

## ***MÁQUINAS ASSÍNCRONAS OU DE INDUÇÃO***

*MÁQUINA ASSÍNCRONA OU DE INDUÇÃO → MODO MAIS COMUM DE UTILIZAÇÃO: MOTOR*

*PEQUENA PENETRAÇÃO DESSE TIPO DE MÁQUINA EM GERAÇÃO ( ESPECIALMENTE EÓLICA E HIDRÁULICA DE PEQUENA POTÊNCIA ) → AINDA INCIPIENTE COMPARADA ÀS MÁQUINAS SÍNCRONAS*

*MOTORES DE INDUÇÃO:*

*MÁQUINA MAIS INTENSIVAMENTE APLICADA NOS ACIONAMENTOS INDUSTRIAIS*

*MAIS DE 95 % DOS MOTORES PRODUZIDOS E APLICADOS NO MUNDO SÃO DE INDUÇÃO*

*RAZÕES PARA TANTO:*

*CONSTRUÇÃO SIMPLES ( → NA VERSÃO COM ROTOR DE GAIOLA )*

*MÁQUINA ROBUSTA E CONFIÁVEL ( COMPARADA ÀS DEMAIS )*

*PEQUENA INCIDÊNCIA DE MANUTENÇÕES – BAIXO CUSTO OPERACIONAL*

*MÁQUINA PRODUZIDA EM LARGA ESCALA EM FABRICAÇÃO SERIADA ( “COMMODITY” INDUSTRIAL )*

*BAIXO CUSTO DE AQUISIÇÃO E PRONTA DISPONIBILIDADE*

**“DESVANTAGENS” DO MOTOR DE INDUÇÃO:**

**1) MÁQUINA DE ROTAÇÃO ESSENCIALMENTE CONSTANTE QUANDO CONECTADA À REDE**

→ **NO ENTANTO, GRANDE PARTE DAS CARGAS MECÂNICAS, COMO BOMBAS, VENTILADORES, COMPRESSORES, OPERAM TAMBÉM EM ROTAÇÃO CONSTANTE**

→ **A ASSOCIAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO COM INVERSORES ESTÁTICOS DE FREQUÊNCIA TORNA O CONJUNTO UM ACIONAMENTO DE ROTAÇÃO VARIÁVEL**

**2) DIFICULDADES INERENTES DE PARTIDA QUANDO CONECTADAS DIRETAMENTE À REDE**

→ **BAIXO TORQUE DE PARTIDA E ACELERAÇÃO**

→ **ELEVADA CORRENTE NO ARRANQUE, COM FORTE IMPACTO NA REDE DE ALIMENTAÇÃO**

→ **NO ENTANTO, GRANDE PARTE DAS CARGAS CITADAS OPERA POR PERÍODOS PROLONGADOS DE TEMPO, DE MODO QUE A INCIDÊNCIA DE PARTIDAS É PEQUENA COM IMPACTO ESPORÁDICO NA REDE DE ALIMENTAÇÃO**

→ **A ASSOCIAÇÃO COM INVERSORES DE FREQUÊNCIA ELIMINA O PROBLEMA DA DIFICULDADE DE PARTIDA E DO IMPACTO NA REDE DE ALIMENTAÇÃO**

**VARIANTES CONSTRUTIVAS NO TOCANTE AO ROTOR DA MÁQUINA ASSÍNCRONA:****1) MÁQUINA ASSÍNCRONA COM ROTOR BOBINADO ( OU ROTOR DE ANÉIS )**

→ **PERMITE ACESSO AO ROTOR**

→ **POSSIBILITA ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS ( ESPECIALMENTE A RESISTÊNCIA ROTÓRICA )**

→ **CARACTERÍSTICAS EXTERNAS SE TORNAM AJUSTÁVEIS -  $C \times \omega$  ;  $I \times \omega$**

→ **MOTOR MAIS VERSÁTIL – ADAPTAÇÃO MAIS FÁCIL ÀS CARGAS MECÂNICAS**

**2) MÁQUINA ASSÍNCRONA COM ROTOR EM CURTO CIRCUITO ( OU ROTOR EM GAIOLA )**

→ **ROTOR INACESSÍVEL POR CONSTRUÇÃO**

→ **PARÂMETROS FIXOS, DEFINIDOS NO PROJETO**

→ **CARACTERÍSTICAS FIXAS**

→ **MOTOR MENOS VERSÁTIL QUANDO LIGADO DIRETAMENTE À REDE DE ALIMENTAÇÃO**

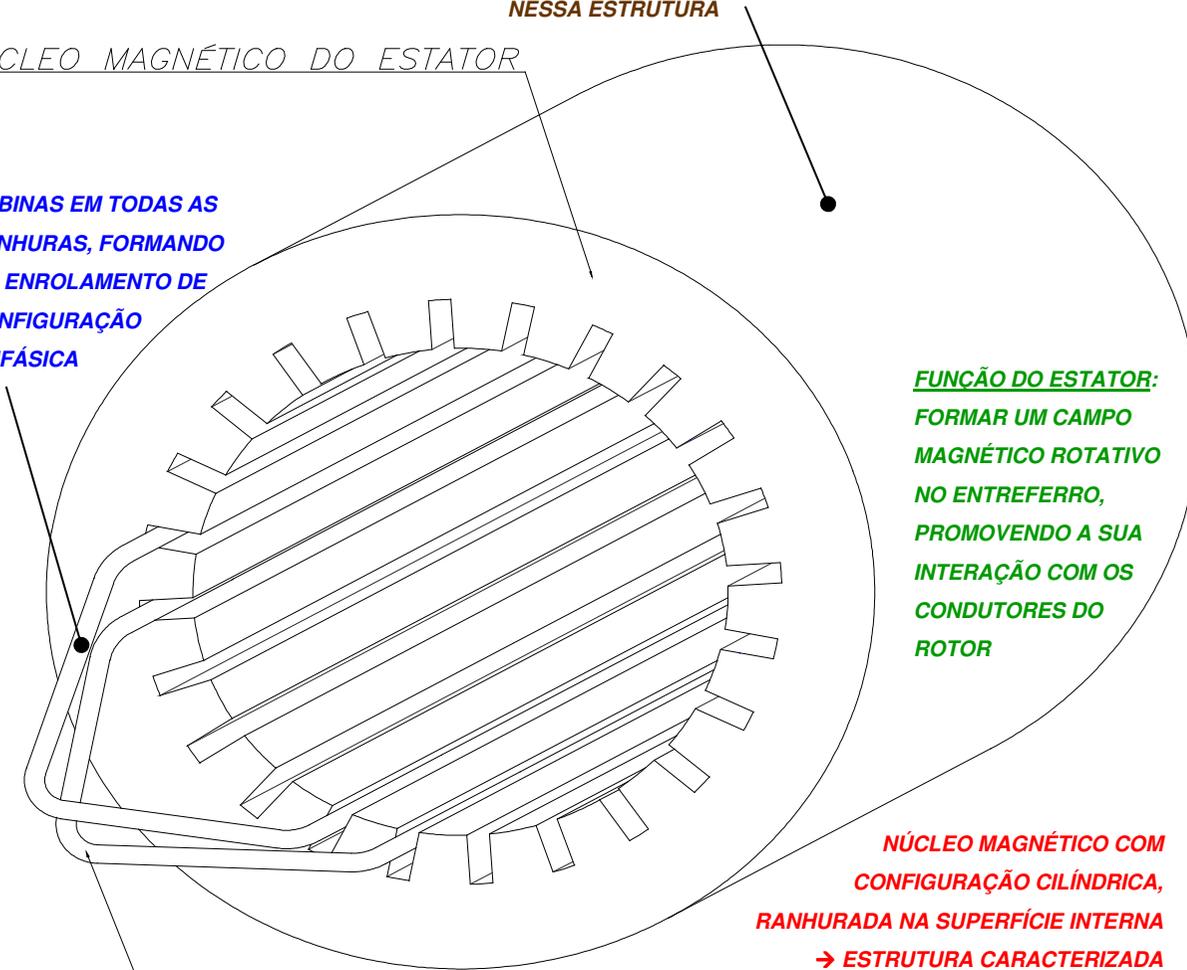
**MÁQUINAS ASSÍNCRONAS: CONSTRUÇÃO**

**ESTATOR**

**NÚCLEO MAGNÉTICO CONSTITUÍDO DE LÂMINAS DE PEQUENA ESPESSURA ( 0,5 mm ) DE AÇO SILICIOSO**  
**→ LIMITA AS PERDAS NO FERRO DEVIDO À EXISTÊNCIA DE CAMPO MAGNÉTICO VARIÁVEL NO TEMPO ESTABELECIDO NESTA ESTRUTURA**

NÚCLEO MAGNÉTICO DO ESTATOR

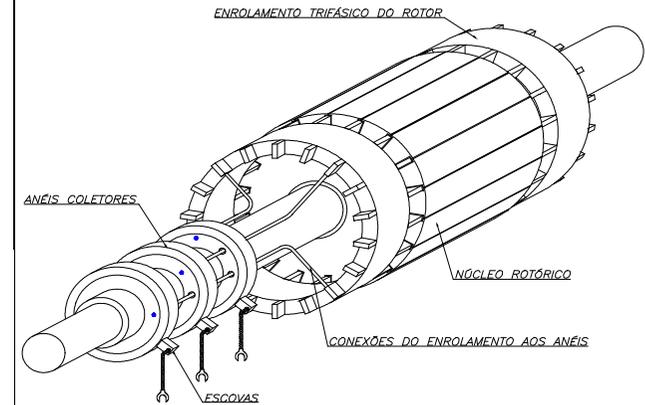
**BOBINAS EM TODAS AS RANHURAS, FORMANDO UM ENROLAMENTO DE CONFIGURAÇÃO TRIFÁSICA**



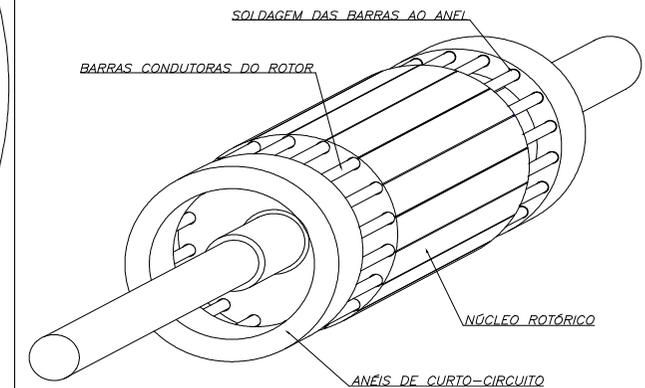
BOBINAS DO ENROLAMENTO ESTATORÍCO

**FUNÇÃO DO ESTATOR:**  
**FORMAR UM CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO NO ENTREFERRO, PROMOVENDO A SUA INTERAÇÃO COM OS CONDUTORES DO ROTOR**

**NÚCLEO MAGNÉTICO COM CONFIGURAÇÃO CILÍNDRICA, RANHURADA NA SUPERFÍCIE INTERNA**  
**→ ESTRUTURA CARACTERIZADA COMO DE "POLOS LISOS"**



**ROTOR BOBINADO ( OU DE ANÉIS )**



**ROTOR EM CURTO (OU DE GAIOLA)**

**VARIANTES CONSTRUTIVAS DO ROTOR DA MÁQUINA ASSÍNCRONA**  
**( → DETALHADAS À FRENTE )**

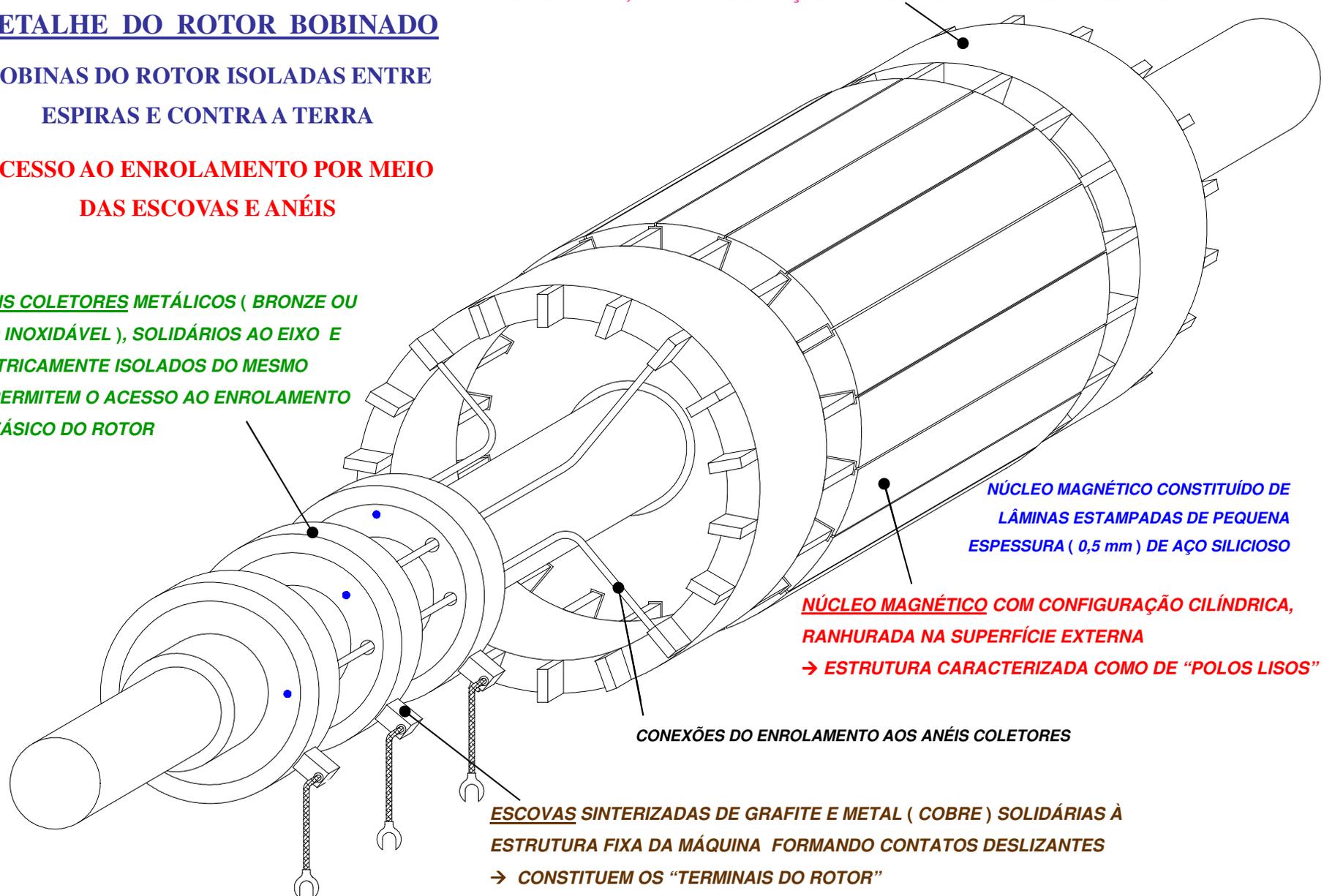
**MOTOR ASSÍNCRONO OU DE INDUÇÃO:  
DETALHE DO ROTOR BOBINADO**

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

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

**ANÉIS COLETORES METÁLICOS ( BRONZE OU  
AÇO INOXIDÁVEL ), SOLIDÁRIOS AO EIXO E  
ELETRICAMENTE ISOLADOS DO MESMO  
→ PERMITEM O ACESSO AO ENROLAMENTO  
TRIFÁSICO DO ROTOR**

**ENROLAMENTO TRIFÁSICO CONVENCIONAL DO ROTOR, SIMILAR AO ENROLAMENTO  
DO ESTATOR, COM AS TERMINAÇÕES CONECTADAS AOS ANÉIS COLETORES**



**NÚCLEO MAGNÉTICO CONSTITUÍDO DE  
LÂMINAS ESTAMPADAS DE PEQUENA  
ESPESSURA ( 0,5 mm ) DE AÇO SILICIOSO**

**NÚCLEO MAGNÉTICO COM CONFIGURAÇÃO CILÍNDRICA,  
RANHURADA NA SUPERFÍCIE EXTERNA  
→ ESTRUTURA CARACTERIZADA COMO DE “POLOS LISOS”**

**CONEXÕES DO ENROLAMENTO AOS ANÉIS COLETORES**

**ESCOVAS SINTERIZADAS DE GRAFITE E METAL ( COBRE ) SOLIDÁRIAS À  
ESTRUTURA FIXA DA MÁQUINA FORMANDO CONTATOS DESLIZANTES  
→ CONSTITUEM OS “TERMINAIS DO ROTOR”**

**MOTOR ASSÍNCRONO OU DE INDUÇÃO:****DETALHE DO ROTOR DE GAIOLA****BARRAS ALOJADAS NAS RANHURA SEM  
ISOLAMENTO**

BARRAS CONDUTORAS DO ROTOR ( LIGAS DE COBRE OU ALUMÍNIO )

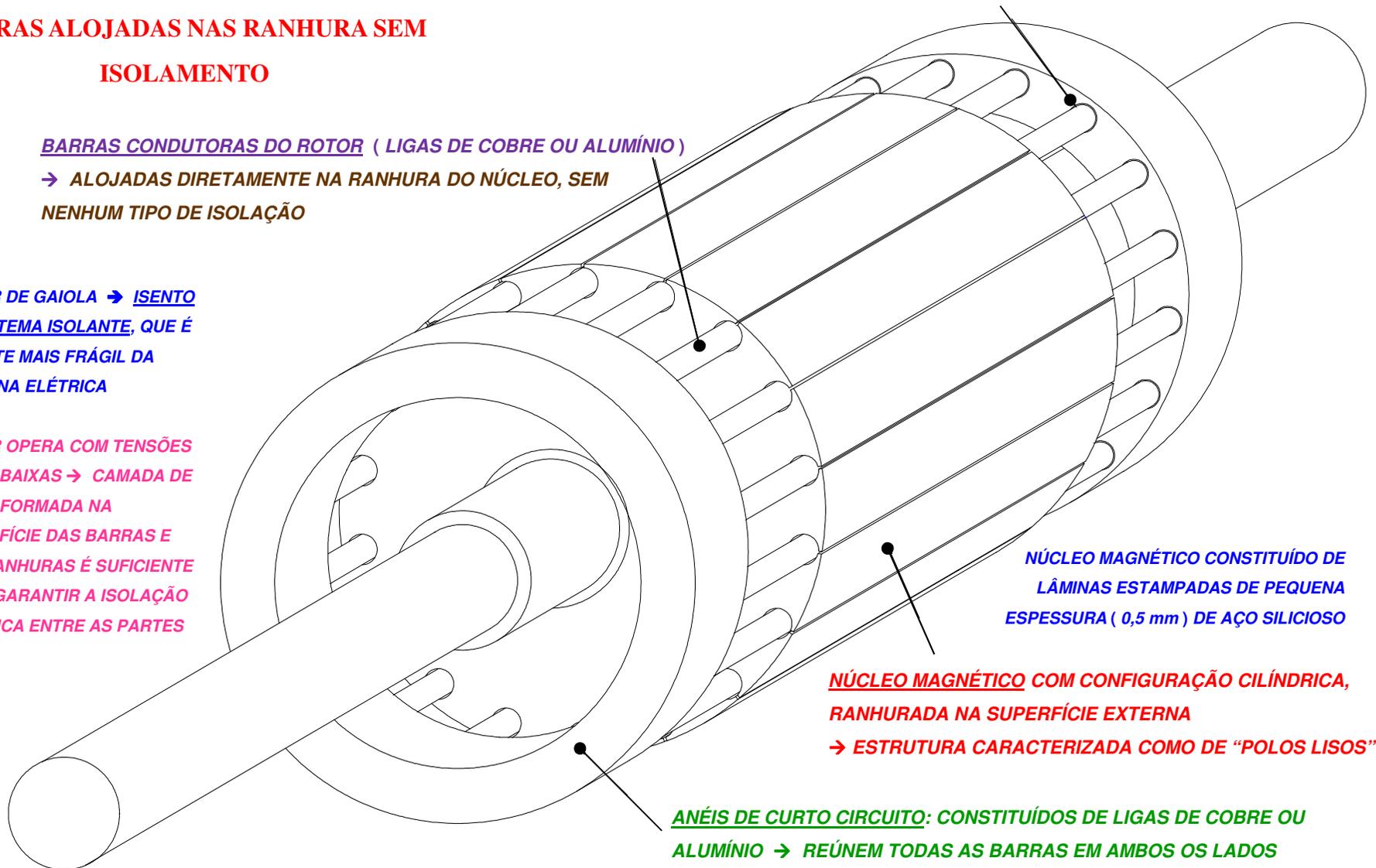
→ ALOJADAS DIRETAMENTE NA RANHURA DO NÚCLEO, SEM  
NENHUM TIPO DE ISOLAÇÃO

ROTOR DE GAIOLA → ISENTO  
DE SISTEMA ISOLANTE, QUE É  
A PARTE MAIS FRÁGIL DA  
MÁQUINA ELÉTRICA

ROTOR OPERA COM TENSÕES  
MUITO BAIXAS → CAMADA DE  
ÓXIDO FORMADA NA  
SUPERFÍCIE DAS BARRAS E  
DAS RANHURAS É SUFICIENTE  
PARA GARANTIR A ISOLAÇÃO  
ELÉTRICA ENTRE AS PARTES

LIGAÇÃO METALÚRGICA ENTRE BARRAS E ANÉIS DE CURTO ( BRAZAGEM OU FUSÃO )

→ CONSOLIDAM ELÉTRICA E MECANICAMENTE AS BARRAS AOS ANÉIS

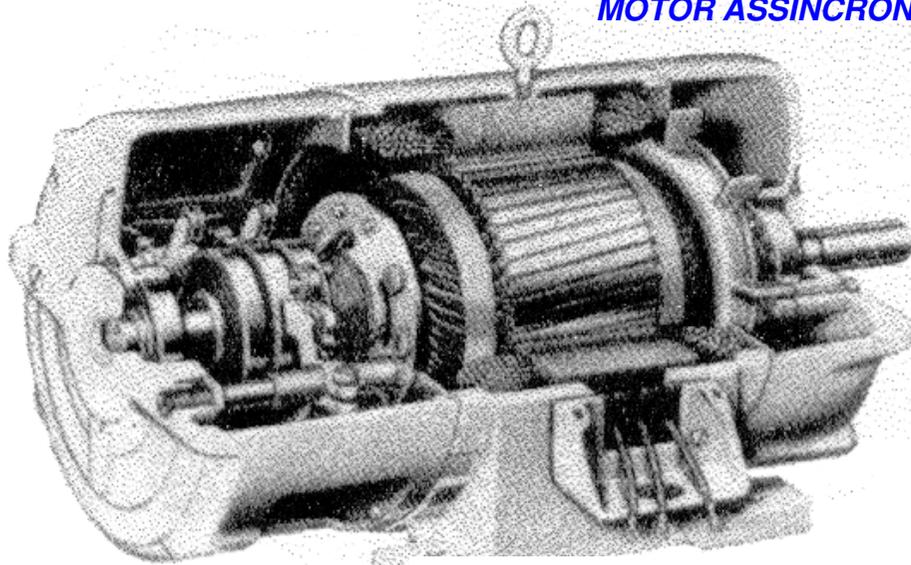


NÚCLEO MAGNÉTICO CONSTITUÍDO DE  
LÂMINAS ESTAMPADAS DE PEQUENA  
ESPESSURA ( 0,5 mm ) DE AÇO SILICIOSO

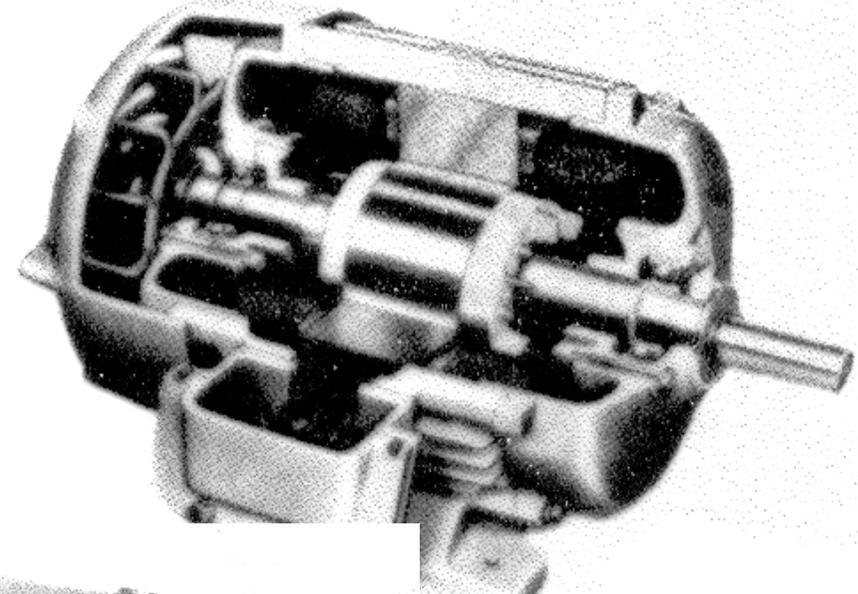
NÚCLEO MAGNÉTICO COM CONFIGURAÇÃO CILÍNDRICA,  
RANHURADA NA SUPERFÍCIE EXTERNA  
→ ESTRUTURA CARACTERIZADA COMO DE “POLOS LISOS”

ANÉIS DE CURTO CIRCUITO: CONSTITUÍDOS DE LIGAS DE COBRE OU  
ALUMÍNIO → REÚNEM TODAS AS BARRAS EM AMBOS OS LADOS  
DO ROTOR, FORMANDO UM CONJUNTO ÚNICO

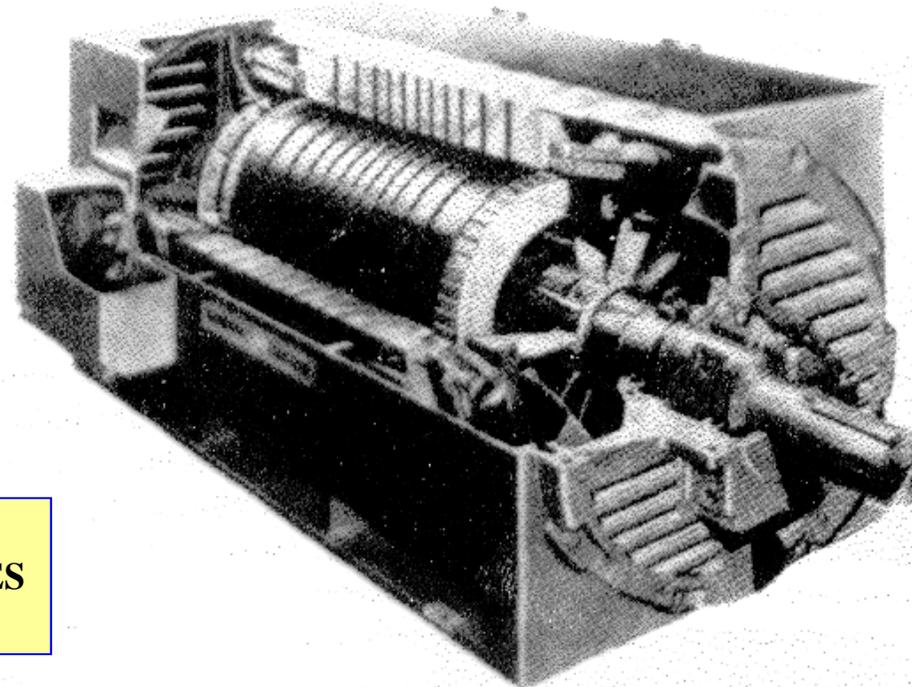
**MOTOR ASSÍNCRONO OU DE INDUÇÃO:**



**MOTOR DE ANÉIS DE  
MÉDIO PORTE**  
CONSTRUÇÃO ABERTA



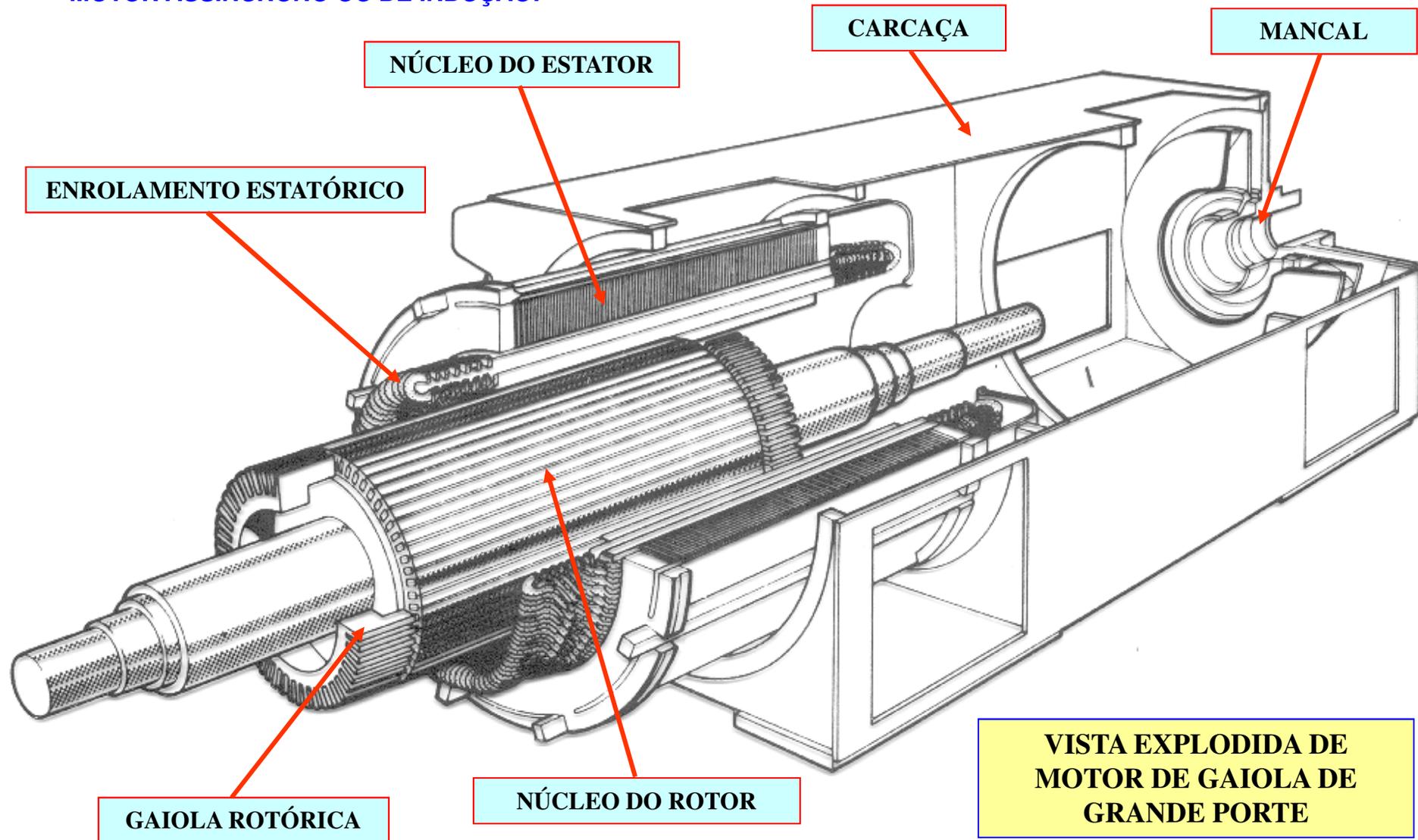
**MOTOR DE GAIOLA  
DE PEQUENO PORTE**  
GAIOLA INJETADA OU  
FUNDIDA EM ALUMÍNIO  
CONSTRUÇÃO FECHADA



**MOTOR DE GAIOLA DE  
MÉDIO PORTE**  
GAIOLA COM BARRAS  
INSERIDAS NAS RANHURAS E  
SOLDADAS AOS ANÉIS DE CURTO  
CONSTRUÇÃO ABERTA

**CONSTRUÇÕES  
TÍPICAS DE MOTORES  
ASSÍNCRONOS**

**MOTOR ASSÍNCRONO OU DE INDUÇÃO:**



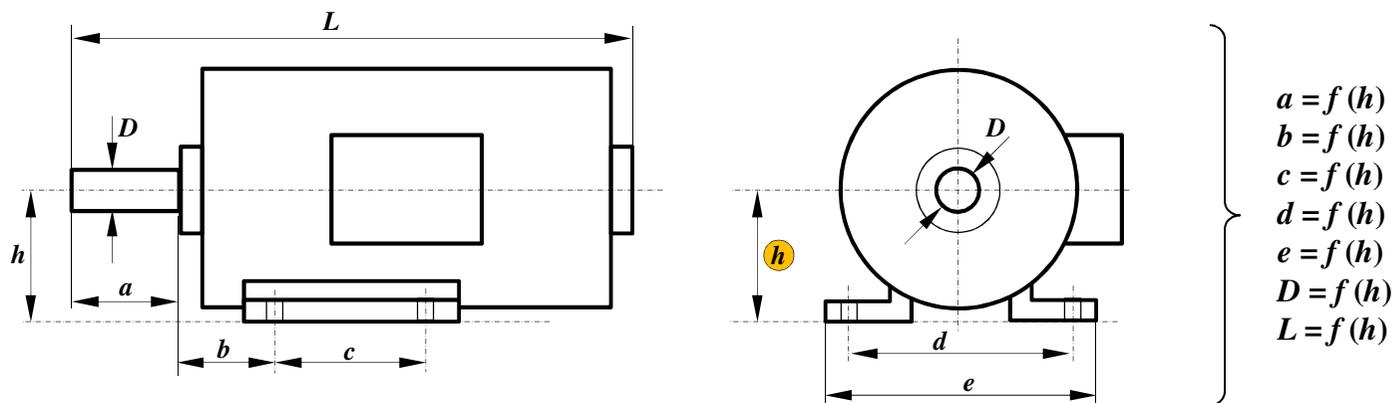
### MOTORES ELÉTRICOS: CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CARÇAÇA

AS MÁQUINAS ELÉTRICAS, NOTADAMENTE AS DE INDUÇÃO, SÃO CLASSIFICADAS E NORMALIZADAS PELO TAMANHO DA CARÇAÇA

TODAS AS DIMENSÕES DE MONTAGEM, COMO COMPRIMENTO E DIÂMETRO DA PONTA DE EIXO, FURAÇÃO DA BASE PARA FIXAÇÃO, COMPRIMENTO TOTAL, ESTÃO ASSOCIADOS AO TAMANHO DA CARÇAÇA → POTÊNCIA DO MOTOR NÃO ENTRA NESSA CARACTERIZAÇÃO

→ TAMANHO DA CARÇAÇA É CARACTERIZADO PELA DIMENSÃO DA ALTURA DO CENTRO DA PONTA DE EIXO ATÉ A BASE DE FIXAÇÃO

DEFINIDA A ALTURA DA CARÇAÇA, QUALQUER MOTOR DE QUALQUER FABRICANTE SE TORNA INTERCAMBIÁVEL COM OUTROS DE MESMA ALTURA → BENEFÍCIO PARA FACILITAR A DISPONIBILIDADE DE REPOSIÇÃO, NOS MOTORES DE PRODUÇÃO SERIADA



CARACTERIZAÇÃO DO TAMANHO DA CARÇAÇA É DADA PELA DIMENSÃO “ $h$ ” EXPRESSA EM MILÍMETROS

POR EXEMPLO:  $h = 225 \text{ mm}$  → MOTOR DE CARÇAÇA PADRÃO: 225 ABNT

TAMANHOS PADRONIZADOS PELAS NORMAS ABNT e IEC:

$h$  : 56 ; 63 ; 71 ; 80 ; 90 ; 100 ; 112 ; 132 ; 160 ; 180 ; 200 ; 225 ; 250 ; 280 ; 315 ; 355 ; 400 ; 450 ; 500 ; 560 ; 630 ; 710 ; 800 ; 900 ; 1000

TAMANHOS USUALMENTE PRODUZIDOS EM FABRICAÇÃO SERIADA

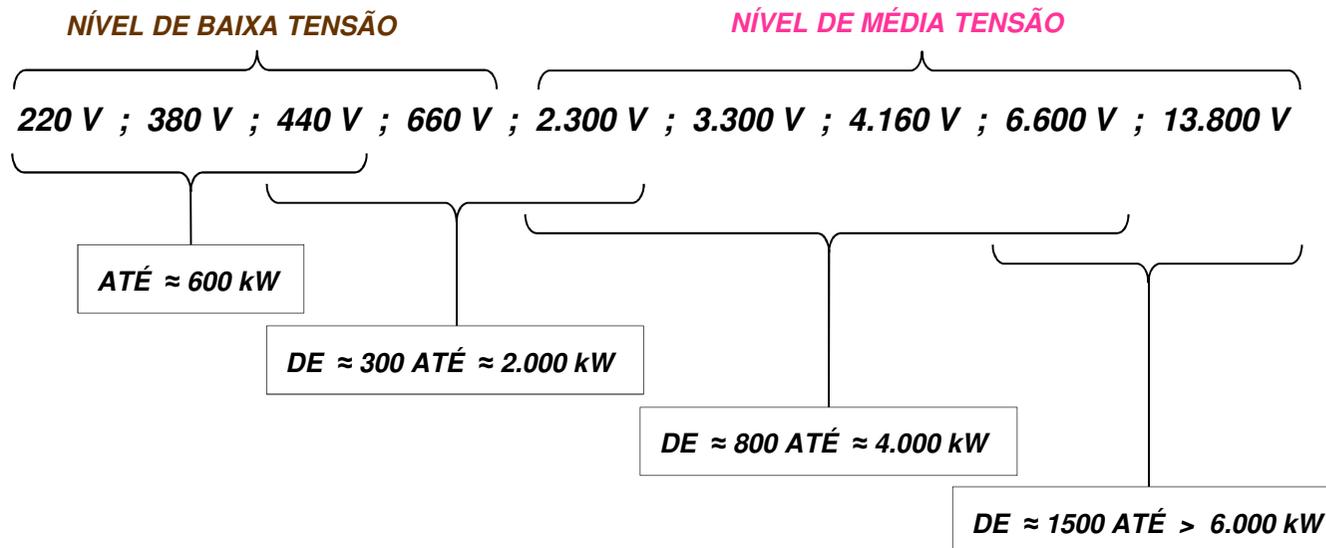
### MOTORES ASSÍNCRONOS OU DE INDUÇÃO: TENSÕES NOMINAIS USUAIS

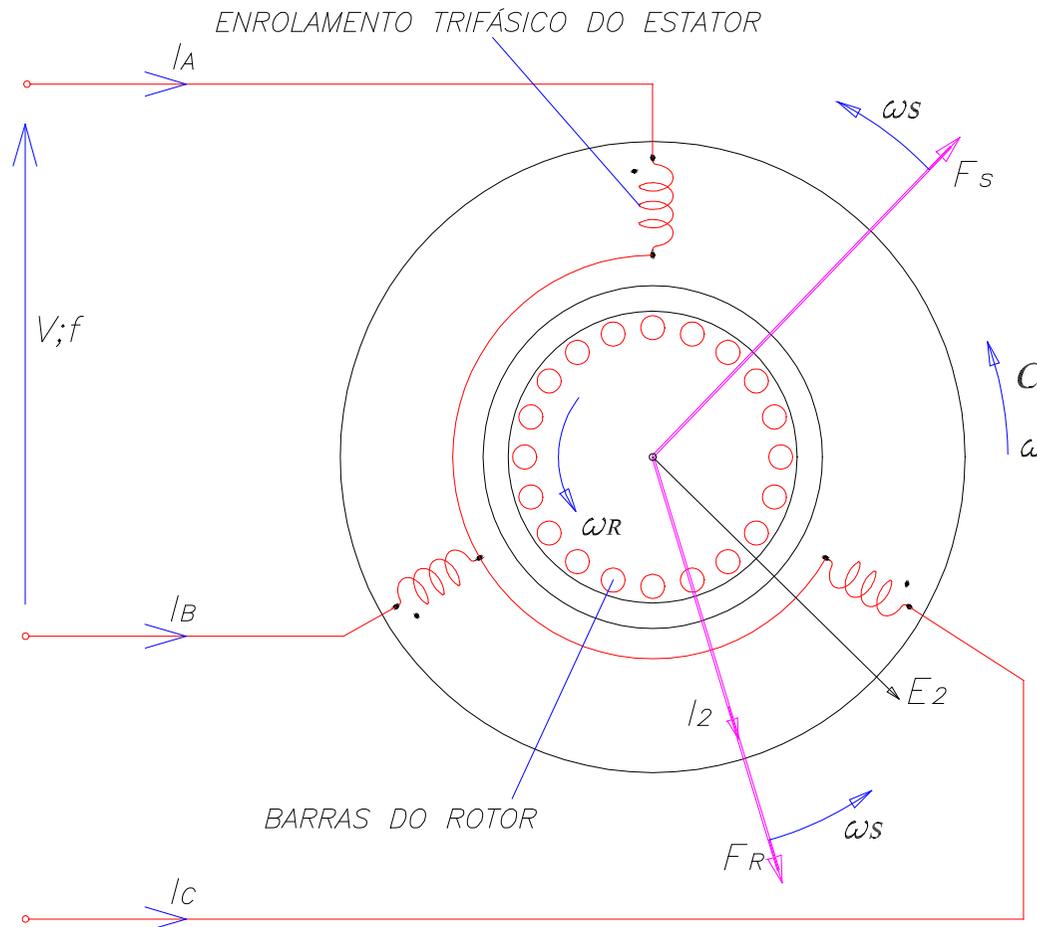
**MOTORES ASSÍNCRONOS SÃO CONSTRUÍDOS EM BAIXA E MÉDIA TENSÃO**

**A TENSÃO DEPENDE DA POTÊNCIA NOMINAL DO MOTOR, E DEVE SER ESPECIFICADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO, E DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DISPONÍVEL NO LOCAL ONDE SERÁ INSTALADO**

**A ESCOLHA DA TENSÃO NOMINAL IMPACTA NO DIMENSIONAMENTO E CUSTO DOS CABOS DE ALIMENTAÇÃO, DOS DISPOSITIVOS DE CHAVEAMENTO E PROTEÇÃO COMO CONTACTORES, DISJUNTORES, RELÉS TÉRMICOS, ETC.**

**TENSÕES NOMINAIS USUAIS PARA MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS:**



**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**

**→  $2\phi$  ( CONFIGURAÇÃO MÍNIMA ) ;  $3\phi$  ( MAIS COMUM ) ;  $5\phi$  ;  $7\phi$  ..... ( 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  $2\phi$  → BOBINAS ESPAÇADAS DE  $90^\circ$  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  $2\phi$  → CORRENTES DEFASADAS DE  $90^\circ$  el.**

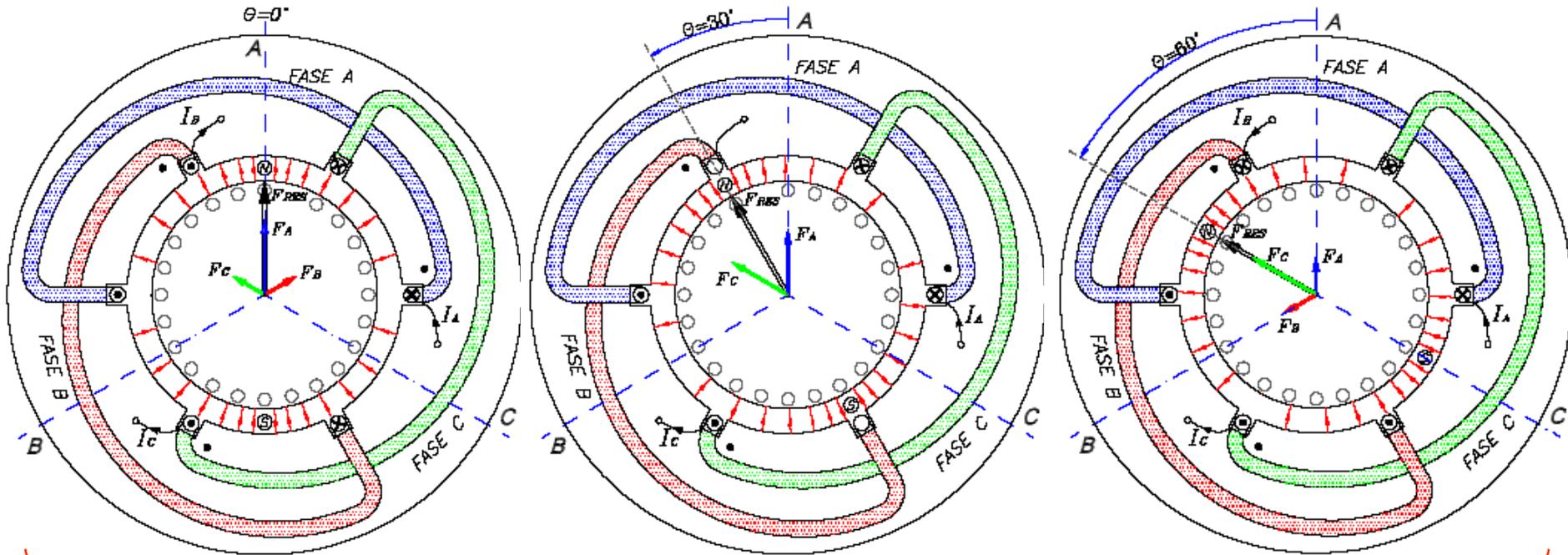
**NO CASO TRIFÁSICO: 3 CONJUNTOS DE BOBINAS EQUIDISTANTES NO ESTATOR – DESLOCADAS ESPACIALMENTE DE  $120^\circ$  - PERCORRIDAS POR CORRENTES ALTERNADAS - DEFASADAS ENTRE SI DE  $120^\circ$**



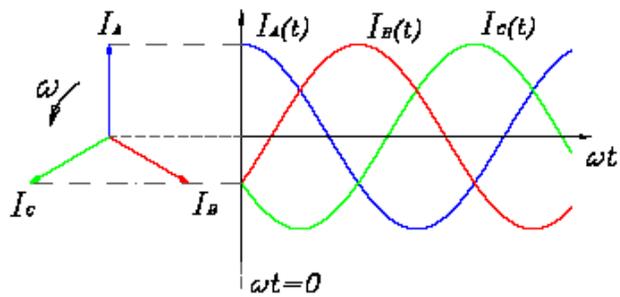
**“SISTEMA TRIFÁSICO DE CORRENTES” APLICADO A UM “ENROLAMENTO TRIFÁSICO”**

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

FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO - ENROLAMENTO TRIFÁSICO

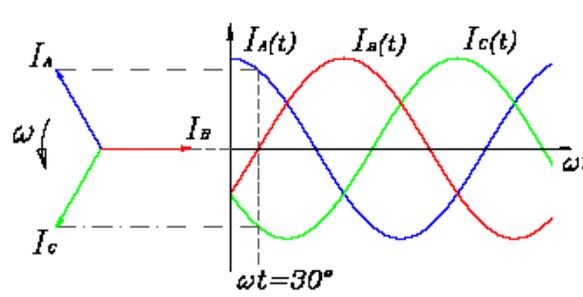


EVOLUÇÃO NO TEMPO E NO ESPAÇO DO CAMPO RESULTANTE,  $F_{RES} \rightarrow$  (AÇÃO CONJUNTA DAS 3 FASES)



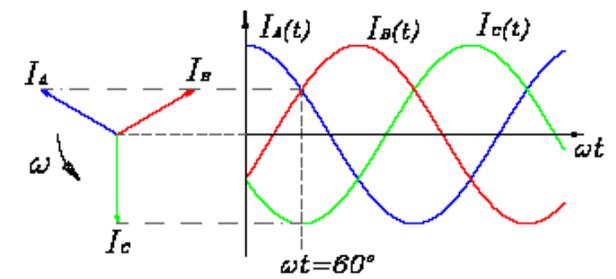
$\omega t = 0^\circ \rightarrow t = 0 \text{ s}$

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



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

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



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

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

DIAGRAMAS FASORIAIS DAS CORRENTES

**PROPRIEDADES DO CAMPO MAGNÉTICO FORMADO NO ENTREFERRO:**

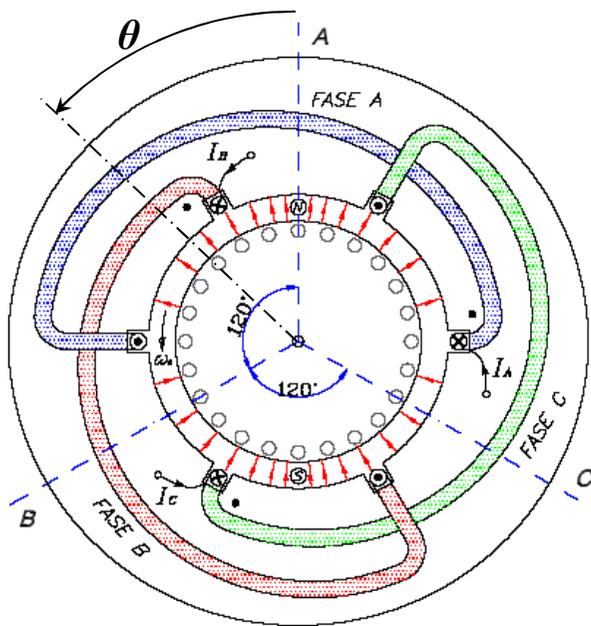
→ CAMPO RESULTANTE COM DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL CO-SENOIDAL (CASO IDEAL), DE AMPLITUDE CONSTANTE

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



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

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

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

COMPONENTES  
DE CAMPO  
INDIVIDUAIS DE  
CADA FASE

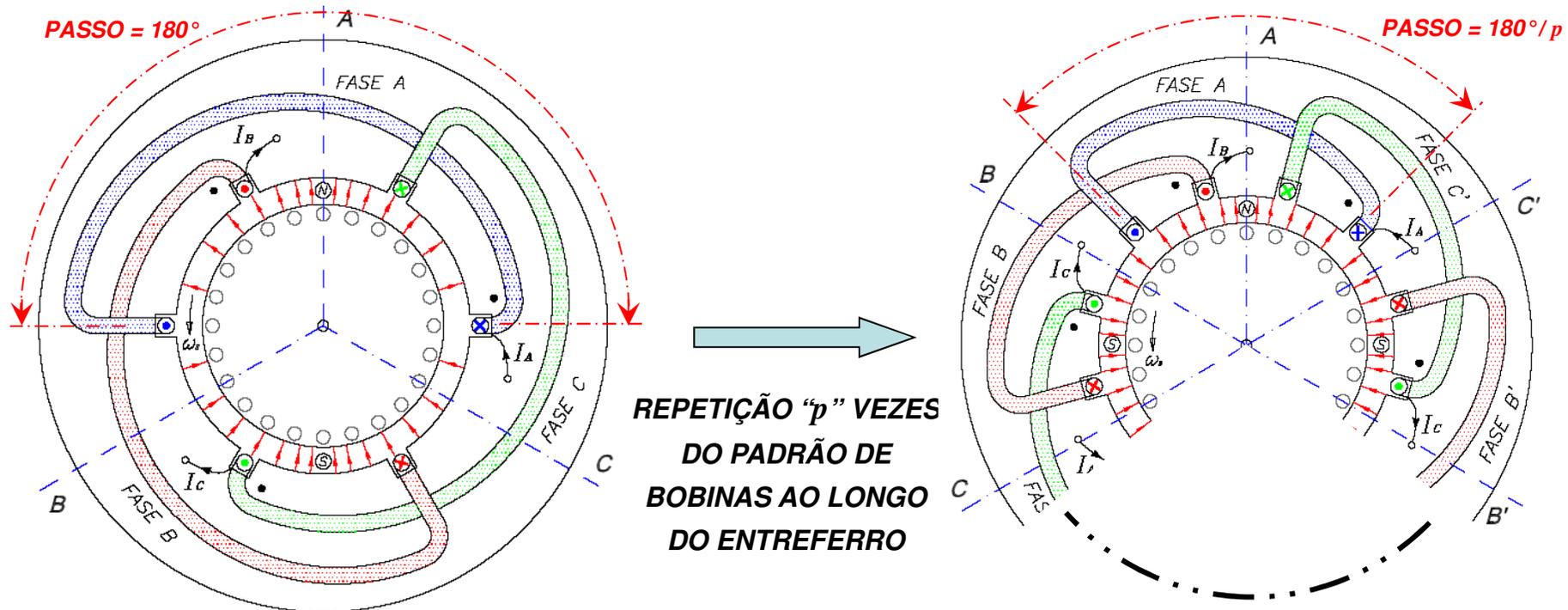
$$\vec{F}_{RES} = \vec{F}_A + \vec{F}_B + \vec{F}_C$$

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

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**



**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.**

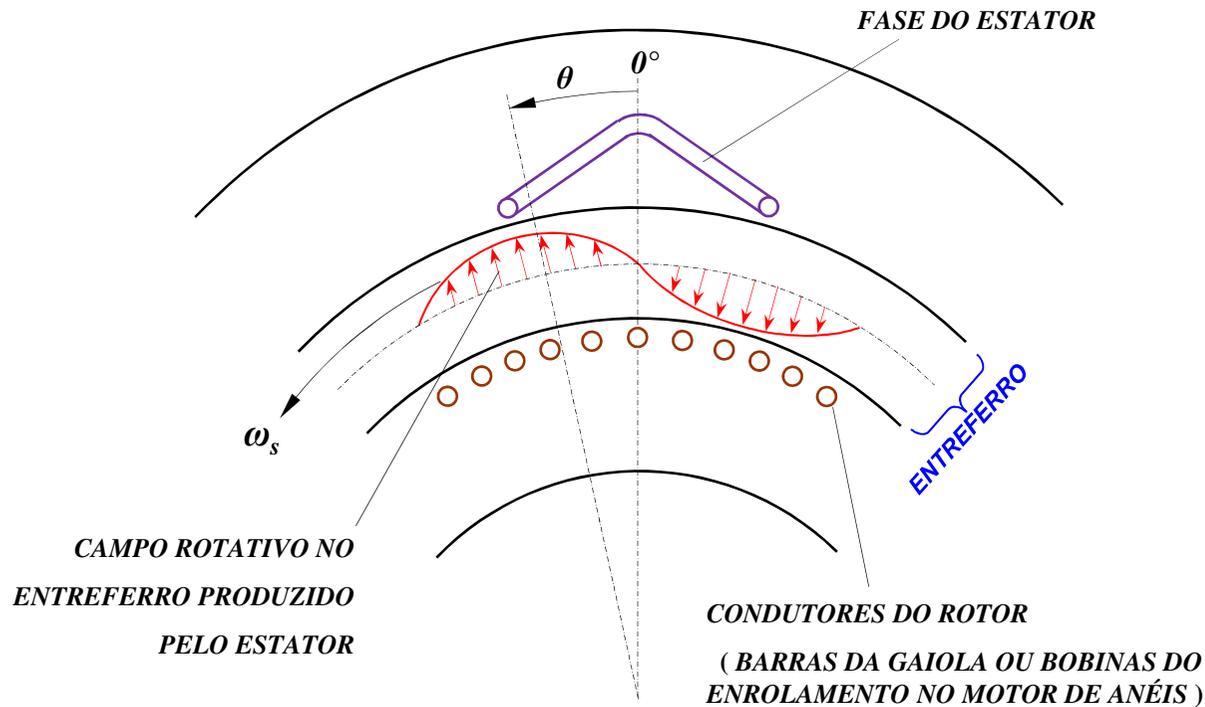
**VELOCIDADE SÍNCRONA:  $1/p$  ROTAÇÃO DO CAMPO A CADA CICLO DA CORRENTE OU 1 ROTAÇÃO A CADA  $p$  CICLOS DA CORRENTE →  $\omega_s = \omega / p = 2.\pi.f / p$**

**$f = 60$  Hz →  $n_s = f/p$  rps =  $60 . f/p$  RPM**



- 2 PÓLOS →  $p = 1$  →  $n_s = 3600$  RPM**
- 4 PÓLOS →  $p = 2$  →  $n_s = 1800$  RPM**
- 6 PÓLOS →  $p = 3$  →  $n_s = 1200$  RPM**
- 8 PÓLOS →  $p = 4$  →  $n_s = 900$  RPM**

## FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO NO ENTREFERRO



$\omega_s$  : ROTAÇÃO SÍNCRONA DO CAMPO GIRANTE NO ENTREFERRO

→ DEPENDE DO NÚMERO DE POLOS MAGNÉTICOS FORMADO PELO ENROLAMENTO

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

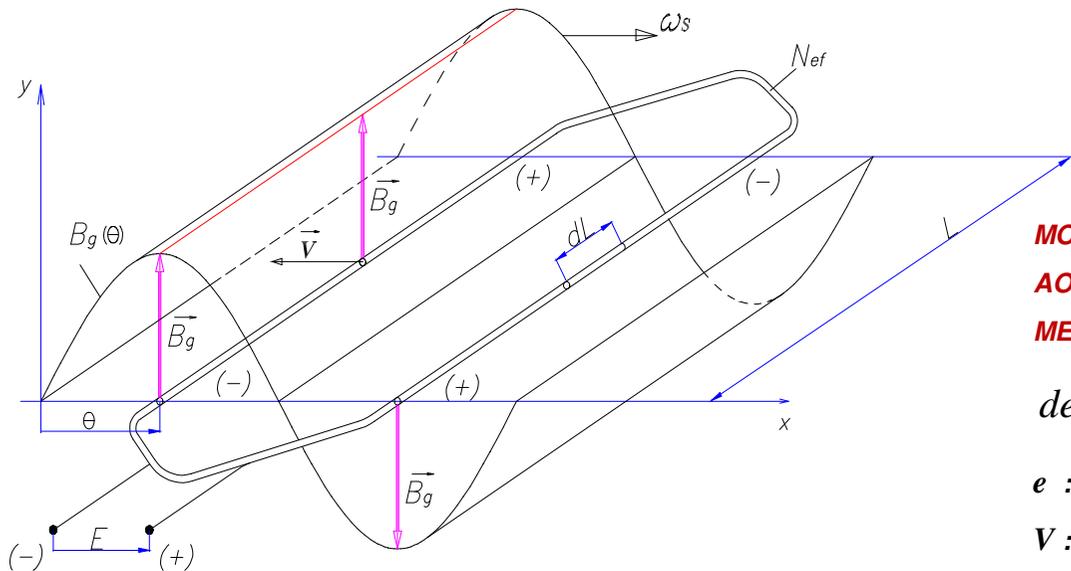
→  $f$  : FREQUÊNCIA DAS CORRENTES NO ENROLAMENTO

→  $p$  : 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  $(m/2).F_M$  E QUE TRASLADA COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO  $\omega_s$  AO LONGO DA CIRCUNFERÊNCIA DO ENTREFERRO

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

## FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA NOS ENROLAMENTOS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA



**CAMPO ROTATIVO EM DESLOCAMENTO CONCATENA COM QUAISQUER ENROLAMENTOS ALOJADOS NAS ADJACÊNCIAS DO ENTREFERRO, TANTO NO ESTATOR QUANTO NO ROTOR.**

**MOVIMENTO RELATIVO DO CAMPO GIRANTE EM RELAÇÃO AOS CONDUTORES DESSES ENROLAMENTOS INDUZ NOS MESMOS TENSÕES POR EFEITO MOCIONAL:**

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

$e$  : TENSÃO INSTANTÂNEA INDUZIDA EM UM CODUTOR

$V$  : VELOCIDADE RELATIVA DO CONDUTOR EM RELAÇÃO AO CAMPO

$L$  : COMPRIMENTO ATIVO DO CONDUTOR IMERSO NO CAMPO

**TENSÃO INDUZIDA DEPENDE DA MAGNITUDE DO CAMPO QUE ATUA SOBRE O CONDUTOR:**

→ DEPENDE, PORTANTO, DA POSIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO EM RELAÇÃO AO CONDUTOR →  $e = e(\theta) = B_g(\theta) \cdot L \cdot V$

**TENSÃO INDUZIDA NA BOBINA DE NÚMERO DE ESPIRAS EFETIVAS :  $N_{ef} = N_b \cdot K_e$  →  $E(\theta) = 2 \cdot N_{ef} \cdot B_M \cdot \text{sen}\theta \cdot L \cdot V$**

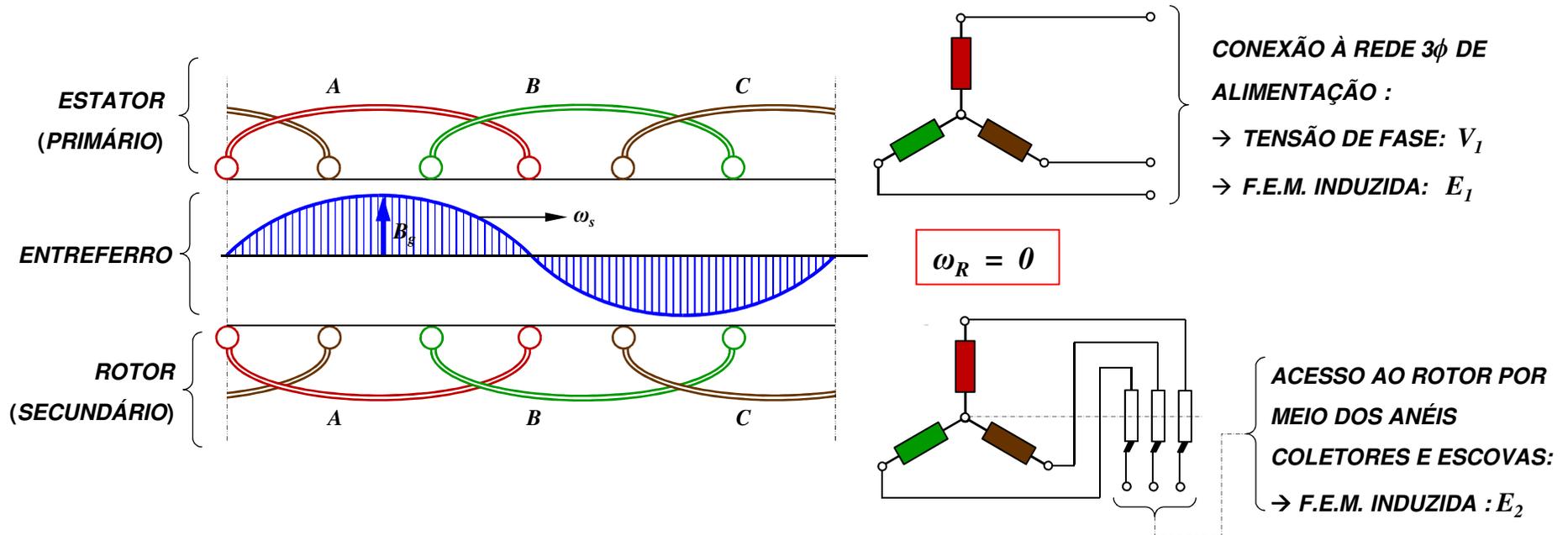
**VELOCIDADE RELATIVA DO CONDUTOR É A VELOCIDADE TANGENCIAL DO CAMPO NA LINHA DO ENTREFERRO:  $V = \pi \cdot D \cdot n_s = \pi \cdot D \cdot f / p$**

$$E(\theta) = 2 \cdot N_{ef} \cdot \frac{\pi \cdot D}{p} \cdot L \cdot f \cdot B_M \cdot \text{sen}\theta = 2 \cdot N_{ef} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot D}{2 \cdot p} \cdot L \cdot f \cdot B_M \cdot \text{sen}\theta \rightarrow E(\theta) = 4 \cdot N_{ef} \cdot \tau_p \cdot L \cdot f \cdot B_M \cdot \text{sen}\theta$$

### INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO NO ENTREFERRO COM O ROTOR DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

**INICIALMENTE CONSIDERANDO A MÁQUINA DE ROTOR BOBINADO → ENROLAMENTO 3φ CONVENCIONAL NO ROTOR ACESSÍVEL**

**→ ROTOR EM REPOUSO, COM OS TERMINAIS DAS ESCOVAS EM CIRCUITO ABERTO**



**CAMPO ROTATIVO INDUZ TENSÕES EM TODOS OS ENROLAMENTOS COM ELE CONCATENADO:**

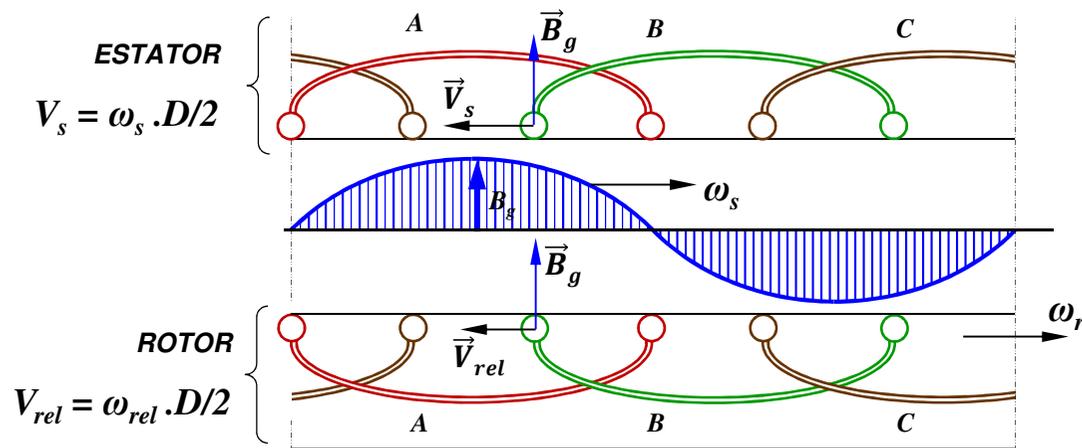
**NO ESTATOR:**  $E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_{f1} \cdot K_{e1} \cdot \phi_p$  → EQUILIBRA A TENSÃO IMPOSTA PELA FONTE ( $E_1 \approx V_1$ ) PERMITINDO A ABSORÇÃO DAS CORRENTES MAGNETIZANTES QUE IRÃO FORMAR O CAMPO ROTATIVO DO ESTATOR

**NO ROTOR:**  $E_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_{f2} \cdot K_{e2} \cdot \phi_p$  → **RELAÇÃO ENTRE TENSÕES DE ESTATOR E ROTOR:**  $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_{f1} \cdot K_{e1}}{N_{f2} \cdot K_{e2}} = a$

**MÁQUINA ASSÍNCRONA DE ANÉIS COM ROTOR ESTACIONÁRIO → COMPORTAMENTO IDÊNTICO AO DO TRANSFORMADOR 3φ**

**INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO COM O ROTOR DA MÁQUINA ASSÍNCRONA – MANIFESTAÇÃO DO CONJUGADO**

**MÁQUINA DE ROTOR BOBINADO → ROTOR EM MOVIMENTO, COM OS TERMINAIS DAS ESCOVAS EM CIRCUITO FECHADO**



**ROTOR EM MOVIMENTO:  $\omega_R \neq 0 \rightarrow 0 < \omega_r < \omega_s$**

**VELOCIDADE RELATIVA ENTRE ROTOR E ESTADOR:**

$$\omega_{rel} = (\omega_s - \omega_r)$$

**VELOCIDADE RELATIVA ENTRE CAMPO ROTATIVO DO ESTADOR E CONDUTORES AO LONGO DO ENTREFERRO:**

→ ESTADOR:  $V_{rel} = V_s \rightarrow$  VELOCIDADE SÍNCRONA

→ ROTOR:  $V_{rel} = [(\omega_s - \omega_r) / \omega_s] \cdot V_s < V_s$

**TENSÃO INDUZIDA PELO CAMPO ROTATIVO SOBRE OS CONDUTORES DAS BOBINAS:  $E = E(\theta) = k \cdot B_g(\theta) \cdot L \cdot V_{rel}$**

**NO ESTADOR:  $E_1 = k_s \cdot B_g(\theta) \cdot L \cdot V_s \rightarrow$  NADA MUDA EM RELAÇÃO À SITUAÇÃO DE ROTOR EM REPOUSO**

**NO ROTOR:  $E_2 = k_r \cdot B_g(\theta) \cdot L \cdot [(\omega_s - \omega_r) / \omega_s] \cdot V_s \rightarrow [(\omega_s - \omega_r) / \omega_s] = s$  : ESCORREGAMENTO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA**

**$E_2 = k_r \cdot B_g(\theta) \cdot L \cdot s \cdot V_s \rightarrow E_2 = s \cdot E_{2o} \rightarrow E_{2o}$  : TENSÃO INDUZIDA NO ROTOR NA SITUAÇÃO DE REPOUSO DO MESMO**

**FREQUÊNCIA DA TENSÃO INDUZIDA PELO CAMPO ROTATIVO NOS ENROLAMENTOS:**

**NO ESTADOR:  $f_1 = (p / 2\pi) \cdot \omega_s$**

**NO ROTOR:  $f_2 = (p / 2\pi) \cdot \omega_{rel} = (f_1 / \omega_s) \cdot \omega_{rel} = (\omega_{rel} / \omega_s) \cdot f_1 = [(\omega_s - \omega_r) / \omega_s] \cdot f_1 = s \cdot f_1$**

**INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO COM O ROTOR DA MÁQUINA ASSÍNCRONA – MANIFESTAÇÃO DO CONJUGADO**

**CAMPO ROTATIVO INDUZ TENSÕES EM TODOS OS ENROLAMENTOS COM ELE CONCATENADO:**

**NO ESTATOR:**  $E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_{f1} \cdot K_{e1} \cdot \phi_p$  ;  $a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_{f1} \cdot K_{e1}}{N_{f2} \cdot K_{e2}}$

**NO ROTOR:**  $E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_{f2} \cdot K_{e2} \cdot \phi_p = 4,44 \cdot s \cdot f_1 \cdot N_{f2} \cdot K_{e2} \cdot \phi_p = s \cdot (4,44 \cdot f_1 \cdot N_{f2} \cdot K_{e2} \cdot \phi_p) = s \cdot (E_1 / a)$

SIMILARIDADE DA MÁQUINA ASSÍNCRONA COM O TRANSFORMADOR PERSISTE → MAS NA MÁQUINA ASSÍNCRONA EXISTE MANIFESTAÇÃO DE CONJUGADO QUANDO CIRCULA CORRENTE PELO SECUNDÁRIO → A RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO DEPENDE DO ESCORREGAMENTO ( MÁQUINA ASSÍNCRONA TRANSFORMA TENSÃO E FREQUÊNCIA ENTRE ESTATOR E ROTOR)

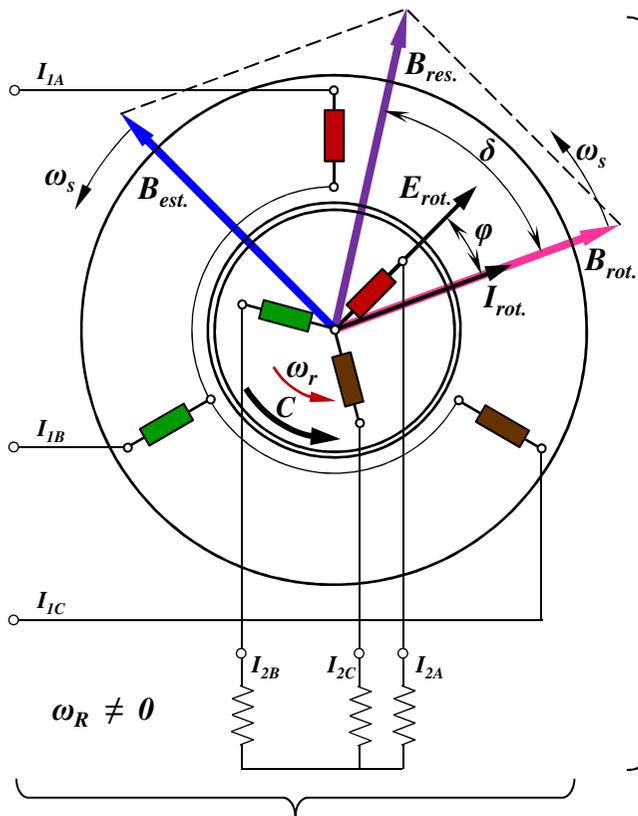


DIAGRAMA VETORIAL VALE PARA QUALQUER s

**CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO DO ESTATOR -  $B_{est.}$  TEM VELOCIDADE SÍNCRONA  $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / p$**

**O ROTOR ESTÁ EM MOVIMENTO, COM VELOCIDADE  $\omega_r$**

**CAMPO ROTATIVO DO ESTATOR INDUZ NO ENROLAMENTO DO ROTOR SISTEMA DE TENSÕES TRIFÁSICAS -  $E_{rot.}$  COM FREQUÊNCIA  $f_2 = s \cdot f_1$**

**CORRENTES TRIFÁSICAS DO ROTOR FORMAM O CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO DO ROTOR -  $B_{rot.}$  COM VELOCIDADE SÍNCRONA  $\omega_{sr} = 2 \cdot \pi \cdot f_2 / p$  OU  $\omega_{sr} = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f_1 / p = s \cdot \omega_s$  EM RELAÇÃO AO ROTOR ( REFERENCIAL MÓVEL COM  $\omega_r$  )**

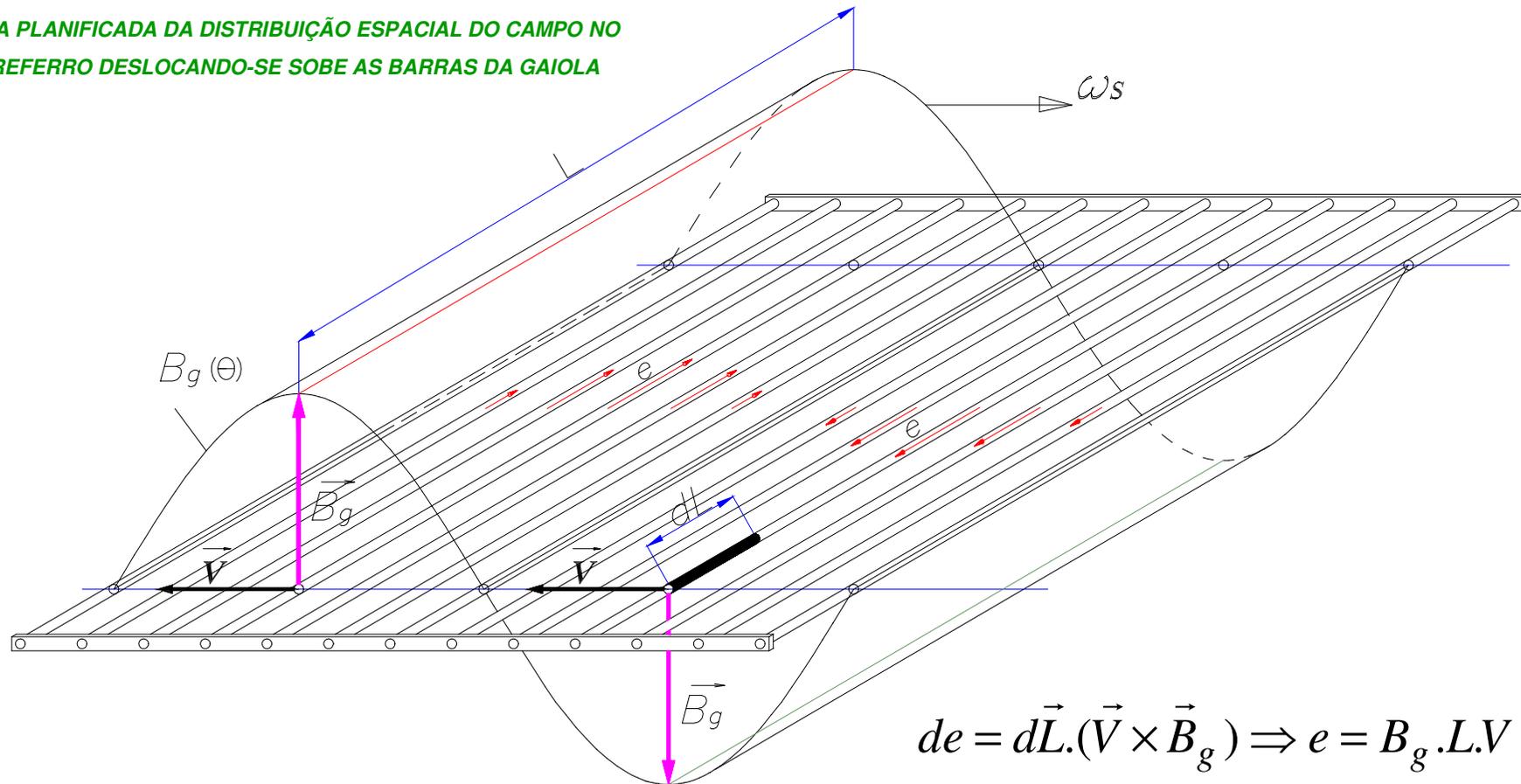
**A VELOCIDADE DO CAMPO DO ROTOR EM RELAÇÃO AO ESTATOR É OBTIDA PELA SUPERPOSIÇÃO DE MOVIMENTOS :  $\omega_{ss} = \omega_{sr} + \omega_r = s \cdot \omega_s + \omega_r = s \cdot \omega_s + (1 - s) \cdot \omega_s = \omega_s$**

**OS CAMPOS  $B_{est.}$  E  $B_{rot.}$  CONTINUAM SÍNCRONOS ENTRE SI, E PRODUZEM UM CAMPO RESULTANTE NO ENTEFERRO  $B_{res.}$  TAMBÉM ROTATIVO COM VELOCIDADE SÍNCRONA  $\omega_s$**

**CONJUGADO DE MÚTUA CONTINUA SE MANIFESTANDO COM O ROTOR EM MOVIMENTO**

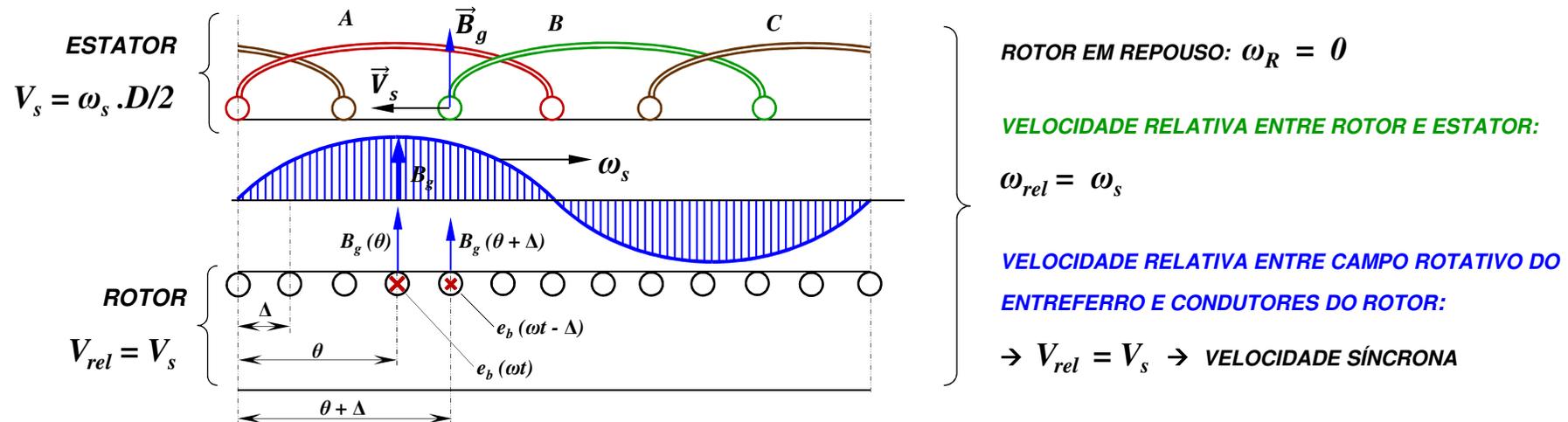
**INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO COM O ROTOR DA MÁQUINA ASSÍNCRONA – ROTOR DE GAIOLA****INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO COM OS ENROLAMENTOS NAS ADJACÊNCIAS DO ENTREFERRO  
TENSÃO MECIONAL INDUZIDA PELO CAMPO ROTATIVO NAS BARRAS DO ROTOR**

VISTA PLANIFICADA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CAMPO NO  
ENTREFERRO DESLOCANDO-SE SOBE AS BARRAS DA GAIOLA



**INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO COM O ROTOR DA MÁQUINA ASSÍNCRONA – ROTOR DE GAIOLA**

**MÁQUINA COM ROTOR DE GAIOLA → ROTOR ESTACIONÁRIO**



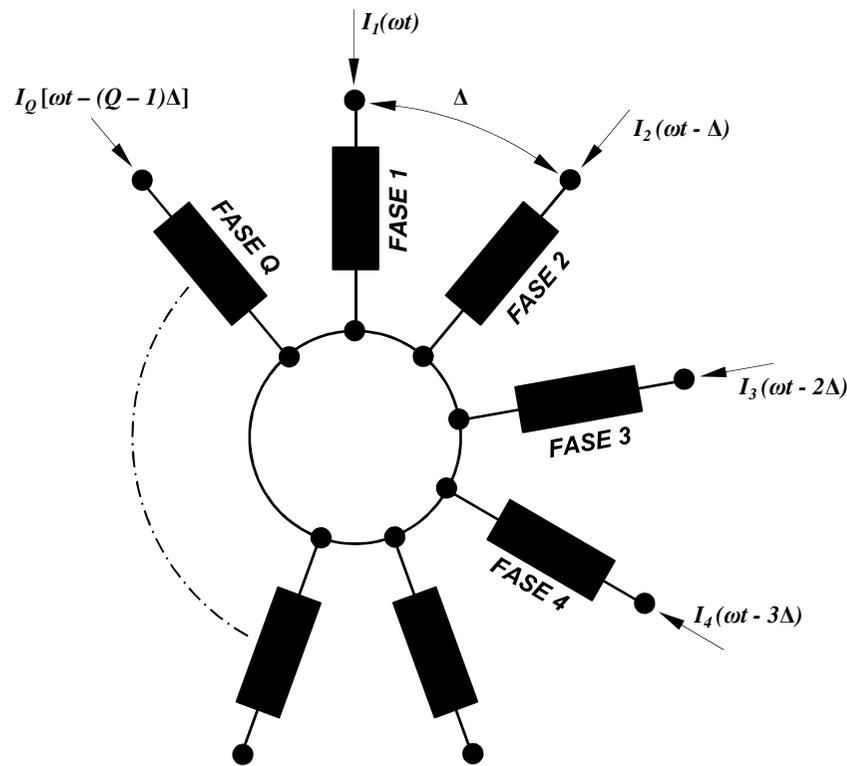
**DISTÂNCIA ANGULAR ENTRE BARRAS DO ROTOR:  $\Delta$  [°el.]**

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE CAMPO NO ENTREFERRO:  $B_g(\theta) = B_M \cdot \text{sen}\theta$**

**TENSÃO INDUZIDA NAS BARRAS:  $e_b(\theta) = B_g(\theta) \cdot L \cdot V_s \rightarrow e_b(\theta) = B_g(\theta + \pi/2) \cdot L \cdot V_s \rightarrow e_b(\omega t) = B_M \cdot L \cdot V_s \cdot \cos \omega t = e_{bM} \cdot \cos \omega t$**

**→ BARRAS AFASTADAS NO ESPAÇO DE  $\Delta$  [°el.] TÊM A TENSÃO INDUZIDA ATRASADA NO TEMPO DE  $\Delta$  [°el.]**

**→ ROTOR DE GAIOLA: SISTEMA COM CONDUTORES DESLOCADOS NO ESPAÇO DE  $\Delta^\circ$  PERCORRIDOS POR CORRENTES DEFASADAS NO TEMPO TAMBÉM DE  $\Delta^\circ \rightarrow$  CONDIÇÕES QUE FORMAM CAMPO ROTATIVO**

**INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO COM O ROTOR DA MÁQUINA ASSÍNCRONA – ROTOR DE GAIOLA****ROTOR DE GAIOLA:**

**COMPORTAMENTO DE ENROLAMENTO POLIFÁSICO  
COM NÚMERO DE FASES “Q” → Q: QUANTIDADE DE  
BARRAS NO ROTOR**

**DESLOCAMENTO ESPACIAL DAS FASES:  $\Delta = 2\pi / Q$**

**DEFASAGEM TEMPORAL DAS CORRENTES:  $\Delta$**

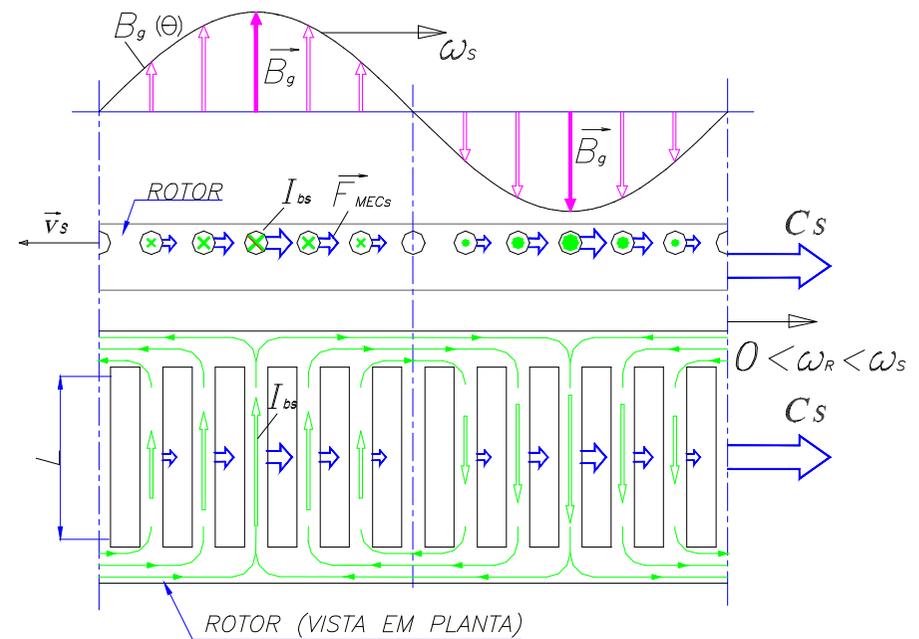
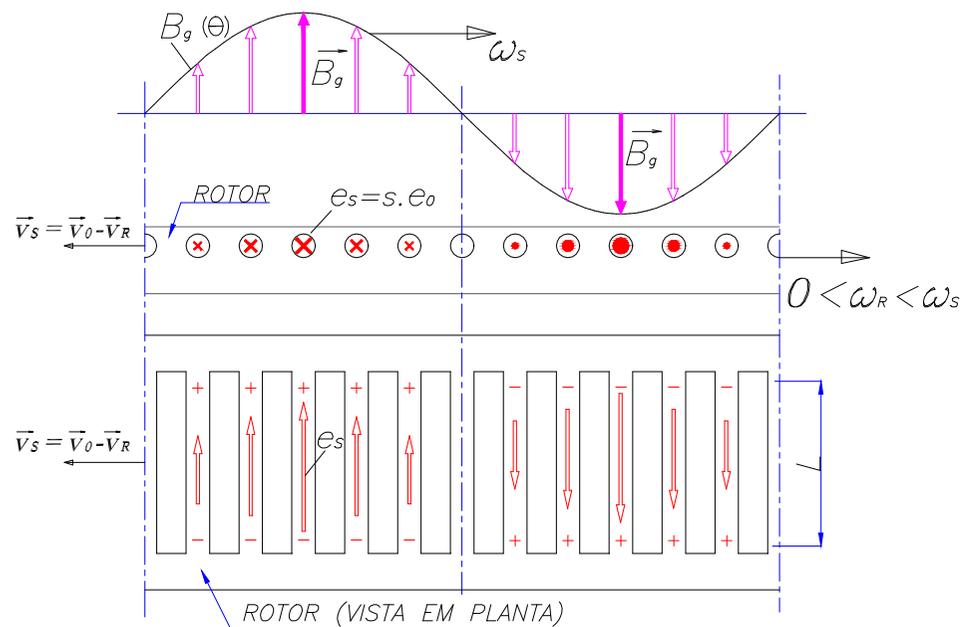
**CADA FASE:  $\frac{1}{2}$ ESPIRA → 1 ÚNICO CONDUTOR**

**FATOR DE ENROLAMENTO UNITÁRIO**

**COMO QUALQUER ENROLAMENTO POLIFÁSICO, O ROTOR DE GAIOLA FORMA CAMPO ROTATIVO NO ROTOR, QUE VAI INTERAGIR COM O CAMPO DO ESTATOR, PRODUZINDO CONJUGADO, À SEMELHANÇA DO QUE OCORRE COM O ROTOR BOBINADO**

PRODUÇÃO DE CONJUGADO E POTÊNCIA MECÂNICA NA MÁQUINA ASSÍNCRONA

ROTOR EM MOVIMENTO



TENSÕES INDUZIDAS NAS BARRAS DO ROTOR

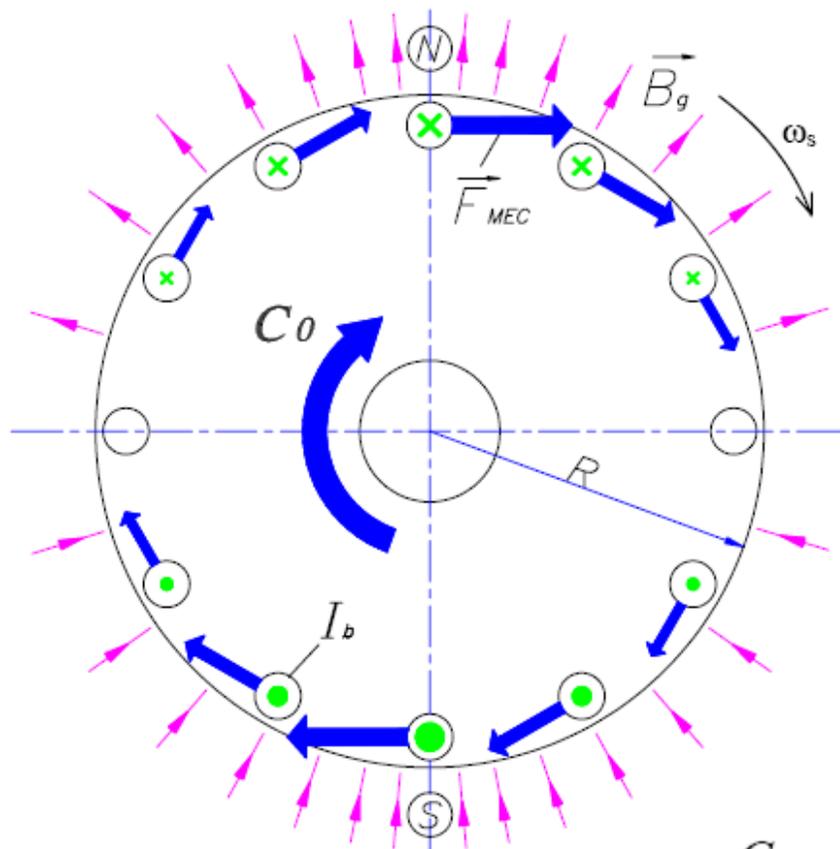
CORRENTES CIRCULANTES NO ROTOR

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

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

HIPÓTESE INICIAL: BARRAS ROTÓRICAS DOTADAS EXCLUSIVAMENTE DE RESISTÊNCIA ( INDUTÂNCIA DESPREZADA )

### COMPOSIÇÃO DO CONJUGADO NO EIXO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA



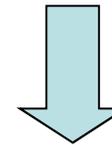
→ **DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE INDUÇÕES NO**

**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

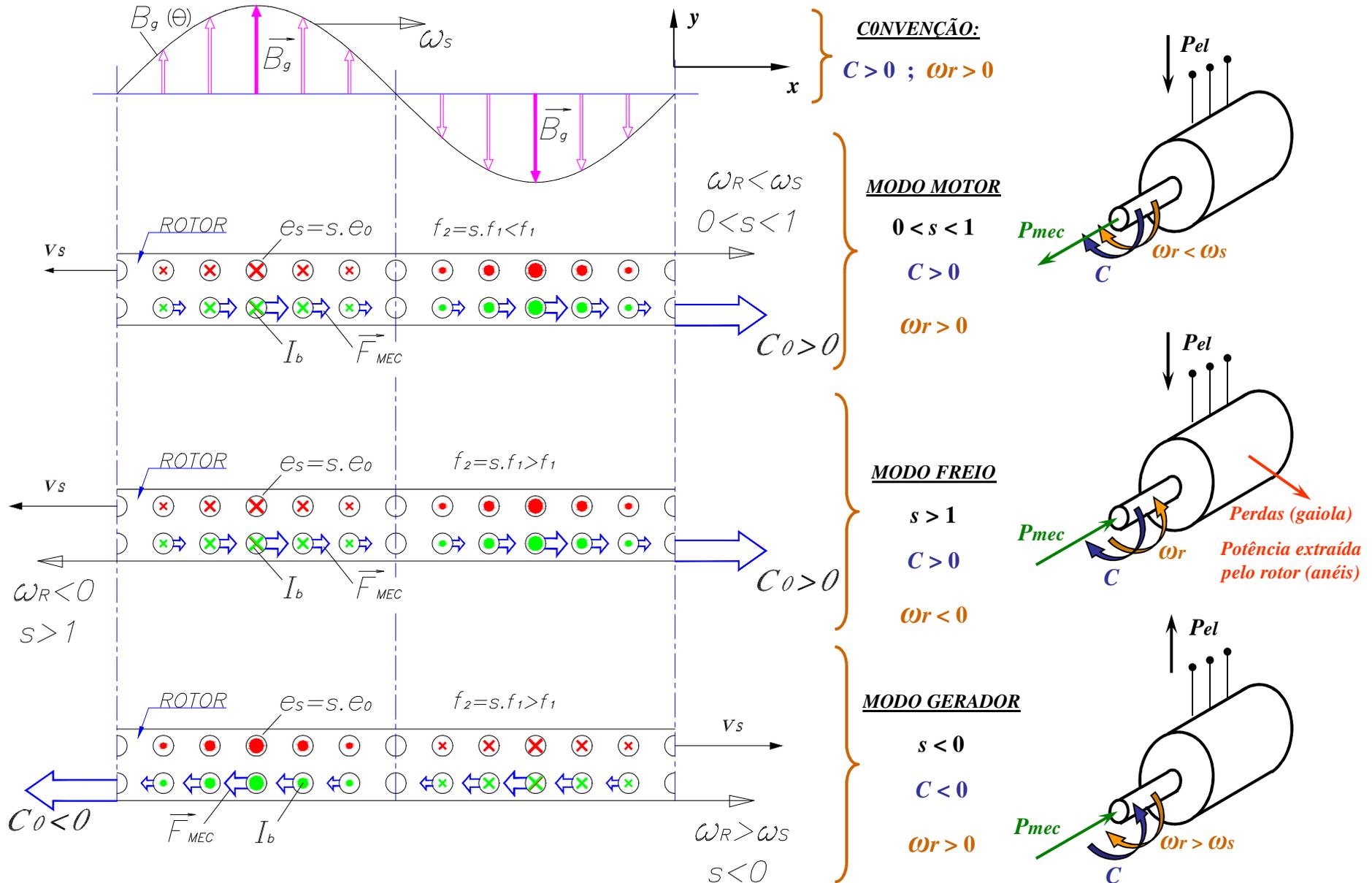


$$C_0 = \sum_{i=1}^{i=Q_b} F_{MEC_i} \cdot R = \sum_{i=1}^{i=Q_b} B_g(\theta_i) \cdot L \cdot I_b(\theta_i) \cdot R$$

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

**HIPÓTESE INICIAL: BARRAS ROTÓRICAS DOTADAS EXCLUSIVAMENTE DE RESISTÊNCIA (INDUTÂNCIA DESPREZADA)**

**MODOS DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA**



**CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA - CURVAS  $C_x s$  E  $I_x s$**

**COMPORTAMENTO DA CORRENTE NO ROTOR E DO CONJUGADO DESENVOLVIDO COM O ESCORREGAMENTO :**

→ **CORRENTE NA BARRA DO ROTOR** :  $I_{bs} = e_s / r_b = s \cdot e_0 / r_b = s \cdot B_g \cdot L \cdot V_0 / r_b = (k \cdot B_g \cdot \omega_s \cdot l / r_b) \cdot s \rightarrow I_{bs} = k_i \cdot s$

→ **FORÇA MECÂNICA E TORQUE** :  $F_{MECs} = B_g \cdot L \cdot I_{bs} \rightarrow C_s = k \cdot B_g \cdot L \cdot s \cdot e_0 / r_b = [k \cdot (B_g)^2 \cdot \omega_s \cdot l / r_b] \cdot s \rightarrow C_s = k_c \cdot s$

SE  $r_b = cte.$  → **CORRENTE E CONJUGADO PROPORCIONAIS AO ESCORREGAMENTO**

**NAS MÁQUINAS REAIS** → **BARRAS ROTÓRICAS NÃO TEM APENAS RESISTÊNCIA, MAS TAMBÉM INDUTÂNCIA** :

**INDUTÂNCIA DO ROTOR MANIFESTA-SE COMO UMA REATÂNCIA INDUTIVA, NA FREQUÊNCIA DO ROTOR**

**CIRCUITO ELÉTRICO DO ROTOR → RESISTIVO + INDUTIVO → IMPEDÂNCIA COMPLEXA NO ROTOR**

**FREQUÊNCIA DO ROTOR VARIA COM O ESCORREGAMENTO → IMPEDÂNCIA : FUNÇÃO DO ESCORREGAMENTO**

**INDUTÂNCIA DA BARRA =  $L_b$  → REATÂNCIA DA BARRA =  $x_s = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot L_b = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L_b = s \cdot x$**

→  $x$  : **REATÂNCIA DA BARRA MEDIDA NA FREQUÊNCIA DA REDE**

**IMPEDÂNCIA DA BARRA**

$$\dot{z}_b = r_b + j \cdot s \cdot x \left\{ \begin{array}{l} |\dot{z}_b| = \sqrt{r_b^2 + s^2 \cdot x^2} \rightarrow \text{MÓDULO DA IMPEDÂNCIA} \\ \varphi = \arccos\left(\frac{r_b}{z_b}\right) = \arccos\left(\frac{r_b}{\sqrt{r_b^2 + s^2 \cdot x^2}}\right) \rightarrow \text{FASE DA IMPEDÂNCIA} \end{array} \right.$$

**CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA - CURVAS  $C_x s$  E  $I_x s$**

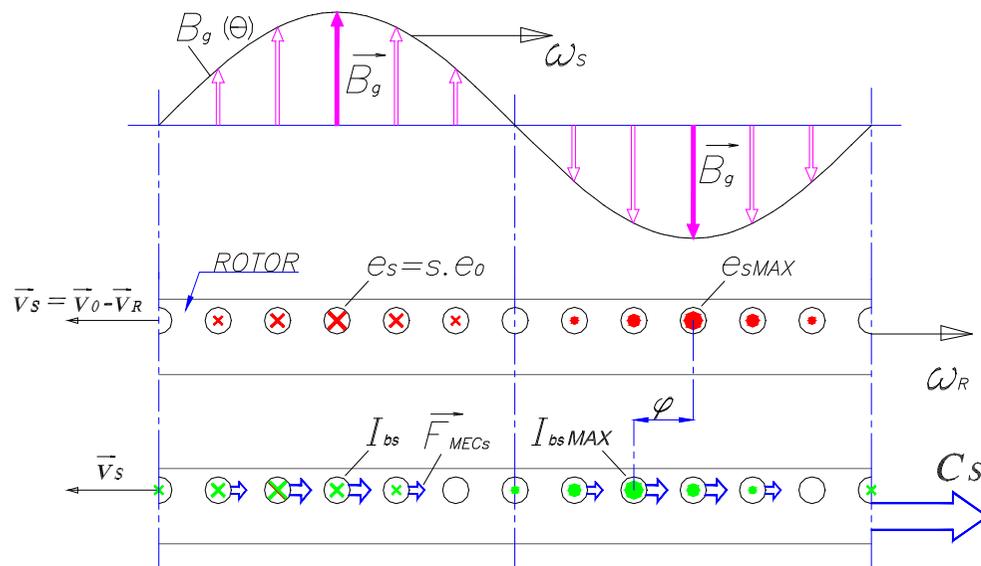
$$|\dot{z}_b| = \sqrt{r_b^2 + s^2 \cdot x^2}$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{r_b}{\sqrt{r_b^2 + s^2 \cdot x^2}}\right)$$

**NATUREZA DO CIRCUITO ELÉTRICO DO ROTOR VARIA C/ O ESCORREGAMENTO :**  
 $s \rightarrow 0$  : CIRCUITO PREDOMINANTEMENTE RESISTIVO ( REGIÃO DE OPERAÇÃO NORMAL )  
 $s \rightarrow 1$  : CIRCUITO PREDOMINANTEMENTE REATIVO ( REGIÃO DA PARTIDA )

$$I_{bs} = \frac{s \cdot e_0}{\sqrt{r_b^2 + s^2 \cdot x^2}} \Rightarrow I_{bs}(\theta) = \frac{s \cdot e_0(\theta)}{r_b + j \cdot s \cdot x}$$

**MANIFESTAÇÃO DA REATÂNCIA → ATRASO NA CORRENTE DA BARRA, EM RELAÇÃO À TENSÃO INDUZIDA PELO CAMPO ROTATIVO → CORRENTE EM CADA BARRA NÃO ESTÁ MAIS EM FASE COM O CAMPO QUE AGE SOBRE A MESMA**



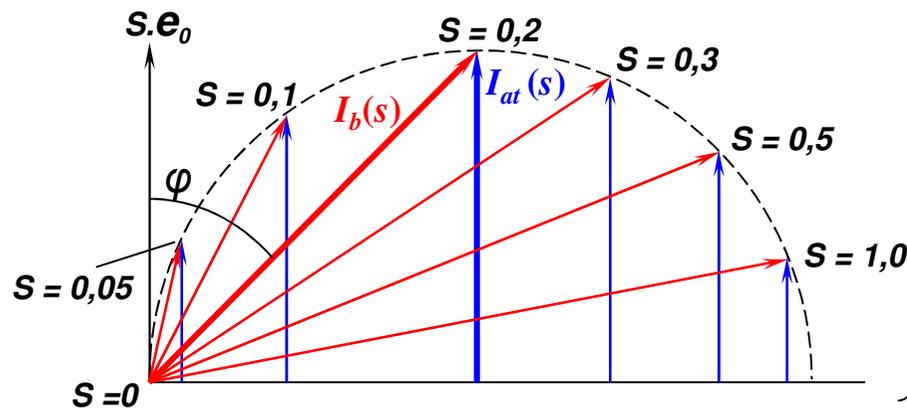
**INTERAÇÃO ELETROMAGNÉTICA :**

$$C_s = \int_0^{2\pi} B_M \cdot \cos(\theta) \cdot L \cdot I_M \cdot \cos(\theta - \varphi) \cdot \frac{Q_b}{2\pi} \cdot R \cdot d\theta$$

$$C_s = \frac{1}{2} \cdot B_M \cdot I_M \cdot \cos \varphi \cdot L \cdot R \cdot Q_b$$

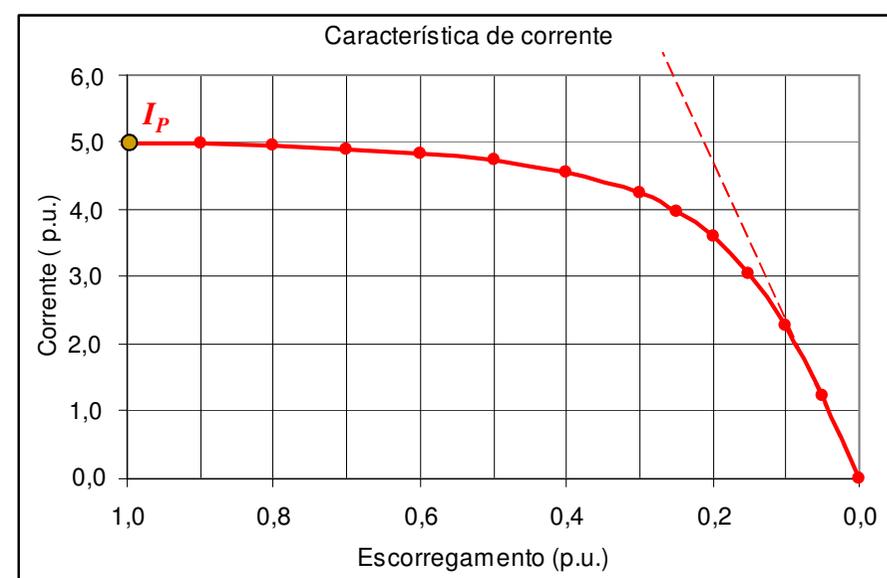
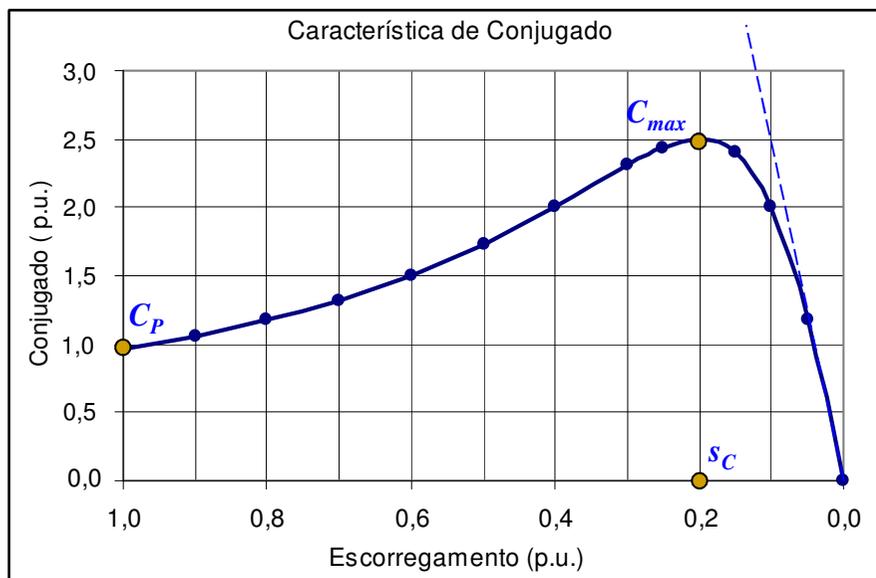
**COMPONENTE ATIVA DA CORRENTE NA BARRA**

**CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA - CURVAS  $C \times s$  E  $I \times s$**

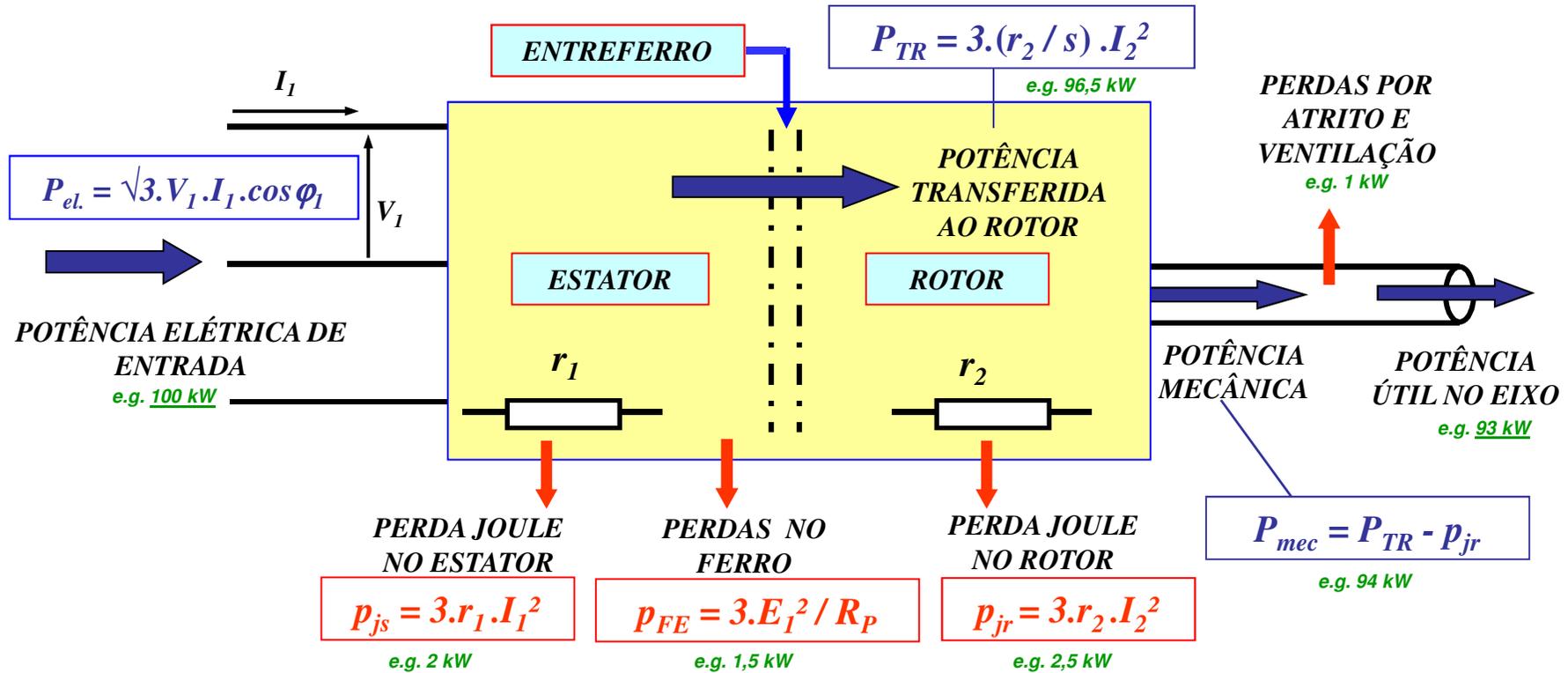


**COMPORTAMENTO DA COMPONENTE ATIVA DA CORRENTE COM O ESCORREGAMENTO NO ROTOR DO MOTOR DE INDUÇÃO :  $I_{at}(s) = I_b(s) \cdot \cos \varphi$**

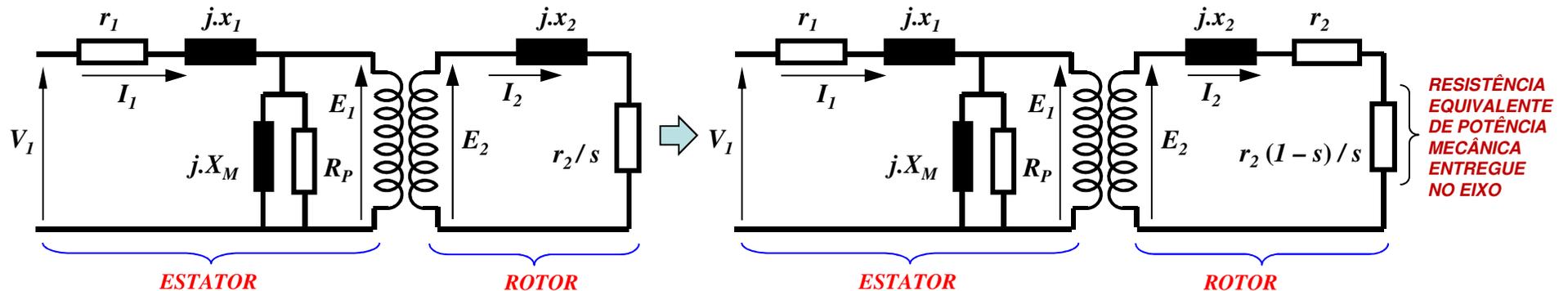
- **CORRENTE TOTAL SEMPRE CRESCENTE COM “s”**
- **CORRENTE ATIVA TEM UM MÁXIMO PARA  $0 < s < 1$**
- **CONJUGADO DESENVOLVIDO PASSA POR UM MÁXIMO PARA  $0 < s < 1 \rightarrow s_c$  : *escorregamento crítico***



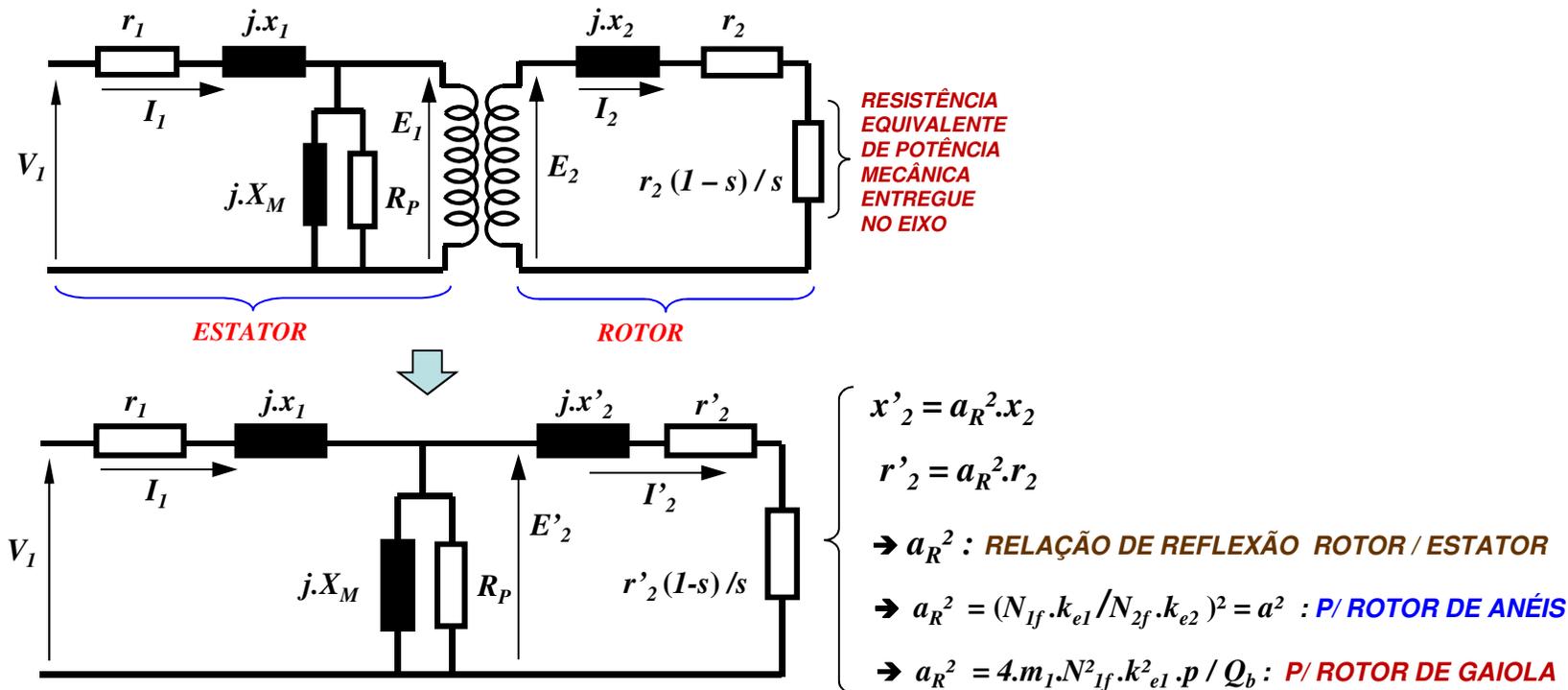
**MODELO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA TRIFÁSICA - FLUXO DE POTÊNCIAS ATIVAS NO MOTOR DE IDUÇÃO**



**POTÊNCIA MECÂNICA ENTREGUE NO EIXO:**  $P_{mec} = P_{TR} - p_{jr} = 3 \cdot r_2 / s \cdot I_2^2 - 3 \cdot r_2 \cdot I_2^2 = 3 \cdot (r_2 / s - r_2) \cdot I_2^2 = 3 \cdot [r_2 \cdot (1 - s) / s] \cdot I_2^2$



**MODELO EQUIVALENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO (POR FASE) - REFERIDO AO ESTATOR**



**CONDIÇÕES EQUIVALENTE DE OPERAÇÃO ENTRE MÁQUINA ASSÍNCRONA E O TRANSFORMADOR:**

**MOTOR COM EIXO LIVRE ( EM VAZIO ) -  $s = 0$**

**$\rightarrow$  TRANSFORMADOR COM SECUNDÁRIO EM ABERTO**

**MOTOR COM EIXO BLOQUEADO ( PARTIDA ) -  $s = 1$**

**$\rightarrow$  TRANSFORMADOR COM SECUNDÁRIO EM CURTO**

**MOTOR EM CARGA COM ESCORREGAMENTO “s”**

**$\rightarrow$  TRANSFORMADOR COM CARGA RESISTIVA :  $r_2 \cdot (1 - s) / s$  NO SECUNDÁRIO**

**RELAÇÕES IMPORTANTES NA MÁQUINA ASSÍNCRONA**

**POTÊNCIA TRANSFERIDA AO ROTOR:**  $P_{TR} = m_1 \cdot (r'_2 / s) \cdot I_2'^2$

**PERDA JOULE NO ROTOR:**  $p_{J2} = m_1 \cdot r'_2 \cdot I_2'^2$

**POTÊNCIA MECÂNICA NO EIXO:**  $P_{mec} = P_{TR} - p_{J2} = m_1 \cdot r'_2 \cdot [(1 - s) / s] \cdot I_2'^2$

$$\rightarrow p_{j2} = s \cdot P_{TR}$$

$$\rightarrow P_{mec} = (1 - s) \cdot P_{TR}$$

**POTÊNCIA MECÂNICA TRANSFERIDA AO ROTOR SE CONVERTE PARTE EM POTÊNCIA MECÂNICA DISPONÍVEL NO EIXO E PARTE EM PERDA JOULE NO ROTOR :**

**→ QUANTO MAIOR O ESCORREGAMENTO, MENOR A PARCELA CONVERTIDA EM POTÊNCIA MECÂNICA E MAIOR A PERDA JOULE**

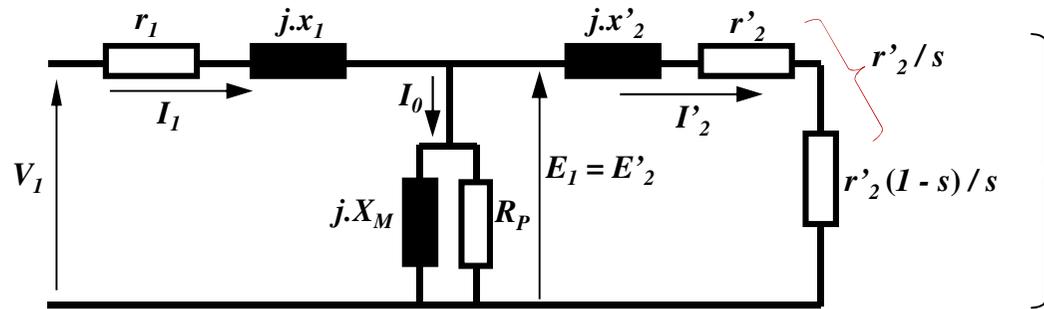
**→ MOTOR ASSÍNCRONO DE BOM RENDIMENTO DEVE OPERAR COM PEQUENO ESCORREGAMENTO**

**→ ESCORREGAMENTOS NOMINAIS TÍPICOS : 0,005 A 0,05 p.u. ( 0,5 % A 5 % )**

**CONJUGADO NO EIXO DO MOTOR DE INDUÇÃO →**

$$C = \frac{P_{MEC}}{\omega_r} = \frac{(1 - s) \cdot P_{TR}}{(1 - s) \cdot \omega_s} = \frac{P_{TR}}{\omega_s}$$

**EXPRESSÃO DO CONJUGADO - CARACTERÍSTICAS EXTERNAS ( A PARTIR DO MODELO )**



CONJUGADO NO EIXO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA :

$$C = \frac{P_{mec}}{\omega_r} = \frac{P_{TR}}{\omega_s}$$

$$P_{TR} = 3 \cdot \frac{r'2}{s} \cdot I'2^2$$

$$C = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{r'2}{s} \cdot I'2^2$$

$$I'2 = \frac{\dot{E}1}{\frac{r'2}{s} + j \cdot x'2} = \frac{E1}{\sqrt{\left(\frac{r'2}{s}\right)^2 + x'2^2}}$$

$$\dot{E}1 = V1 - (r1 + j \cdot x1) \cdot \dot{I}1$$

$$\dot{I}1 = \dot{I}0 + \dot{I}'2$$

$$\dot{I}0 = \frac{\dot{E}1}{\dot{Z}M} \cong \frac{\dot{E}1}{j \cdot XM}$$



$$I'2 = \frac{\alpha \cdot V1}{\sqrt{\left(\alpha \cdot r1 + \frac{r'2}{s}\right)^2 + \underbrace{(x1 + x'2)}_{x_{cc}}^2}}$$



$$C = \frac{3 \cdot \alpha^2 V1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'2}{s}}{\left[\left(\alpha \cdot r1 + \frac{r'2}{s}\right)^2 + \underbrace{(x1 + x'2)}_{x_{cc}}^2\right]}$$

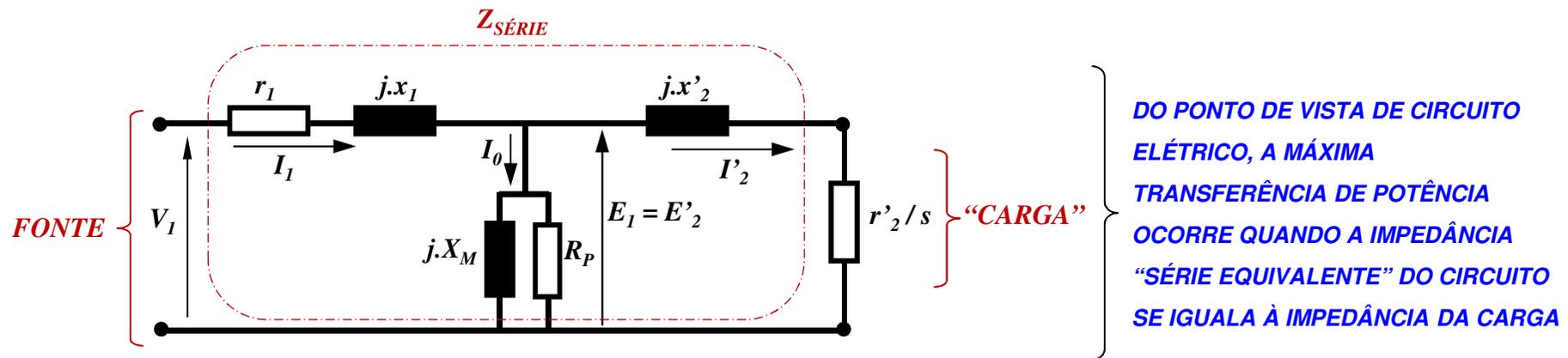
$$\alpha = \frac{XM}{x1 + XM} \cong 1$$

**CARACTERÍSTICAS EXTERNAS - CONJUGADO MÁXIMO**

PONTO DE INFLEXÃO NA CURVA DE CONJUGADO → “CONJUGADO MÁXIMO” :

OCORRE PARA UM VALOR ESPECÍFICO DE ESCORREGAMENTO → ESCORREGAMENTO CRÍTICO

$$C = \frac{P_{mec}}{\omega_r} = \frac{P_{TR}}{\omega_s} \rightarrow C_{MAX} \rightarrow P_{TR-MAX} \left\{ \begin{array}{l} \text{CONJUGADO MÁXIMO OCORRE NA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE} \\ \text{POTÊNCIA ENTRE A FONTE DE ALIMENTAÇÃO E O ROTOR} \end{array} \right.$$



$$P_{TR-MAX} \rightarrow |Z_{SÉRIE}| = r'_{2}/s \rightarrow \frac{r'_{2}}{s_c} = \sqrt{(\alpha \cdot r_1)^2 + (x_{cc})^2} \rightarrow s_c = \frac{r'_{2}}{\sqrt{(\alpha \cdot r_1)^2 + (x_{cc})^2}} \cong \frac{r'_{2}}{x_{cc}}$$

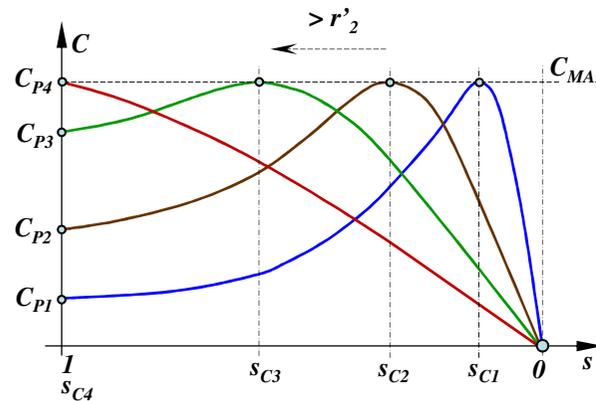
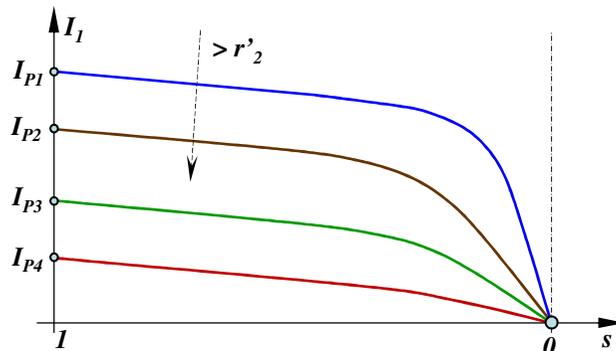
$$C = \frac{3 \cdot \alpha^2 V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'_{2}}{s}}{\left[ \left( \alpha \cdot r_1 + \frac{r'_{2}}{s} \right)^2 + (x_{cc})^2 \right]} \rightarrow C_{MAX} = \frac{3 \cdot \alpha^2 V_1^2}{2 \cdot \omega_s} \cdot \frac{1}{\left[ \alpha \cdot r_1 + \sqrt{(\alpha \cdot r_1)^2 + (x_{cc})^2} \right]} \cong \frac{3 \cdot V_1^2}{2 \cdot \omega_s \cdot x_{cc}}$$

**CARACTERÍSTICAS EXTERNAS - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS E DA ALIMENTAÇÃO**

$$I_1 \cong I'_2 = \frac{\alpha \cdot V_1}{\sqrt{\left(\alpha \cdot r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_{cc})^2}}$$

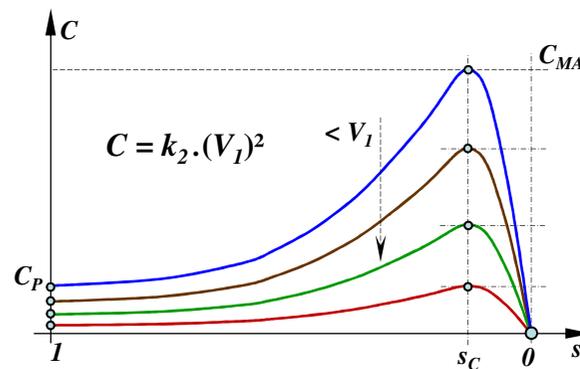
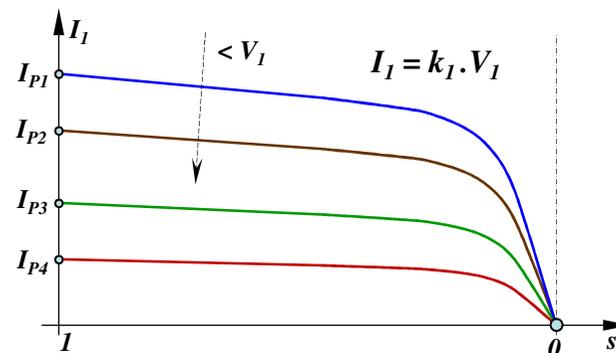
$$C = \frac{3 \cdot \alpha^2 V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'_2}{s}}{\left[\left(\alpha \cdot r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_{cc})^2\right]}$$

$$C_{MAX} \cong \frac{3 \cdot V_1^2}{2 \cdot \omega_s \cdot x_{cc}} \quad s_C \cong \frac{r'_2}{x_{cc}}$$



INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA ROTÓRICA

TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO CONSTANTE



INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO

RESISTÊNCIA ROTÓRICA CONSTANTE

**CONFORMAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES ASSÍNCRONOS****MOTOR DE INDUÇÃO:**

**CARACTERÍSTICAS SATISFATÓRIAS NA REGIÃO DE OPERAÇÃO NOMINAL ( BAIXO ESCORREGAMENTO )**

→ **ELEVADO RENDIMENTO E FATOR DE POTÊNCIA**

→ **PEQUENA REGULAÇÃO DE VELOCIDADE**

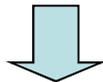
→ **TORQUE E CORRENTE PRATICAMENTE PROPORCIONAIS AO ESCORREGAMENTO**

**CARACTERÍSTICAS INADEQUADAS NA REGIÃO DE PARTIDA ( ELEVADO ESCORREGAMENTO )**

→ **BAIXO CONJUGADO DE PARTIDA E DE ACELERAÇÃO**

→ **ELEVADA CORRENTE DE PARTIDA**

→ **ELEVADA POTÊNCIA APARENTE REQUERIDA DA LINHA DE ALIMENTAÇÃO**

**ADEQUAÇÃO À CARGA E COMPATIBILIDADE COM A FONTE DE ALIMENTAÇÃO:**

**NECESSIDADE DE CONFORMAÇÃO DAS CURVAS DE CONJUGADO, ESPECIALMENTE NA REGIÃO DA PARTIDA**

→ **ASSOCIAÇÃO DE REOSTATO EXTERNO AO ROTOR NO MOTOR DE ANÉIS**

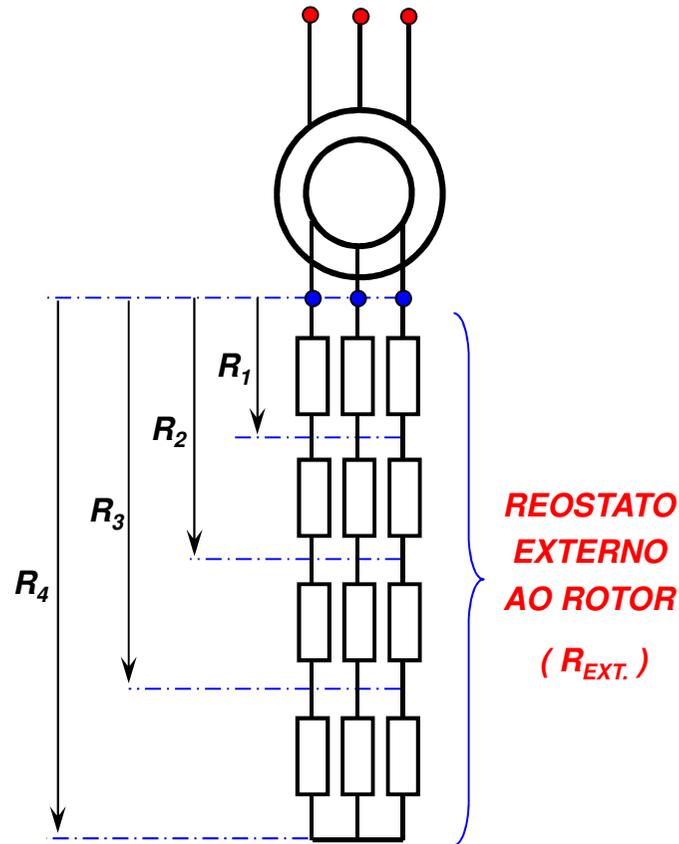
→ **PROJETO ADEQUADO DA GAIOLA NO MOTOR COM ROTOR EM CURTO CIRCUITO ( CATEGORIAS DE CONJUGADO )**

**NECESSIDADE DE MÉTODOS PARA LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE PARTIDA**

→ **INSERÇÃO DE REOSTATO ROTÓRICO NO MOTOR DE ANÉIS**

→ **MÉTODOS AUXILIARES PARA REDUÇÃO DA TENSÃO NA PARTIDA, EM MOTORES DE GAIOLA**

**CONFORMAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DE ANÉIS**



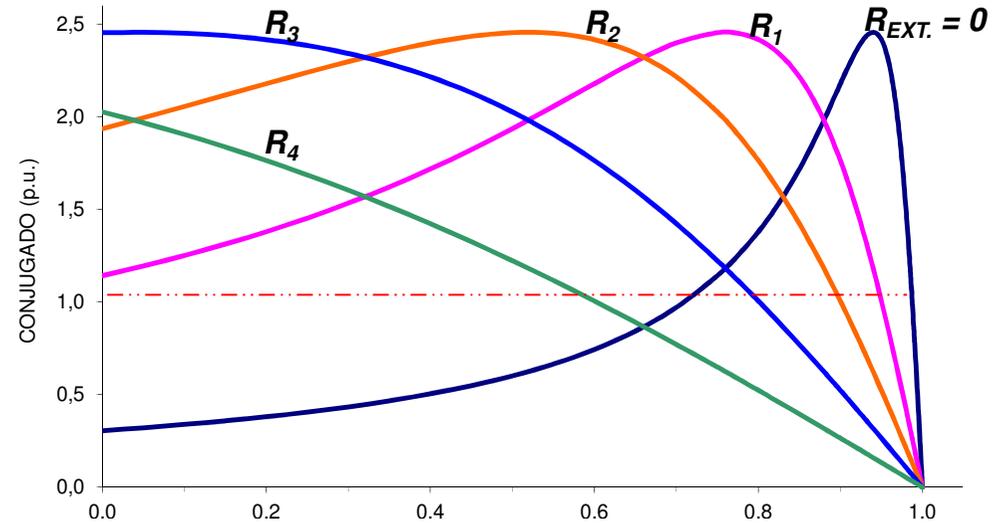
**MÉTODO DISSIPATIVO**

**DISSIPACÃO DE POTÊNCIA EXTERNA AO ROTOR**

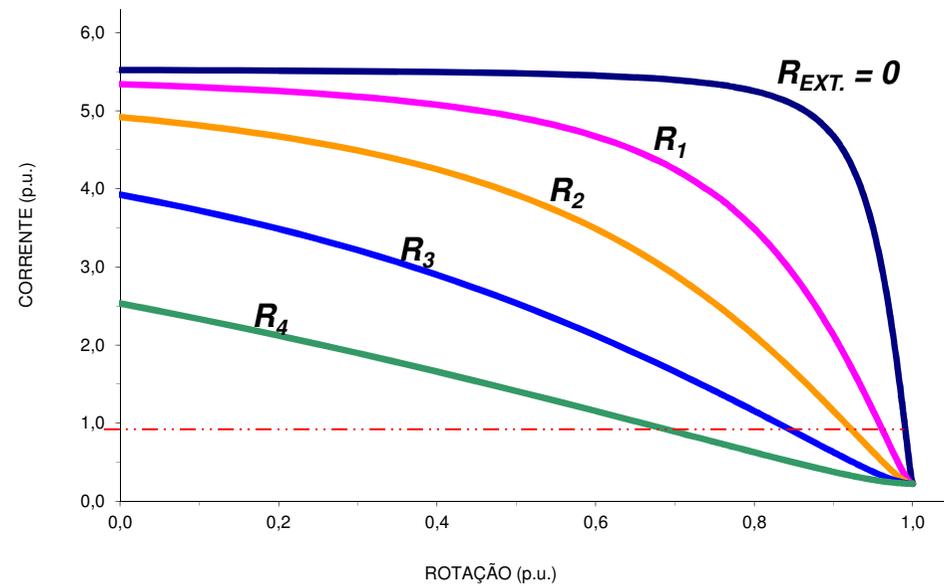
**OTIMIZAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PARTIDA**

**DEGRADAÇÃO DA REGIÃO DE REGIME NORMAL**

CARACTERÍSTICAS C-N

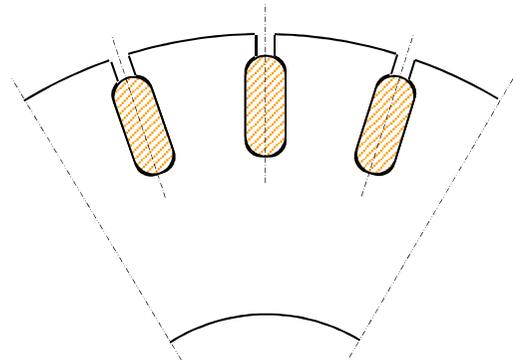


CARACTERÍSTICAS I - N

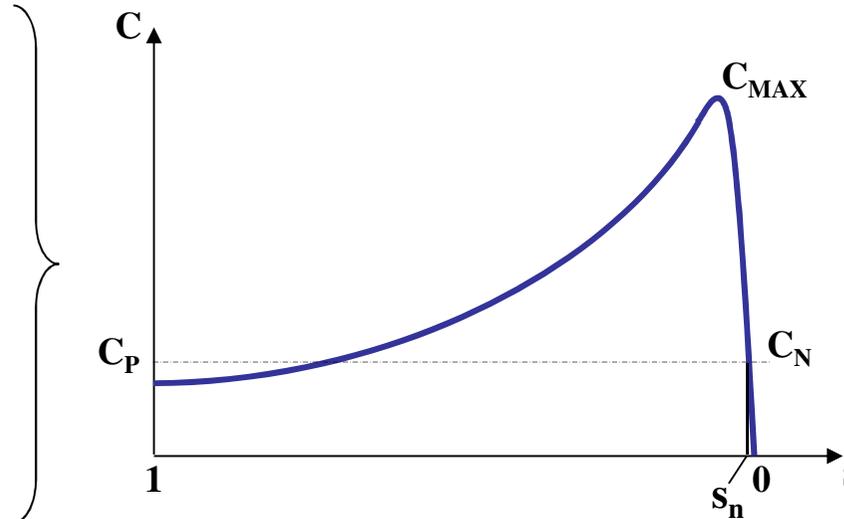


**CONFORMAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DE GAIOLA**

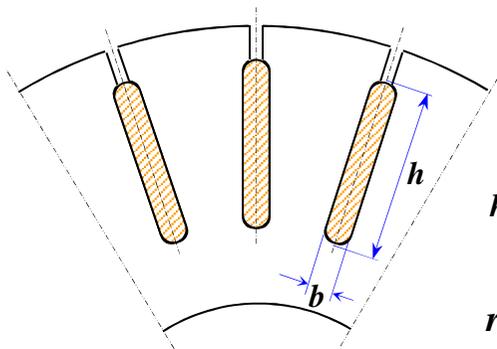
CARACTERÍSTICA DO MOTOR É FIXA → DEFINIDA PELA CONFIGURAÇÃO DA GAIOLA



**GAIOLA SIMPLES** → **BARRAS DE BAIXA RESISTÊNCIA** → **COBRE OU ALUMÍNIO** COM GRANDE SEÇÃO



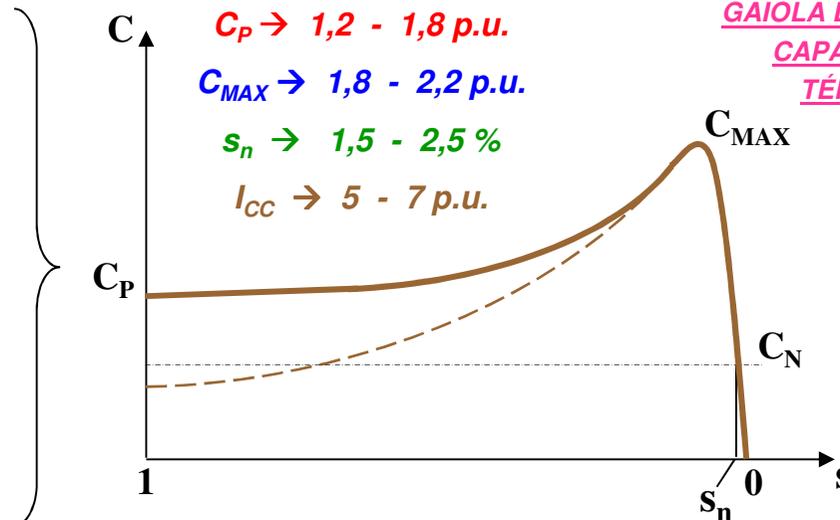
$C_P \rightarrow 0,5 - 1,2 \text{ p.u.}$   
 $C_{MAX} \rightarrow 1,8 - 2,5 \text{ p.u.}$   
 $s_n \rightarrow 1 - 2 \%$   
 $I_{CC} \rightarrow 6 - 8 \text{ p.u.}$



**ADENSAMENTO DE CORRENTE :**

$h/b > 10 - h > 4 \text{ cm}$   
 →  $r_b = f(s)$   
 $r_{b:s=1} \approx h(\text{cm}) \cdot r_{b:s=0}$

**GAIOLA DE BARRAS PROFUNDAS** → **BARRAS DE BAIXA RESISTÊNCIA** → **COBRE OU ALUMÍNIO** COM EFEITO DE ADENSAMENTO DE CORRENTE



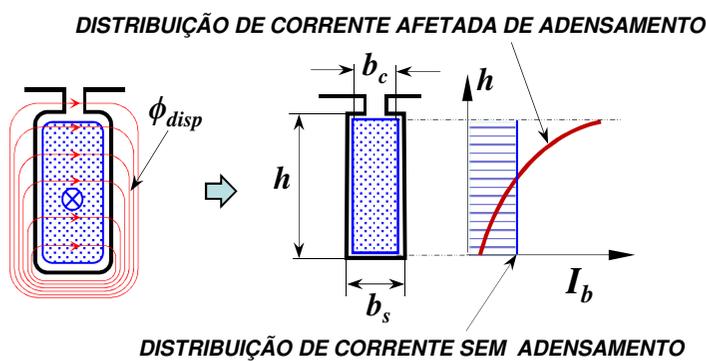
$C_P \rightarrow 1,2 - 1,8 \text{ p.u.}$   
 $C_{MAX} \rightarrow 1,8 - 2,2 \text{ p.u.}$   
 $s_n \rightarrow 1,5 - 2,5 \%$   
 $I_{CC} \rightarrow 5 - 7 \text{ p.u.}$

**GAIOLA DE GRANDE CAPACIDADE TÉRMICA**

• ADENSAMENTO DE CORRENTE NAS BARRAS DO ROTOR :

→ **INTERAÇÃO DO FLUXO DE DISPERSÃO DA RANHURA COM A CORRENTE DA BARRA** → **DESLOCA A CORRENTE PARA A REGIÃO PRÓXIMA AO ENTREFERRO** → **PRODUZ ALTERAÇÃO NAS RESISTÊNCIAS E REATÂNCIAS EM CORRENTE ALTERNADA**

→ **RESISTÊNCIA E REATÂNCIA ADENSADAS** :  $r'_{2-ad}$  ;  $x'_{2-ad}$



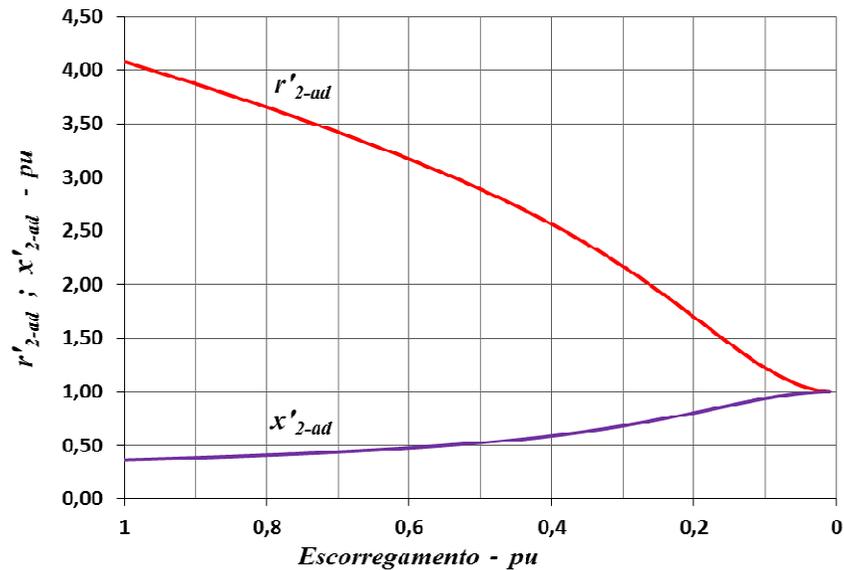
$$r'_{2-ad} = R(\xi) \cdot r'_2 \rightarrow R(\xi) = \xi \cdot \frac{\sinh(2\xi) + \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)}$$

$$x'_{2-ad} = X(\xi) \cdot x'_2 \rightarrow X(\xi) = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)}$$

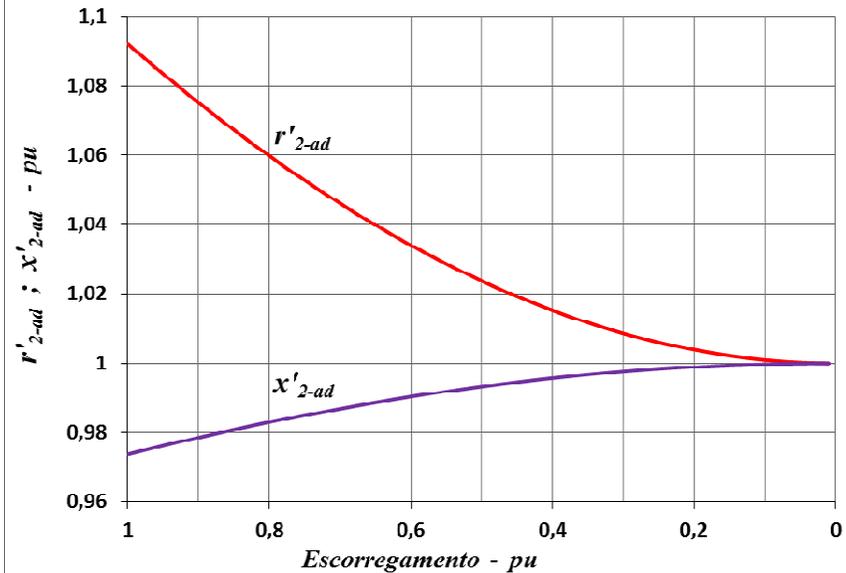
$$\xi = h \cdot \sqrt{\frac{b_c}{b_s} \cdot \frac{\pi \cdot \mu_0}{\rho} \cdot f_1 \cdot s}$$

$h [m]$  : ALTURA DA BARRA  
 $\rho [\Omega.m]$  : RESISTIVIDADE DO MATERIAL DA BARRA  
 $s [p.u.]$  : ESCORREGAMENTO

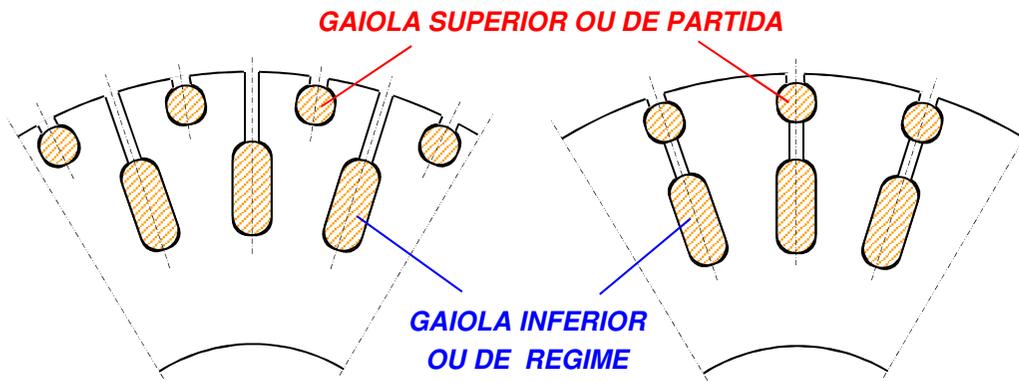
EFEITO DO ADENSAMENTO DE CORRENTE -  $h = 4 \text{ cm}$



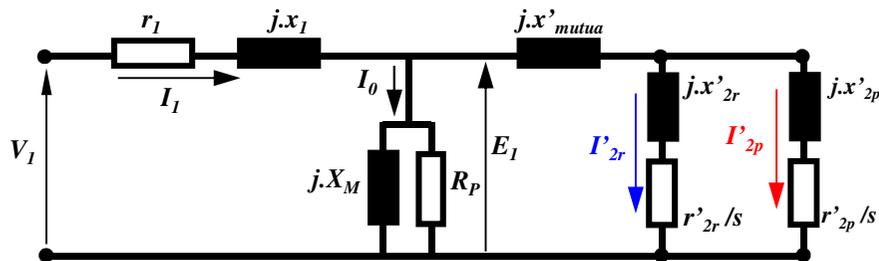
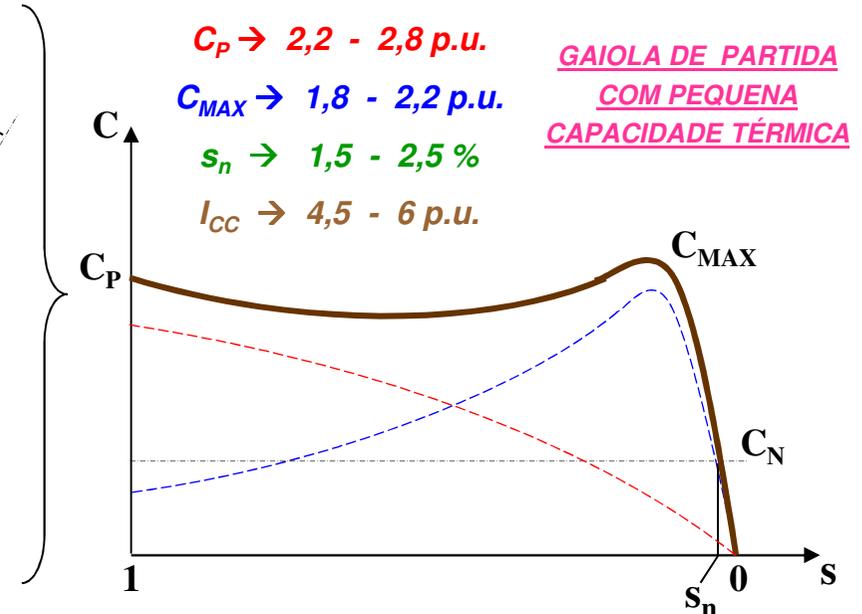
EFEITO DO ADENSAMENTO DE CORRENTE -  $h = 1 \text{ cm}$



CONFORMAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DE GAIOLA



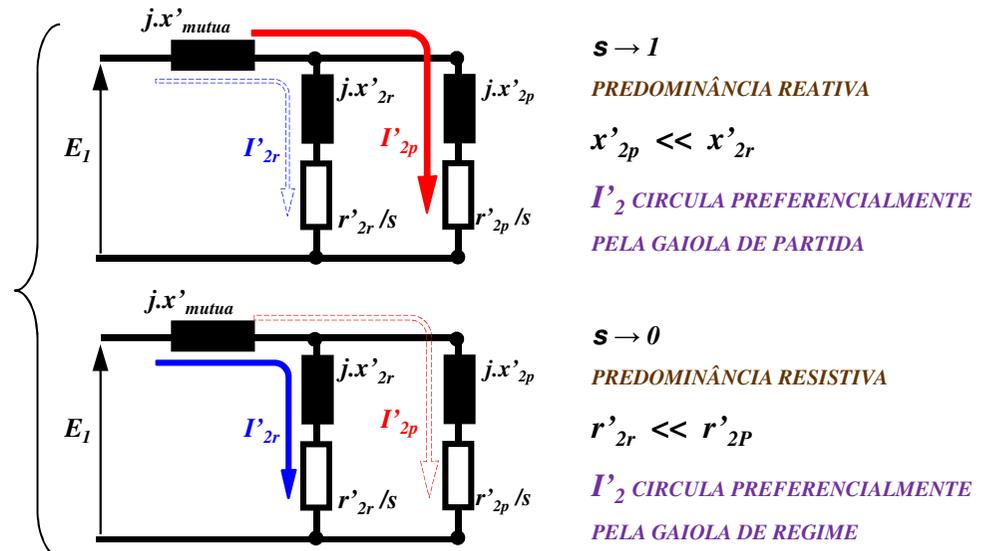
**ROTOR DE DUPLA GAIOLA → BARRAS SUPERIORES DE ELEVADA RESISTÊNCIA + BAIXA REATÂNCIA → BARRAS INFERIORES DE BAIXA RESISTÊNCIA + ELEVADA REATÂNCIA**



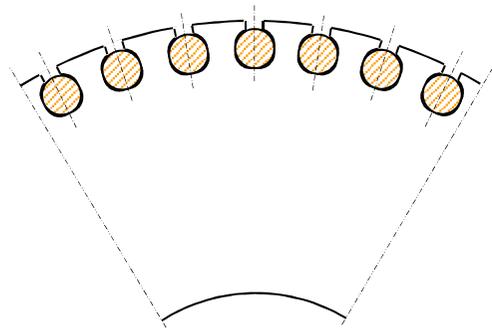
**GAIOLA SUPERIOR OU DE PARTIDA :**  $z'_{2p} = r'_{2p} + j.s.x'_{2p}$

**GAIOLA INFERIOR OU DE REGIME :**  $z'_{2r} = r'_{2r} + j.s.x'_{2r}$

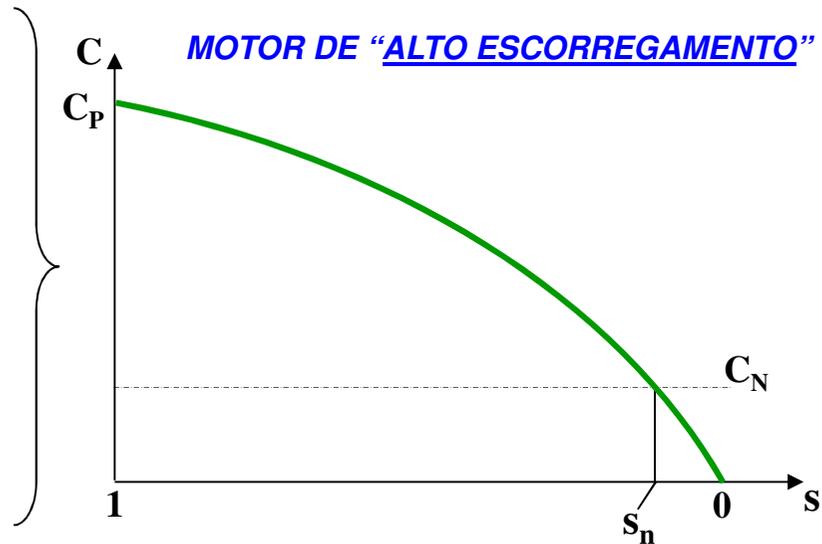
$r'_{2p} \gg r'_{2r} ; x'_{2r} \gg x'_{2p}$



### CONFORMAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DE GAIOLA



**GAIOLA SIMPLES** → **BARRAS DE ELEVADA RESISTÊNCIA** → **LATÃO OU BRONZE COM PEQUENA SECÇÃO**

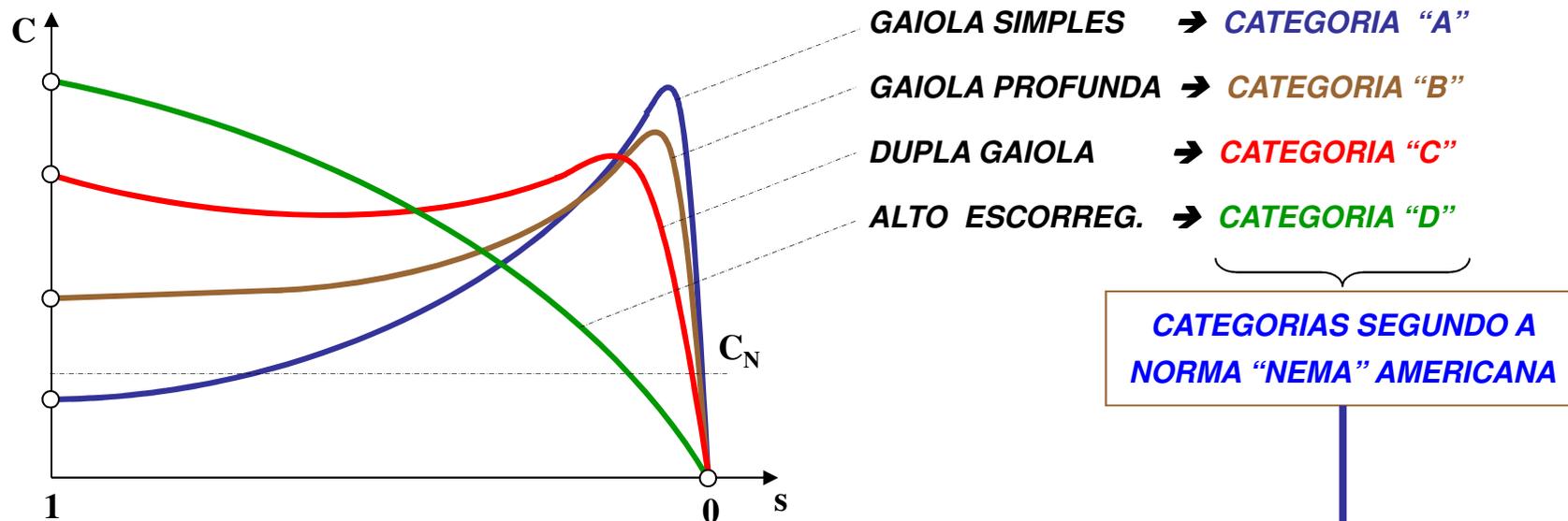


### CARACTERÍSTICA DE TORQUE MONOTÔNICA - SEM INFLEXÃO INTERMEDIÁRIA

- **IMPORTANTE EM CARGAS DE LEVANTAMENTO E TRANSPORTE VERTICAL (GUINCHOS ; ELEVADORES)**
- **APLICADOS TAMBÉM EM CARGAS QUE PODEM SOFRER BLOQUEIO DO EIXO EM OPERAÇÃO ( PRENSAS DE VULCANIZAÇÃO )**
- **USADOS AINDA EM CARGAS DOTADAS DE VOLANTE DE INÉRCIA ONDE SE APROVEITA A ENERGIA CINÉTICA ARMAZENADA NO MESMO ( PRENSAS EXCÊNTRICAS )**

## CURVAS CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DOS MOTORES DE GAIOLA - CATEGORIAS DE CONJUGADO

**DIFERENTES TIPOS DE GAIOLA DEFINEM AS CATEGORIAS DE CONJUGADO → ESPECIFICAÇÃO DA CATEGORIA É FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DO MOTOR**



**CATEGORIAS SEGUNDO A NORMA "NEMA" AMERICANA**

**DIFERENTES TIPOS DE GAIOLA :**

→ **CONFORMAM AS CURVAS DE TORQUE**

→ **PRATICAMENTE NÃO ALTERAM AS CURVAS DE CORRENTE**

( EXCEÇÃO FEITA AO CATEGORIA "D" )

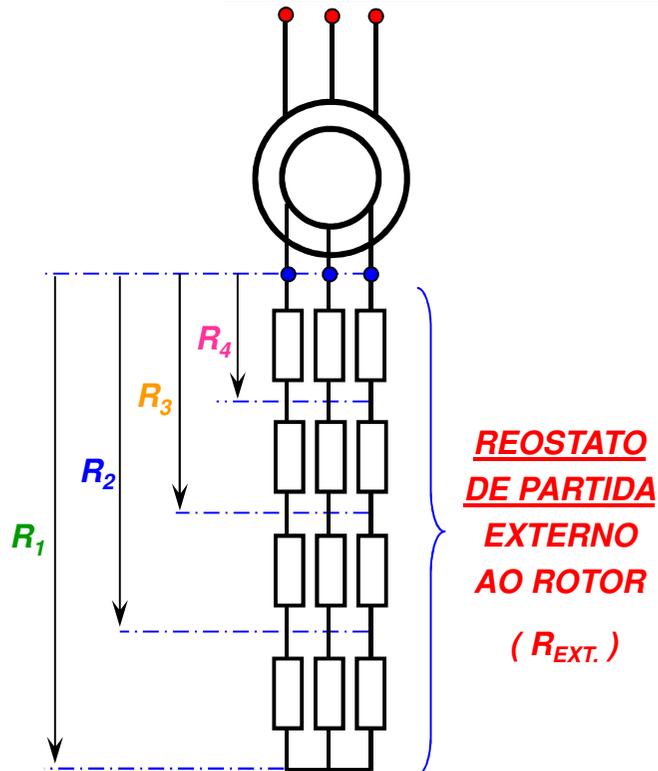
**CATEGORIAS DE CONJUGADO SEGUNDO A NORMA "ABNT" BRASILEIRA E "IEC" :**

**CATEGORIA "N" → "A" E "B" NEMA**

**CATEGORIA "H" → "C" NEMA**

**CATEGORIA "D" → "D" NEMA**

## MÉTODOS DE PARTIDA DOS MOTORES ASSÍNCRONOS - MOTORES DE ANÉIS

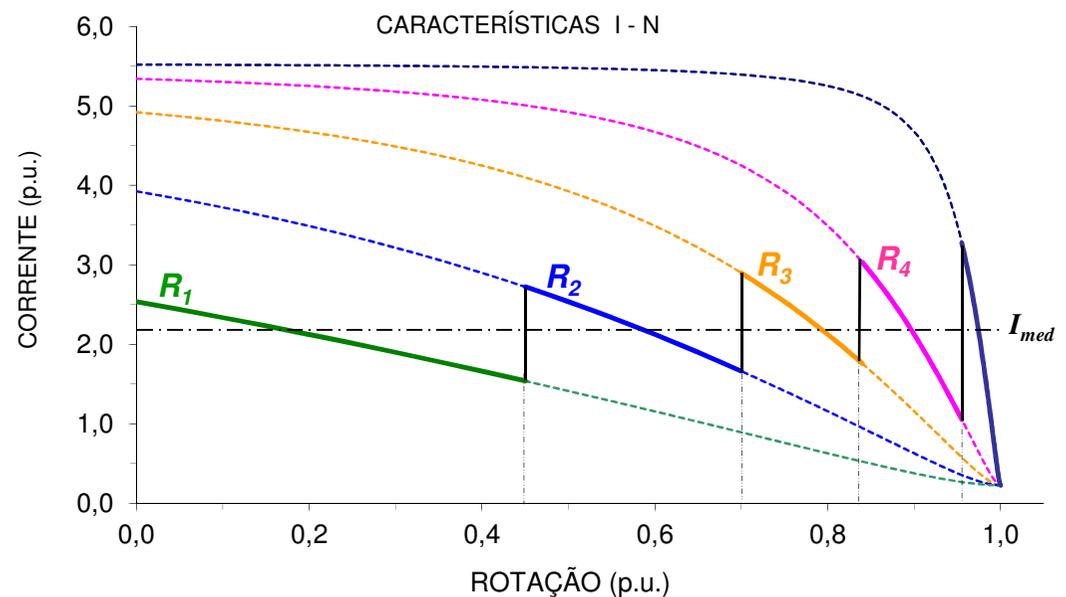
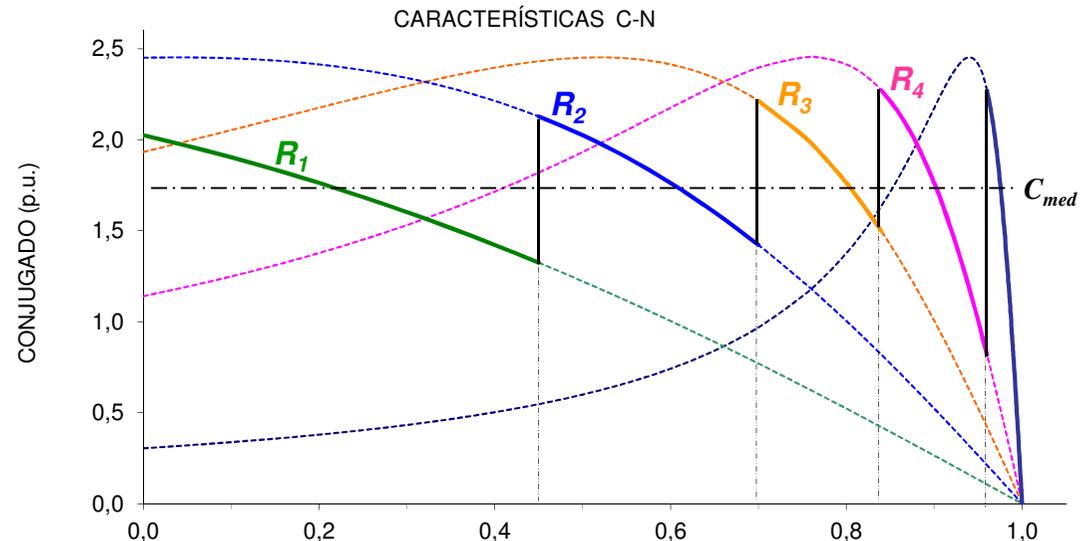


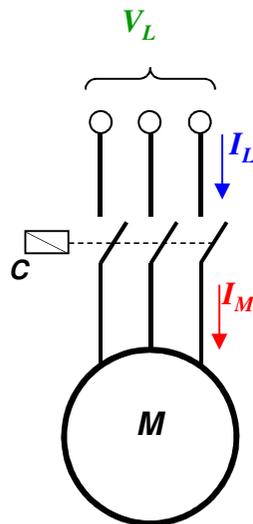
**REOSTATO ELIMINADO GRADUALMENTE CONFORME A ACELERAÇÃO DO MOTOR**

**PARTIDA DISSIPATIVA → DISSIPAÇÃO DE POTÊNCIA EXTERNA AO ROTOR**

**OTIMIZAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PARTIDA**

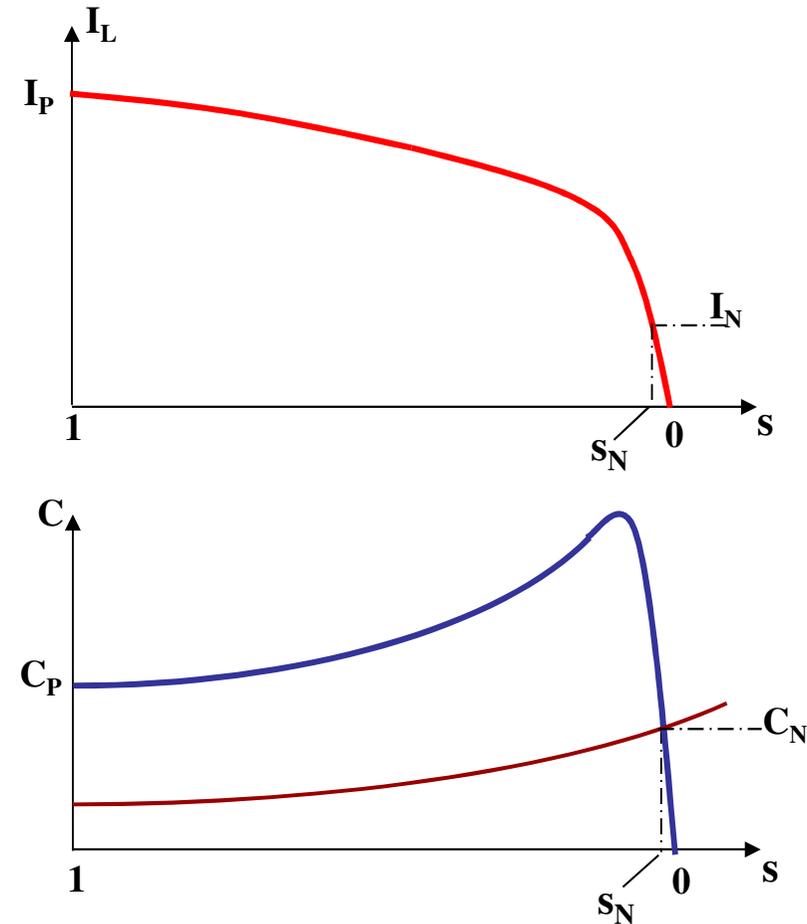
**ADEQUADO PARA PARTIDAS FREQUENTES E/OU COM CARGAS DE GRANDE INÉRCIA**



**MÉTODOS DE PARTIDA DOS MOTORES ASSÍNCRONOS - MOTORES DE GAIOLA****PARTIDA DIRETA NA REDE**

**MÉTODO UTILIZADO PARA PEQUENOS MOTORES EM BAIXA TENSÃO ( 220 – 380 – 440 V )**

**MÉTODO UTILIZADO PARA MOTORES MÉDIOS E GRANDES EM MÉDIA TENSÃO ( 2,3 - 3,3 - 4,16 - 6,6 - 13,8 kV )**

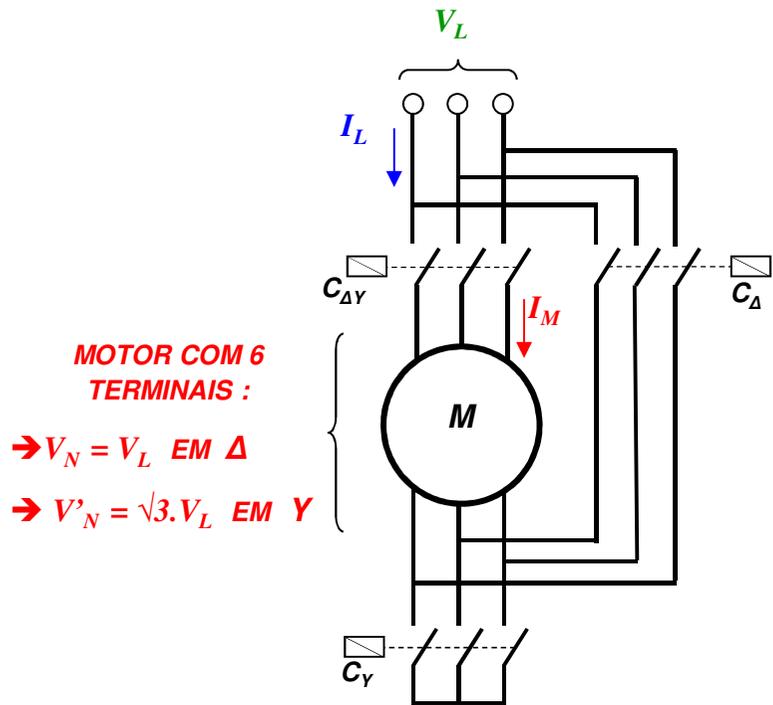


**CORRENTE NA LINHA IGUAL À CORRENTE DE CURTO CIRCUITO DO MOTOR NA PARTIDA**

**CURVA DE TORQUE PRESERVADA NOS SEUS VALORES PLENOS EM QUALQUER “s”**

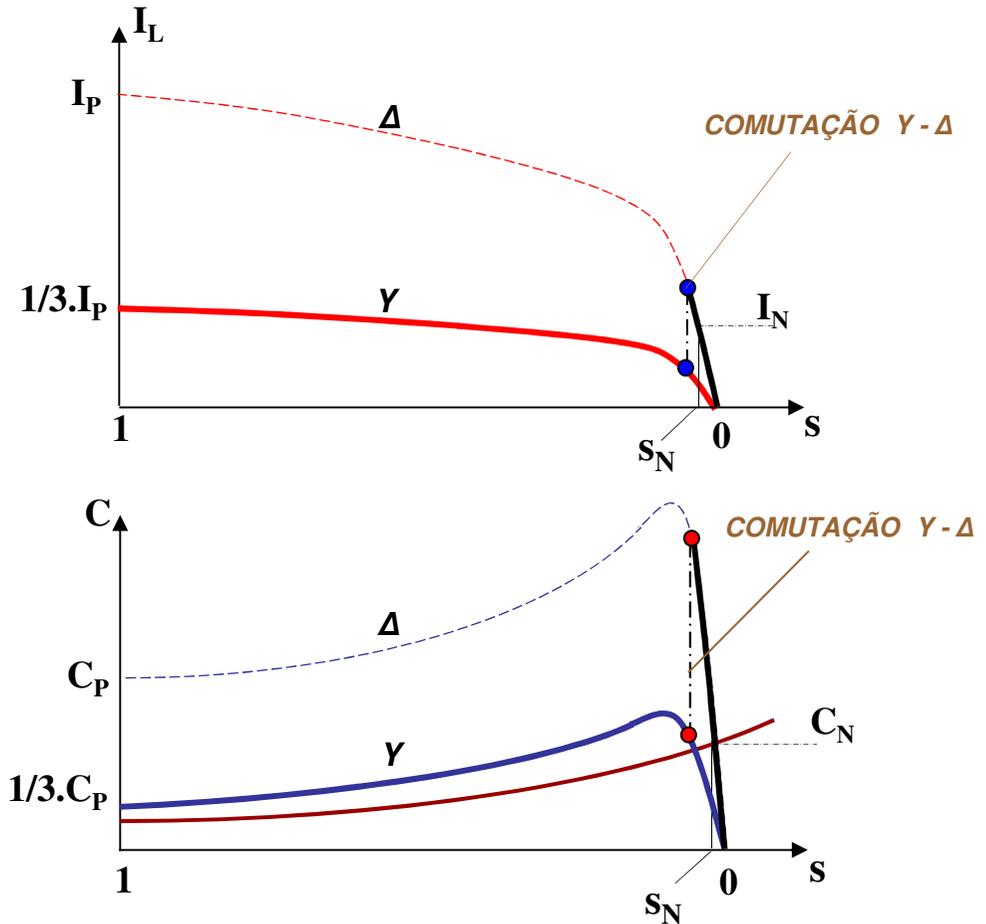
MÉTODOS DE PARTIDA DOS MOTORES ASSÍNCRONOS - MOTORES DE GAIOLA

PARTIDA ESTRELA – TRIÂNGULO → Y-Δ



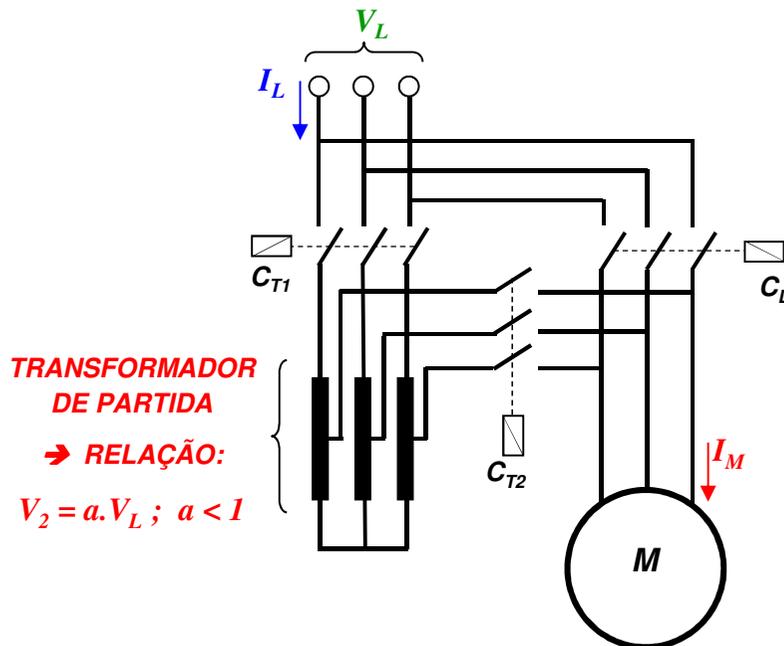
MÉTODO UTILIZADO PARA MOTORES MÉDIOS EM BAIXA TENSÃO ( 220 – 380 – 440 V )

TENSÃO NOMINAL DO MOTOR NA LIGAÇÃO “Δ” IGUAL À TENSÃO DA LINHA



CORRENTE NA LINHA REDUZIDA A 1/3 DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO DO MOTOR NA PARTIDA

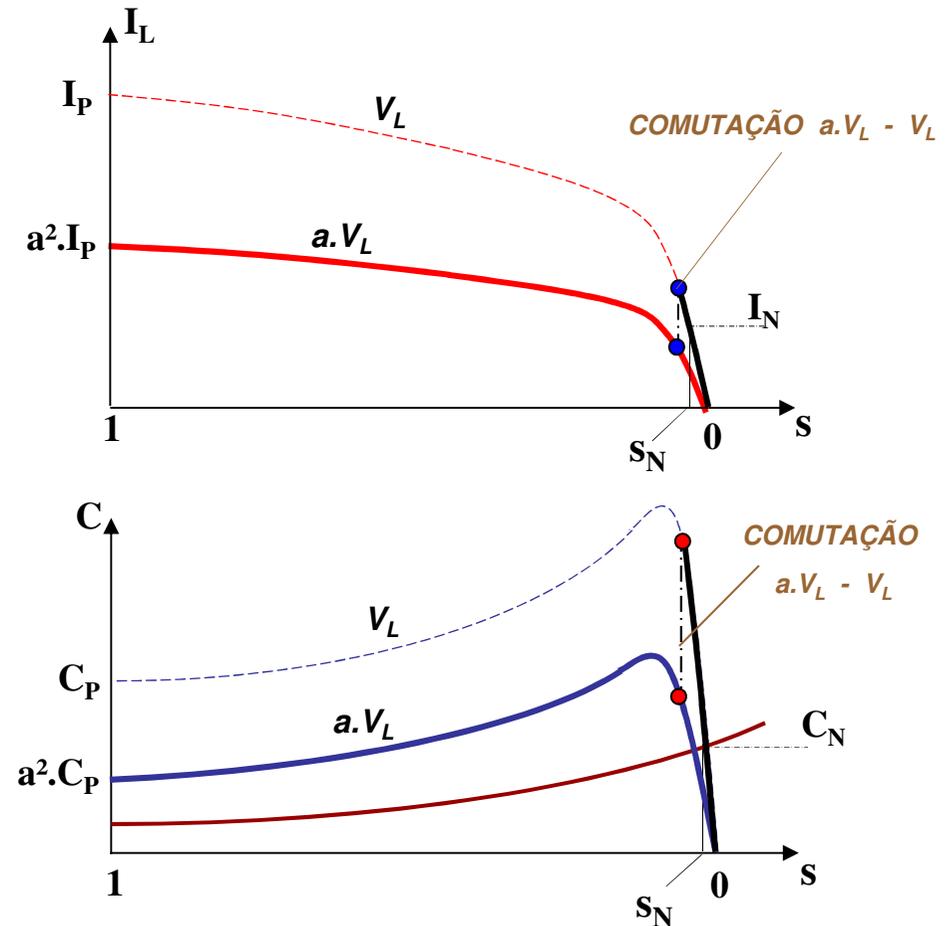
CURVA DE TORQUE ATENUADA PARA 1/3 DOS SEUS VALORES PLENOS EM QUALQUER “s”

**MÉTODOS DE PARTIDA DOS MOTORES ASSÍNCRONOS - MOTORES DE GAIOLA****PARTIDA COM CHAVE COMPENSADORA**

**MÉTODO UTILIZADO PARA MOTORES MÉDIOS EM BAIXA TENSÃO ( 220 – 380 – 440 V )**

**MÉTODO UTILIZADO PARA MOTORES GRANDES EM MÉDIA TENSÃO ( 2,3 - 3,3 - 4,16 - 6,6 - 13,8 kV )**

**AUTOTRANSFORMADOR COMPENSADOR COM RELAÇÕES TÍPICAS:  $a = 0,5$  ;  $a = 0,65$  ;  $a = 0,8$**



**CORRENTE NA LINHA REDUZIDA POR FATOR  $a^2$  EM RELAÇÃO À CORRENTE DE CURTO CIRCUITO NA PARTIDA**

**CURVA DE TORQUE ATENUADA POR FATOR  $a^2$  EM RELAÇÃO AOS VALORES PLENOS EM QUALQUER "s"**

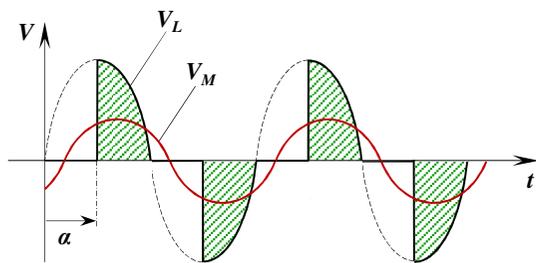
**MÉTODOS DE PARTIDA DOS MOTORES ASSÍNCRONOS - MOTORES DE GAIOLA**

**PARTIDA COM "SOFT-STARTER"**

**CONVERSOR CA-CA  
TIRISTORIZADO CONTROLÁVEL**

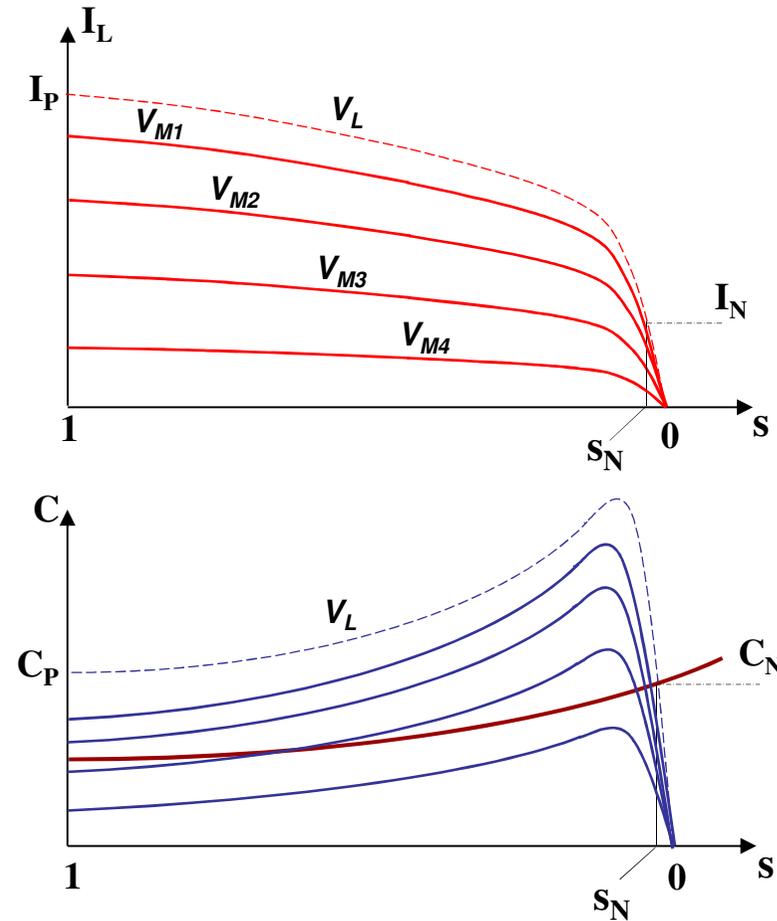
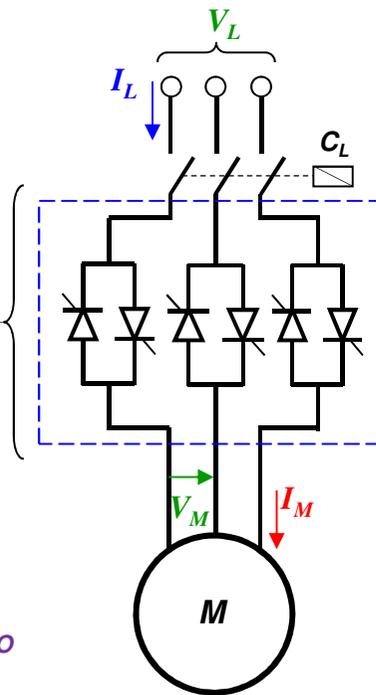
$$V_M = \cos(\alpha / 2) \cdot V_L$$

$\alpha$  : ÂNGULO DE DISPARO DAS CHAVES



CONDUÇÃO DAS CHAVES COMANDADA PELO ÂNGULO DE DISPARO

→  $V_M$  : FUNDAMENTAL DA TENSÃO RECORTADA



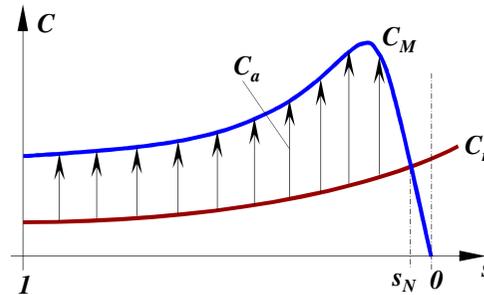
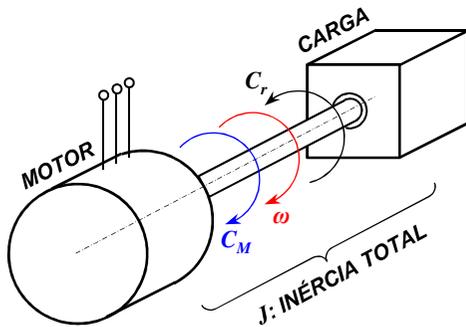
**MÉTODO UTILIZADO PARA MOTORES PEQUENOS E MÉDIOS EM BAIXA TENSÃO ( 220 – 380 – 440 V )**

**AJUSTE FINO DA TENSÃO DE SAÍDA, POR CONTROLE ELETRÔNICO → CARACTERÍSTICAS DO MOTOR AJUSTADAS SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DA CARGA**

**CORRENTE NA LINHA REDUZIDA PROPORCIONALMENTE À ATENUAÇÃO DA TENSÃO APLICADA AO MOTOR**

**CURVA DE TORQUE ATENUADA QUADRATICAMENTE COM A REDUÇÃO DA TENSÃO NOS TERMINAIS DO MOTOR**

**TRANSITÓRIO DE PARTIDA - ENERGIA DESENVOLVIDA NO ROTOR DURANTE A ACELERAÇÃO**



**CONJUGADO DE ACELERAÇÃO :**

$$C_a = C_M - C_r$$

$$C_a = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

$$\omega = (1 - s) \cdot \omega_s \rightarrow d\omega = -\omega_s \cdot ds$$

$$C_a = -J \cdot \omega_s \cdot \frac{ds}{dt}$$

**CONJUGADO MOTOR:**

$$C_M = \frac{P_{tr}}{\omega_s} = \frac{m \cdot r'_2 \cdot I_2'^2}{s \cdot \omega_s} = C_a + C_r$$

$$\frac{m \cdot r'_2 \cdot I_2'^2}{s \cdot \omega_s} = -J \cdot \omega_s \cdot \frac{ds}{dt} + C_r \quad ; \quad \text{MULTIPLICANDO AMBOS OS MEMBROS POR } : s \cdot \omega_s \rightarrow \underbrace{m \cdot r'_2 \cdot I_2'^2}_{\text{PERDA JOULE NO ROTOR}} = -J \cdot \omega_s^2 \cdot s \cdot \frac{ds}{dt} + C_r \cdot s \cdot \omega_s$$

**PERDA JOULE NO ROTOR**

$$m \cdot r'_2 \cdot I_2'^2 \cdot dt = -J \cdot \omega_s^2 \cdot s \cdot ds + C_r \cdot s \cdot \omega_s \cdot dt \quad \Rightarrow \quad \underbrace{\int_0^{ta} m \cdot r'_2 \cdot I_2'^2 \cdot dt}_{\text{ENERGIA "DISSIPADA" NO ROTOR : } E_d} = \int_1^0 -J \cdot \omega_s^2 \cdot s \cdot ds + \int_0^{ta} C_r \cdot s \cdot \omega_s \cdot dt$$

**ENERGIA "DISSIPADA" NO ROTOR :  $E_d$**

$$E_d = -J \cdot \omega_s^2 \cdot \int_1^0 s \cdot ds + C_r \cdot \int_0^{ta} (\omega_s - \omega) \cdot dt$$

$E_d$  : ENERGIA DESENVOLVIDA NO ROTOR QUE SE CONVERTE EM CALOR

$t_a$  : TEMPO DE ACELERAÇÃO ( $\omega = 0$  ATÉ  $\omega = \omega_n \approx \omega_s$ )

$C_r$  : FUNÇÃO EM GERAL NÃO CONHECIDA

**TRANSITÓRIO DE PARTIDA - ENERGIA DESENVOLVIDA NO ROTOR DURANTE A ACELERAÇÃO**

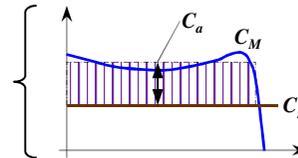
$$E_d = -J \cdot \omega_s^2 \cdot \int_1^0 s \cdot ds + C_r \cdot \int_0^{t_a} (\omega_s - \omega) \cdot dt = -J \cdot \omega_s^2 \cdot \left[ \frac{s^2}{2} \right]_1^0 + C_r \cdot \int_0^{t_a} (\omega_s - \omega) \cdot dt$$

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_s^2 + C_r \cdot \int_0^{t_a} (\omega_s - \omega) \cdot dt \rightarrow \text{QUANDO } C_r = 0 \text{ (PARTIDA REATIVA MECÂNICA)} \rightarrow E_d = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_s^2 = E_{cin}$$

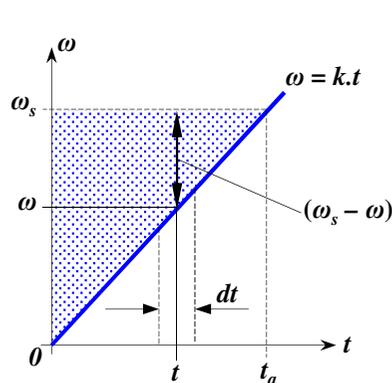
$E_{cin}$  : ENERGIA CINÉTICA ARMAZENADA NO SISTEMA ROTATIVO

QUANDO  $C_r \neq 0 \rightarrow$  CASO PARTICULAR DE  $C_r = cte.$  E  $C_a \approx cte.$

PARTE DA ENERGIA É UTILIZADA PARA SUPRIR A CARGA MECÂNICA ATIVA



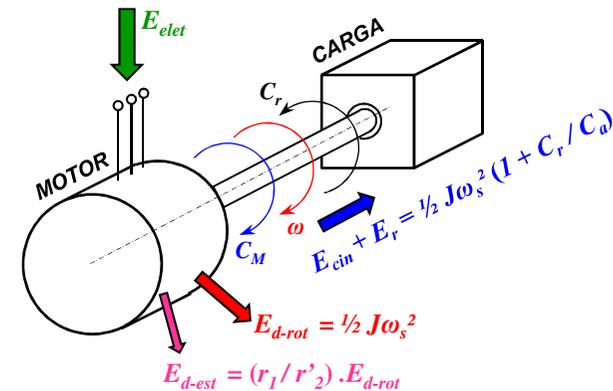
$$C_a = cte. \rightarrow C_a = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = cte. \rightarrow \frac{d\omega}{dt} = cte. = \frac{\omega_s}{t_a} \rightarrow C_a = J \cdot \frac{\omega_s}{t_a} \rightarrow t_a = J \cdot \frac{\omega_s}{C_a} \rightarrow \omega = k \cdot t$$



$$\int_0^{t_a} (\omega_s - \omega) \cdot dt = \frac{\omega_s \cdot t_a}{2} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_s^2 \cdot \frac{1}{C_a}$$

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_s^2 + C_r \cdot \frac{1}{C_a} \cdot \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_s^2$$

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_s^2 \cdot \left( 1 + \frac{C_r}{C_a} \right)$$



ENERGIA DESENVOLVIDA NO ROTOR ( SISTEMA ADIABÁTICO )  $\rightarrow$  CALOR ACUMULADO QUE ELEVA A TEMPERATURA DO MESMO

**MÉTODOS DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DOS MOTORES DE INDUÇÃO**

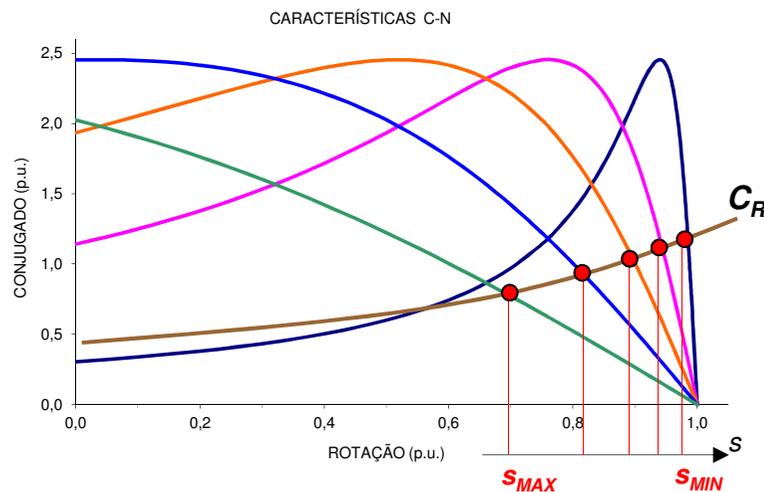
**VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO EIXO DO MOTOR ASSÍNCRONO :**

$\rightarrow \omega_R = (1 - s) \cdot \omega_s$   
 $\rightarrow \omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / p$

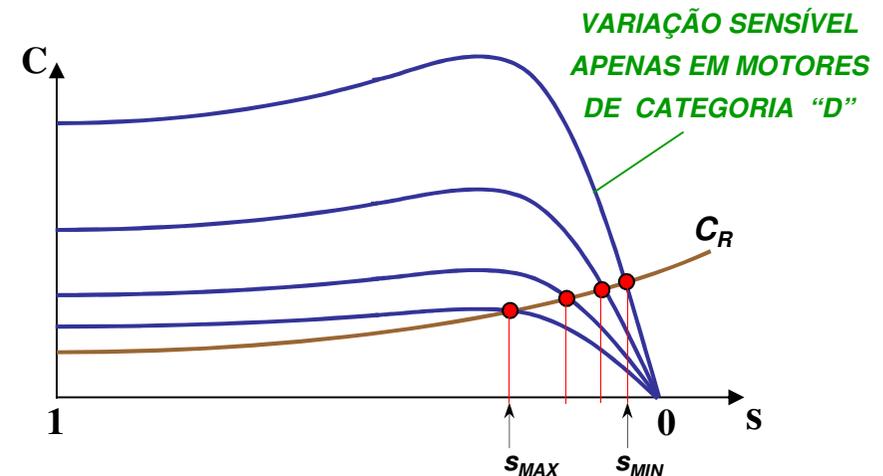
**3 MÉTODOS POSSÍVEIS DE VARIAÇÃO DA ROTAÇÃO:**

$\rightarrow$  **POR ESCORREGAMENTO** - MÉTODO **DISSIPATIVO**  
 $\rightarrow$  **POR COMUTAÇÃO DO NÚMERO DE PÓLOS** - VARIAÇÃO **DISCRETA**  
 $\rightarrow$  **POR ALIMENTAÇÃO COM FREQUÊNCIA VARIÁVEL** - VARIAÇÃO **CONTÍNUA IDEAL**

**VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR ESCORREGAMENTO  $\rightarrow$  POSSÍVEL APENAS EM CARGA**



**MOTOR DE ANÉIS  $\rightarrow$  POR VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA NO REOSTATO DE ESCORREGAMENTO EXTERNO**



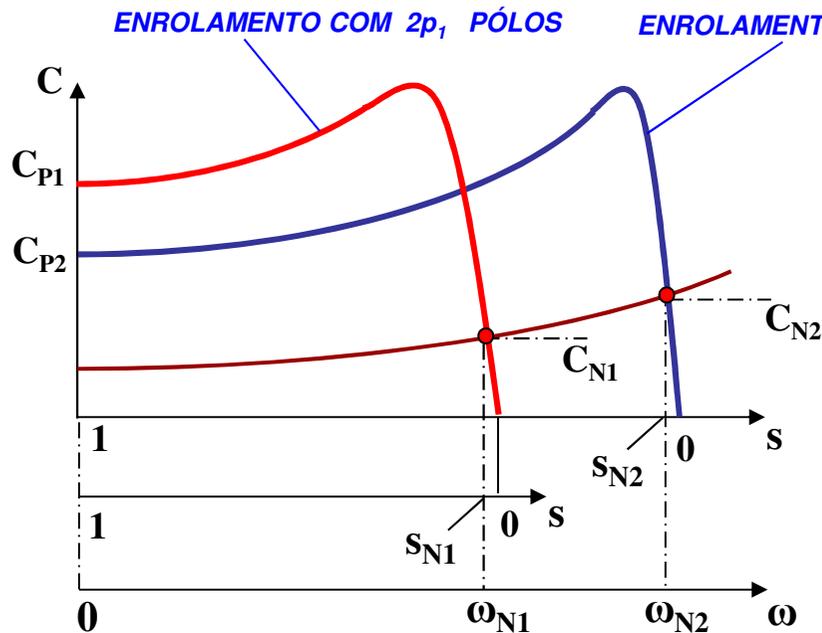
**MOTOR DE GAIOLA  $\rightarrow$  POR VARIAÇÃO DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR**

**VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR COMUTAÇÃO DO NÚMERO DE PÓLOS DO ENROLAMENTO**

**MOTOR DE INDUÇÃO COM MAIS DE UM ENROLAMENTO NO ESTATOR → DUAS OU MAIS POLARIDADES**

**ENROLAMENTOS COM DIFERENTES NÚMEROS DE PÓLOS COMPARTILHAM O MESMO NÚMERO DE RANHURAS DO NÚCLEO DO ESTATOR**

**ROTOR RESPONDE AO ENROLAMENTO QUE ESTIVER ALIMENTADO, DEFININDO UM MOTOR COM O NÚMERO DE PÓLOS CORRESPONDENTE**

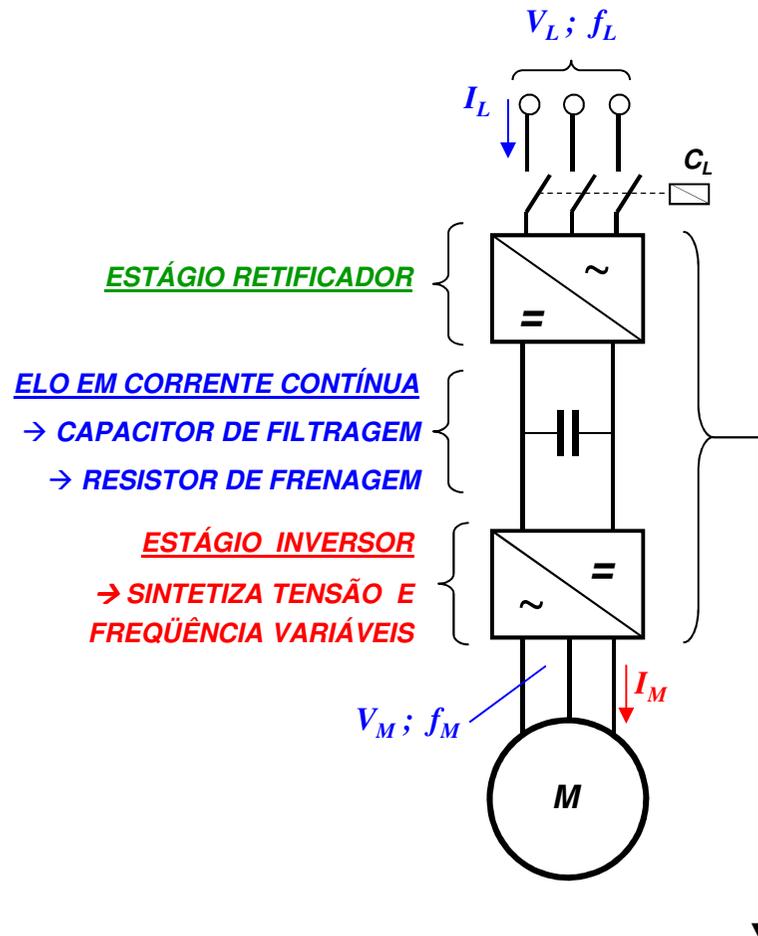


**RAZÃO DAS POTÊNCIAS EM CADA POLARIDADE APROXIMADAMENTE INVERSAMENTE PROPORCIONAL AO NÚMERO DE PÓLOS**

**POLARIDADES TÍPICAS:**

**2/4 - 4/8 - 4/6 - 6/8 - 4/12 - 6/24**

**4/32 - 2/4/16 - 2/8/24**

**VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR****NO MOTOR DE INDUÇÃO:**

→ **CAMPO ROTATIVO COM VELOCIDADE SÍNCRONA DADA POR:**

$$\omega_s = 2.\pi . f_1 / p$$

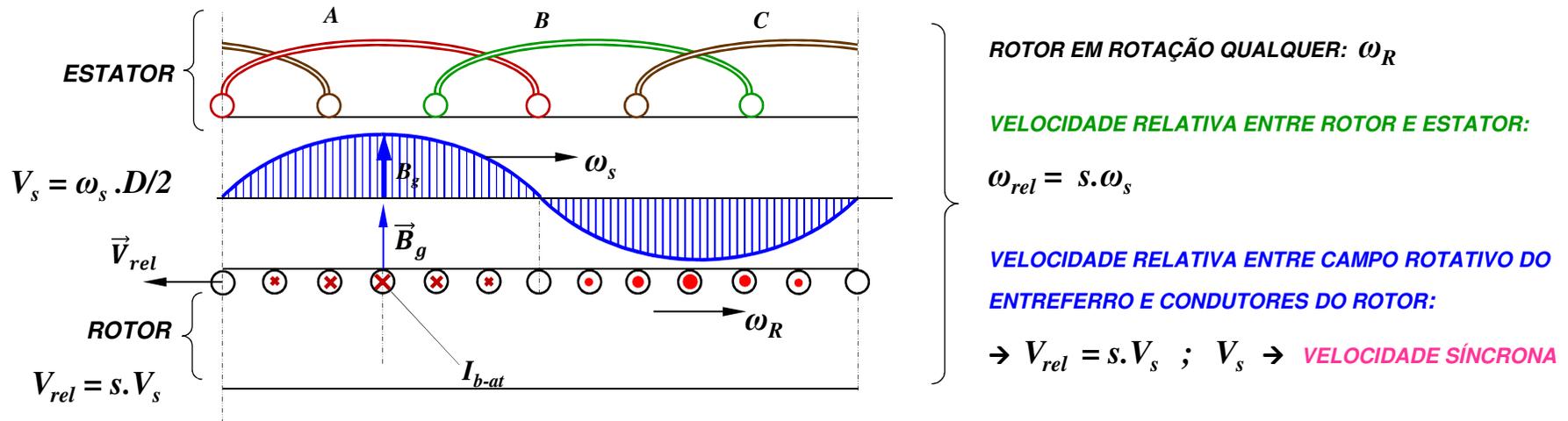
→ **PARA N° DE PÓLOS FIXADOS NA CONSTRUÇÃO, A ROTAÇÃO SÍNCRONA É FUNÇÃO EXCLUSIVA DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ENROLAMENTO TRIFÁSICO DO ESTATOR**

→ **VELOCIDADE DO ROTOR RESULTA DA INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO COM OS CONDUTORES DO ROTOR, NUM DADO ESCORREGAMENTO**

**CONVERSOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL → A PARTIR DA TENSÃO FIXA DA REDE, PROMOVE NOS TERMINAIS DO MOTOR, TENSÃO E FREQUÊNCIA TRIFÁSICAS, VARIÁVEIS E CONTROLADAS.**

**SINTETIZAÇÃO DA ONDA DE TENSÃO NA FREQUÊNCIA DESEJADA → A PARTIR DE CHAVEAMENTO DA TENSÃO CONTÍNUA NO ELO C.C., COM CHAVES ELETRÔNICAS (SCR - GTO - IGBT)**

VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR



GARANTIA DA DISPONIBILIDADE DE CONJUGADO DESENVOLVIDO PELO MOTOR DE INDUÇÃO:

$\rightarrow C = k \cdot B_g \cdot L \cdot I_{b-at} \rightarrow$  PARA CORRENTE DEFINIDA (NO VALOR NOMINAL p.ex.) NO ROTOR  $\rightarrow B_g = cte.$

$\rightarrow$  CONSERVAÇÃO DA MAGNITUDE DO CAMPO ROTATIVO  $\rightarrow$  CONSERVAÇÃO DO FLUXO POR PÓLO

$\rightarrow V = 4,44 \cdot f \cdot N_F \cdot \Phi \rightarrow$  PARA  $\Phi = cte. \rightarrow$   $V/f = cte$

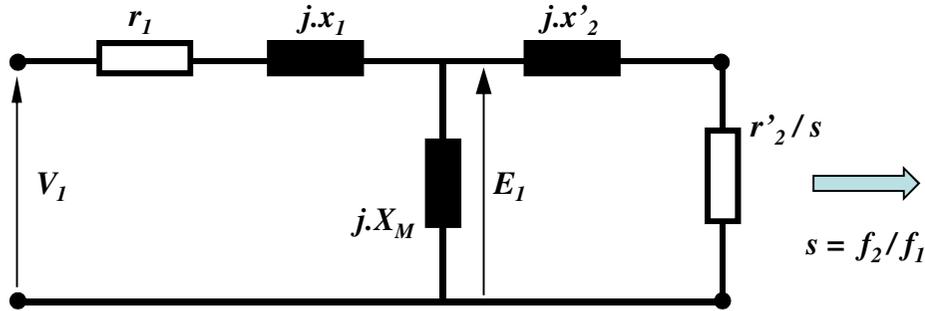
$s = (\omega_s - \omega_R) / \omega_s$   
 $\omega_s = 2\pi \cdot f_1 / p$

$f_1$  VARIÁVEL  $\rightarrow \omega_s$  VARIÁVEL  
 $\rightarrow s$  "PERDE O CARÁTER ABSOLUTO COMO VARIÁVEL INDEPENDENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO"

INVERSOR DEVE SINTETIZAR TENSÃO E FREQUÊNCIA VARIÁVEIS, PORÉM DEVE CONSERVAR SUA RAZÃO CONSTANTE

VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR

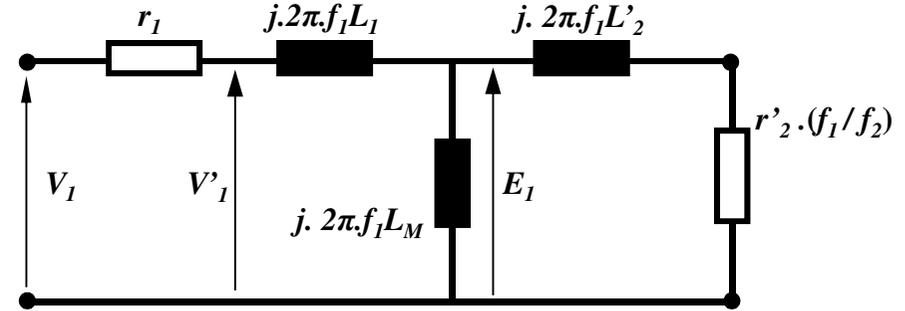
MODELO CLÁSSICO DO MOTOR DE INDUÇÃO



VARIÁVEL INDICADORA DO ESTADO DE CARGA : "s"

$$C = \frac{3 \cdot \alpha^2 V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'_2}{s}}{\left[ \left( \alpha \cdot r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_{cc})^2 \right]}$$

MODELO ADAPTADO PARA OPERAÇÃO COM  $f_1$  VARIÁVEL



VARIÁVEL INDICADORA DO ESTADO DE CARGA : "f2"

$$C = \frac{3 \cdot \alpha^2 V_1^2 \cdot p}{2\pi f_1} \cdot \frac{r'_2 \cdot \frac{f_1}{f_2}}{\left[ \left( \alpha \cdot r_1 + r'_2 \cdot \frac{f_1}{f_2} \right)^2 + (2\pi f_1 L_{cc})^2 \right]}$$

DESCONSIDERANDO INICIALMENTE A QUEDA DE TENSÃO EM  $r_1$  → SUBSTITUIR  $V_1$  POR  $V'_1$  [  $\alpha = X_M / (x_1 + X_M) \approx 1$  ]

$$C = \frac{3p}{2\pi f_2} \cdot \frac{r'_2}{\left[ \left( \frac{r'_2}{f_2} \right)^2 + (2\pi L_{cc})^2 \right]} \cdot \left( \frac{V'_1}{f_1} \right)^2 \left. \vphantom{C} \right\} \begin{array}{l} [1] \text{ CONJUGADO DISPONÍVEL NO EIXO PARA QUALQUER} \\ \text{VALOR DE } f_2, \text{ OU SEJA, QUALQUER VALOR DE CARGA} \end{array}$$

$$C_{MAX} = \frac{3 \cdot \alpha^2 V_1^2}{2 \cdot \omega_s} \cdot \frac{1}{\left[ \alpha \cdot r_1 + \sqrt{(\alpha \cdot r_1)^2 + (x_{cc})^2} \right]} \cong \frac{3 \cdot V_1^2 \cdot p}{2 \cdot 2\pi f_1} \cdot \frac{1}{2\pi f_1 \cdot L_{cc}} = \frac{3p}{8 \cdot \pi^2 \cdot L_{cc}} \cdot \left( \frac{V'_1}{f_1} \right)^2 \left. \vphantom{C_{MAX}} \right\} [2] \text{ CONJUGADO MÁXIMO DESENVOLVIDO}$$

$$s_C = \frac{r'_2}{\sqrt{(\alpha \cdot r_1)^2 + (x_{cc})^2}} \cong \frac{r'_2}{x_{cc}} = \frac{r'_2}{2\pi \cdot f_1 \cdot L_{cc}} = \frac{r'_2}{2\pi \cdot L_{cc}} \cdot \left( \frac{1}{f_1} \right) \left. \vphantom{s_C} \right\} [3] \text{ ESCORREGAMENTO CRÍTICO}$$

VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR

$s = 1 \rightarrow f_2 = f_1 \quad (r'_2 \ll x_{cc}) \quad \rightarrow [4] \text{ CONJUGADO DE PARTIDA}$

$$C_p = \frac{3 \cdot \alpha^2 V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{r'_2}{[(\alpha \cdot r_1 + r'_2)^2 + (x_{cc})^2]} = \frac{3 \cdot V_1'^2 \cdot p}{2\pi \cdot f_1} \cdot \frac{r'_2}{[(r'_2)^2 + (2\pi \cdot f_1 \cdot L_{cc})^2]} = \frac{3p \cdot r'_2}{8\pi^3 \cdot L_{cc}^2} \cdot \left(\frac{V_1'}{f_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{f_1}\right)$$

CONCLUSÕES PRELIMINARES:

**DESPREZANDO A QUEDA EM  $r_1$  E MANTENDO CONSTANTE A RAZÃO  $V_1'/f_1$  RESULTA:**

[1] **CONJUGADO DISPONÍVEL CONSTANTE PARA O MESMO VALOR DE  $f_2$  (CADA PONTO DE CARGA) EM QUALQUER FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO  $f_1$**

[2] **CONJUGADO MÁXIMO INVARIANTE PARA QUALQUER FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO  $f_1$**

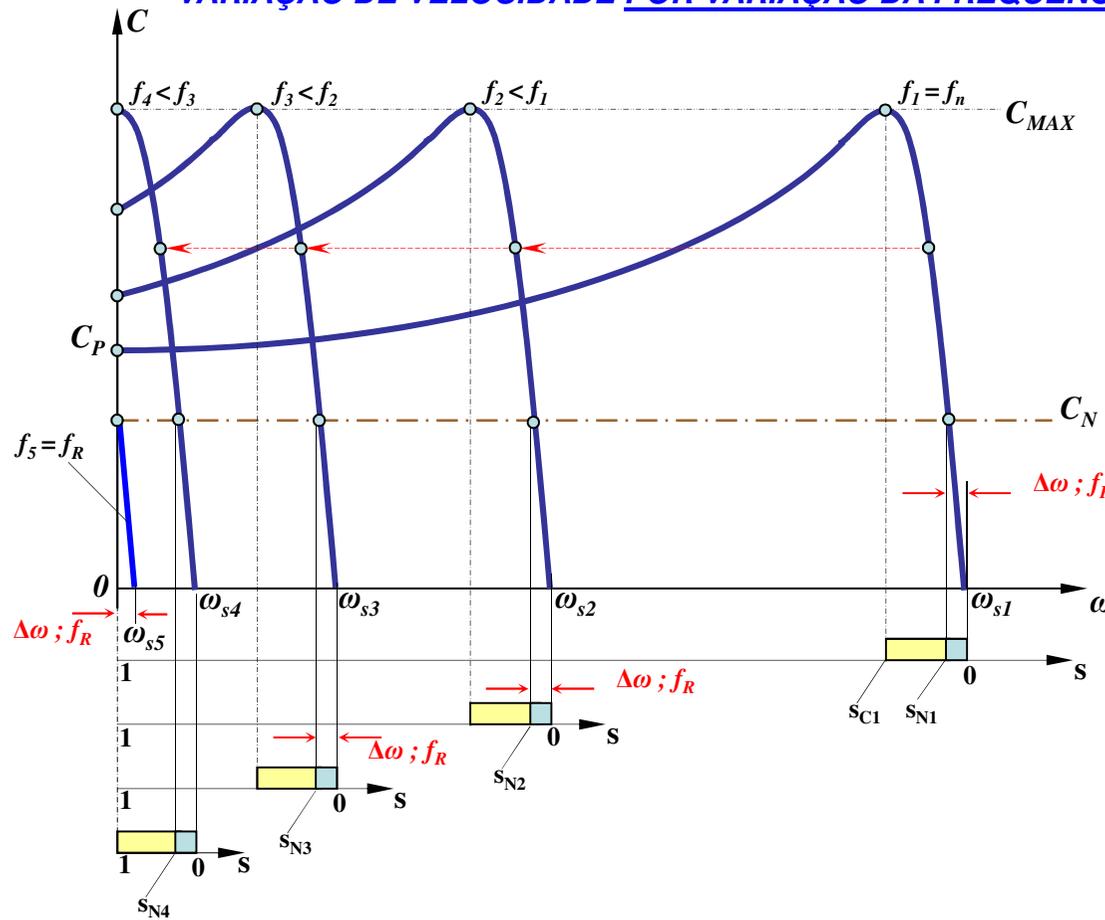
[3] **ESCORREGAMENTO CRÍTICO AUMENTA COM A REDUÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO  $\rightarrow s_c = k \cdot (1/f_1)$**

[4] **CONJUGADO DE PARTIDA AUMENTA COM A REDUÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO  $\rightarrow C_p = k \cdot (1/f_1)$**

**A FREQUÊNCIA ROTÓRICA  $f_2 = f_R$  É A VARIÁVEL INDEPENDENTE QUE INDICA A CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO DO MOTOR**

**$\rightarrow f_2 = \Delta\omega / 2\pi$  ;  $\Delta\omega = \omega_s - \omega_r$  ;  $\omega_s = 2\pi \cdot f_1 / p$**

**VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR**



**CARACTERÍSTICAS DO MOTOR DE INDUÇÃO, ALIMENTADO COM FREQUÊNCIA VARIÁVEL,  $V_1/f_1 = cte.$**

**→ CURVAS DE CONJUGADO SE DESLOCAM PARALELAMENTE AO EIXO DA ROTAÇÃO**

**→  $C = cte.$  →  $\Delta\omega = cte.$**

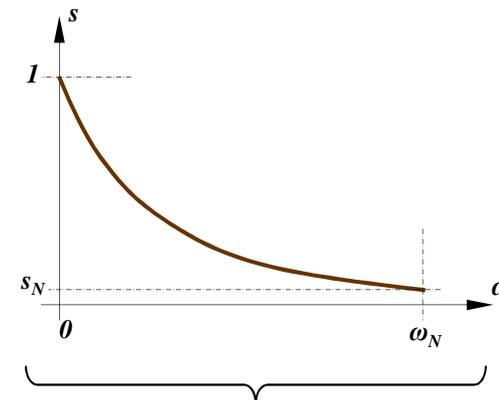
**FREQUÊNCIA REDUZIDA PROGRESSIVAMENTE A PARTIR DE  $f_n$  :**

**→ CURVAS SE DESLOCAM PONTO A PONTO PARA A ESQUERDA**

**QUANDO A FREQUÊNCIA É REDUZIDA ATÉ  $f_1 = f_R$**

**→  $\omega_s = \Delta\omega$  ;  $s_n = 1$**

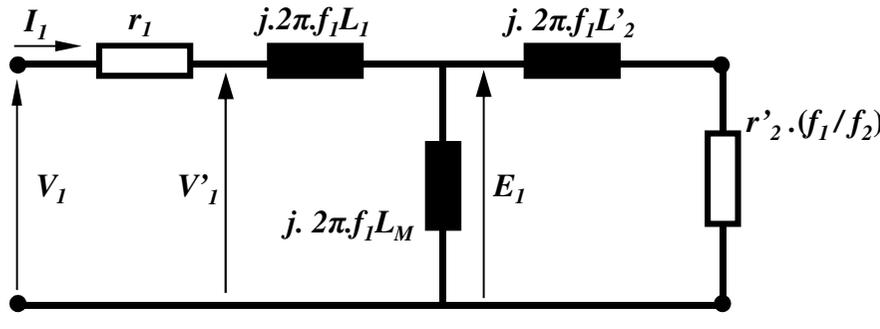
**→  $C_N$  ACONTECE NA PARTIDA, COM  $I_N$**



**COMPORTAMENTO DO ESCORREGAMENTO EM CARGA PARA TORQUE CONSTANTE, COM ALIMENTAÇÃO SOB FREQUÊNCIA VARIÁVEL**

**VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR**

**CONSIDERANDO AGORA A QUEDA DE TENSÃO EM  $r_1 \rightarrow$  TENSÃO NOS TERMINAIS DE FATO É  $V_1$  E NÃO  $V'_1$**



**EM FREQUÊNCIAS ELEVADAS  $\rightarrow$  TENSÕES ELEVADAS :**

$$\frac{V'_1}{f_1} = \frac{V_1 - r_1 \cdot I_1}{f_1} = \frac{V_1 - \Delta V_1}{f_1} \cong \frac{V_1}{f_1}$$

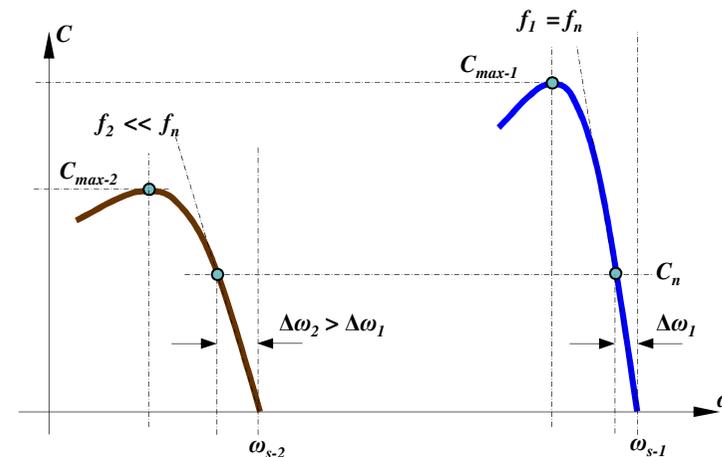
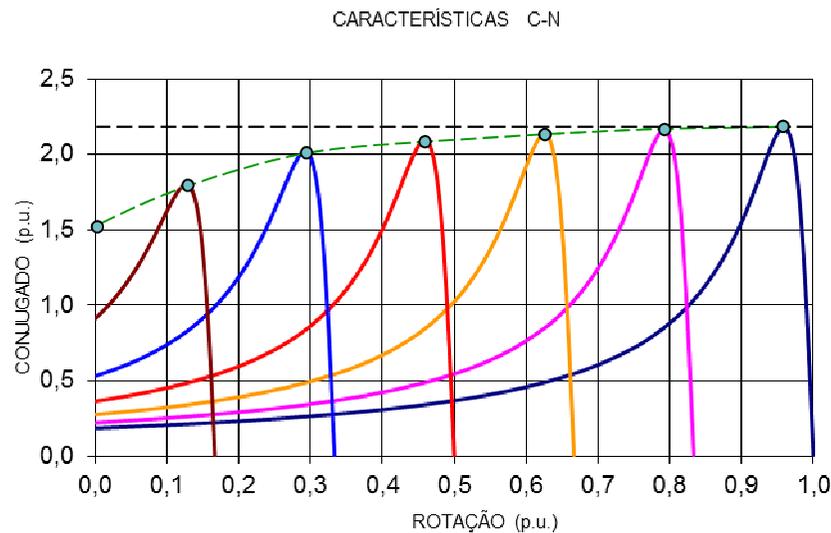
**EM FREQUÊNCIAS BAIXAS  $\rightarrow$  TENSÕES REDUZIDAS**

$$\Delta V_1 \approx V_1 \rightarrow \frac{V'_1}{f_1} = \frac{V_1 - \Delta V_1}{f_1} < \frac{V_1}{f_1}$$

**ALIMENTADO EM BAIXA FREQUÊNCIA  $\rightarrow \left(\frac{V'_1}{f_1}\right)^2 \ll \left(\frac{V_1}{f_1}\right)^2 ; C = K \cdot \left(\frac{V'_1}{f_1}\right)^2$**

**MANTIDA CONSTANTE A RAZÃO  $V_1/f_1$**

**$\rightarrow$  FORTE DEGRADAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE TORQUE EM BAIXA FREQUÊNCIA, DEVIDO À ATENUAÇÃO DO FLUXO NO ENTEFERRO**



**VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR**

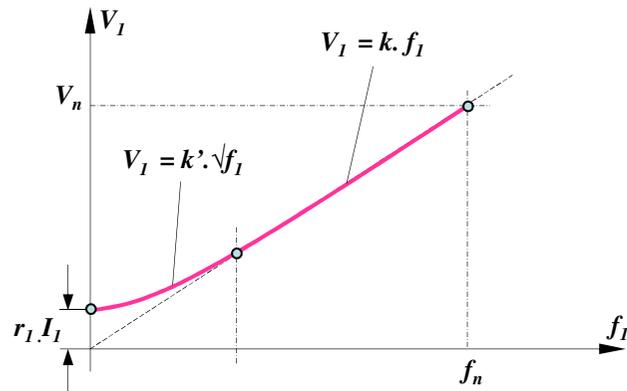
**COMPENSAÇÃO DA QUEDA DE TENSÃO EM  $r_1$  → INCREMENTO DA RAZÃO  $V_1/f_1$  → MANUTENÇÃO DE  $C_{max} = cte.$**

$$C_{MAX} \cong \frac{3 \cdot V_1^2}{2 \cdot \omega_s} \cdot \frac{1}{\left[ r_1 + \sqrt{(r_1)^2 + (x_{cc})^2} \right]} \cong \frac{3 \cdot V_1^2 \cdot p}{2 \cdot 2\pi f_1} \cdot \frac{1}{\left[ r_1 + \sqrt{(r_1)^2 + (2\pi \cdot f_1 \cdot L_{cc})^2} \right]}$$

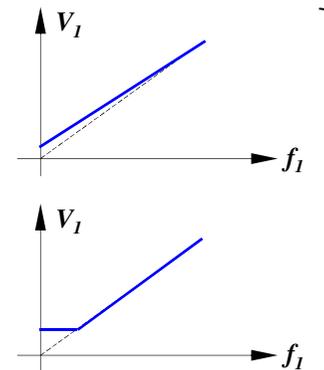
$$V_1 = \sqrt{\frac{C_{MAX} \cdot 4\pi \cdot f_1}{3p} \cdot \left( r_1 + \sqrt{(r_1)^2 + (2\pi \cdot f_1 \cdot L_{cc})^2} \right)}$$

[ 1 ] **PARA FREQUÊNCIAS ELEVADAS :**  $2\pi \cdot f_1 \cdot L_{cc} \gg r_1 \rightarrow V_1 = \left[ \sqrt{\frac{C_{MAX} \cdot 8\pi^2 \cdot L_{cc}}{3p}} \right] \cdot f_1 \rightarrow \frac{V_1}{f_1} = cte.$

[ 2 ] **PARA FREQUÊNCIAS REDUZIDAS :**  $r_1 > 2\pi \cdot f_1 \cdot L_{cc} \rightarrow V_1 \cong \left[ \sqrt{\frac{C_{MAX} \cdot 8\pi \cdot r_1}{3p}} \right] \cdot \sqrt{f_1} \rightarrow \frac{V_1}{f_1} = k \cdot \frac{1}{\sqrt{f_1}}$



**ANDAMENTO DA RAZÃO  $V/f$  PARA COMPENSAÇÃO DA QUEDA NA RESISTÊNCIA DO ESTATOR**



**PARAMETRIZAÇÕES USUAIS DE INVERSORES PARA COMPENSAÇÃO DA QUEDA EM  $r_1$**

**VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR**

**VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA ACIMA DA FREQUÊNCIA NOMINAL:**

**PERMITIDA DESDE QUE A TENSÃO PERMANEÇA CONSTANTE NO SEU VALOR NOMINAL**

→ **LIMITAÇÃO IMPOSTA PELO DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA ISOLANTE**

→ **LIMITAÇÃO DEVIDA À TENSÃO DISPONÍVEL NO ELO CC DO INVERSOR**

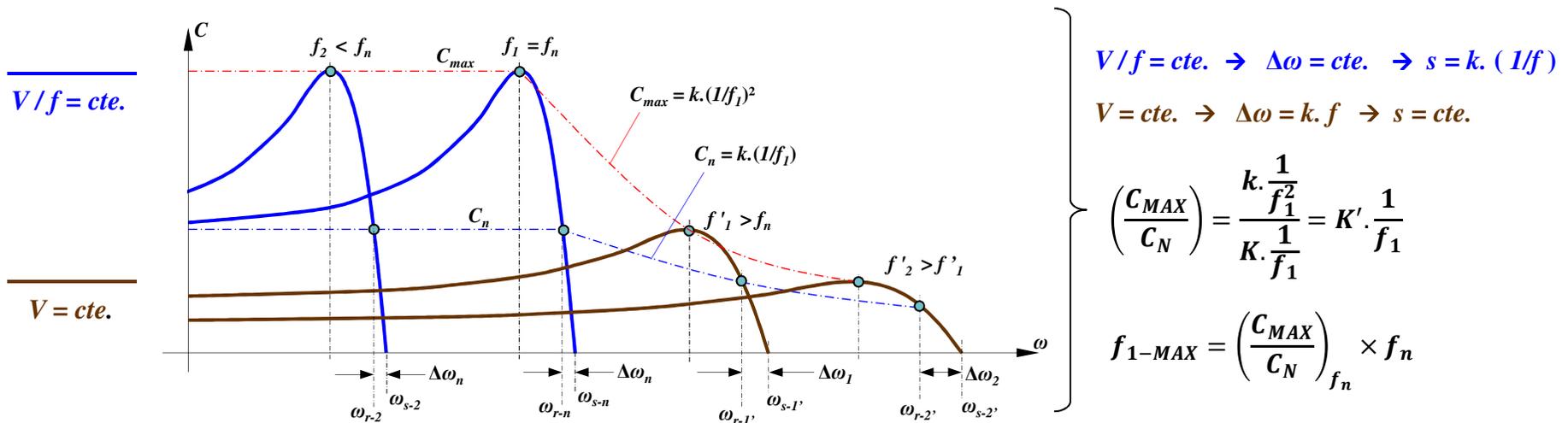
→ **AUMENTO DE  $f_1$  COM  $V_1 = cte.$  → ATENUAÇÃO DO FLUXO NO ENTEFERRO** ( $V = 4,44 \cdot f \cdot N_f \cdot \Phi_p$ )

→ **IMPACTO NO CONJUGADO MÁXIMO**

→ **IMPACTO NO CONJUGADO DISPONÍVEL NO EIXO**

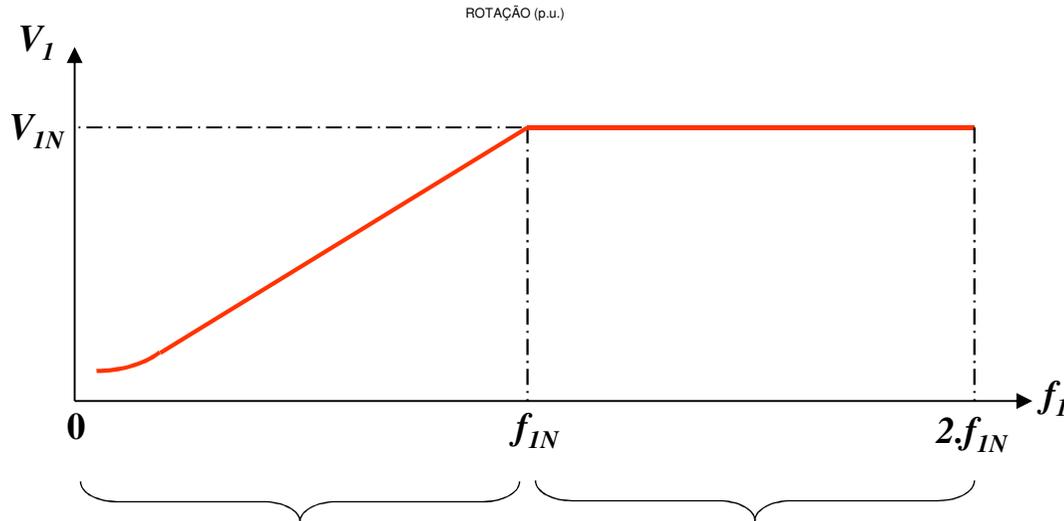
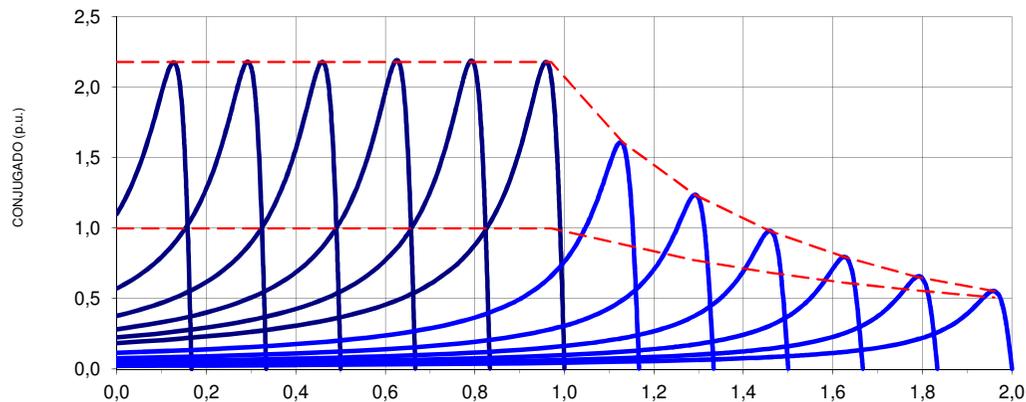
$$C_{MAX} = \frac{3 \cdot V_1^2}{2 \cdot \omega_s} \cdot \frac{1}{\left[ r_1 + \sqrt{(r_1)^2 + (2\pi \cdot f_1 \cdot L_{cc})^2} \right]} ; f_1 > f_n \rightarrow 2\pi \cdot f_1 \cdot L_{cc} \gg r_1 \rightarrow C_{MAX} = \frac{3 \cdot V_1^2 \cdot p}{8\pi^2 \cdot L_{cc}} \cdot \frac{1}{f_1^2} = \boxed{k \cdot \frac{1}{f_1^2}}$$

$$C_N = k \cdot B_g \cdot L \cdot I_N \rightarrow \text{para } V_1 = cte. \rightarrow \Phi_p = k' \cdot \frac{1}{f_1} \rightarrow B_g = k'' \cdot \frac{1}{f_1} \rightarrow \text{para conservar } I_N \rightarrow C_N = k \cdot k'' \cdot \frac{1}{f_1} \cdot L \cdot I_N = \boxed{K \cdot \frac{1}{f_1}}$$



**VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR**

CARACTERÍSTICAS C-N



**OPERAÇÃO A TORQUE  
CONSTANTE**

**OPERAÇÃO A POTÊNCIA  
CONSTANTE**

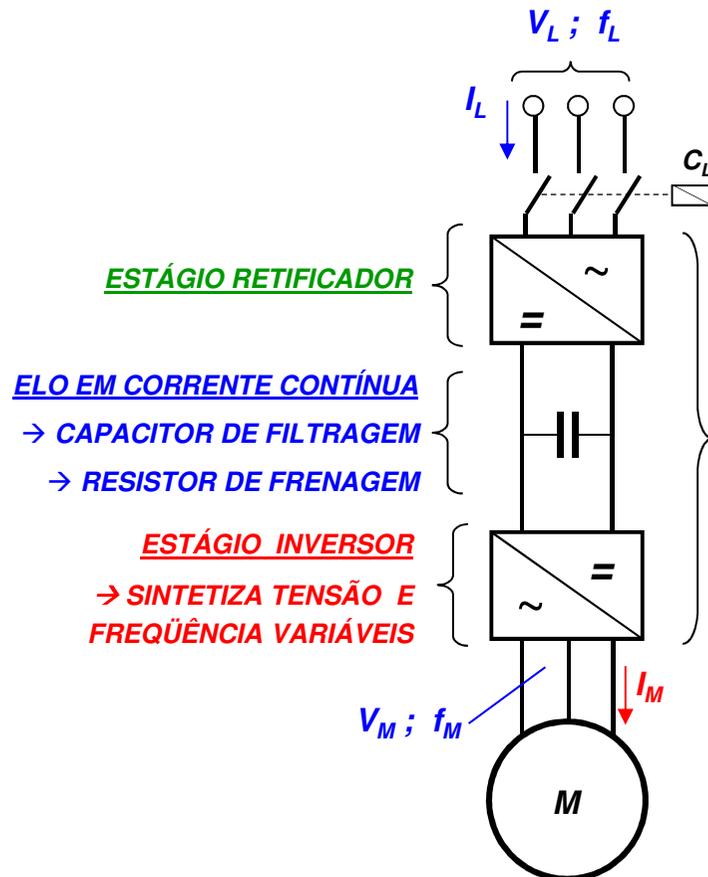
**EVOLUÇÃO DA TENSÃO E  
FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO  
MOTOR ASSÍNCRONO, OPERADO EM  
VELOCIDADE VARIÁVEL**

**VARIAÇÃO ABAIXO E ACIMA DA  
FREQUÊNCIA NOMINAL**

**“CONTROLE ESCALAR” DO MOTOR DE  
INDUÇÃO**

**→ COMPORTAMENTO SIMILAR AO DO  
MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA  
OPERADO COM VARIAÇÃO PELA  
ARMADURA E VARIAÇÃO PELO CAMPO**

## TOPOLOGIA TÍPICA DO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL



### **ESTÁGIO RETIFICADOR:**

**EM GERAL, PONTE RETIFICADORA NÃO CONTROLADA A DIODOS**

**PARA CONVERSORES REGENERATIVOS, ESTÁGIO RETIFICADOR DEVE SER DE 4 QUADRANTES**

### **ELO DE CORRENTE CONTÍNUA:**

**CAPACITOR PARA DIMINUIR ONDULAÇÃO DA TENSÃO RETIFICADA E PARA SUPRIR REATIVOS DO MOTOR**

**RESISTOR PARA FRENAGEM DINÂMICA QUANDO O RETIFICADOR NÃO É REGENERATIVO**

### **ESTÁGIO INVERSOR:**

**CHAVES ESTÁTICAS (IGBT ATUALMENTE) COMANDADAS ADEQUADAMENTE**

### TOPOLOGIA TÍPICA DO ESTÁGIO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

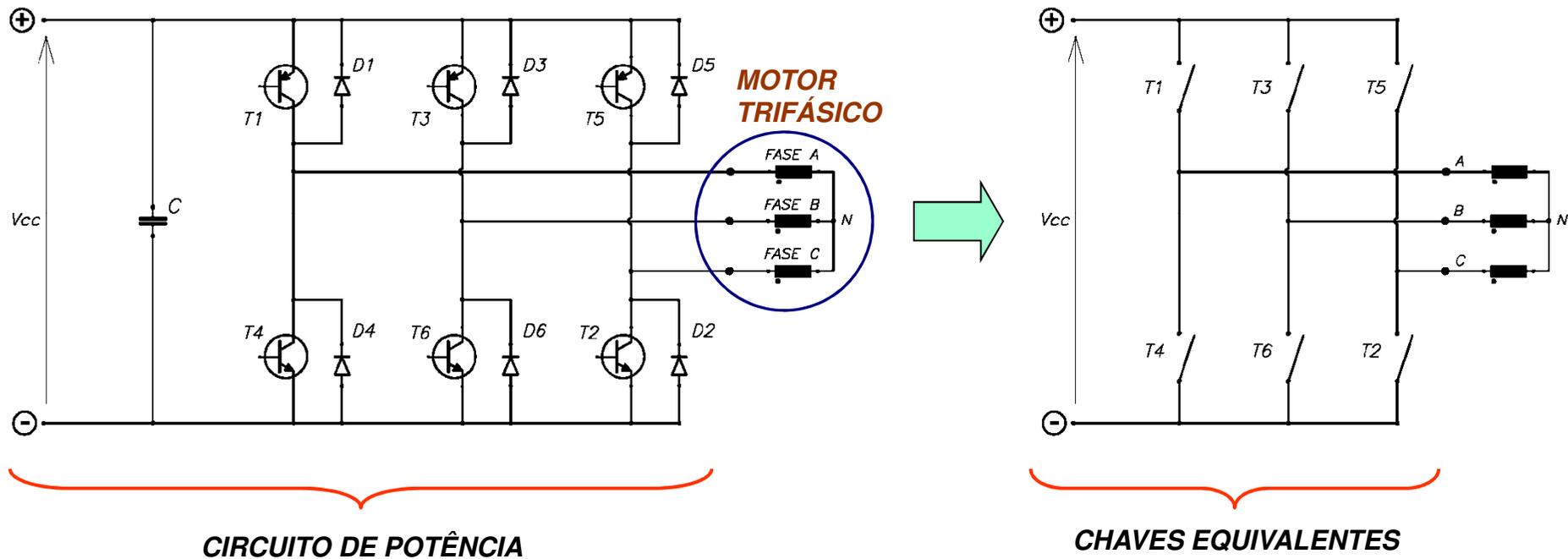
**$V_{cc}$  – TENSÃO DO BARRAMENTO DE CORRENTE CONTÍNUA ( TENSÃO DO FIO DE CONTATO PARA LINHA C.C. )**

**T1 a T6 - TRANSISTORES DE POTÊNCIA - “CHAVES DE ESTADO SÓLIDO”**

**D1 a D6 - DIODOS DE RETORNO ( PARA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES INDUTIVAS E DURANTE A REGENERAÇÃO )**

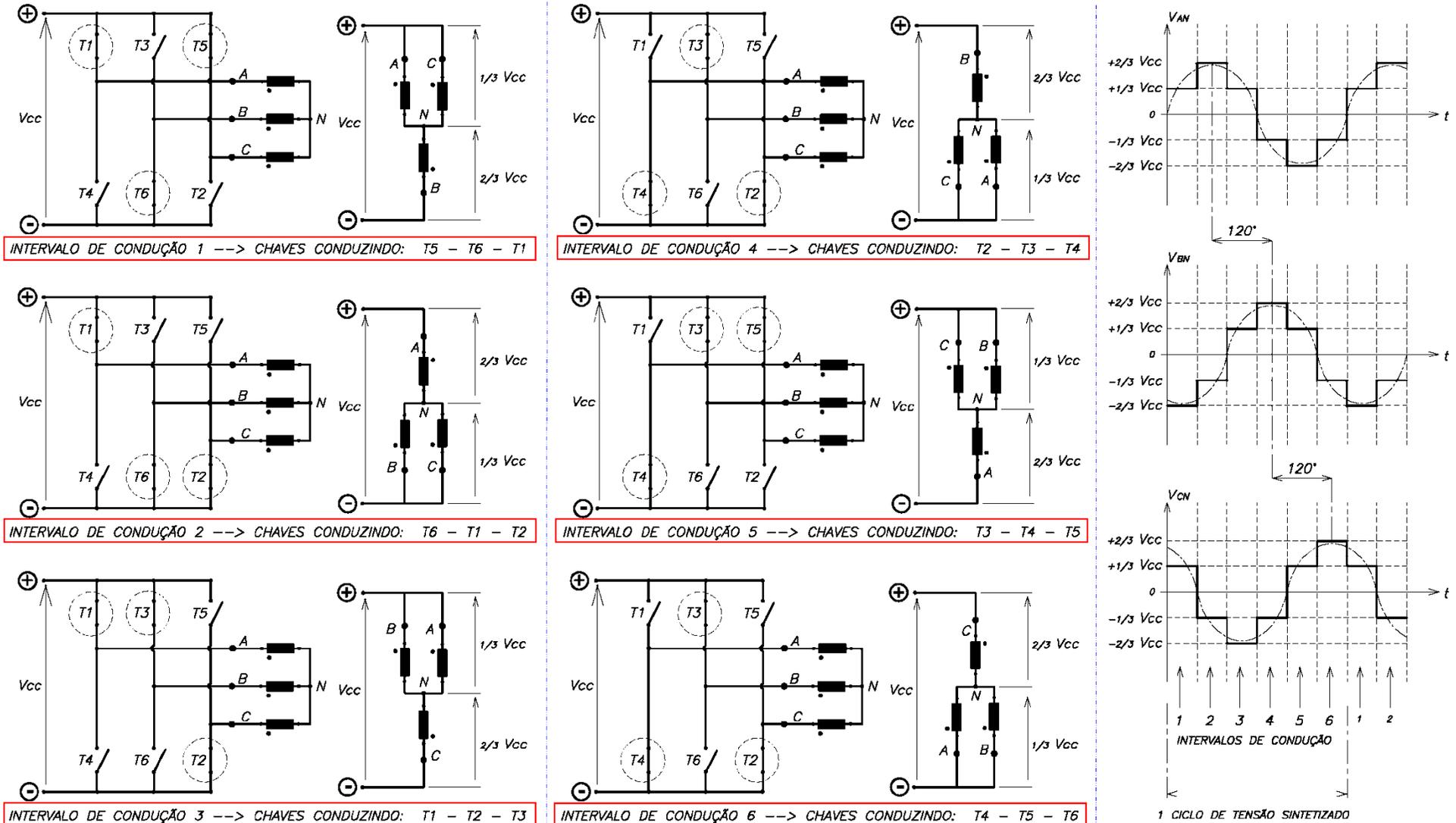
**C - CAPACITOR DE FILTRO E DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

**→ SEMPRE CONDUZEM 3 CHAVES SIMULTANEAMENTE: (T1-T2-T3; T2-T3-T4; T3-T4-T5; T4-T5-T6; T5-T6-T1; T6-T1-T2; T1-T2-T3; .....).**



**SINTETIZAÇÃO DE TENSÕES TRIFÁSICAS PELO INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

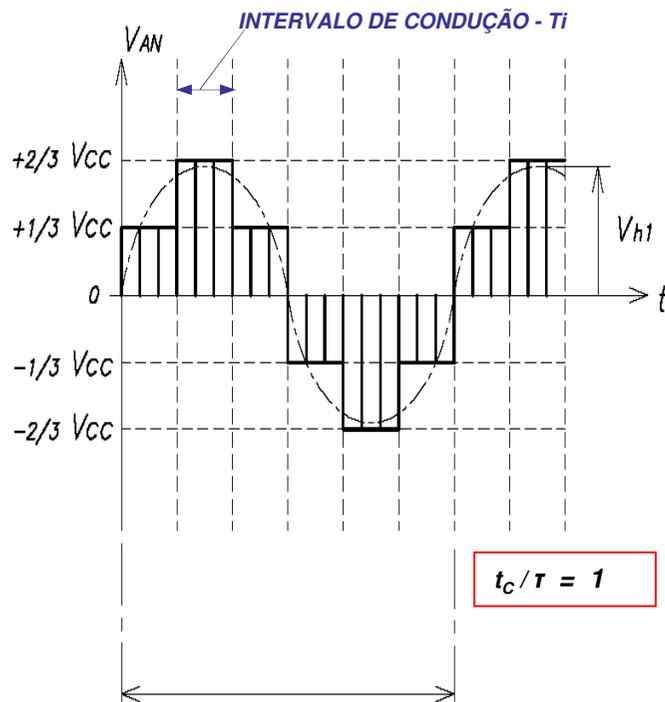
FREQUÊNCIA DA TENSÃO SINTETIZADA → DETERMINADA PELO TEMPO DE DURAÇÃO DO INTERVALO DE CONDUÇÃO DAS CHAVES



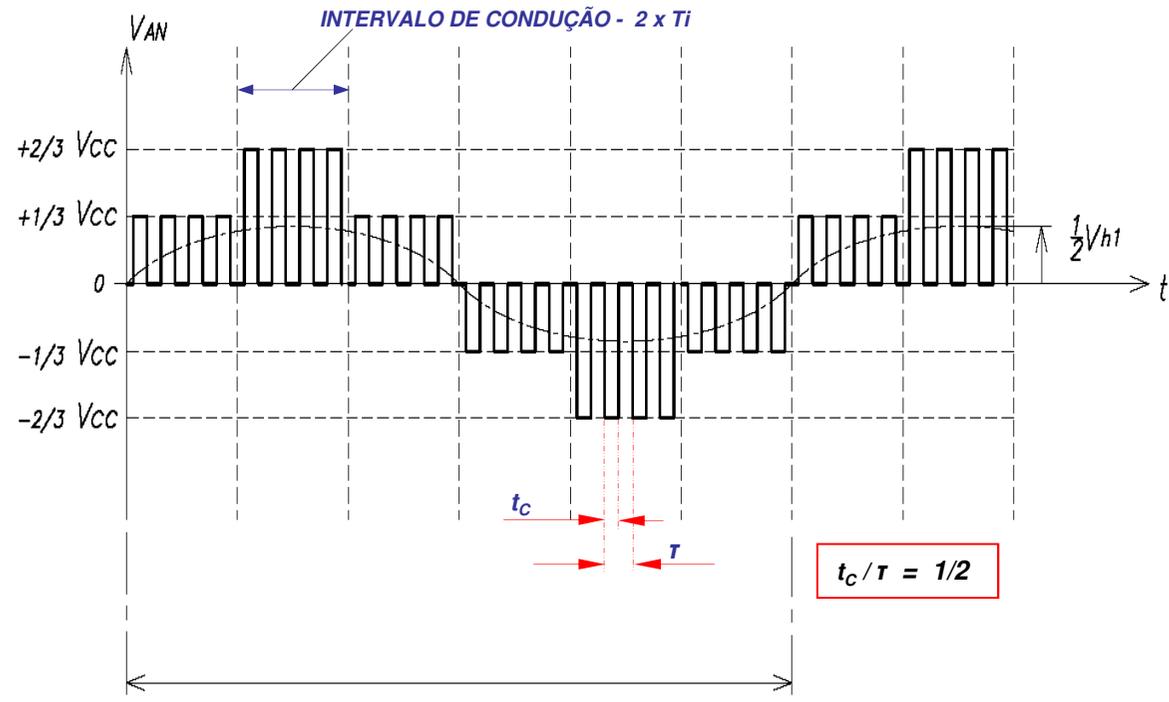
## AJUSTE DE TENSÃO CONCOMITANTE COM A FREQUÊNCIA

RECORTE DA TENSÃO SINTETIZADA POR CHAVEAMENTO DENTRO DE CADA INTERVALO DE CONDUÇÃO DAS CHAVES

**SISTEMA PWM - "PULSE WIDTH MODULATION" →  $V/f = CTE.$**

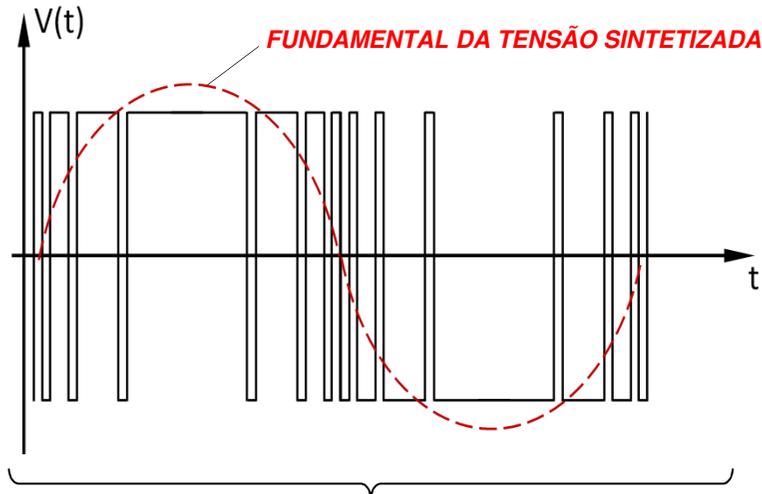


1 CICLO DE TENSÃO SINTETIZADO  
PERÍODO:  $T$  [s] → FREQUÊNCIA:  $f$  [Hz]



1 CICLO DE TENSÃO SINTETIZADO  
PERÍODO:  $2T$  [s] → FREQUÊNCIA:  $f/2$  [Hz]

FORMAS ALTERNATIVAS DE MODULAÇÃO DA TENSÃO SINTETIZADA - PROBLEMAS ASSOCIADOS

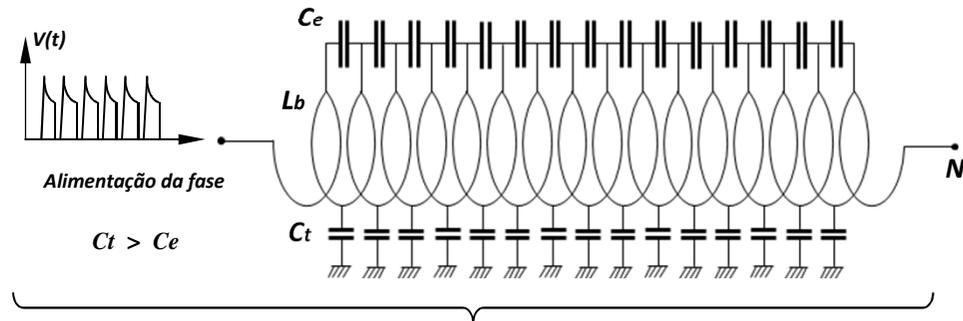


MODULAÇÃO "PWM" PARA MINIMIZAÇÃO DO CONTEÚDO HARMÔNICO DA TENSÃO RESULTANTE → FREQUÊNCIA DE MODULAÇÃO DE 3 A 20 kHz

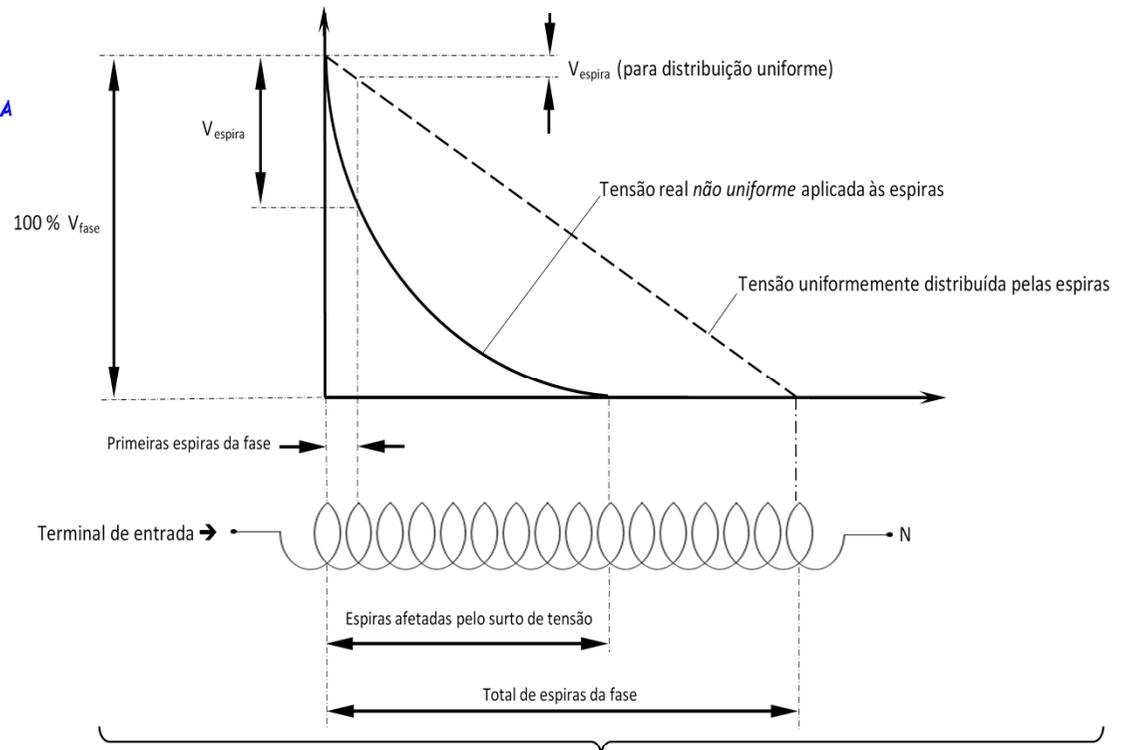
**ALGUNS ASPECTOS DA ALIMENTAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO COM INVERSORES ESTÁTICOS:**

DISTRIBUIÇÃO NÃO UNIFORME DA TENSÃO ENTRE ESPIRAS DENTRO DA FASE, SOLICITANDO MAIS FORTEMENTE AS ESPIRAS INICIAIS → EVENTUAL SURGIMENTO DE EFEITO CORONA QUE DEGRADA O ISOLAMENTO DOS CONDUTORES, REQUERENDO USUALMENTE ISOLAMENTO ESPECIAL

COMPONENTE DE ALTA FREQUÊNCIA DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO PROVOCA ACOPLAMENTO CAPACITIVO COM O ROTOR, INDUZINDO ALI CARGAS ELÉTRICAS QUE ESCOAM PARA A TERRA ATRAVÉS DOS MANCAIS, DANIFICANDO-OS → REQUER USUALMENTE MANCAIS ISOLADOS OU ESCOVAS DE ATERRAMENTO



ALIMENTAÇÃO DAS FASES POR MEIO DE PULSOS COM TEMPOS DE SUBIDA DE ATÉ 3 kV/μs  
→ MODELO DA FASE COM CAPACITÂNCIAS DISTRIBUÍDAS PARA TERRA (Ct) E ENTRE FASES (Ce)



RESULTA DISTRIBUIÇÃO NÃO UNIFORME DA TENSÃO ENTRE ESPIRAS

**MÉTODOS DE FRENAGEM DOS MOTORES DE INDUÇÃO NOS ACIONAMENTOS INDUSTRIAIS**

**PROBLEMA CRÍTICO PARTICULARMENTE EM MOTORES DE INDUÇÃO ( DE GAIOLA )**  
**( EXCEÇÃO FEITA PARA PARTIDA POR INVERSOR )**

**ENERGIA DESENVOLVIDA NO ROTOR DURANTE O TRANSITÓRIO DE PARTIDA (  $E_{d2}$  ) :**

$$E_{d2} = \frac{1}{2} \cdot J_{tot} \cdot \omega_n^2 = E_{cin.}$$

$J_{tot}$  : MOMENTO DE INÉRCIA TOTAL TRACIONADO  
 $\omega_n$  : ROTAÇÃO NOMINAL DO MOTOR  
 $E_{cin}$  : ENERGIA CINÉTICA ARMAZENADA

**ENERGIA DESENVOLVIDA NO ESTATOR DURANTE O TRANSITÓRIO DE PARTIDA (  $E_{d1}$  ) :**

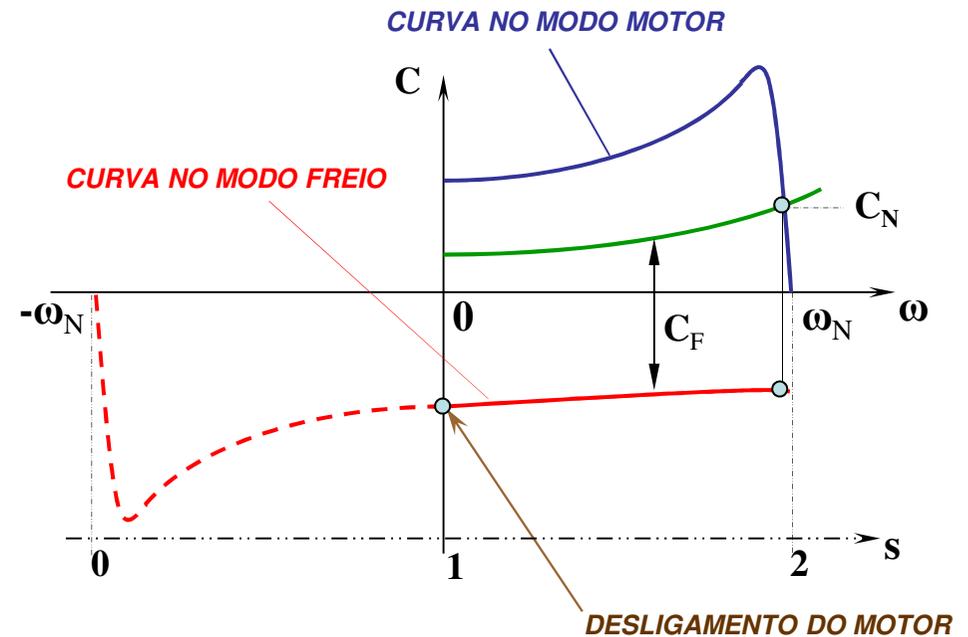
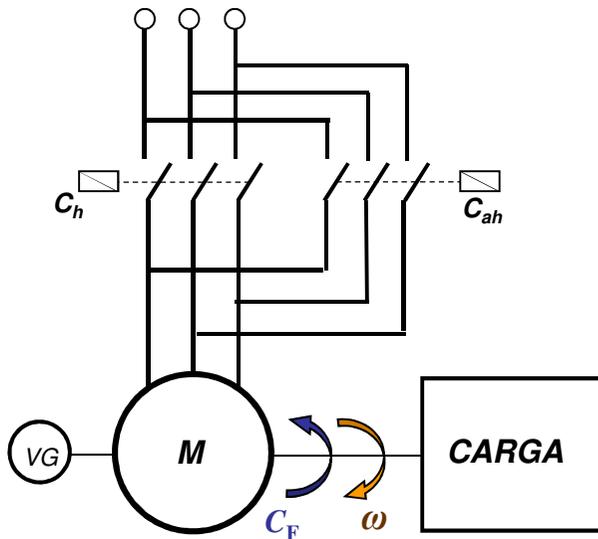
$$E_{d1} = \frac{r_1}{r_2'} \cdot E_{d2}$$

$r_1$  : RESISTÊNCIA POR FASE DO ENROLAMENTO DO ESTATOR  
 $r_2'$  : RESISTÊNCIA POR FASE DO ROTOR REFERIDA AO ESTATOR

**NOS MÉTODOS DE FRENAGEM DOS MOTORES DE INDUÇÃO UTILIZANDO O PRÓPRIO MOTOR PARA REDUZIR A VELOCIDADE, OS TRANSITÓRIOS TAMBÉM SE MANIFESTAM, DE FORMA SIMILAR OU DE FORMA INTENSIFICADA EM RELAÇÃO AO QUE OCORRE NAS PARTIDAS**

MÉTODOS DE FRENAGEM DOS MOTORES NOS ACIONAMENTOS INDUSTRIAIS

1- FRENAGEM POR CONTRA CORRENTE ( "PLUGING" )



VG : CHAVE VIGIA DE VELOCIDADE ( DETECTA  $\omega = 0$  )

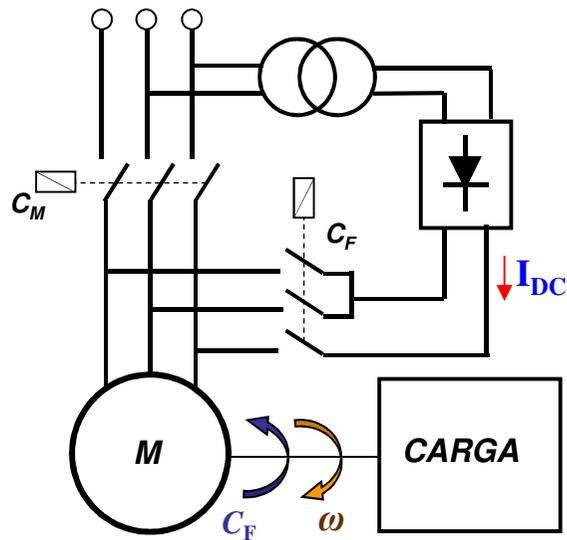
INVERSÃO DO SENTIDO DE ROTAÇÃO DO CAMPO GIRANTE CONSERVANDO O SENTIDO DE ROTAÇÃO DO EIXO PELA INÉRCIA TOTAL → LEVA A MÁQUINA AO MODO FREIO DISSIPATIVO (  $s > 1$  ) → SURGIMENTO DO TORQUE DE FRENAGEM  $C_F$

MOTOR É DESLIGADO NA PASSAGEM PELA ROTAÇÃO NULA, DETECTADA PELO VIGIA DE VELOCIDADE

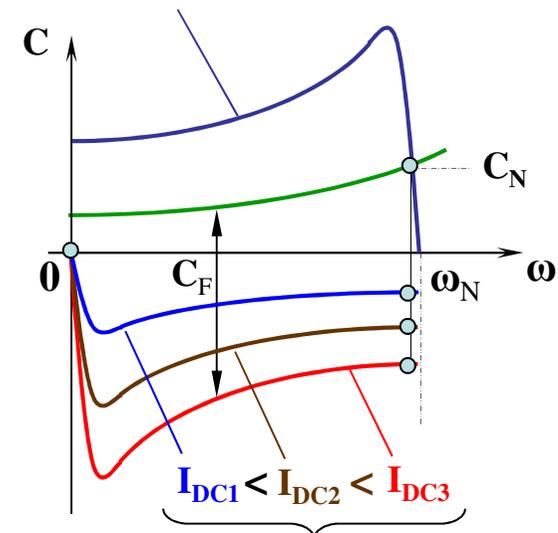
ENERGIA DESENVOLVIDA NO ROTOR DURANTE O TRANSITÓRIO DE FRENAGEM (  $E_{dF}$  ) :

$$E_{dF} = \frac{1}{2} \cdot J_{tot} \cdot [(-\omega_n) - \omega_n]^2 - \frac{1}{2} \cdot J_{tot} \cdot [(-\omega_n)^2 - 0]$$

$$E_{dF} = \frac{3}{2} \cdot J_{tot} \cdot \omega_n^2 = 3 \cdot E_{cin}$$

**2 - FRENAGEM POR INJEÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA NO ESTATOR**

CURVA NO MODO MOTOR



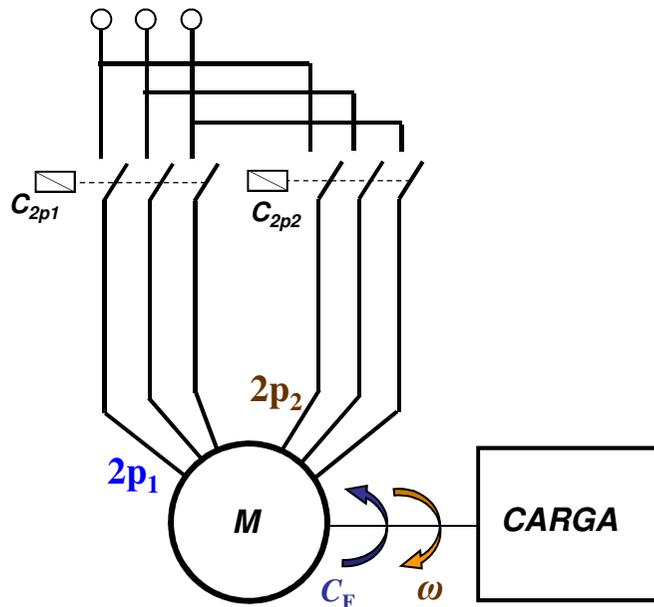
CURVAS DE TORQUE FRENANTE

**INJEÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA NO ESTATOR POR UMA DAS FASES E RETORNO PELAS DUAS RESTANTES**

**CORRENTE CONTÍNUA NO ESTATOR CRIA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO ESTACIONÁRIA NO ENTREFERRO → ROTOR EM MOVIMENTO, ARRASTADO PELA INÉRCIA TOTAL, TEM CORRENTES INDUZIDAS NO MESMO → SURGIMENTO DO TORQUE DE FRENAGEM  $C_F$  POR INTERAÇÃO ENTRE CORRENTES DO ROTOR E CAMPO ESTACIONÁRIO**

**ENERGIA DESENVOLVIDA NO ROTOR DURANTE O TRANSITÓRIO DE FRENAGEM ( $E_{dF}$ ):**

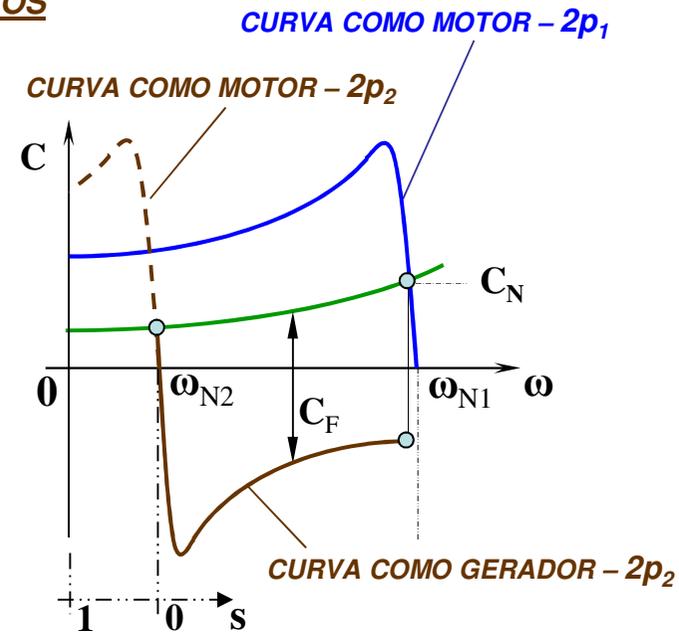
$$E_{dF} = \frac{1}{2} \cdot J_{tot} \cdot \omega_n^2 = E_{cin}$$

**3 - FRENAGEM REGENERATIVA POR COMUTAÇÃO DE POLOS**

**MOTOR DOTADO DE DOIS ENROLAMENTOS COM NÚMERO DE POLOS  $2p_1$  E  $2p_2$**

**COMUTAÇÃO DE  $2p_1$  PARA  $2p_2 \rightarrow$  MOTOR ENTRA EM REGIME DE REGENERAÇÃO NA POLARIDADE  $2p_2$  ( $S < 0$ )**

**$\rightarrow$  SURGIMENTO DO TORQUE DE FRENAGEM  $C_F$  COM RETORNO DE PARTE DA ENERGIA CINÉTICA ARMAZENADA PARA A REDE DE ALIMENTAÇÃO**

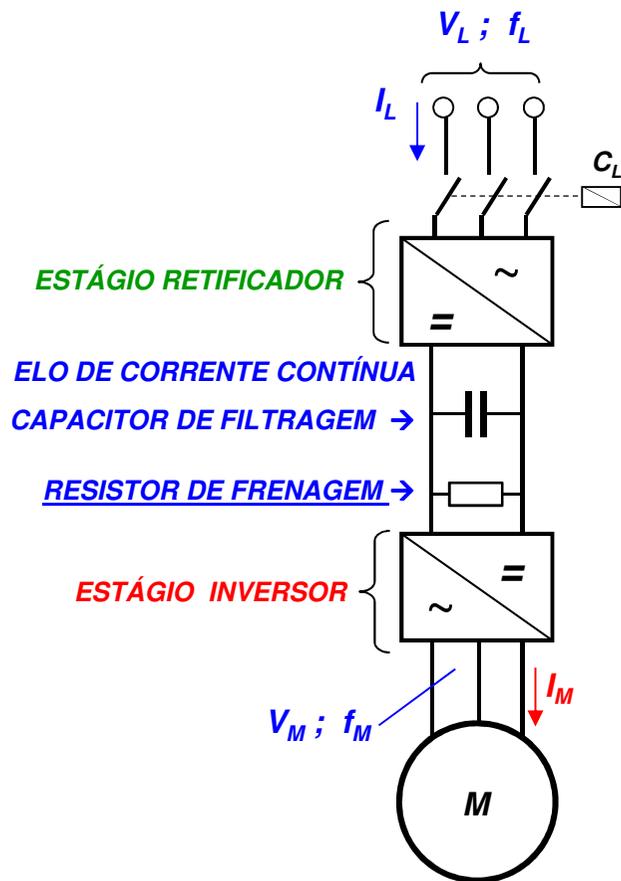


**ENERGIA DESENVOLVIDA NO ROTOR DURANTE O TRANSITÓRIO DE FRENAGEM ( $E_{dF}$ ):**

$$E_{dF} = \frac{1}{2} \cdot J_{tot} \cdot (\omega_{n1} - \omega_{n2})^2$$

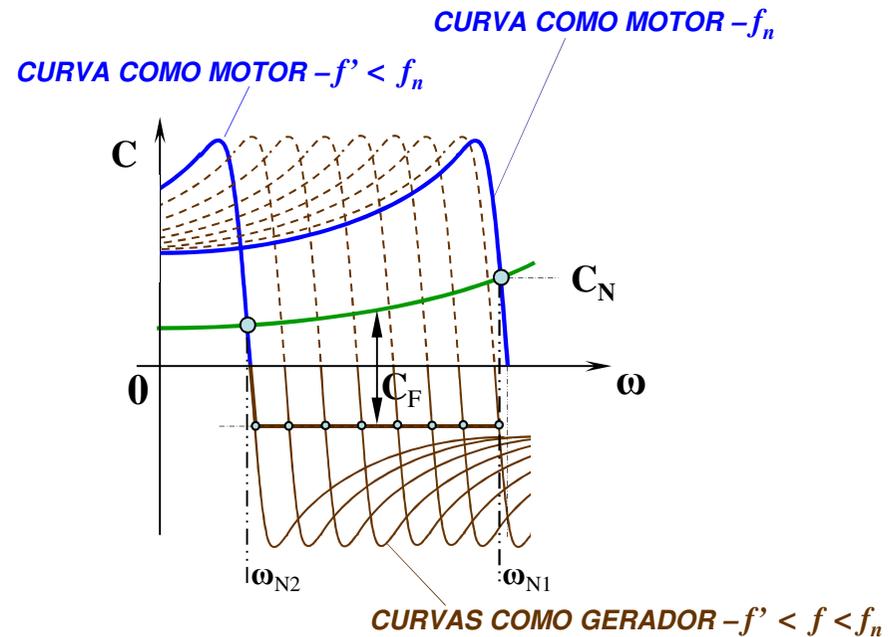
**ENERGIA RECUPERADA PARA A LINHA DURANTE O TRANSITÓRIO DE FRENAGEM ( $E_{REC}$ ):**

$$E_{REC} = J_{tot} \cdot (\omega_{n1} \cdot \omega_{n2} - \omega_{n2}^2)$$

**4 - FRENAGEM “REGENERATIVA” POR REDUÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO**

ENERGIA CINÉTICA DA CARGA É DISSIPADA NO RESISTOR DE FRENAGEM DURANTE A DESACELERAÇÃO

SE O ESTÁGIO RETIFICADOR FOR DE 4 QUADRANTES, A ENERGIA DA FRENAGEM PODE SER INJETADA NA LINHA DE ALIMENTAÇÃO



**FRENAGEM CONTROLADA POR MEIO DA REDUÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO**

**REDUÇÃO GRADATIVA DA FREQUÊNCIA PROMOVE FRENAGEM SEM APORTE DE ENERGIA TÉRMICA ADICIONAL AO ROTOR**

**CONJUGADO E CORRENTE DURANTE A FRENAGEM AJUSTÁVEIS EM QUALQUER NÍVEL, e.g. NOS VALORES NOMINAIS**