

***MÉTODOS DE VARIAÇÃO DA VELOCIDADE
DOS MOTORES ASSÍNCRONOS***

MÉTODOS DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DOS MOTORES DE INDUÇÃO

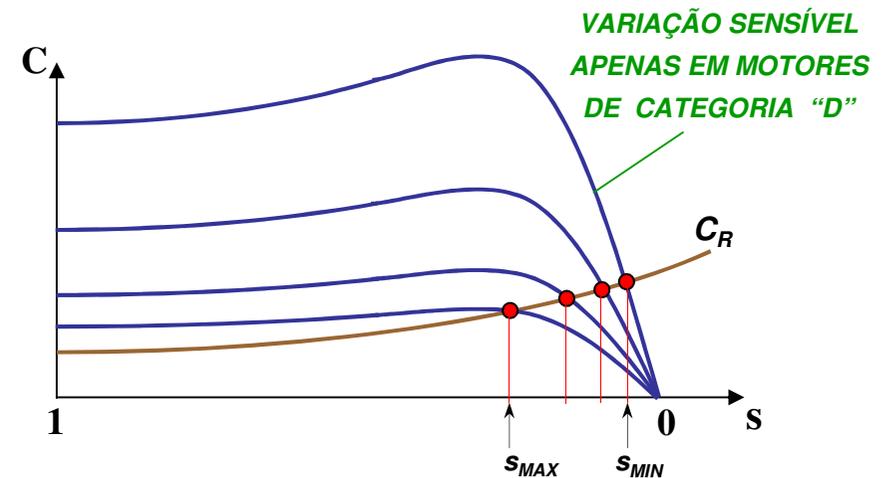
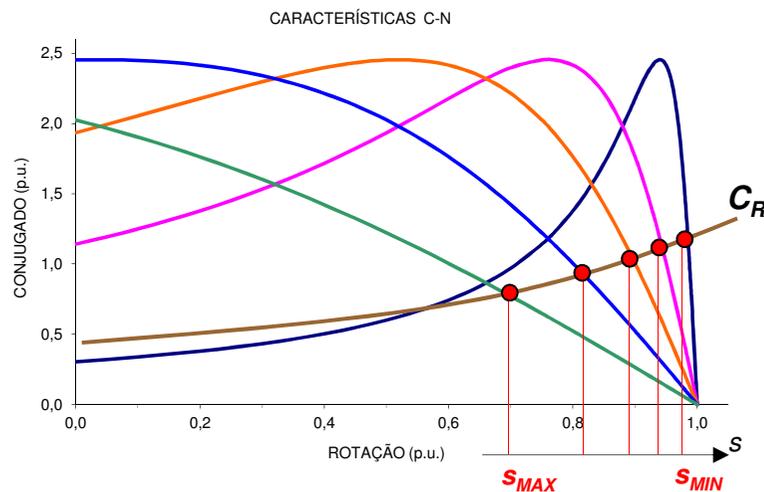
VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO EIXO DO MOTOR ASSÍNCRONO :

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

3 MÉTODOS POSSÍVEIS DE VARIAÇÃO DA ROTAÇÃO:

↓
 → **POR ESCORREGAMENTO** - MÉTODO **DISSIPATIVO**
 → **POR COMUTAÇÃO DO NÚMERO DE PÓLOS** - VARIAÇÃO **DISCRETA**
 → **POR ALIMENTAÇÃO COM FREQUÊNCIA VARIÁVEL** - VARIAÇÃO **CONTÍNUA IDEAL**

VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR ESCORREGAMENTO → POSSÍVEL APENAS EM CARGA



MOTOR DE ANÉIS → POR VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA NO REOSTATO DE ESCORREGAMENTO EXTERNO

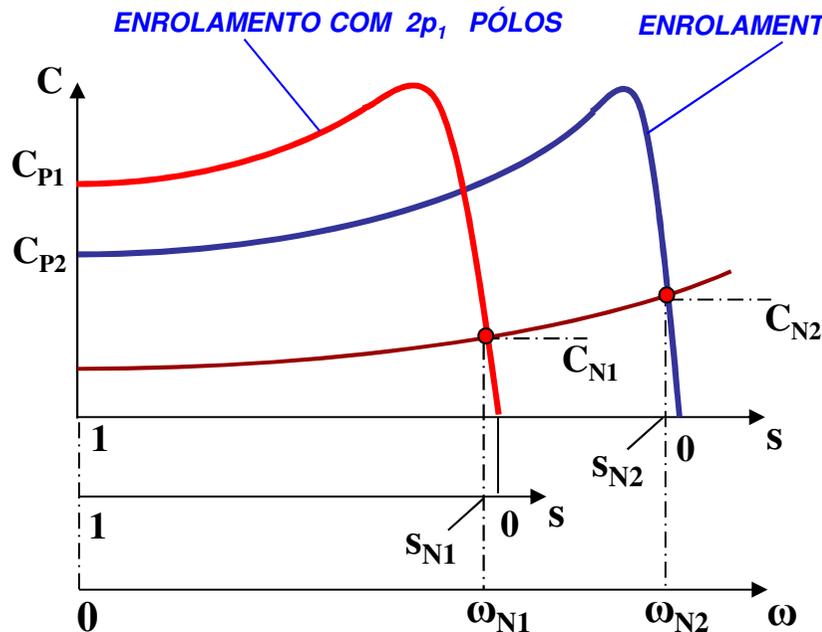
MOTOR DE GAIOLA → POR VARIAÇÃO DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR

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

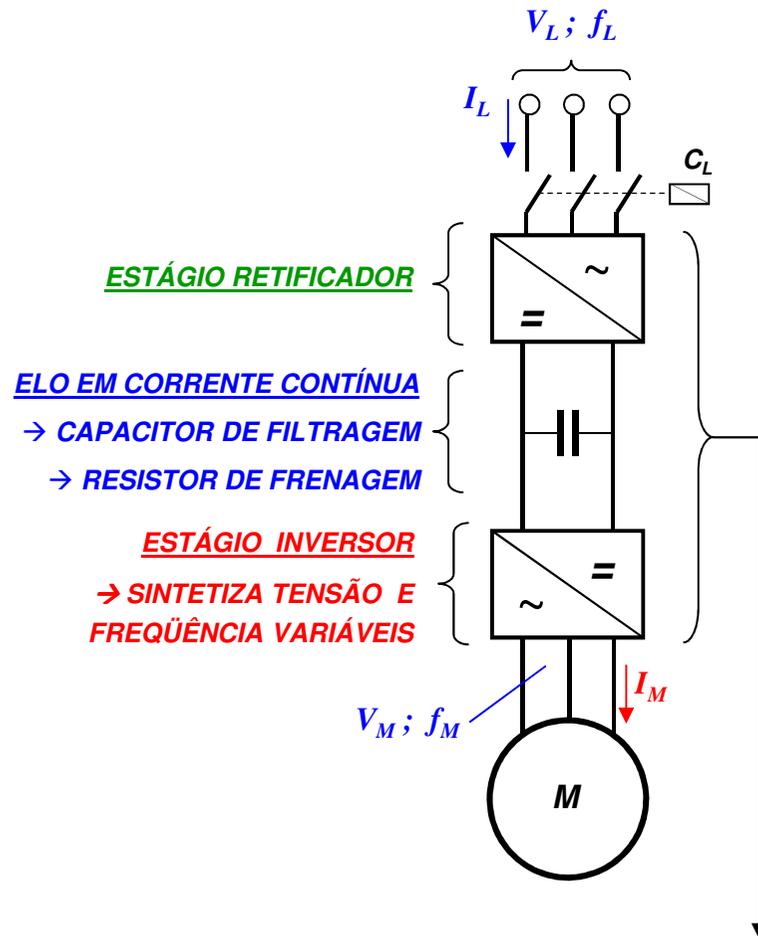


RAZÃO DAS POTÊNCIAS EM CADA POLARIDADE APROXIMADAMENTE INVERSAMENTE PROPORCIONAL AO NÚMERO DE PÓLOS

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:**

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

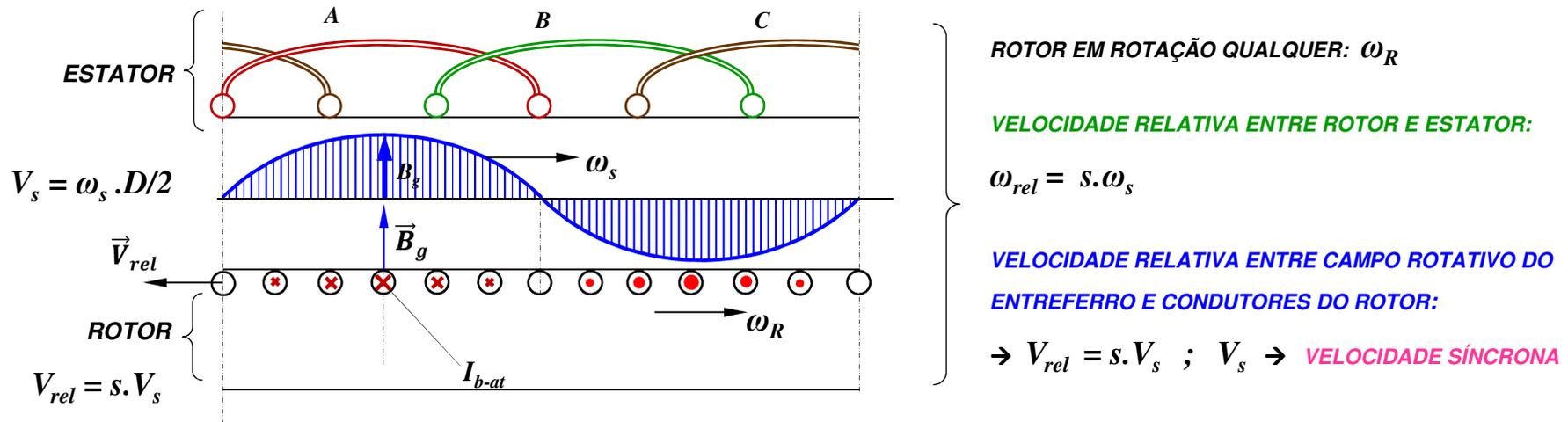
→ **PARA N° DE PÓLOS FIXADOS NA CONSTRUÇÃO, A ROTAÇÃO SÍNCRONA É FUNÇÃO EXCLUSIVA DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ENROLAMENTO TRIFÁSICO DO ESTATOR**

→ **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 $\Phi = cte. \rightarrow$ $V/f = cte$

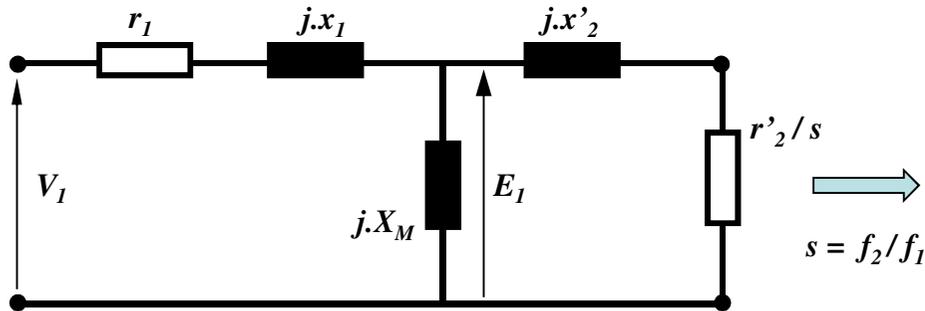
$s = (\omega_s - \omega_R) / \omega_s$
 $\omega_s = 2\pi \cdot f_1 / p$

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

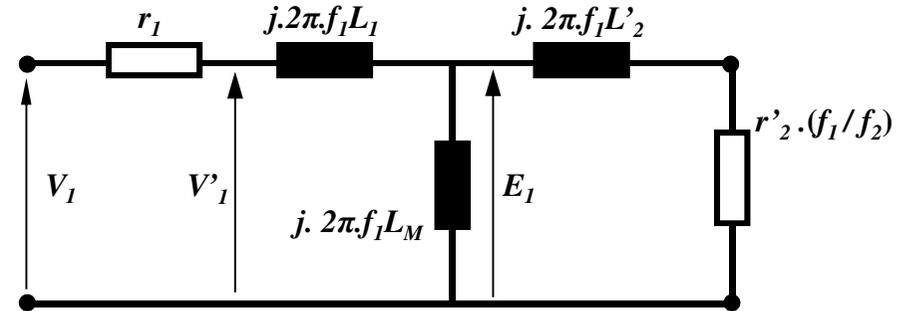
MODELO CLÁSSICO DO MOTOR DE INDUÇÃO



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**

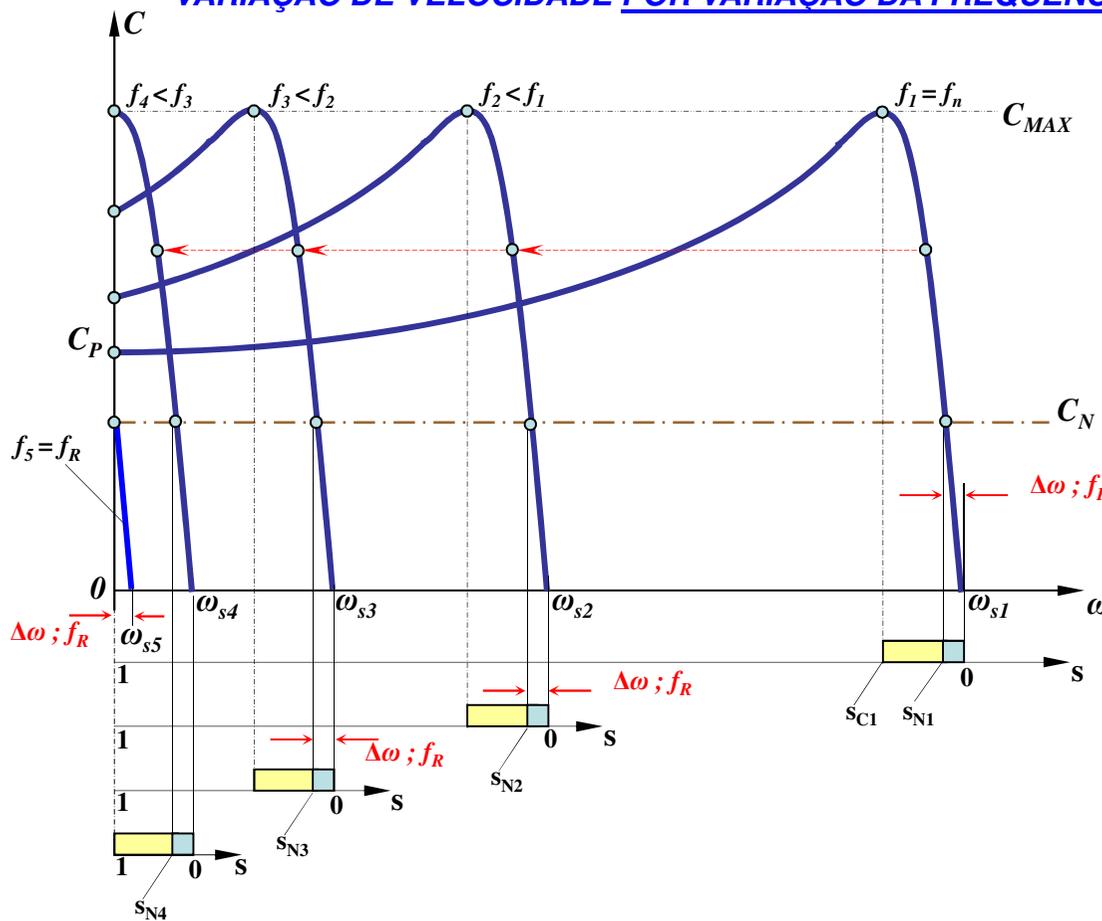
[3] **ESCORREGAMENTO CRÍTICO AUMENTA COM A REDUÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO $\rightarrow s_c = k \cdot (1/f_1)$**

[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

→ $C = cte.$ → $\Delta\omega = cte.$

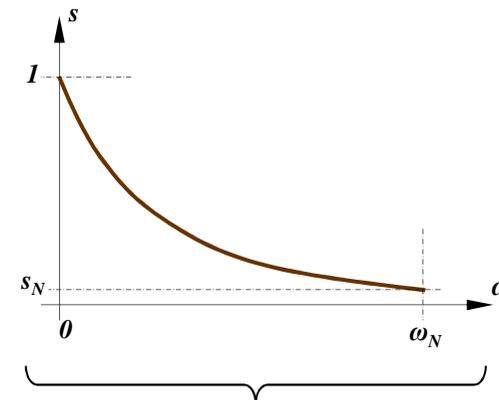
FREQUÊNCIA REDUZIDA PROGRESSIVAMENTE A PARTIR DE f_n :

→ CURVAS SE DESLOCAM PONTO A PONTO PARA A ESQUERDA

QUANDO A FREQUÊNCIA É REDUZIDA ATÉ $f_1 = f_R$

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

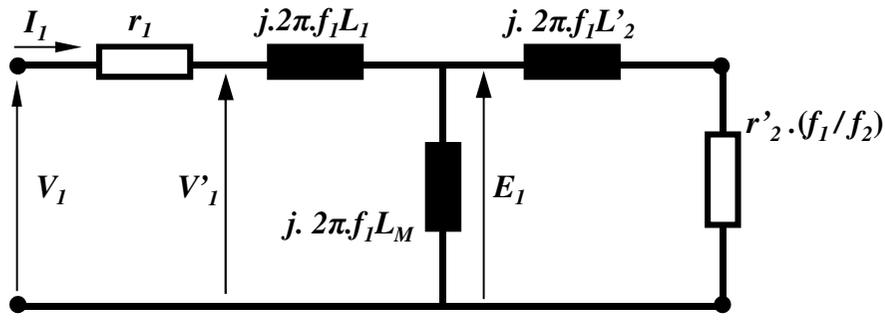
→ C_N ACONTECE NA PARTIDA, COM I_N



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 :

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

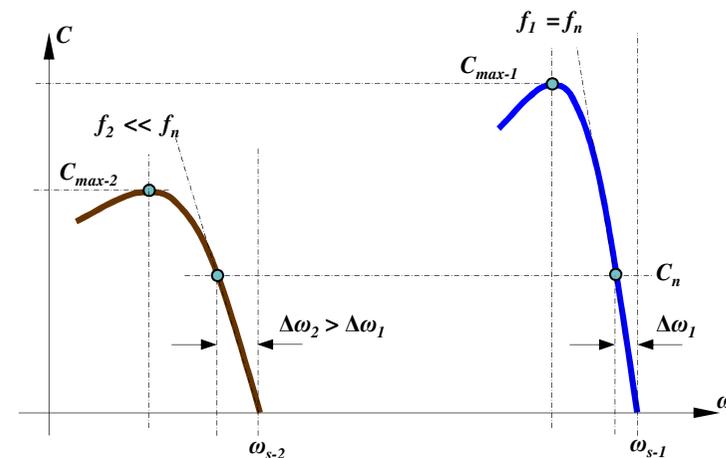
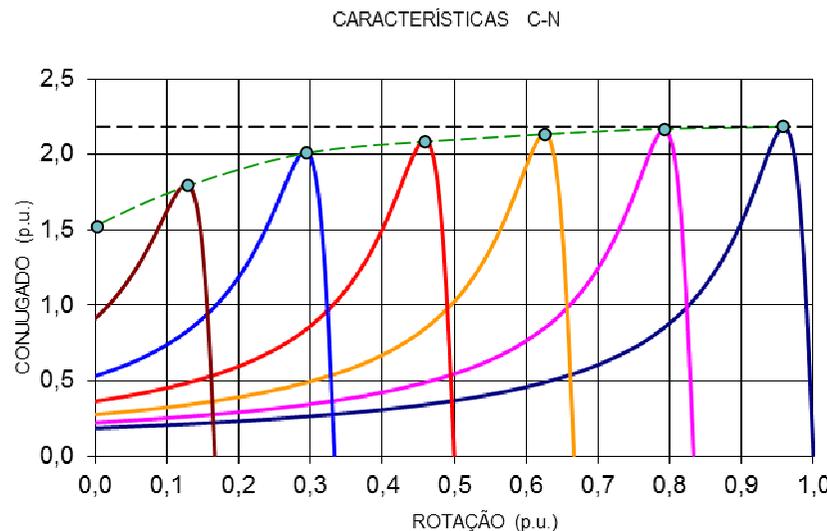
EM FREQUÊNCIAS BAIXAS \rightarrow TENSÕES REDUZIDAS

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

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

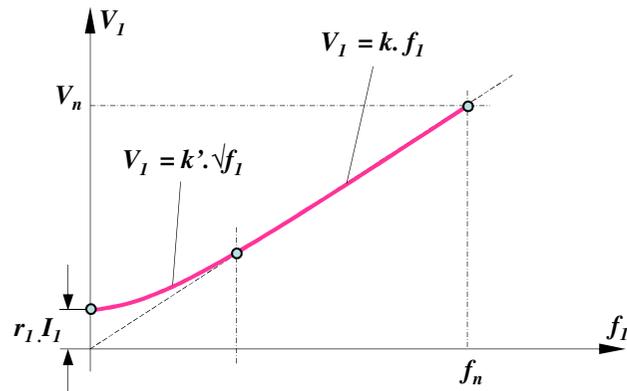
COMPENSAÇÃO DA QUEDA DE TENSÃO EM r_1 → INCREMENTO DA RAZÃO V_1/f_1 → MANUTENÇÃO DE $C_{max} = cte.$

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

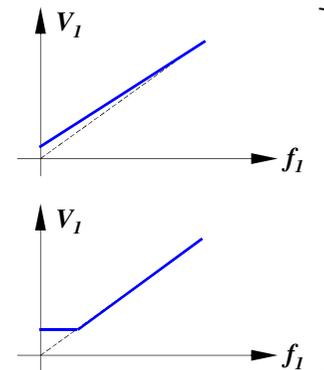
$$V_1 = \sqrt{\frac{C_{MAX} \cdot 4\pi \cdot f_1}{3p} \cdot \left(r_1 + \sqrt{(r_1)^2 + (2\pi \cdot f_1 \cdot L_{cc})^2} \right)}$$

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

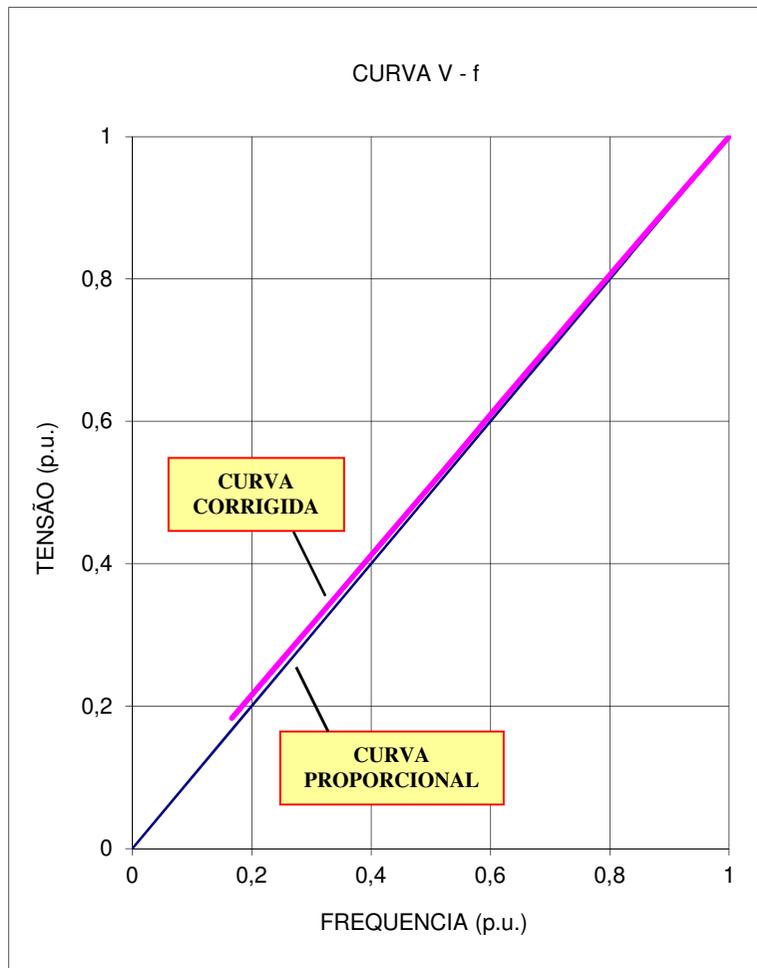
[2] **PARA FREQUÊNCIAS REDUZIDAS :** $r_1 > 2\pi \cdot f_1 \cdot L_{cc} \rightarrow V_1 \cong \left[\sqrt{\frac{C_{MAX} \cdot 8\pi \cdot r_1}{3p}} \right] \cdot \sqrt{f_1} \rightarrow \frac{V_1}{f_1} = k \cdot \frac{1}{\sqrt{f_1}}$



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

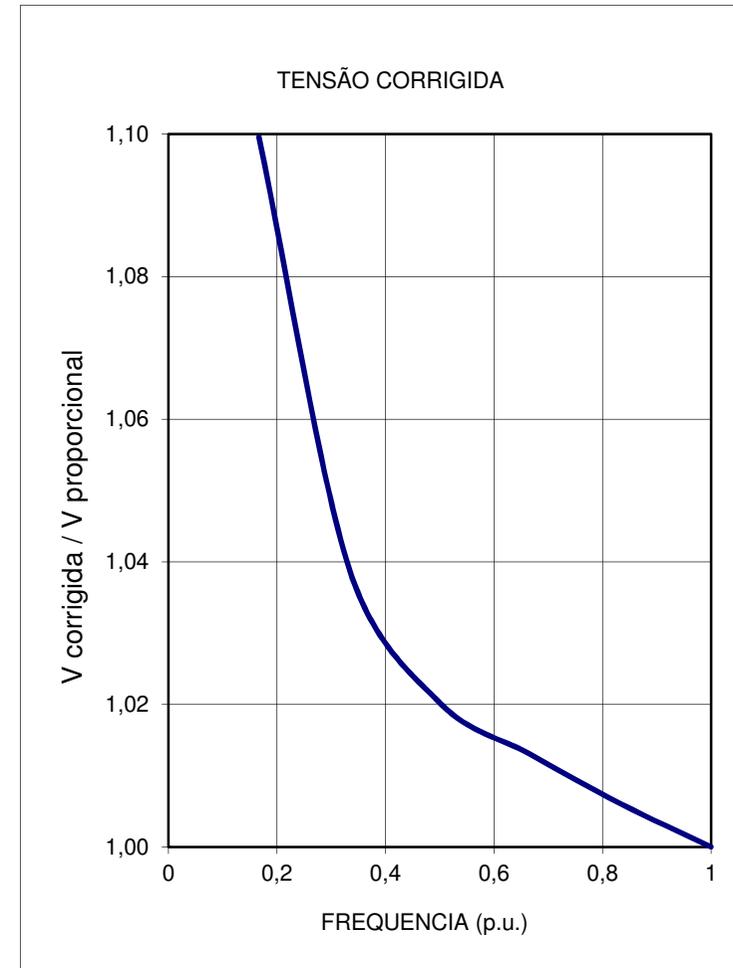


PARAMETRIZAÇÕES USUAIS DE INVERSORES PARA COMPENSAÇÃO DA QUEDA EM r_1

VARIAÇÃO DA TENSÃO E FREQUÊNCIA PARA VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DO MOTOR ASSÍNCRONO

**CURVAS DE VARIAÇÃO DA RELAÇÃO
TENSÃO / FREQUÊNCIA**

EXEMPLO PARA MOTOR DE GRANDE PORTE



**INCREMENTO NA TENSÃO
PROPORCIONAL PARA CORREÇÃO
DAS CARACTERÍSTICAS**

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**

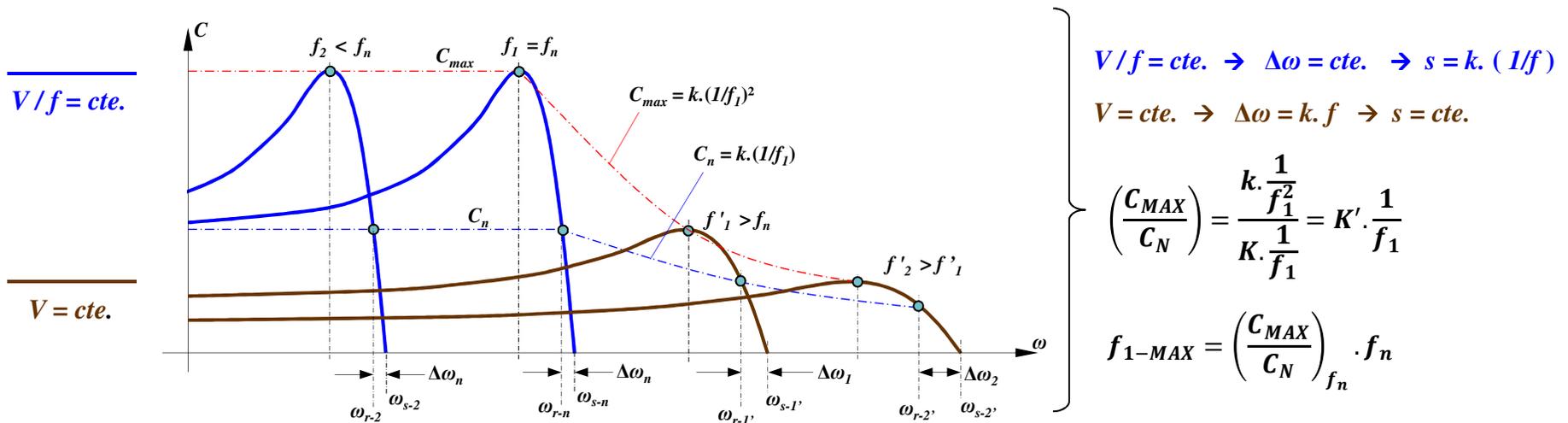
→ **AUMENTO DE f_1 COM $V_1 = cte.$ → ATENUAÇÃO DO FLUXO NO ENTEFERRO** ($V = 4,44 \cdot f \cdot N_f \cdot \Phi_p$)

→ **IMPACTO NO CONJUGADO MÁXIMO**

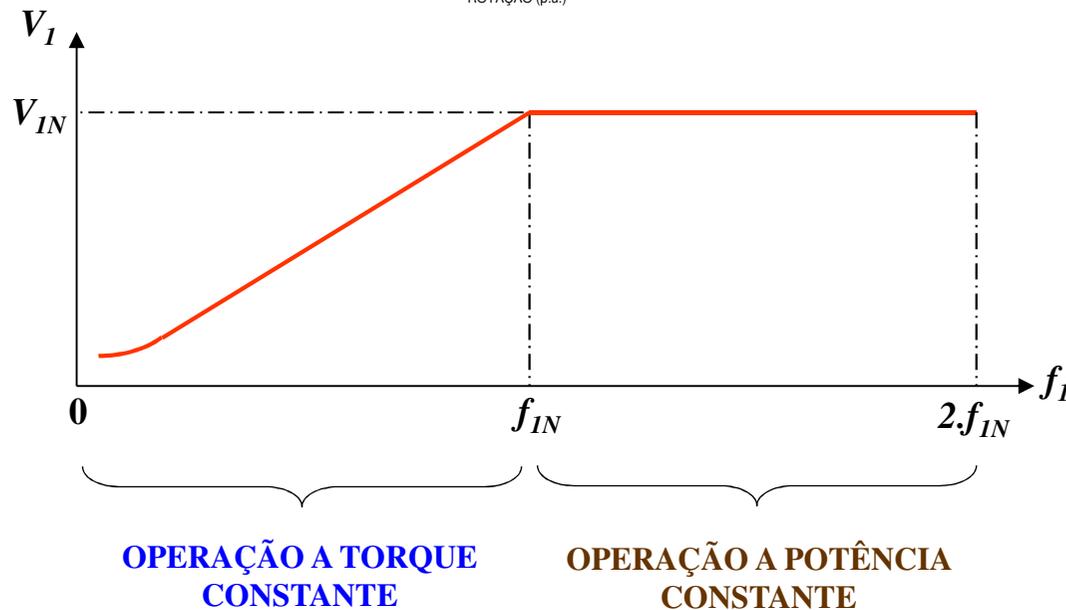
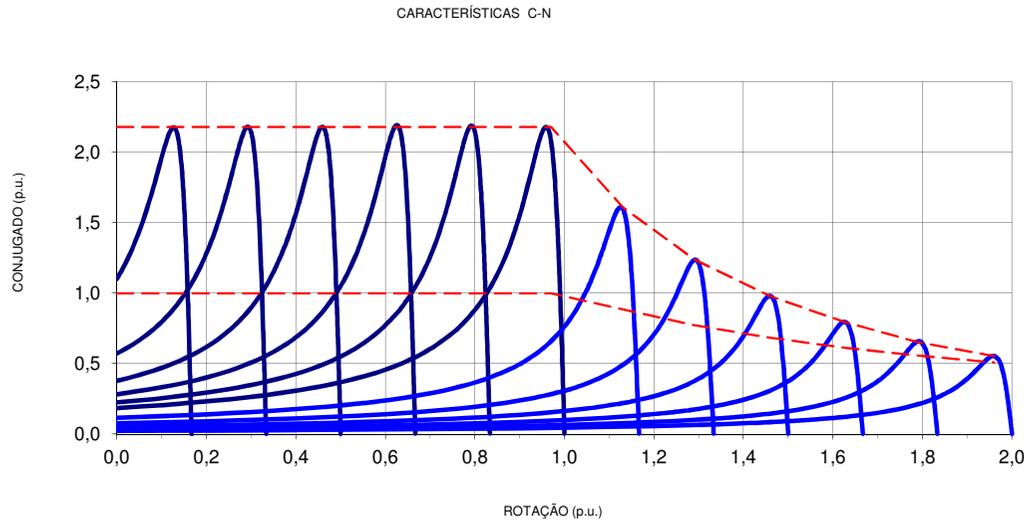
→ **IMPACTO NO CONJUGADO DISPONÍVEL NO EIXO**

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

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



VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR



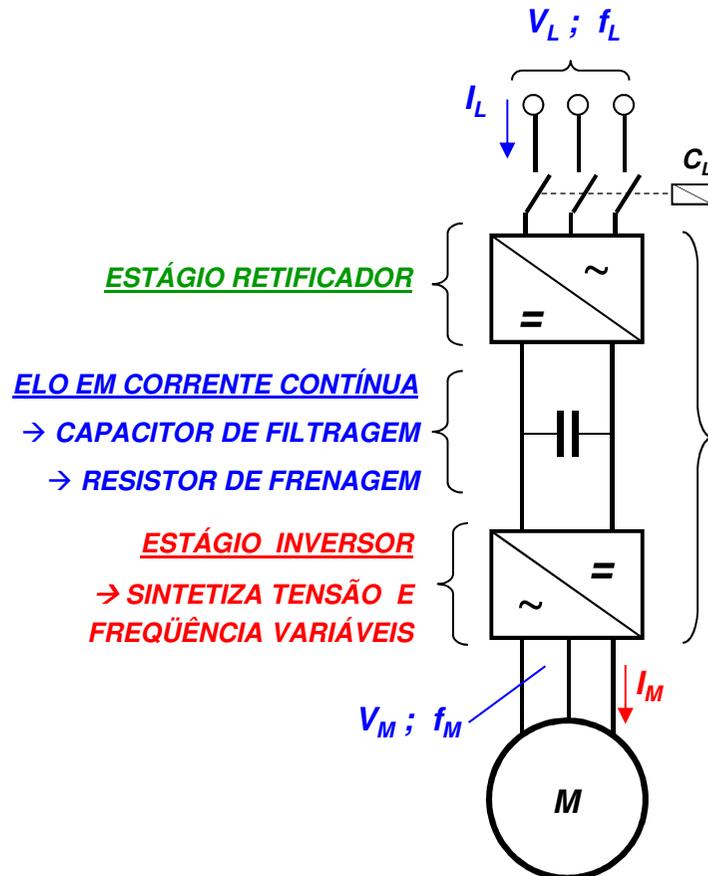
EVOLUÇÃO DA TENSÃO E FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO MOTOR ASSÍNCRONO, OPERADO EM VELOCIDADE VARIÁVEL

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

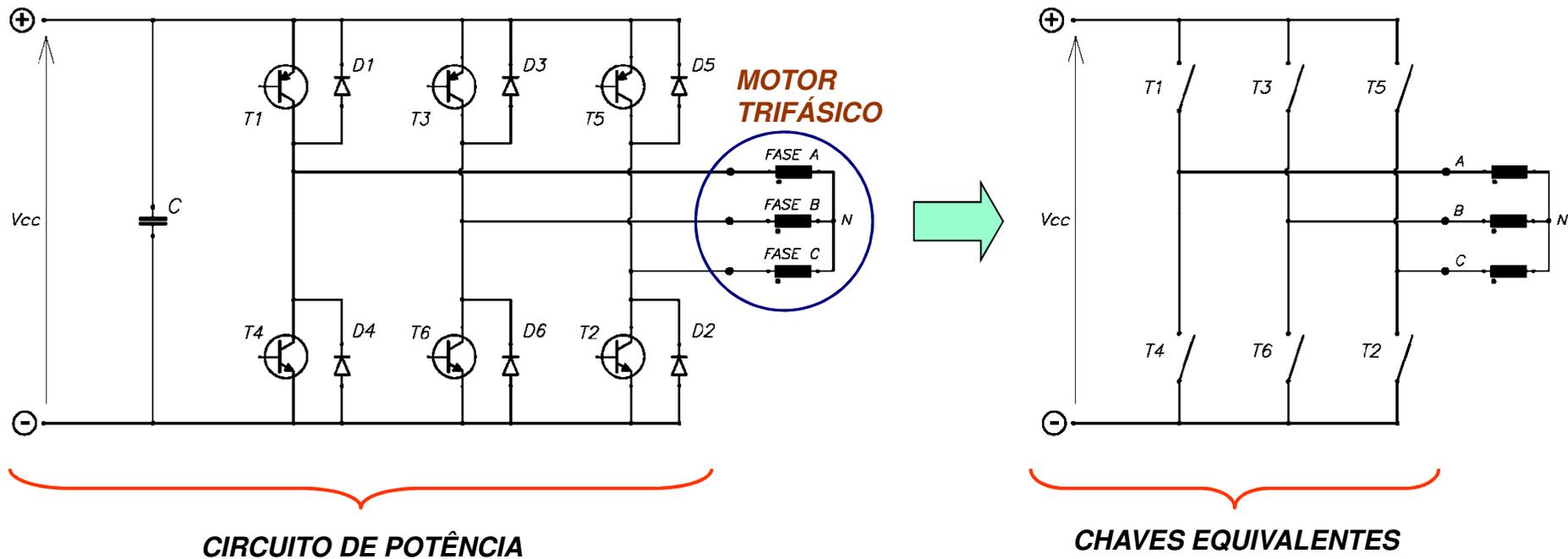
TOPOLOGIA TÍPICA DO ESTÁGIO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

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”

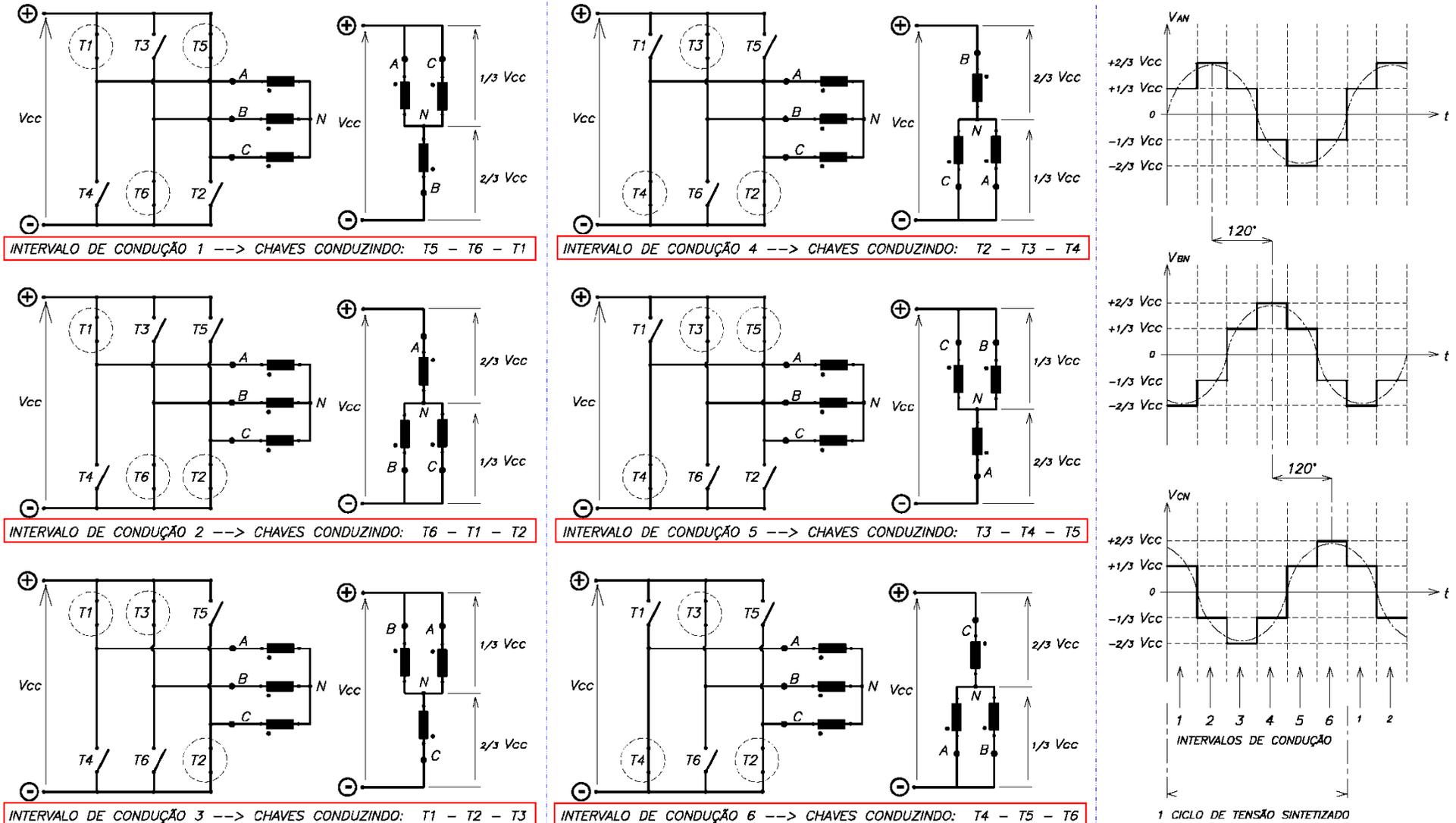
$D1$ a $D6$ - DIODOS DE RETORNO (PARA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES INDUTIVAS E DURANTE A REGENERAÇÃO)

C - CAPACITOR DE FILTRO E DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA



SINTETIZAÇÃO DE TENSÕES TRIFÁSICAS PELO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

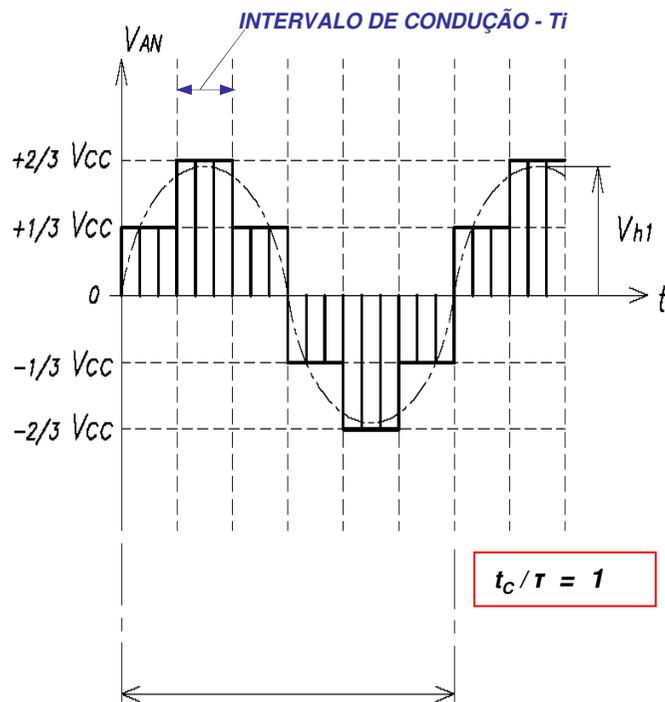
FREQUÊNCIA DA TENSÃO SINTETIZADA → DETERMINADA PELO TEMPO DE DURAÇÃO DO INTERVALO DE CONDUÇÃO DAS CHAVES



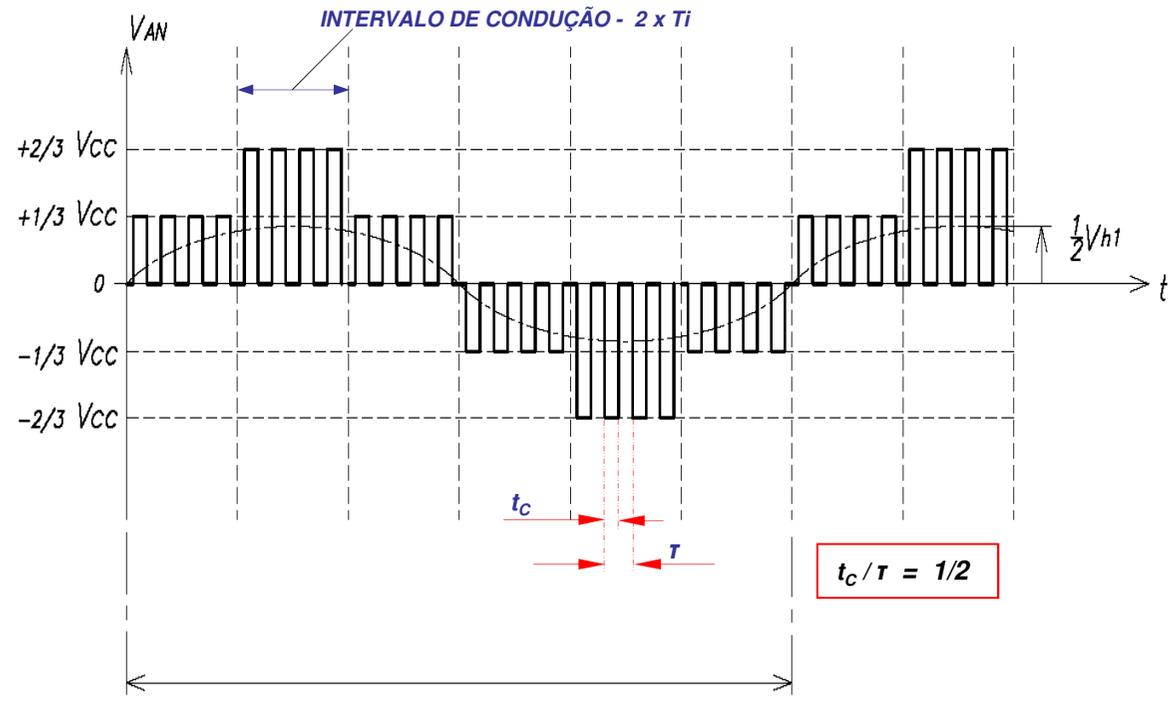
AJUSTE DE TENSÃO CONCOMITANTE COM A FREQUÊNCIA

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]