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

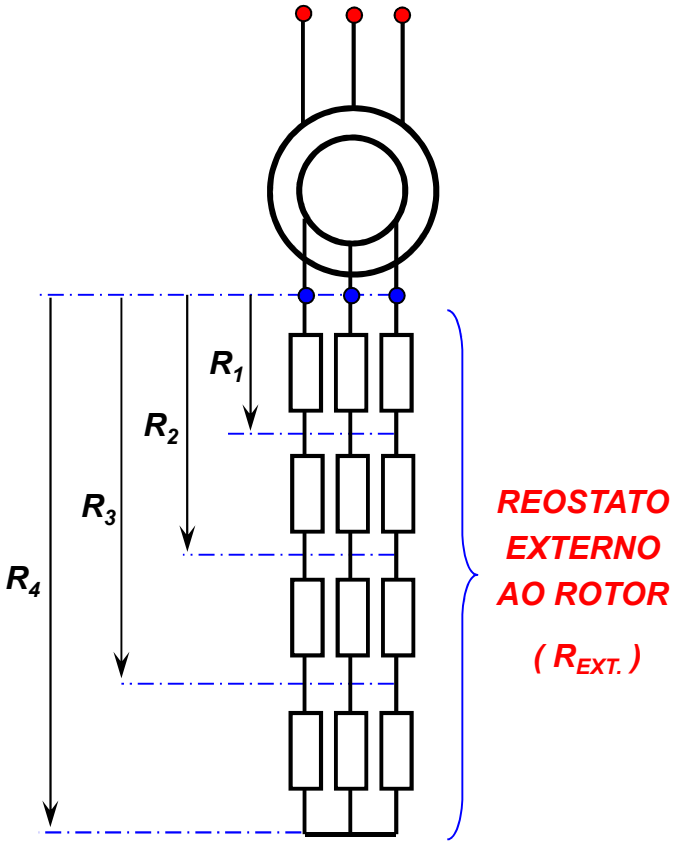
➔PROJETO ADEQUADO DA GAIOLA NO MOTOR COM ROTOR EM CURTO CIRCUITO (CATEGORIAS DE CONJUGADO)

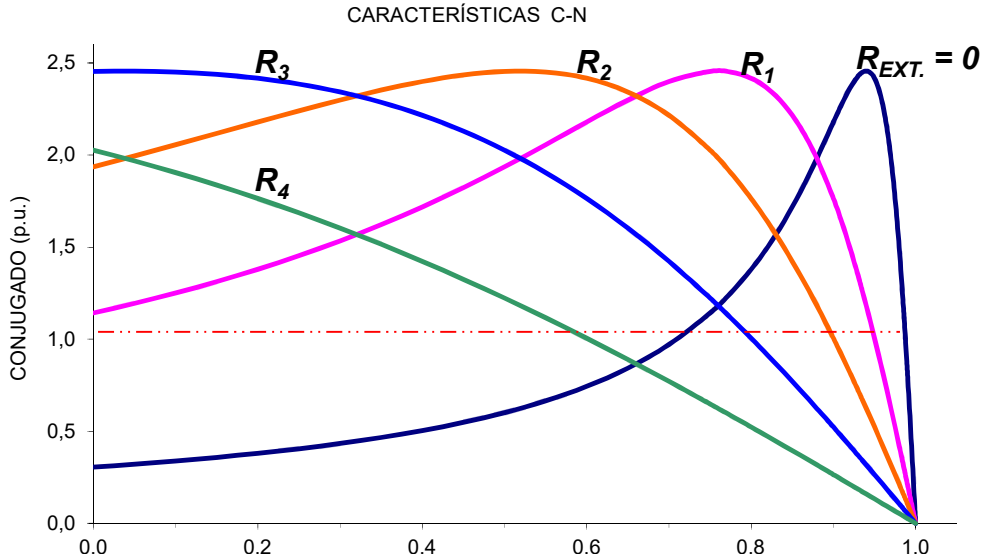
NECESSIDADE DE MÉTODOS PARA LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE PARTIDA

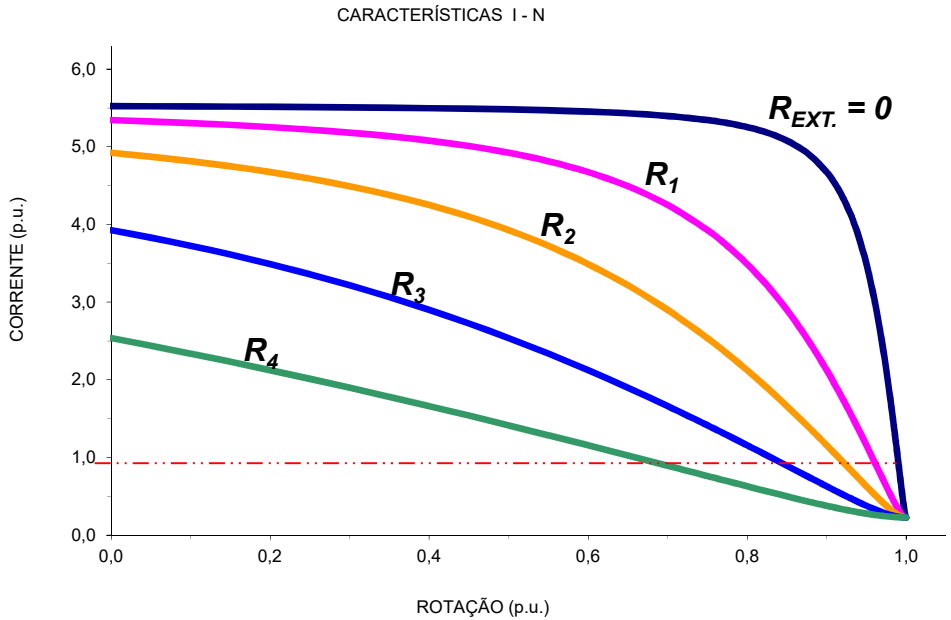
➔INSERÇÃO DE REOSTATO ROTÓRICO NO MOTOR DE ANÉIS

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

CONFORMAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DE ANÉIS







MÉTODO DISSIPATIVO

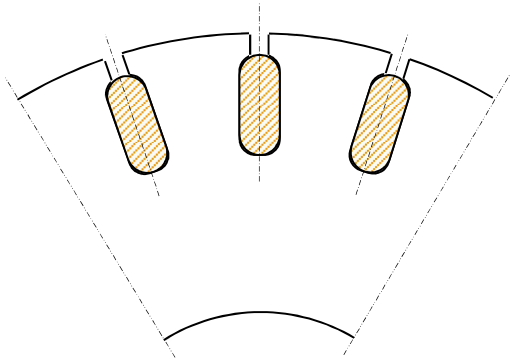
DISSIPAÇÃO DE POTÊNCIA EXTERNA AO ROTOR

OTIMIZAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PARTIDA

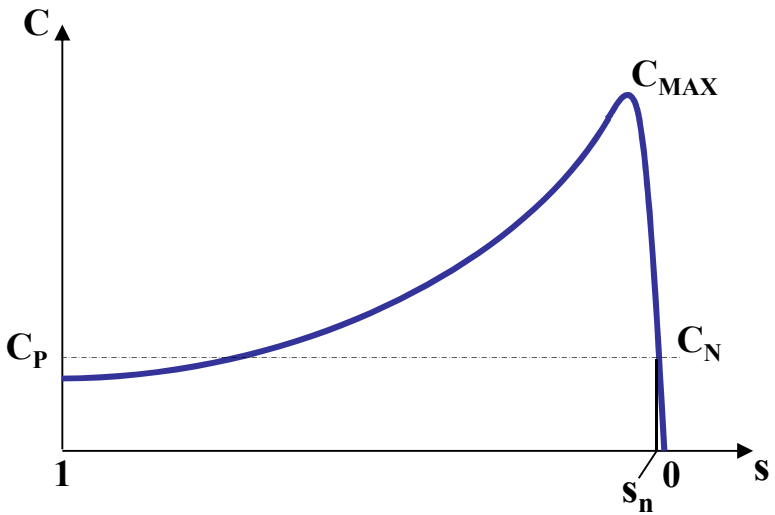
DEGRADAÇÃO DA REGIÃO DE REGIME NORMAL

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 SECÇÃO

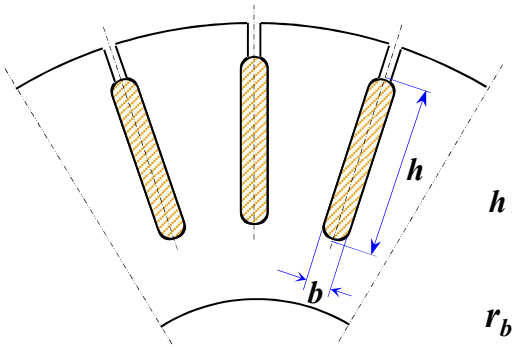


C_P → 0,5 - 1,2 p.u.

C_{MAX} → 1,8 - 2,5 p.u.

s_n → 1 - 2 %

I_{CC} → 6 - 8 p.u.



ADENSAMENTO DE CORRENTE :

$h / b > 10$ - $h > 4$ cm

➔ $r_b = f(s)$

$r_{b:s=1} \approx h(cm) \cdot r_{b:s=0}$

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

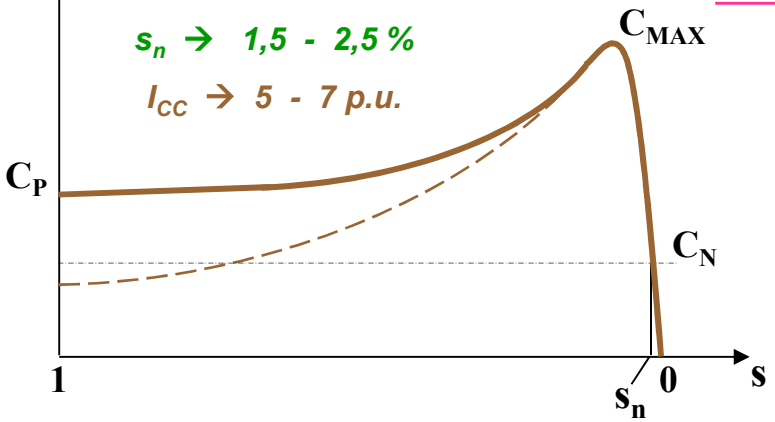
C_P → 1,2 - 1,8 p.u.

C_{MAX} → 1,8 - 2,2 p.u.

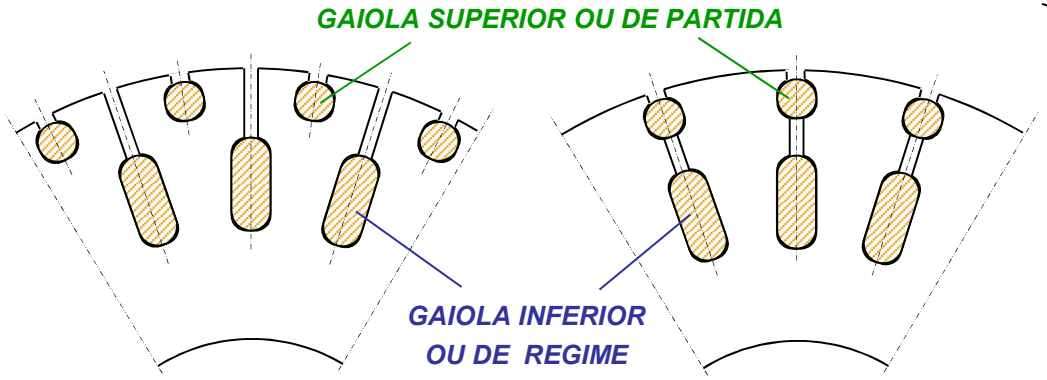
s_n → 1,5 - 2,5 %

I_{CC} → 5 - 7 p.u.

GAIOLA DE GRANDE CAPACIDADE TÉRMICA



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

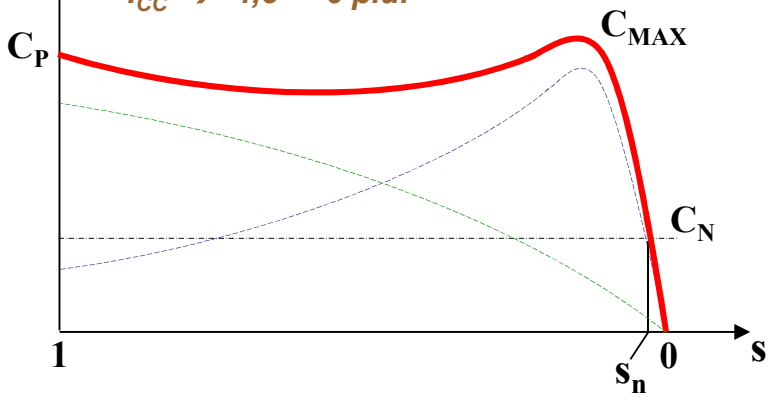
C_P → 2,2 - 2,8 p.u.

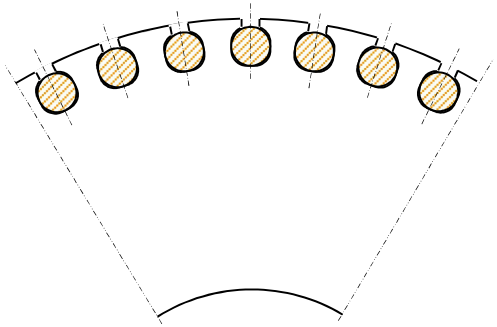
C_{MAX} → 1,8 - 2,2 p.u.

s_n → 1,5 - 2,5 %

I_{CC} → 4,5 - 6 p.u.

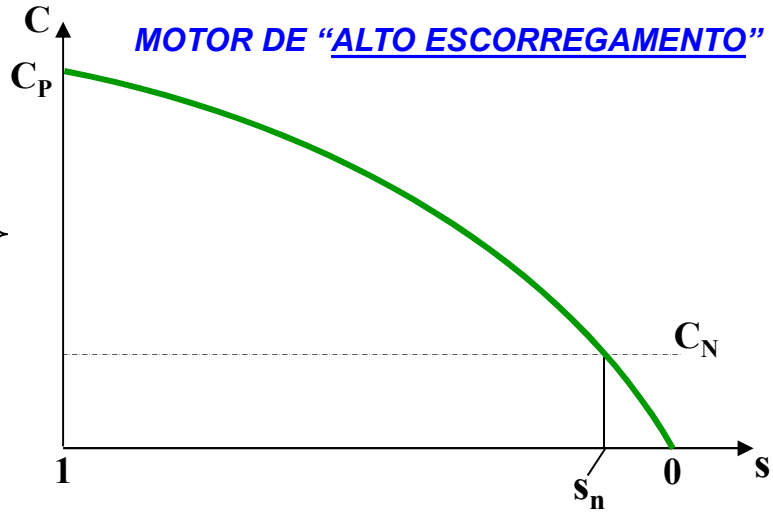
GAIOLA DE PARTIDA COM PEQUENA CAPACIDADE TÉRMICA





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

MOTOR DE "ALTO ESCORREGAMENTO"



C_P → 2,7 - 3,5 p.u.

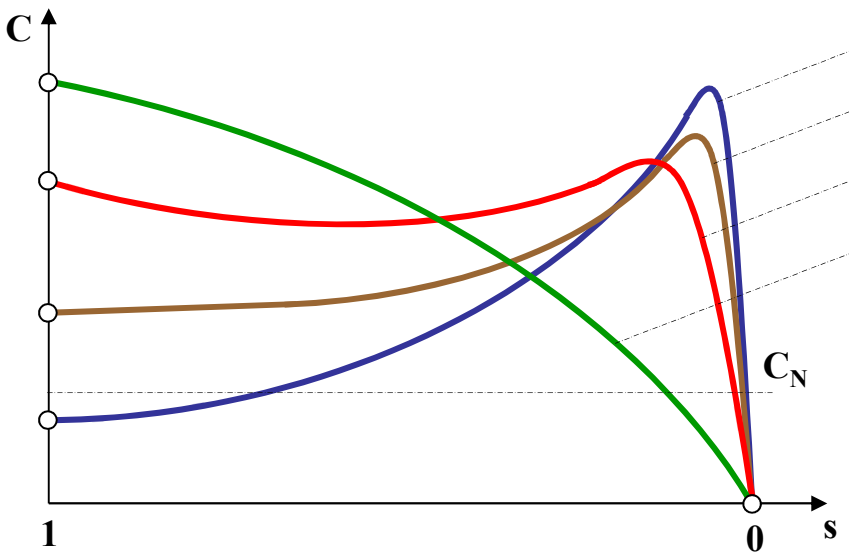
C_{MAX} → C_P

s_n → 8 - 13 %

I_{CC} → 3,5 - 5 p.u.

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



GAIOLA SIMPLES ➔ CATEGORIA "A"

GAIOLA PROFUNDA ➔ CATEGORIA "B"

DUPLA GAIOLA ➔ CATEGORIA "C"

ALTO ESCORREG. ➔ CATEGORIA "D"

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")

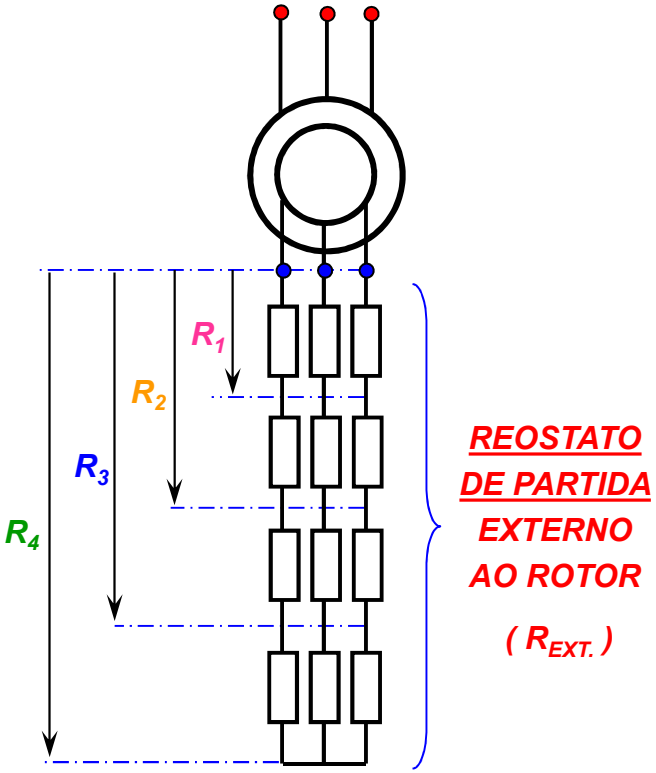
CATEGORIAS DE CONJUGADO SEGUNDO A NORMA "ABNT" BRASILEIRA E "IEC" :

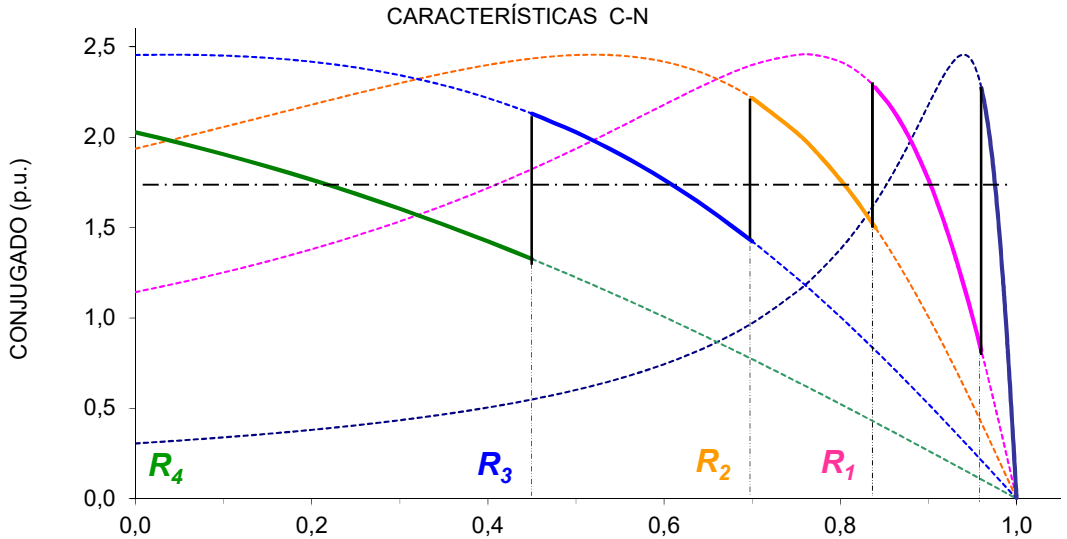
CATEGORIA "N" → "A" E "B" NEMA

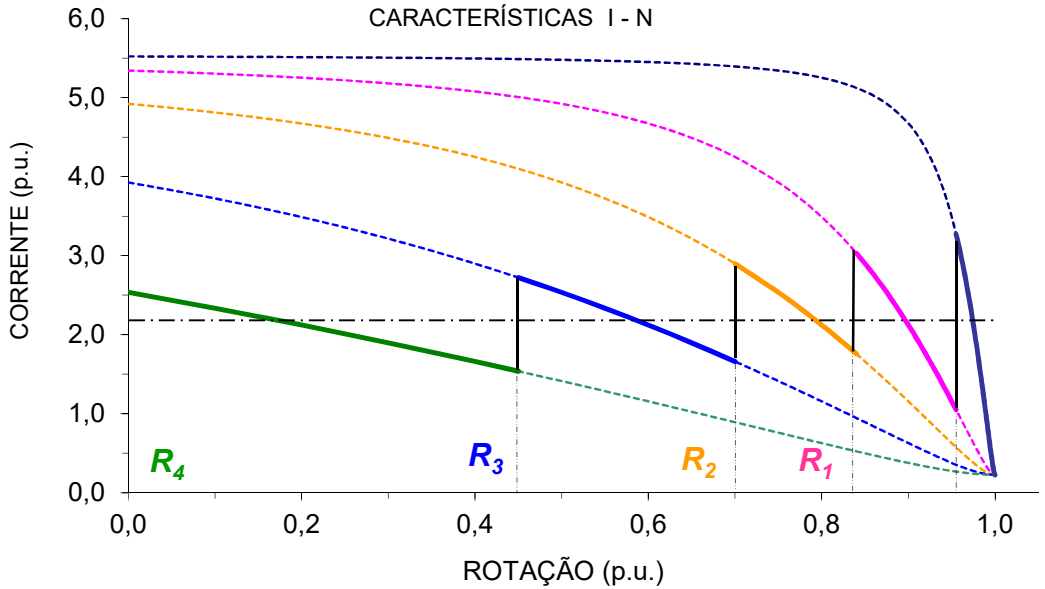
CATEGORIA "H" → "C" NEMA

CATEGORIA "D" → "D" NEMA

MÉTODOS DE PARTIDA DOS MOTORES ASSÍNCRONOS - MOTORES DE ANÉIS







REOSTATO ELIMINADO GRADUALMENTE CONFORME A ACELERAÇÃO DO MOTOR

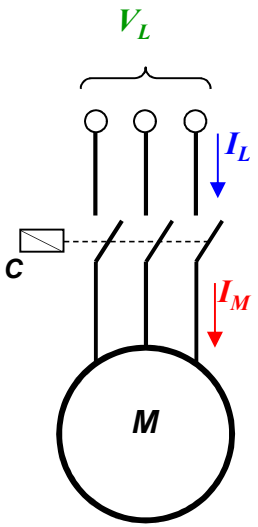
PARTIDA DISSIPATIVA → DISSIPAÇÃO DE POTÊNCIA EXTERNA AO ROTOR

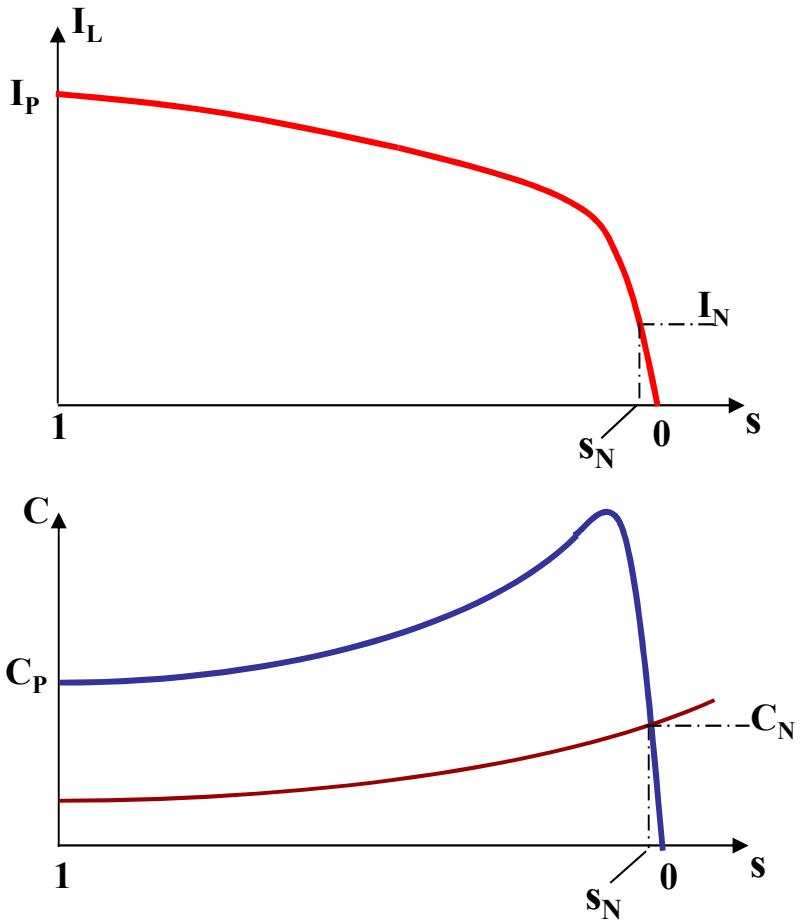
OTIMIZAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PARTIDA

ADEQUADO PARA PARTIDAS FREQÜENTES 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)

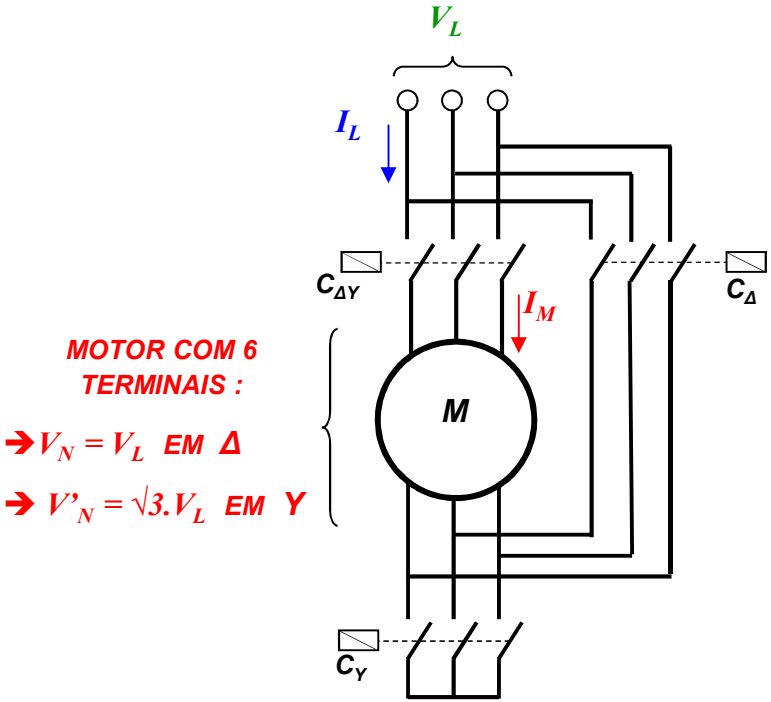
MÉTODO UTILIZADO PARA MOTORES MÉDIOS E GRANDES EM MÉDIA TENSÃO (2,3 - 3,3 - 4,16 - 6,6 - 13,8 kV)

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

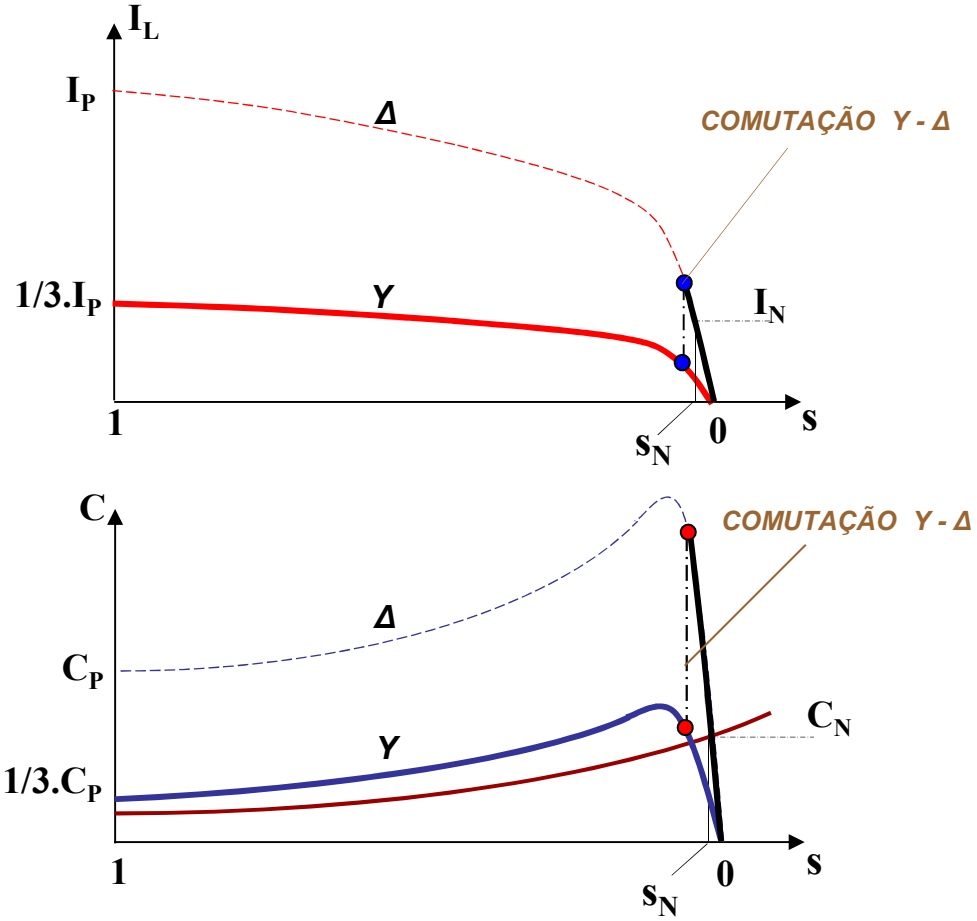
PARTIDA ESTRELA – TRIÂNGULO → Y - Δ



MOTOR COM 6 TERMINAIS :

→ $V_N = V_L$ EM Δ

→ $V'_N = \sqrt{3}.V_L$ EM Y



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

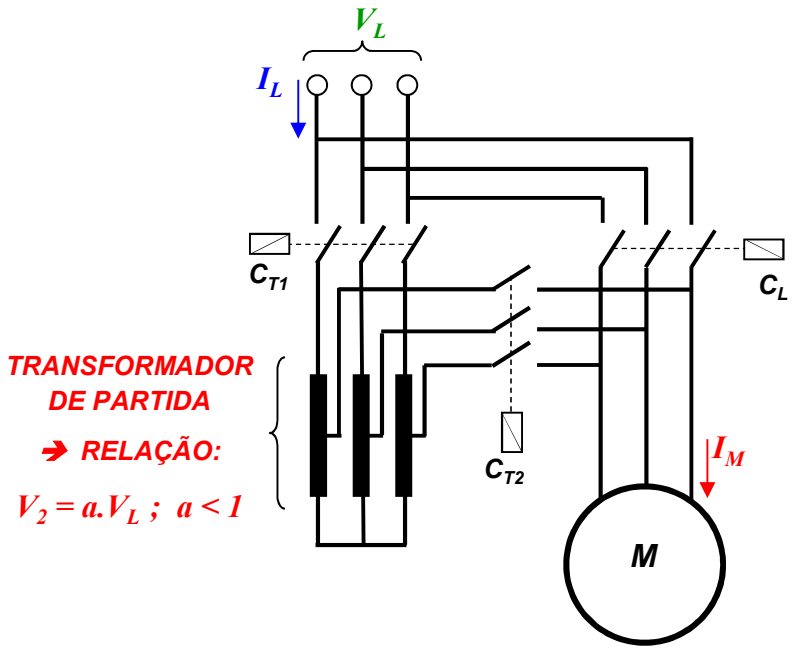
TENSÃO NOMINAL DO MOTOR NA LIGAÇÃO "Δ" IGUAL À TENSÃO DA LINHA

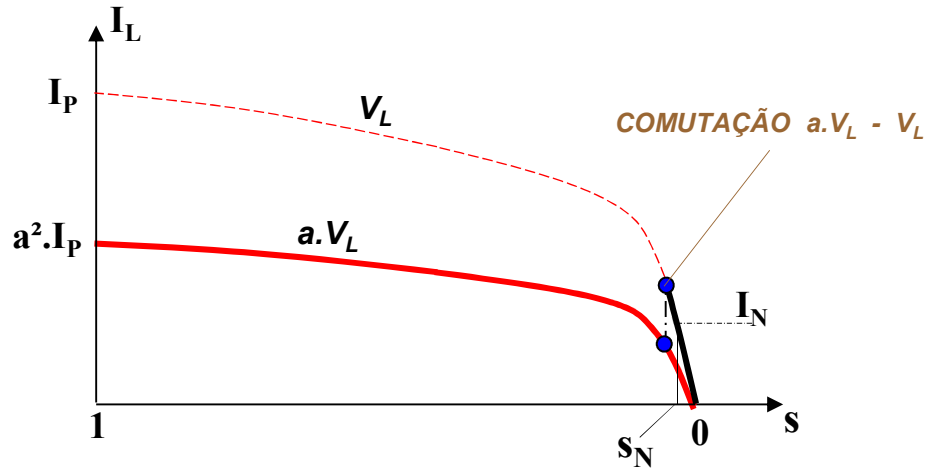
CORRENTE NA LINHA REDUZIDA A 1/3 DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO DO MOTOR NA PARTIDA

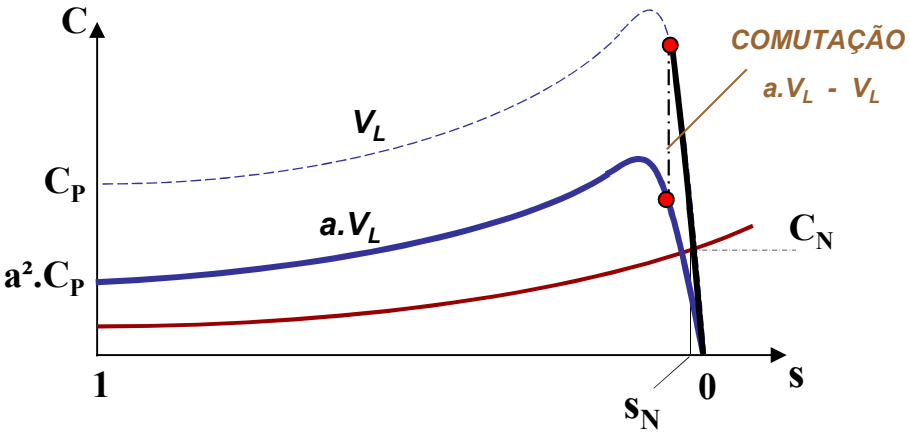
CURVA DE TORQUE ATENUADA PARA 1/3 DOS SEUS VALORES PLENOS EM QUALQUER "s"

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"

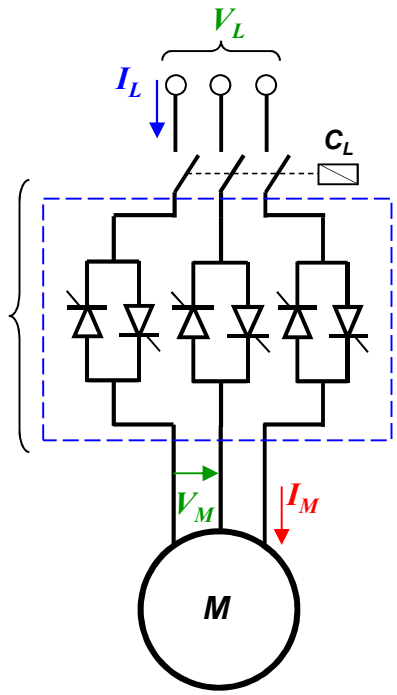
MÉTODOS DE PARTIDA DOS MOTORES ASSÍNCRONOS - MOTORES DE GAIOLA

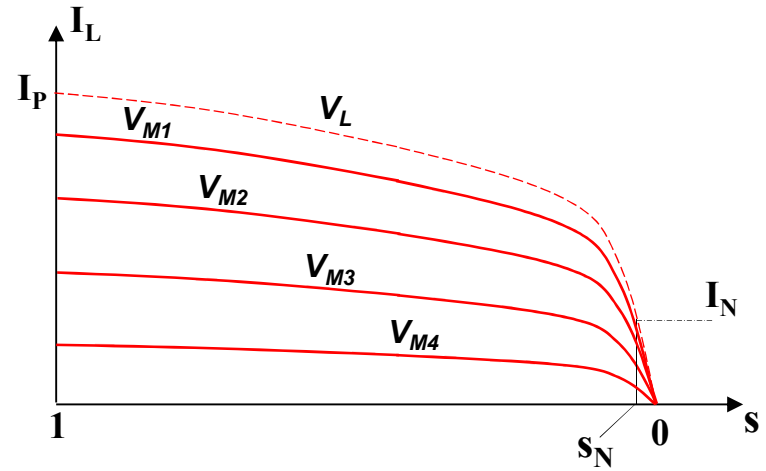
PARTIDA COM "SOFT-STARTER"

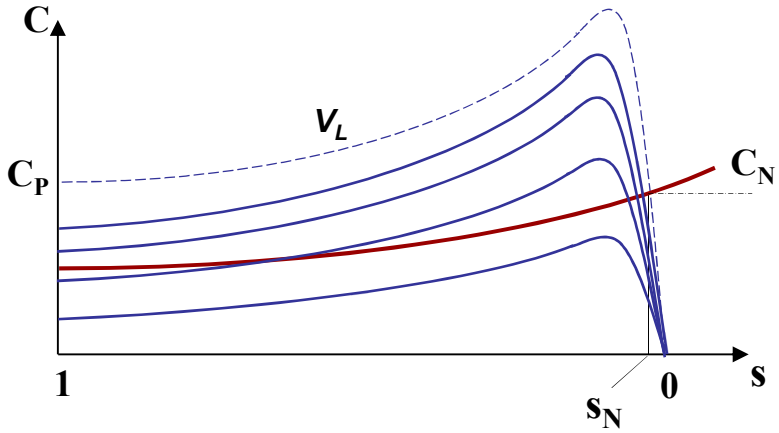
CONVERSOR CA-CA TIRISTORIZADO CONTROLÁVEL

$V_M = \cos \alpha . V_L$

α : ÂNGULO DE DISPARO DAS CHAVES







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

MÉTODOS DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DOS MOTORES DE INDUÇÃO

VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO EIXO DO MOTOR ASSÍNCRONO :

➔ $\omega_R = (1 - s).\,\omega_s$

➔ $\omega_s = 2.\pi\,.\,f_1 / p$

3 MÉTODOS POSSÍVEIS DE VARIAÇÃO DA ROTAÇÃO:

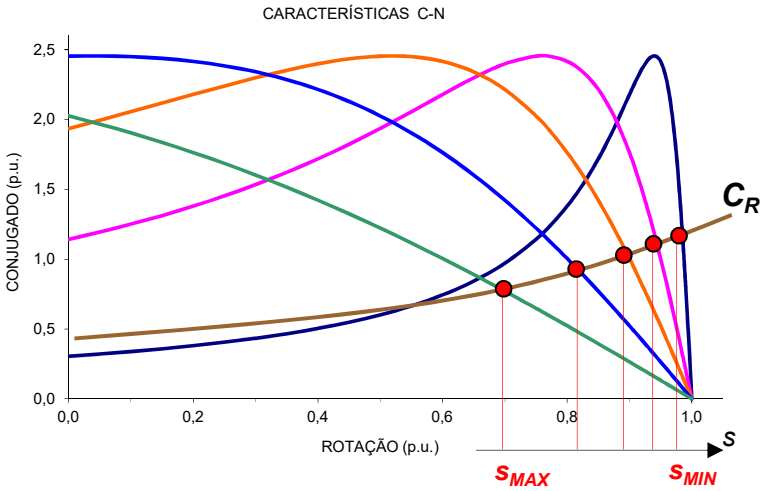
⇩

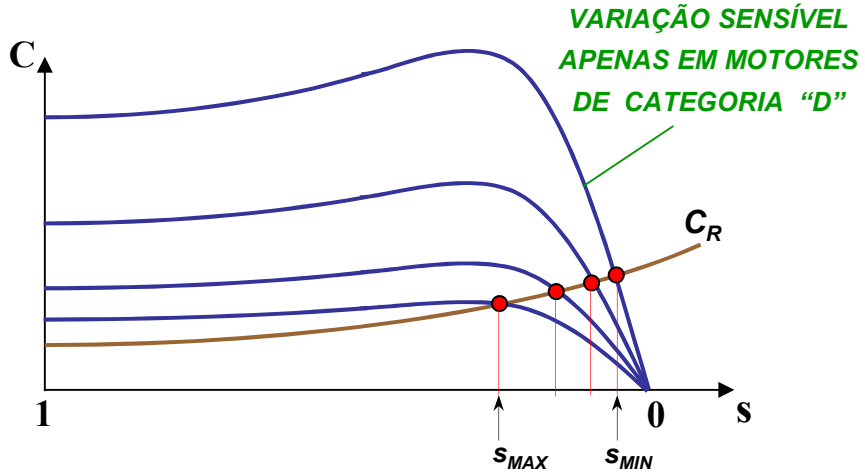
→ POR ESCORREGAMENTO - MÉTODO DISSIPATIVO

→ POR COMUTAÇÃO DO NÚMERO DE PÓLOS - VARIAÇÃO DISCRETA

→ POR ALIMENTAÇÃO COM FREQÜÊNCIA 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

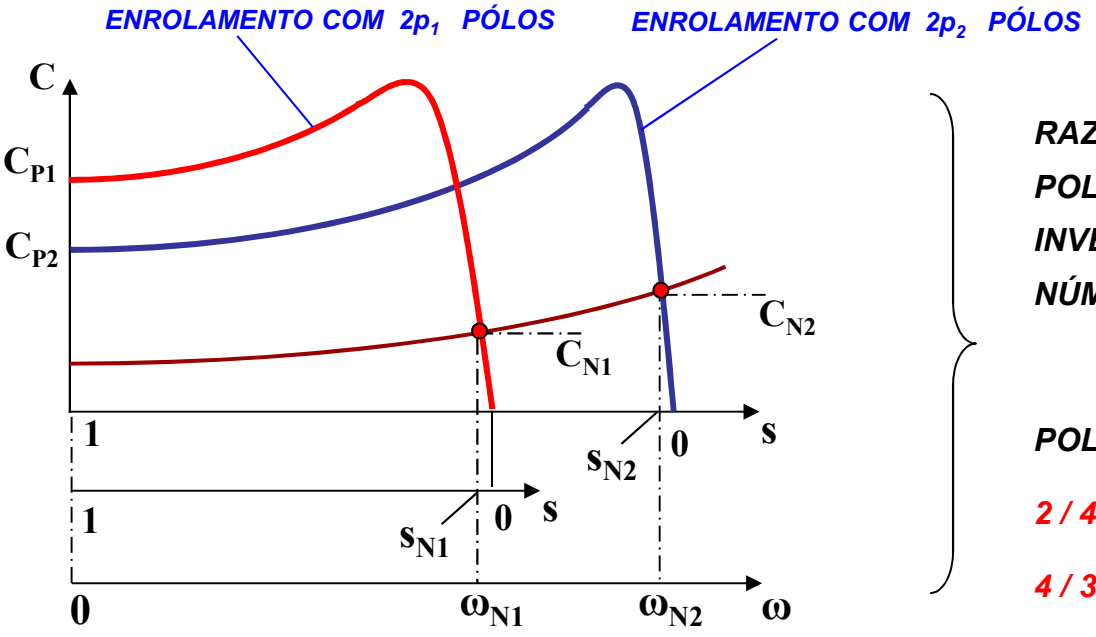
MOTOR DE GAIOLA → POR VARIAÇÃO DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR

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



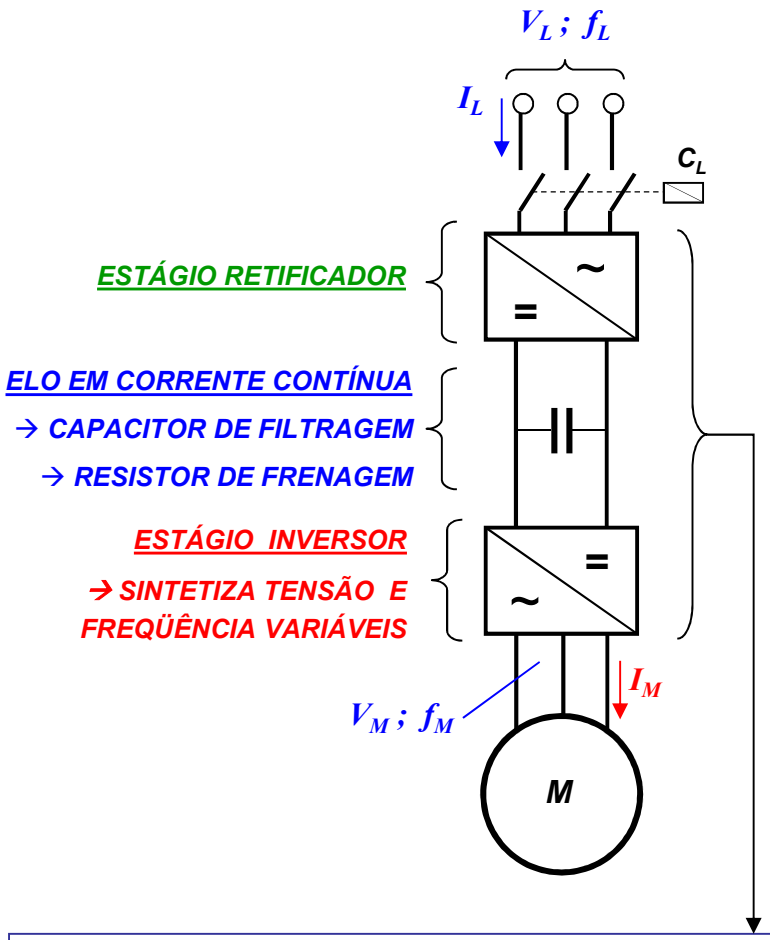
RAZÃO DAS POTÊNCIAS EM CADA POLARIDADE APROXIMADAMENTE INVERSAMENTE PROPORCIONAL AO NÚMERO DE PÓLOS

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 FREQÜÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR



NO MOTOR DE INDUÇÃO:

→ CAMPO ROTATIVO COM VELOCIDADE SÍNCRONA DADA POR:

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

→PARA Nº DE PÓLOS FIXADOS NA CONSTRUÇÃO, A ROTAÇÃO SÍNCRONA É FUNÇÃO EXCLUSIVA DA FREQÜÊNCIA 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 FREQÜÊNCIA VARIÁVEL → A PARTIR DA TENSÃO FIXA DA REDE, PROMOVE NOS TERMINAIS DO MOTOR, TENSÃO E FREQÜÊNCIA TRIFÁSICAS, VARIÁVEIS E CONTROLADAS.

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

VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA FREQÜÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR

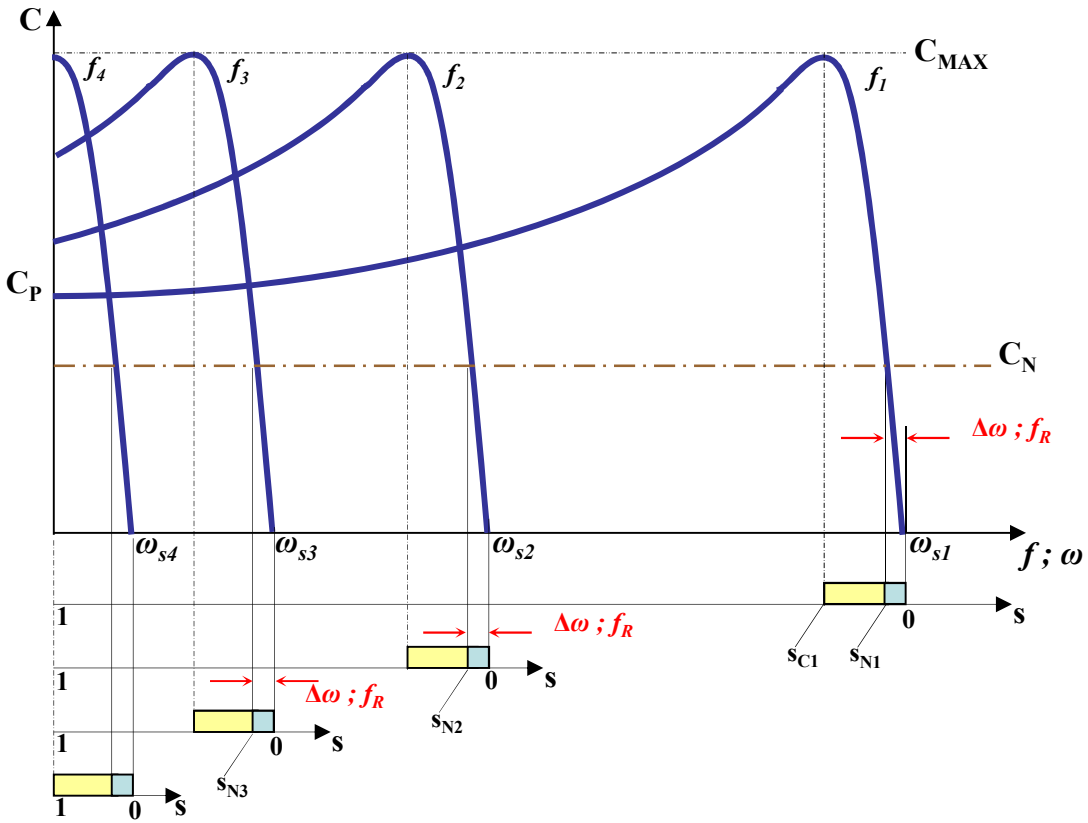
GARANTIA DA DISPONIBILIDADE DE CONJUGADO DESENVOLVIDO PELO MOTOR DE INDUÇÃO:

➔ $C = k \,.\, B_g \,.\, L \,.\, I_{at}$ → PARA CORRENTE DEFINIDA (NO VALOR NOMINAL p.ex.) NO ROTOR ➔ $B_g = cte.$

➔ CONSERVAÇÃO DA MAGNITUDE DO CAMPO ROTATIVO ➔ CONSERVAÇÃO DO FLUXO POR PÓLO

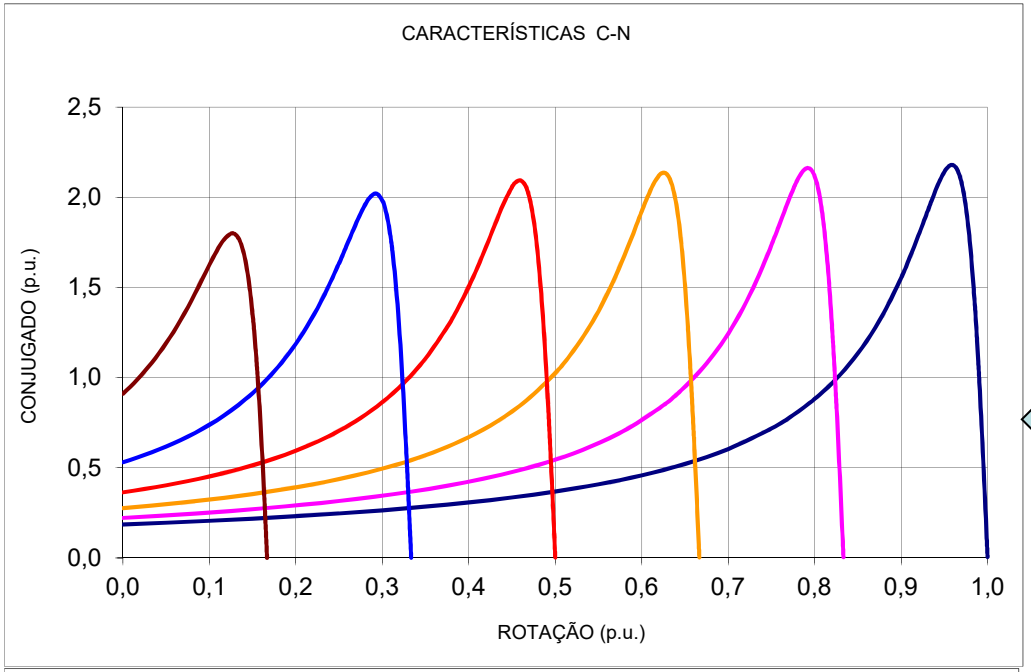
➔ $V = 4{,}44 \,.\, f \,.\, N_F \,.\, \Phi$ ➔ PARA $\Phi = cte.$ ➔ $V / f = cte$

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



CARACTERÍSTICAS DO MOTOR DE INDUÇÃO, ALIMENTADO COM FREQÜÊNCIA VARIÁVEL, V / f = cte.

➔ CURVAS DE CONJUGADO SE DESLOCAM PARALELAMENTE AO EIXO DA ROTAÇÃO



CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DE MOTOR DE INDUÇÃO

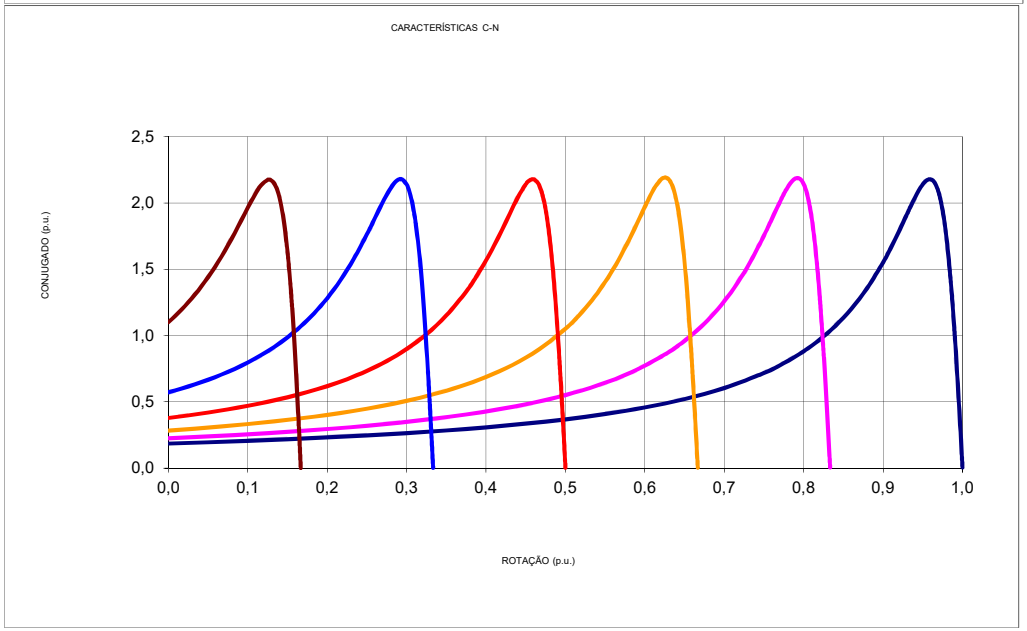
VARIAÇÃO DE VELOCIDADE PELA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA

RAZÃO TENSÃO / FREQUÊNCIA CONSTANTE

INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DO ESTATOR SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DO MOTOR REAL

MOTOR DE INDUÇÃO DE GAIOLA

VARIAÇÃO DE 10 A 60 Hz

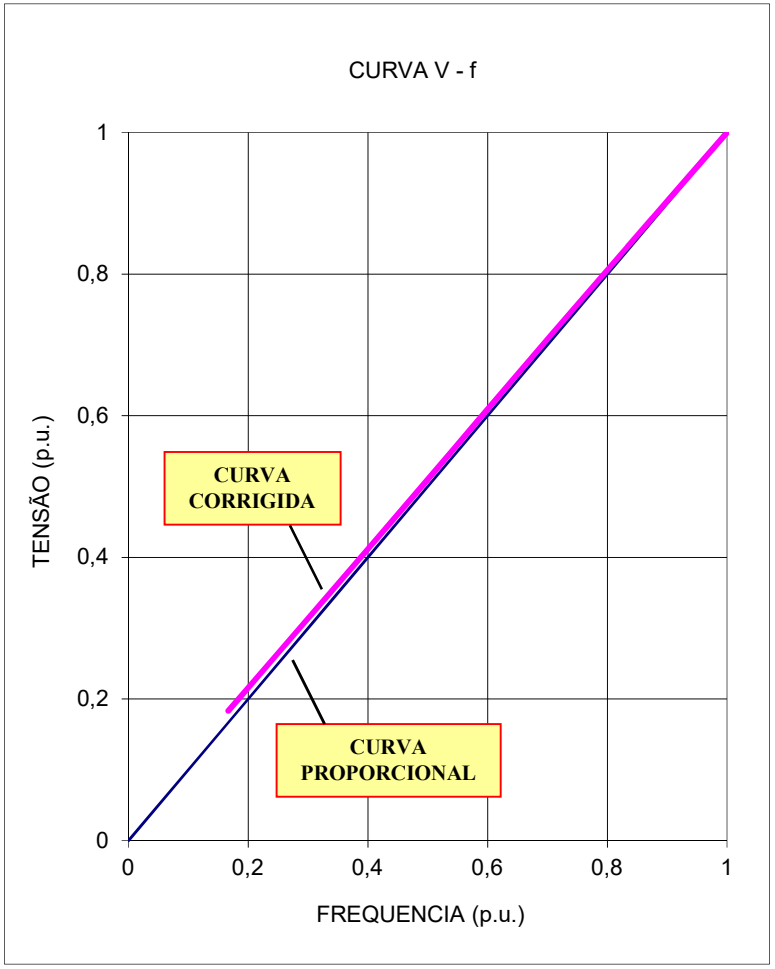


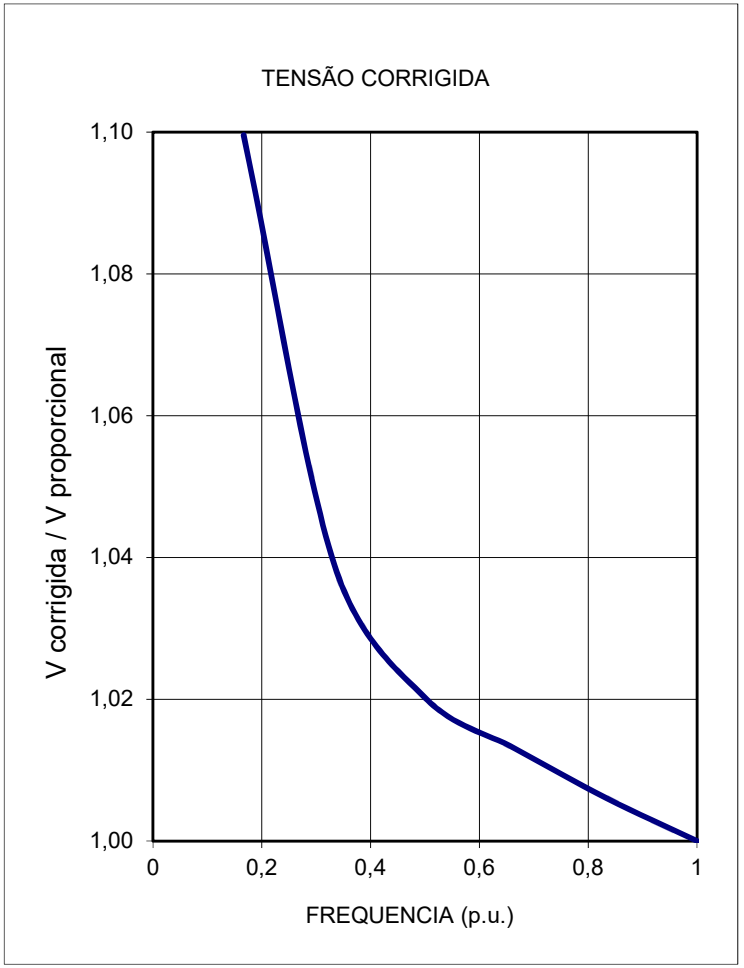
CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DE MOTOR DE INDUÇÃO

VARIAÇÃO DE VELOCIDADE PELA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA

RAZÃO TENSÃO / FREQUÊNCIA CORRIGIDA

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

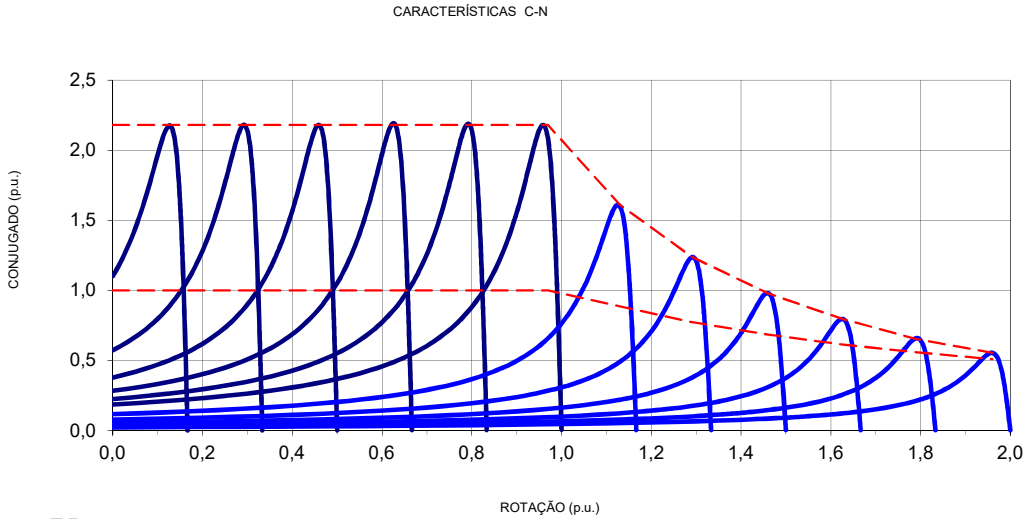


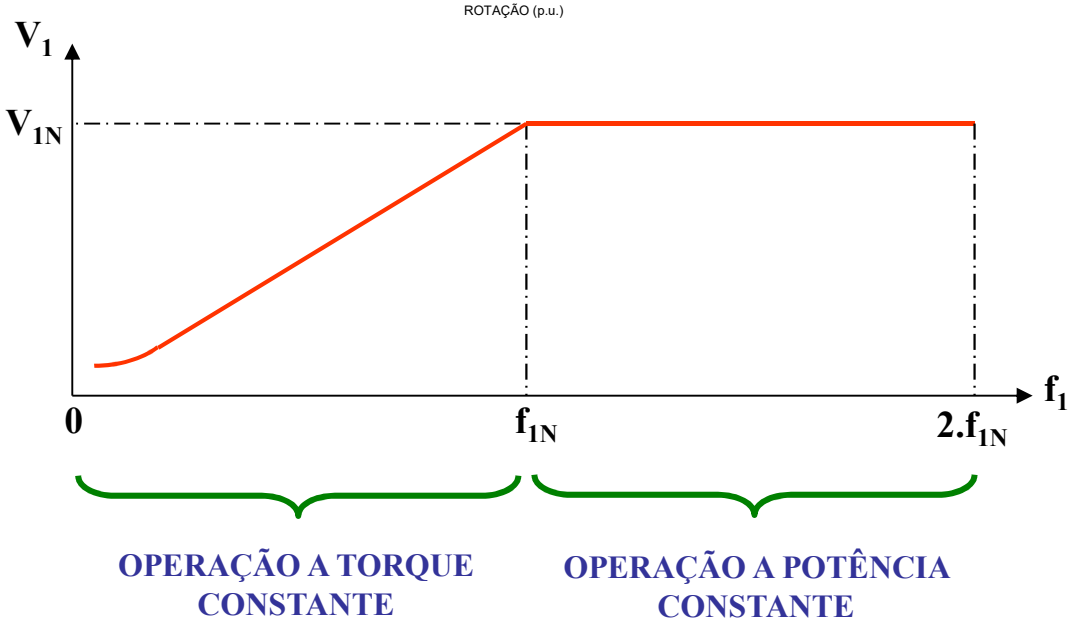


CURVAS DE VARIAÇÃO DA RELAÇÃO TENSÃO / FREQUÊNCIA

INCREMENTO NA TENSÃO PROPORCIONAL PARA CORREÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS

VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA FREQÜÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR





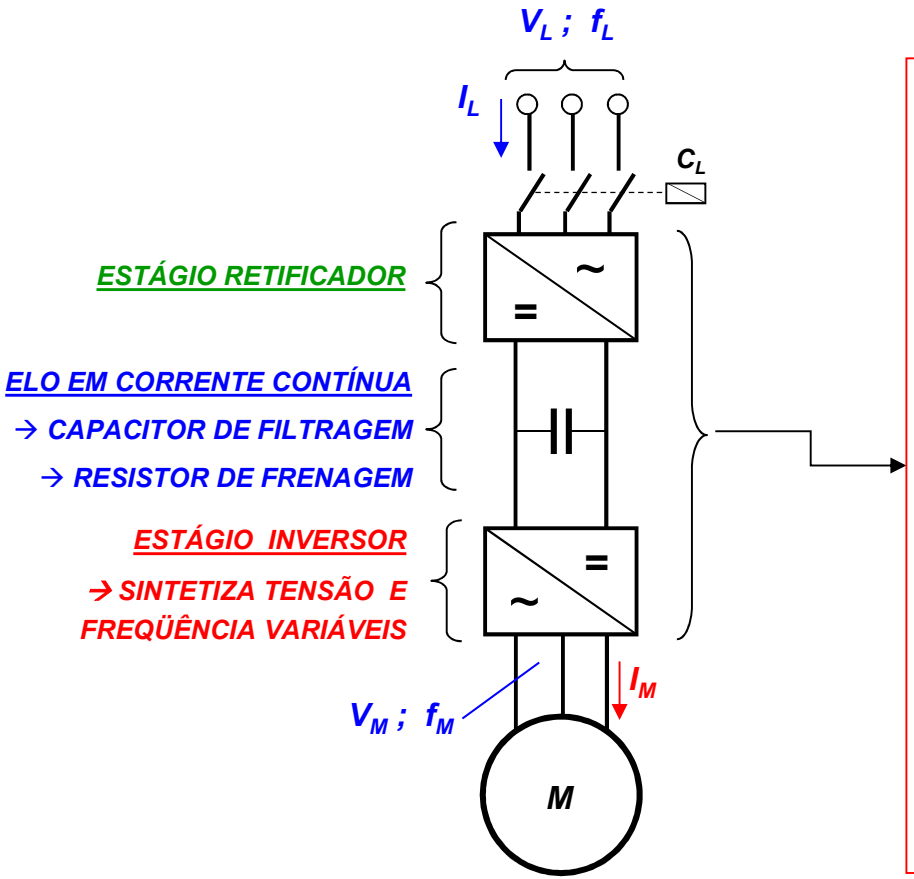
EVOLUÇÃO DA TENSÃO E FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DO MOTOR ASSÍNCRONO, OPERADO EM VELOCIDADE VARIÁVEL

VARIAÇÃO ABAIXO E ACIMA DA FREQÜÊNCIA 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 RETIFICAFOR NÃO É REGENERATIVO

ESTÁGIO INVERSOR:

CHAVES ESTÁTICAS (IGBT ATUALMENTE) COMANDADAS ADEQUADAMENTE

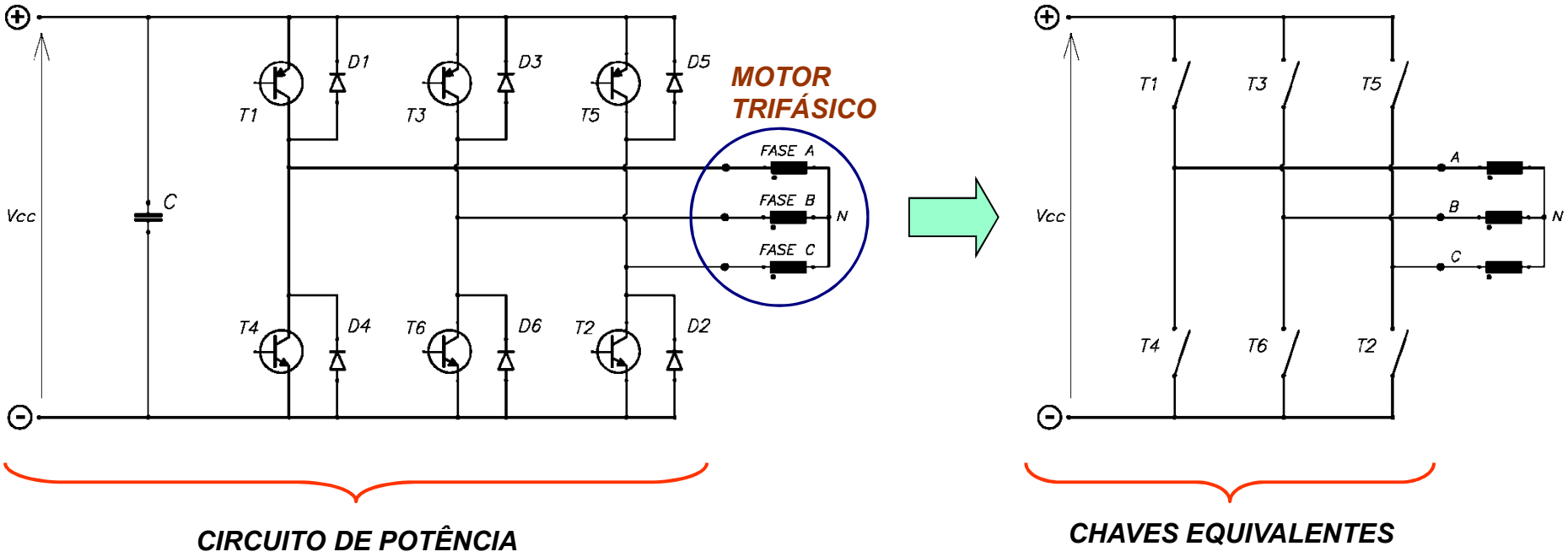
TOPOLOGIA TÍPICA DO ESTÁGIO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Vcc – 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"

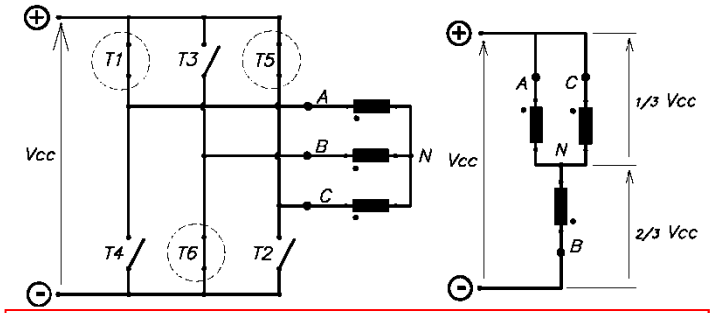
D1 a D6 - DIODOS DE RETORNO (PARA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES INDUTIVAS E DURANTE A REGENERAÇÃO)

C - CAPACITOR DE FILTRO E DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

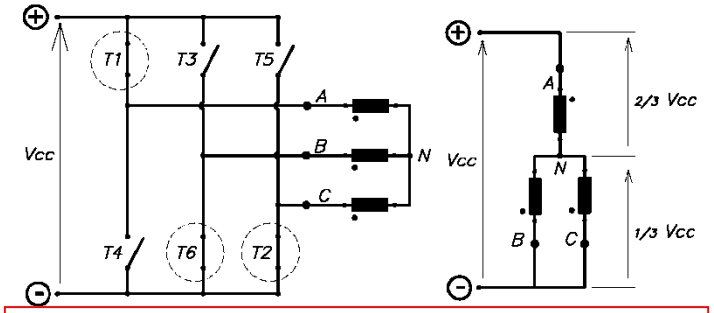


SINTETIZAÇÃO DE TENSÕES TRIFÁSICAS PELO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

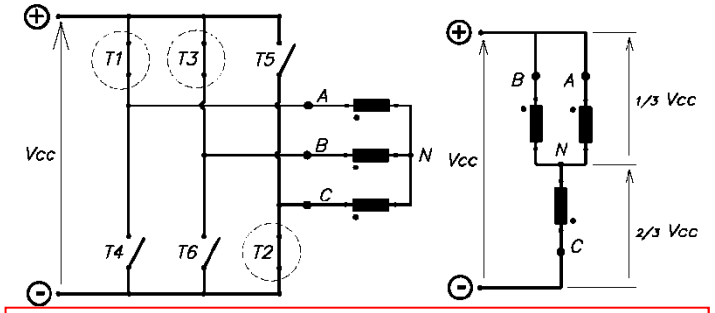
FREQUÊNCIA DA TENSÃO SINTETIZADA ➔ DETERMINADA PELO TEMPO DE DURAÇÃO DO INTERVALO DE CONDUÇÃO DAS CHAVES



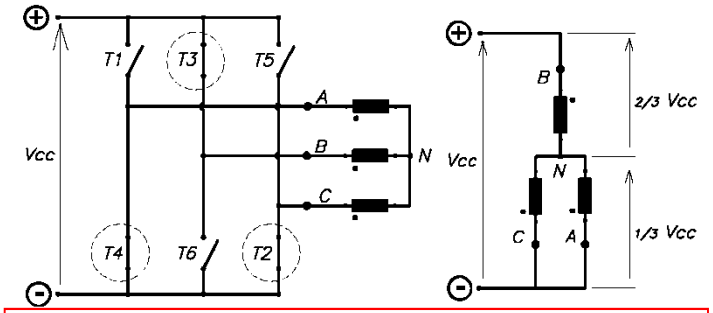
INTERVALO DE CONDUÇÃO 1 --> CHAVES CONDUZINDO: T5 – T6 – T1



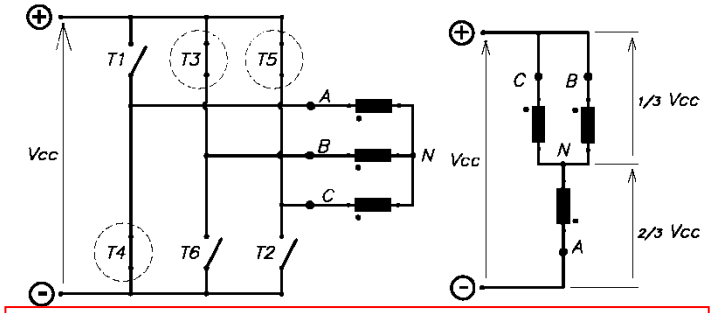
INTERVALO DE CONDUÇÃO 2 --> CHAVES CONDUZINDO: T6 – T1 – T2



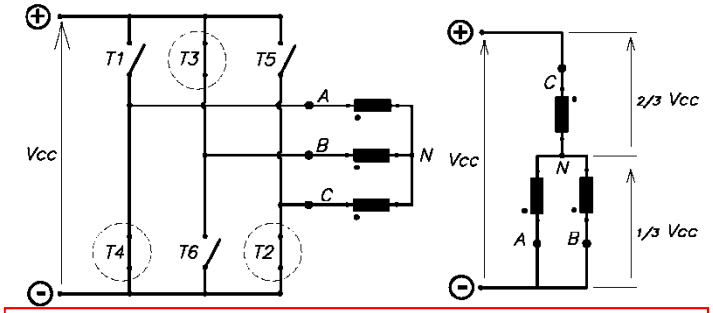
INTERVALO DE CONDUÇÃO 3 --> CHAVES CONDUZINDO: T1 – T2 – T3



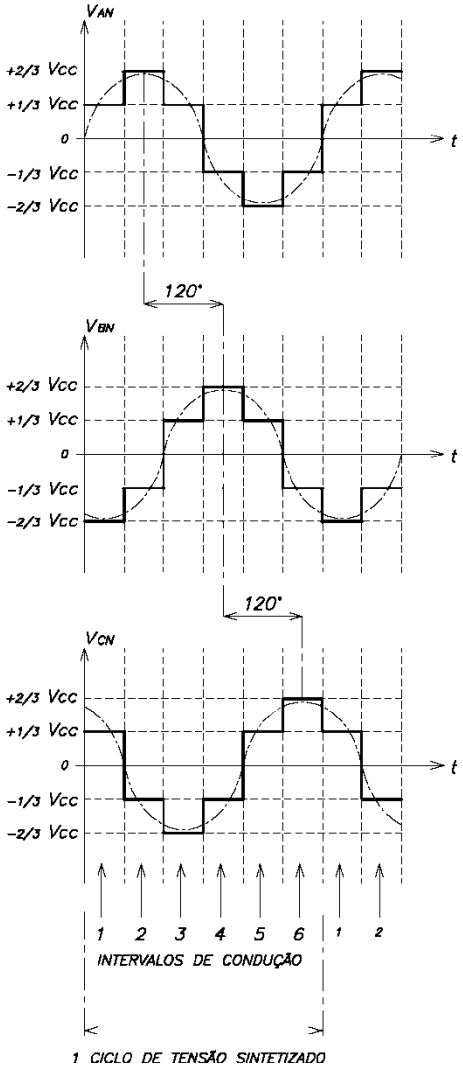
INTERVALO DE CONDUÇÃO 4 --> CHAVES CONDUZINDO: T2 – T3 – T4



INTERVALO DE CONDUÇÃO 5 --> CHAVES CONDUZINDO: T3 – T4 – T5



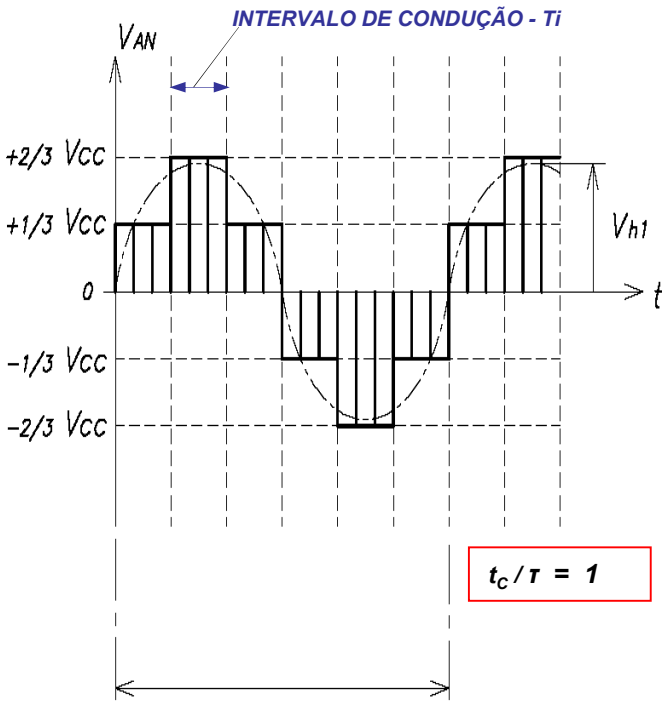
INTERVALO DE CONDUÇÃO 6 --> CHAVES CONDUZINDO: T4 – T5 – T6



AJUSTE DE TENSÃO CONCOMITANTE COM A FREQUÊNCIA

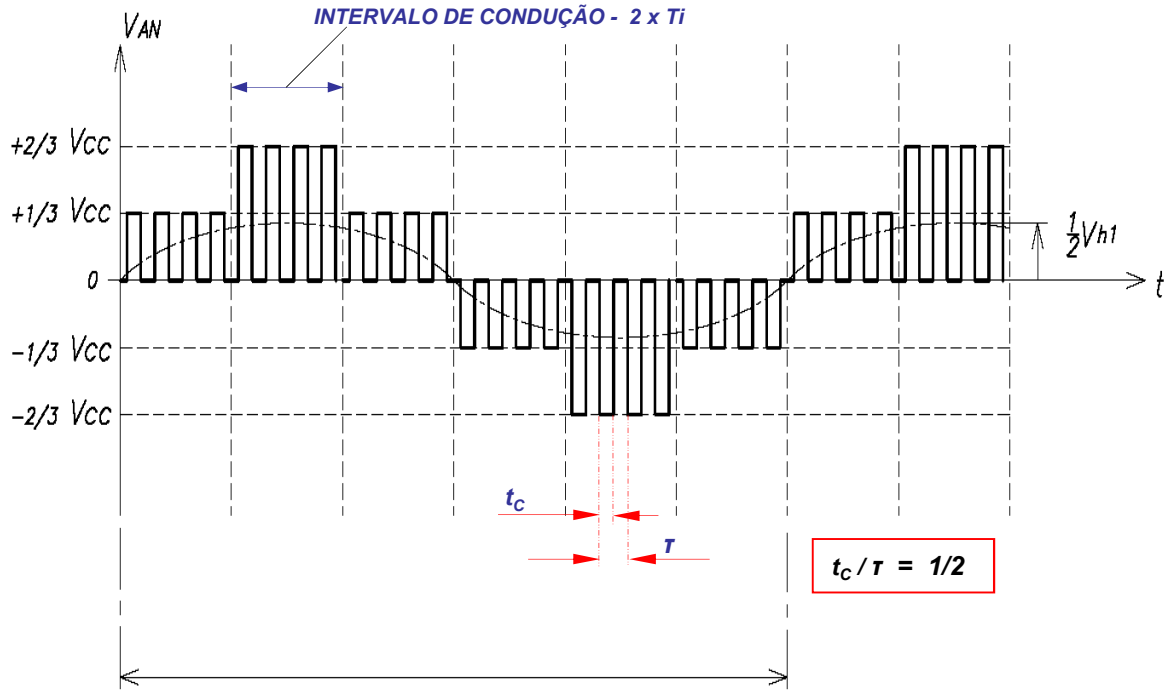
RECORTE DA TENSÃO SINTETIZADA POR CHAVEAMENTO DENTRO DE CADA INTERVALO DE CONDUÇÃO DAS CHAVES

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]