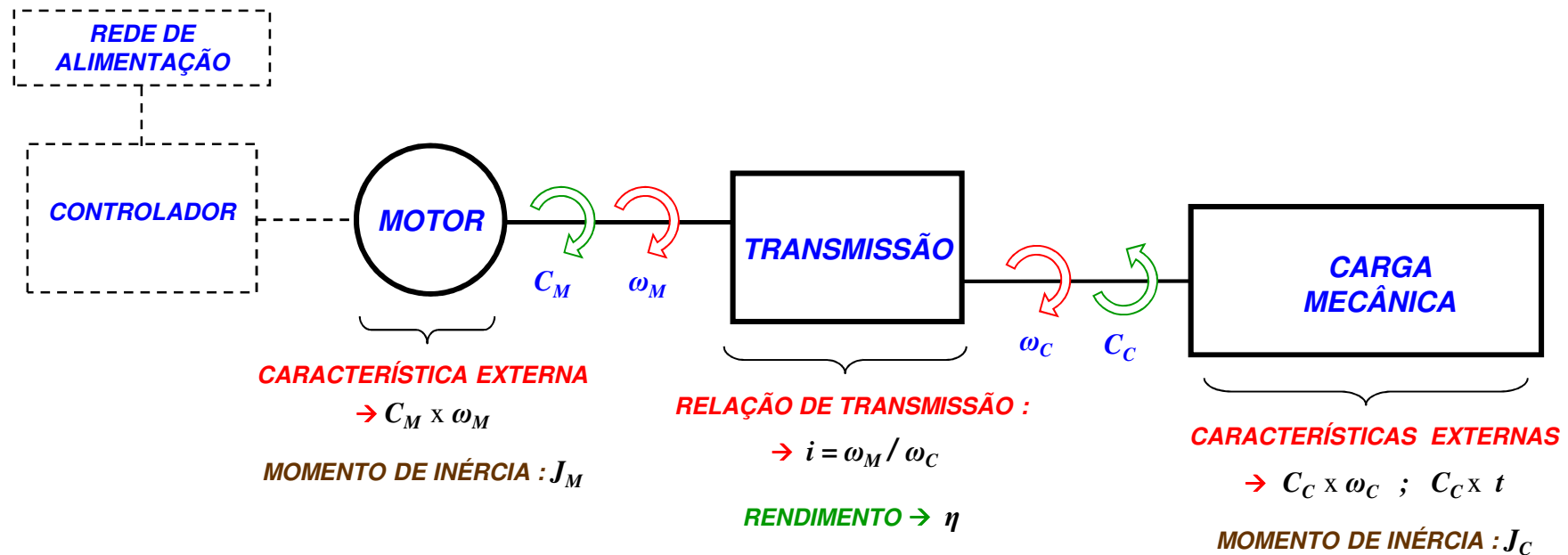


PARTE 3 – ACIONAMENTOS

ASPECTOS GERAIS DOS ACIONAMENTOS INDUSTRIAIS

ACIONAMENTO → **CARACTERIZADO POR MOTOR ACOPLADO A UMA CARGA MECÂNICA ATRAVÉS DE UMA TRANSMISSÃO ADEQUADA**



POTÊNCIA DE SAÍDA NO EIXO DO MOTOR: $P_M = C_M \cdot \omega_M \rightarrow P_M : [\text{W}]$; $C_M : [\text{N.m}]$; $\omega_M : [\text{rd/s}]$

POTÊNCIA DE ENTRADA NO EIXO DA CARGA: $P_C = C_C \cdot \omega_C$

$$\rightarrow P_M = (1 / \eta) \cdot P_C$$

CARGA REFERIDA AO EIXO DO MOTOR:

CONJUGADO REFERIDO $\rightarrow C_M = \frac{C_C}{i \cdot \eta}$

VELOCIDADE REFERIDA $\rightarrow \omega_M = i \cdot \omega_C$

MOMENTO DE INÉRCIA TOTAL TRACIONADO $\rightarrow J_{TOT} = J_M + \frac{1}{i^2} \cdot J_C$

TRANSMISSÃO REDUTORA: $i > 1$; TRANSMISSÃO MULTIPLICADORA: $i < 1$

$$E_{c-carga} = \frac{1}{2} \cdot J_C \cdot \omega_c^2$$

$$E_{c-carga\ ref} = \frac{1}{2} \cdot J_{ref} \cdot \omega_M^2$$

$$J_{ref} = J_C \cdot \frac{\omega_c^2}{\omega_M^2} = J_C \cdot \frac{1}{i^2}$$

INÉRCIA DA CARGA REFERIDA AO EIXO DO MOTOR

TIPO DE MOTOR (CARACTERÍSTICA $C_M \times \omega_M$)
VELOCIDADE (FIXA – VARIÁVEL – CONTROLÁVEL)
POTÊNCIA REQUERIDA - REGIME DE TRABALHO

**ASSOCIADO AO TIPO E NATUREZA
DA CARGA MECÂNICA ACIONADA**

MÉTODO DE PARTIDA (VAZIO – EM CARGA)
LIMITAÇÃO DE CORRENTE DE PARTIDA
DURAÇÃO E FREQUÊNCIA DE PARTIDAS

**ASSOCIADO AO TIPO DE ALIMENTADOR
DISPONÍVEL E LIMITE DE IMPACTO
ELÉTRICO PERMITIDO NA REDE**

CARGAS MECÂNICAS → PRINCIPAIS TIPOS E CARACTERÍSTICAS

MÁQUINAS DE FLUXO →

EM GERAL : CONJUGADO E
POTÊNCIA CONSTANTES NO
TEMPO

BOMBAS

VENTILADORES

COMPRESSORES

EM GERAL: $C_c = k \cdot (\omega_c)^2$; $P_c = k \cdot (\omega_c)^3$

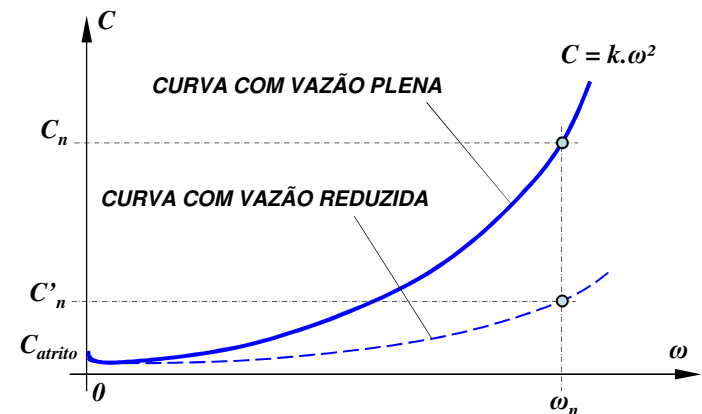
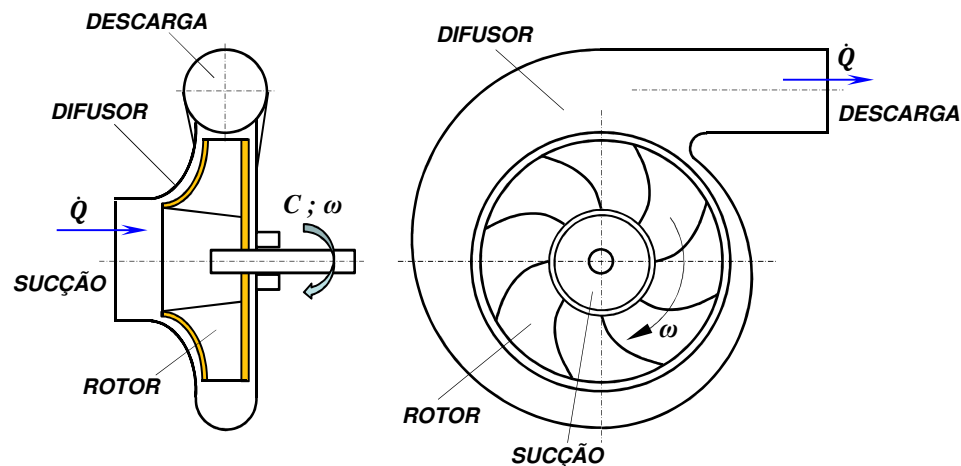
BAIXO CONJUGADO DE PARTIDA

PARTIDA COM CURVA DE TORQUE REDUZIDA (VAZÃO RESTRINGIDA)

EM GERAL: $C_c = k$ OU $C_c = k \cdot \omega_c$; $p_c = k \cdot \omega_c$ OU $P_c = k \cdot (\omega_c)^2$

ELEVADO CONJUGADO DE PARTIDA

PARTIDA COM CONTRA PRESSÃO



CARACTERÍSTICA TÍPICA DE BOMBA / VENTILADOR

BOMBA TÍPICA: ROTOR IMPRIME QUANTIDADE DE MOVIMENTO AO FLUIDO DE TRABALHO AO SER ROTACIONADO, RESULTANDO EM GANHO DE PRESSÃO ENTRE A SUCÇÃO E A DESCARGA, PARA UMA DADA VAZÃO

POTÊNCIA HIDRÁULICA NO FLUIDO: $P_h [W] = Q \cdot \Delta H$ - Q : VAZÃO EM m^3/s ; ΔH : GANHO DE PRESSÃO EM Pa OU N/m^2

POTÊNCIA MECÂNICA REQUERIDA NO EIXO: $P_{mec} = P_h / \eta_h \rightarrow \eta_h$: RENDIMENTO HIDRÁULICO

MOTORES COMUMENTE EMPREGADOS: MOTORES DE INDUÇÃO DE GAIOLA CATEGORIAS "A" ou "C", DIRETAMENTE CONECTADOS À REDE

CARGAS MECÂNICAS → PRINCIPAIS TIPOS E CARACTERÍSTICAS

MÁQUINAS DE LEVANTAMENTO
E TRANSPORTE

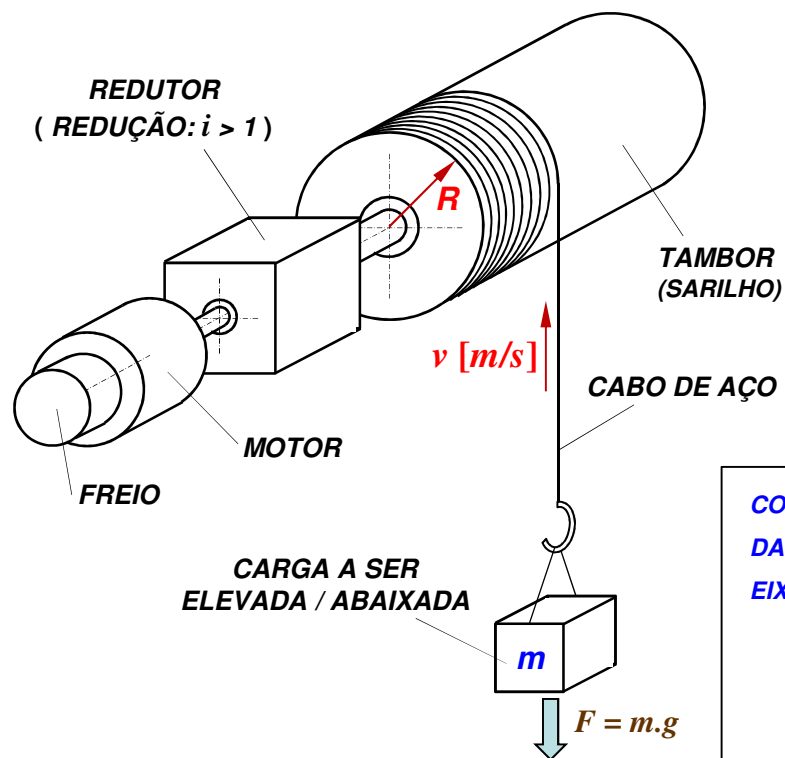
EM GERAL : CONJUGADO E POTÊNCIA
AMPLAMENTE VARIÁVEIS NO TEMPO

→ {
PONTES ROLANTES
GUINCHOS
GUINDASTES
GRUAS
ELEVADORES

EM GERAL: $C_c = k$; $P_c = k \cdot \omega_c$

ELEVADO CONJUGADO DE PARTIDA
(IGUAL OU SUPERIOR AO DE REGIME)

PARTIDAS E PARADAS FREQÜENTES

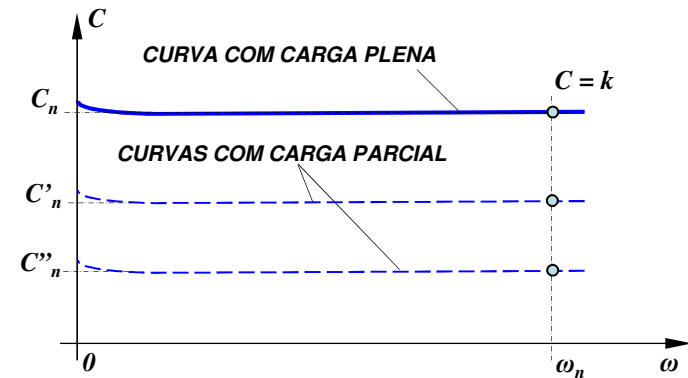


ELEMENTOS
BÁSICOS DE
UM GUINCHO

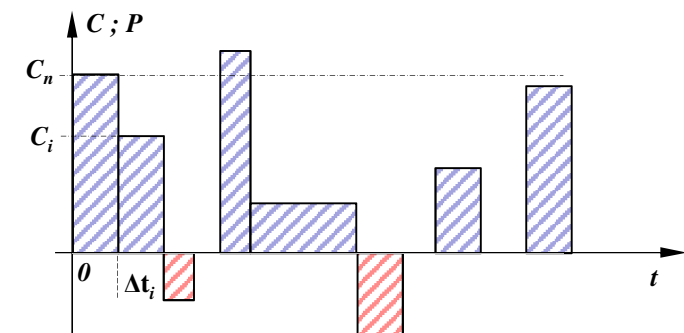
CONJUGADO E VELOCIDADE
DA CARGA REFERIDOS AO
EIXO DO MOTOR :

$$C_c = m \cdot g \cdot R / i$$

$$\omega_c = (v / R) \cdot i$$



CARACTERÍSTICA TÍPICA DE UM GUINCHO



MOTORES COMUMENTE EMPREGADOS: MOTORES DE GAIOLA CATEGORIA "D" COM DUPLA POLARIDADE / MOTORES ASSÍNCRONOS DE ANÉIS

CARGAS MECÂNICAS → PRINCIPAIS TIPOS E CARACTERÍSTICAS

MÁQUINAS DE GRANDE INÉRCIA →

EM GERAL: CONJUGADO E
POTÊNCIA VARIÁVEIS NO TEMPO
(EXCEÇÃO AO SOPRADOR)

SÉRIAS DIFICULDADES DE PARTIDA

SOPRADORES

EM GERAL: $C_c = k \cdot (\omega_c)^2$; $P_c = k \cdot (\omega_c)^3$

BAIXO CONJUGADO DE PARTIDA

PARTIDA COM CURVA DE TORQUE REDUZIDA

ESTEIRAS
TRANSPORTADORAS

MOINHOS

BRITADORES

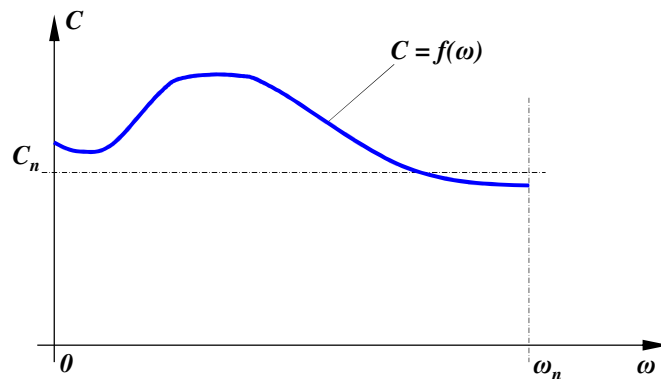
PRENSAS C/ VOLANTE

EM GERAL: $C_c = f(\omega_c)$; $P_c = f(\omega_c) \cdot \omega_c$

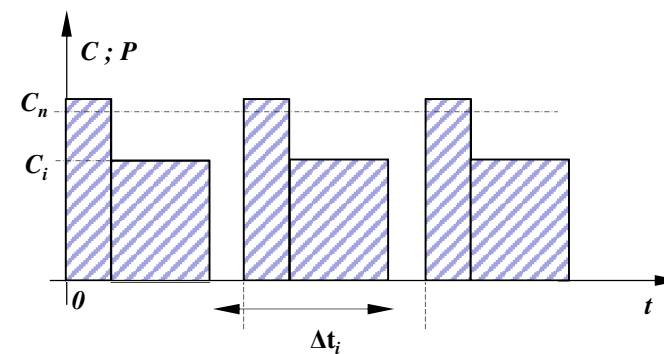
$f(\omega_c) \rightarrow$ FUNÇÃO COMPLEXA DA VELOCIDADE

CONJUGADO DE PARTIDA INDETERMINADO

PARTIDAS FREQUENTES



CARACTERÍSTICA TÍPICA DE UM MOINHO DE BARRAS



MOTORES COMUMENTE EMPREGADOS: MOTORES DE INDUÇÃO DE GAIOLA CATEGORIA "B" / MOTORES ASSÍNCRONOS DE ANÉIS

CARGAS MECÂNICAS → PRINCIPAIS TIPOS E CARACTERÍSTICAS

**MÁQUINAS P/ INDÚSTRIA TÊXTIL,
PAPEL E CELULOSE E LAMINAÇÃO →
DE METAIS**

EM GERAL: PERFIL DE TORQUE
VARIÁVEL AO LONGO DO TEMPO

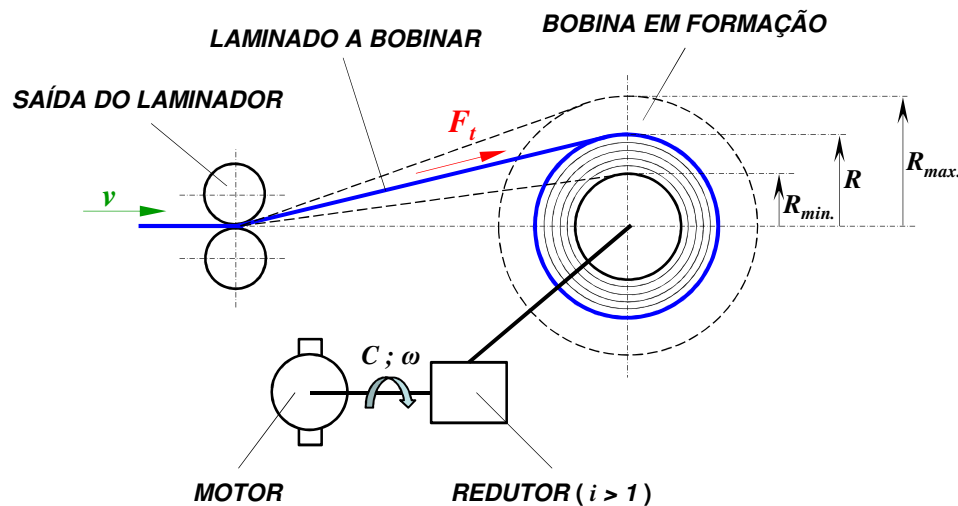
OPERAÇÃO EM MALHA FECHADA
DE CONTROLE

BOBINADEIRAS
DESBOBINADEIRAS
CALANDRAS
LAMINADORES

EM GERAL: $C_c = k \cdot (1 / \omega_c)$; $P_c = k$

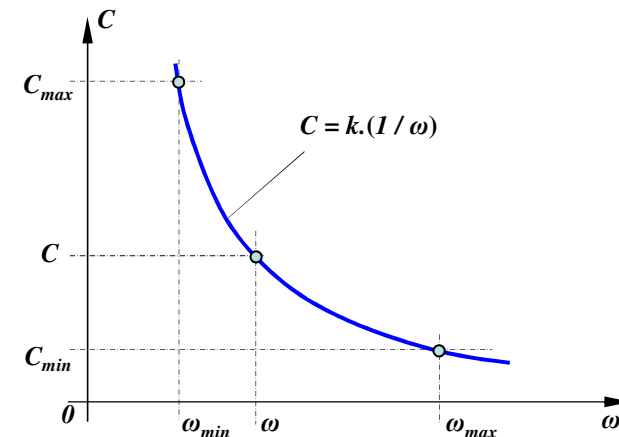
VELOCIDADE VARIÁVEL EM AMPLA FAIXA

CONTROLE RIGOROSO DE TORQUE E VELOCIDADE



F_t : FORÇA TANGENCIAL DE TRAÇÃO DO MATERIAL LAMINADO

v : VELOCIDADE DE SAÍDA DO MATERIAL LAMINADO



CARACTERÍSTICA TÍPICA DE UMA BOBINADEIRA

CONJUGADO E VELOCIDADE DA CARGA

REFERIDOS AO EIXO DO MOTOR :

$$C_c = F_t \cdot R / i \quad \omega_c = (v / R) \cdot i$$

MOTORES COMUMENTE EMPREGADOS: MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA OPERANDO COM ATENUAÇÃO DE CAMPO → POTÊNCIA CTE.

CARGAS MECÂNICAS → PRINCIPAIS TIPOS E CARACTERÍSTICAS

MÁQUINAS DE TRAÇÃO →

EM GERAL: PERFIL DE TORQUE
VARIÁVEL AO LONGO DO TEMPO

FREQÜENTE REGENERAÇÃO DE
ENERGIA PARA FRENAGEM

VEÍCULOS METRO-FERROVIÁRIOS

VEÍCULOS RODOVIÁRIOS

EMPILHADEIRAS

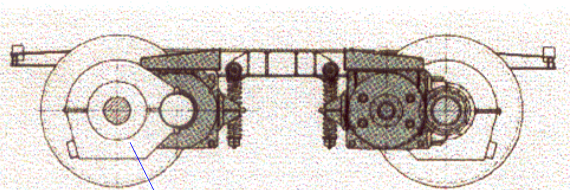
TRANSLAÇÃO DE PONTES ROLANTES

EM GERAL: $C_C = k_1 + k_2 \cdot \omega_C + k_3 \cdot (\omega_C)^2$

ELEVADA TAXA DE ACELERAÇÃO REQUERIDA

PARTIDAS FREQÜENTES

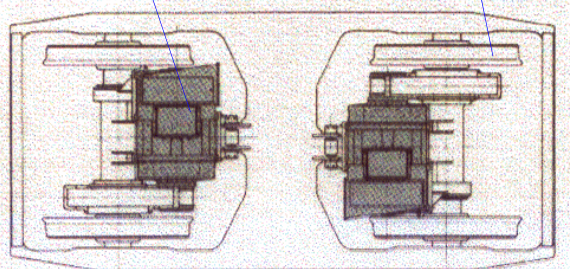
VELOCIDADE VARIÁVEL EM AMPLA FAIXA



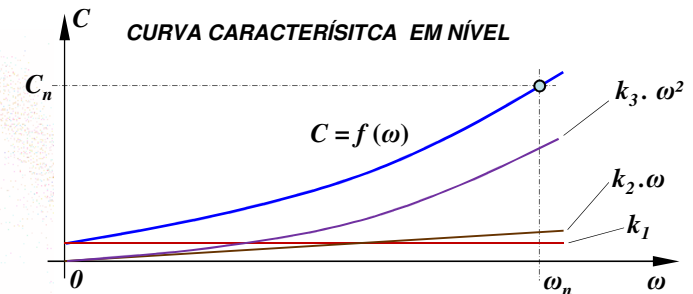
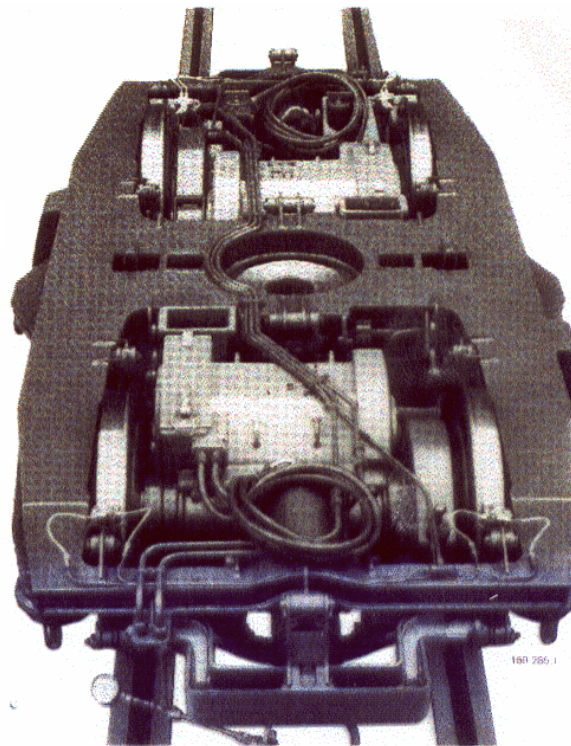
ENGRENAGEM DE ACOPLAMENTO ($i > 1$)

MOTOR DE TRAÇÃO

RODEIRO



TRUCK FERROVIÁRIO TÍPICO



CARACTERÍSTICA TÍPICA DE
UM VEÍCULO FERROVIÁRIO

k_1 : ATRITO DE ROLAMENTO

$k_2 \cdot \omega$: ATRITO EM MANCAIS E
FRISOS DAS RODAS

$k_3 \cdot \omega^2$: ATRITO AERODINÂMICO

MOTORES COMUMENTE EMPREGADOS: MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA DE EXCITAÇÃO SÉRIE / MOTORES DE INDUÇÃO COM INVERSORES

CARGAS MECÂNICAS → PRINCIPAIS TIPOS E CARACTERÍSTICAS

CARGAS MECÂNICAS PODEM IMPOR AOS MOTORES:

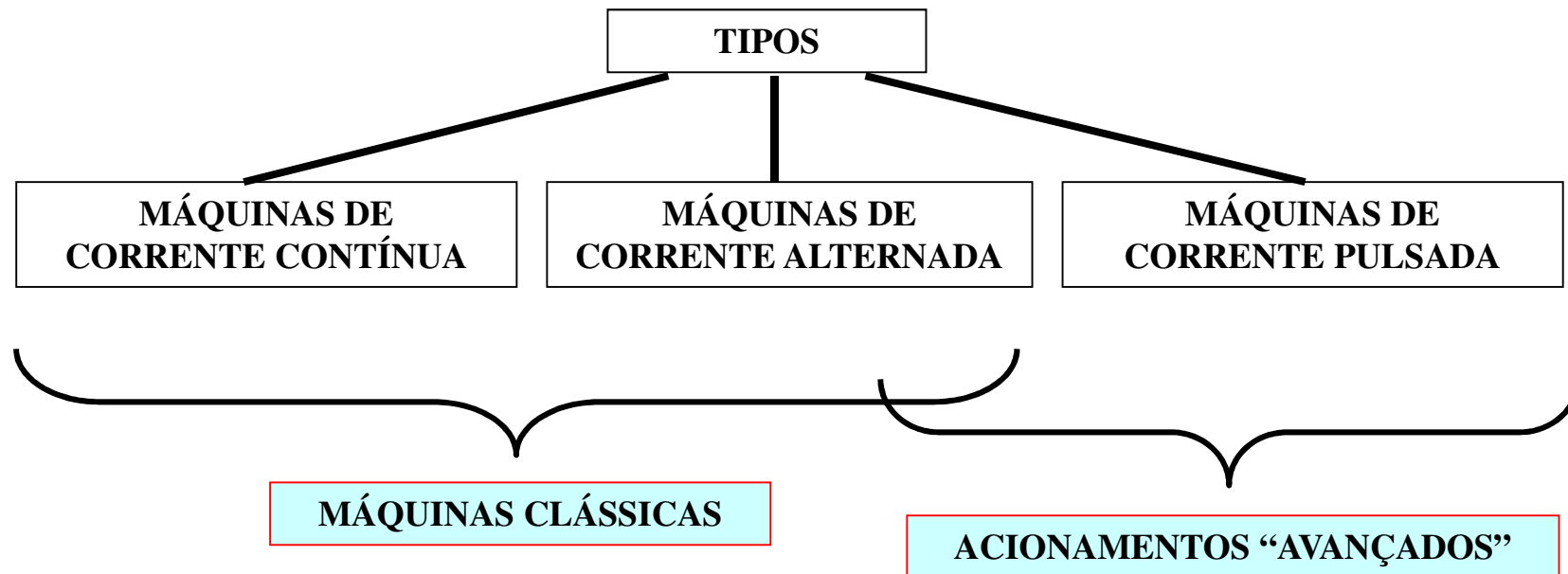
SEVERAS SOLICITAÇÕES MECÂNICAS → VIBRAÇÃO – CHOQUE - ESFORÇOS ESTRUTURAIS

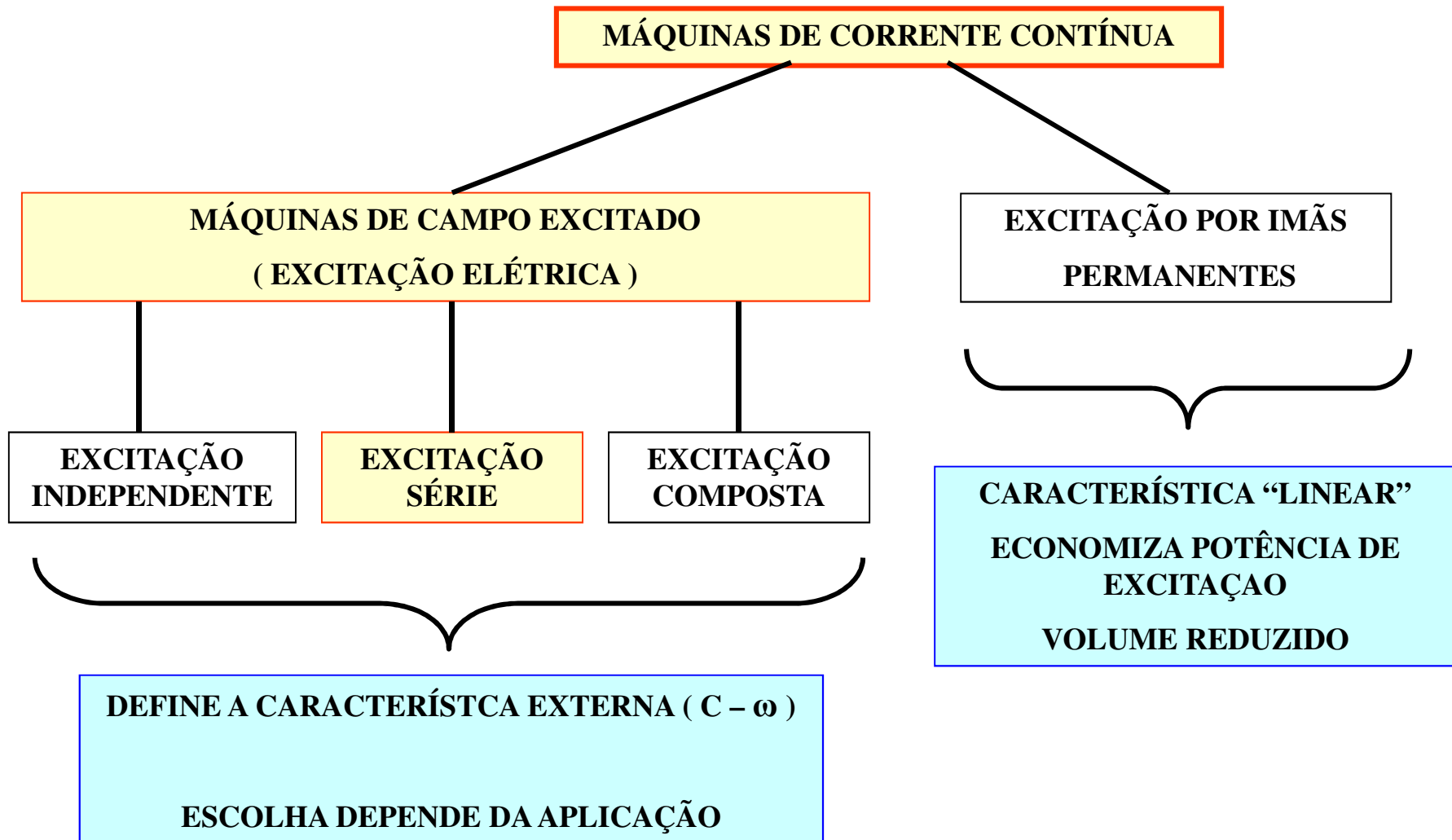
SEVERAS SOLICITAÇÕES AMBIENTAIS → TEMPERATURA – UMIDADE – AMBIENTE AGRESSIVO

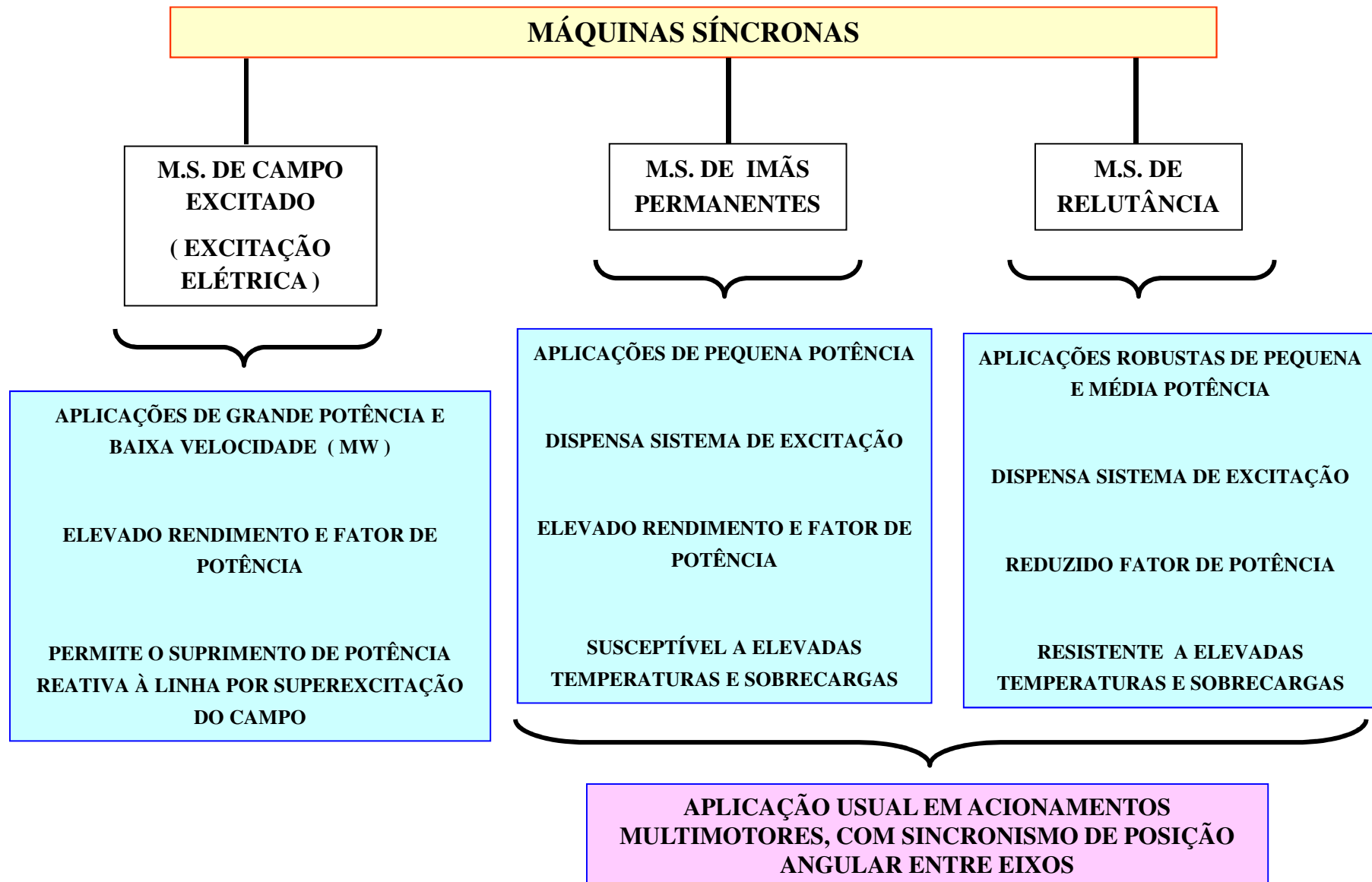
CARGAS MECÂNICAS PODEM REQUERER DOS MOTORES:

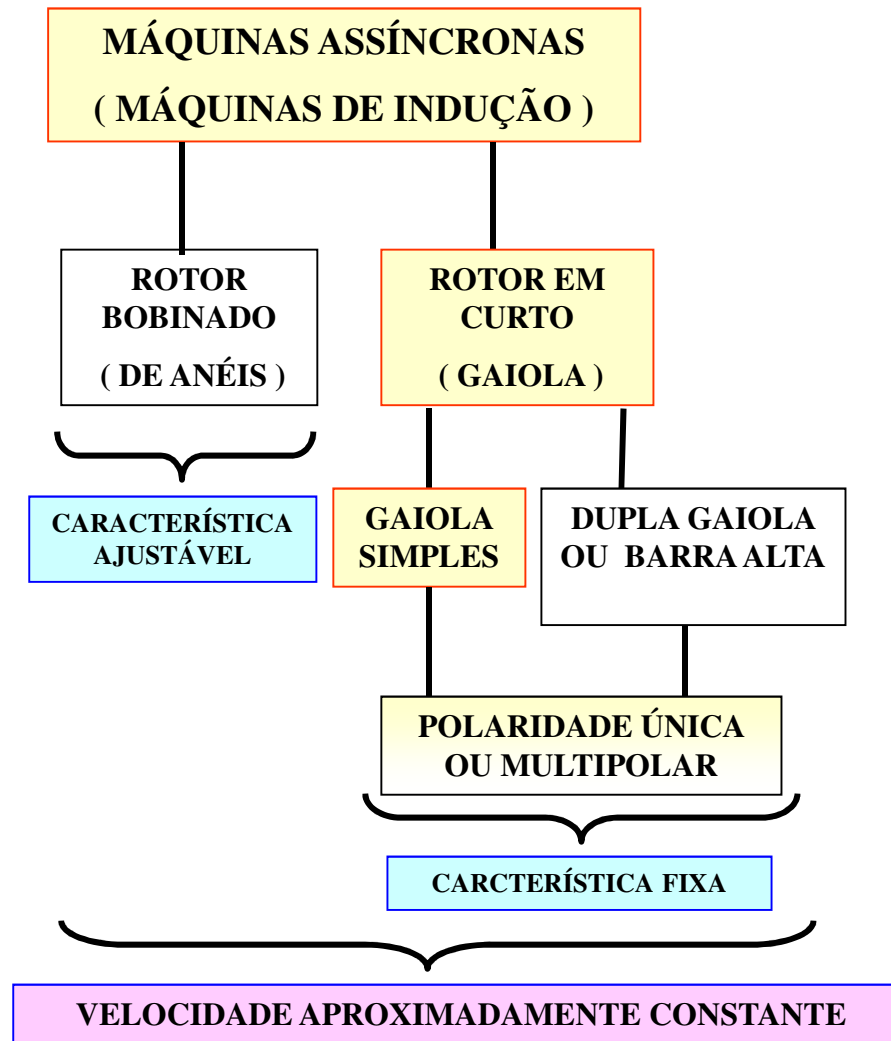
RESTRIÇÕES MECÂNICAS → DIMENSÕES – VIBRAÇÃO E RUÍDO TRANSMITIDO

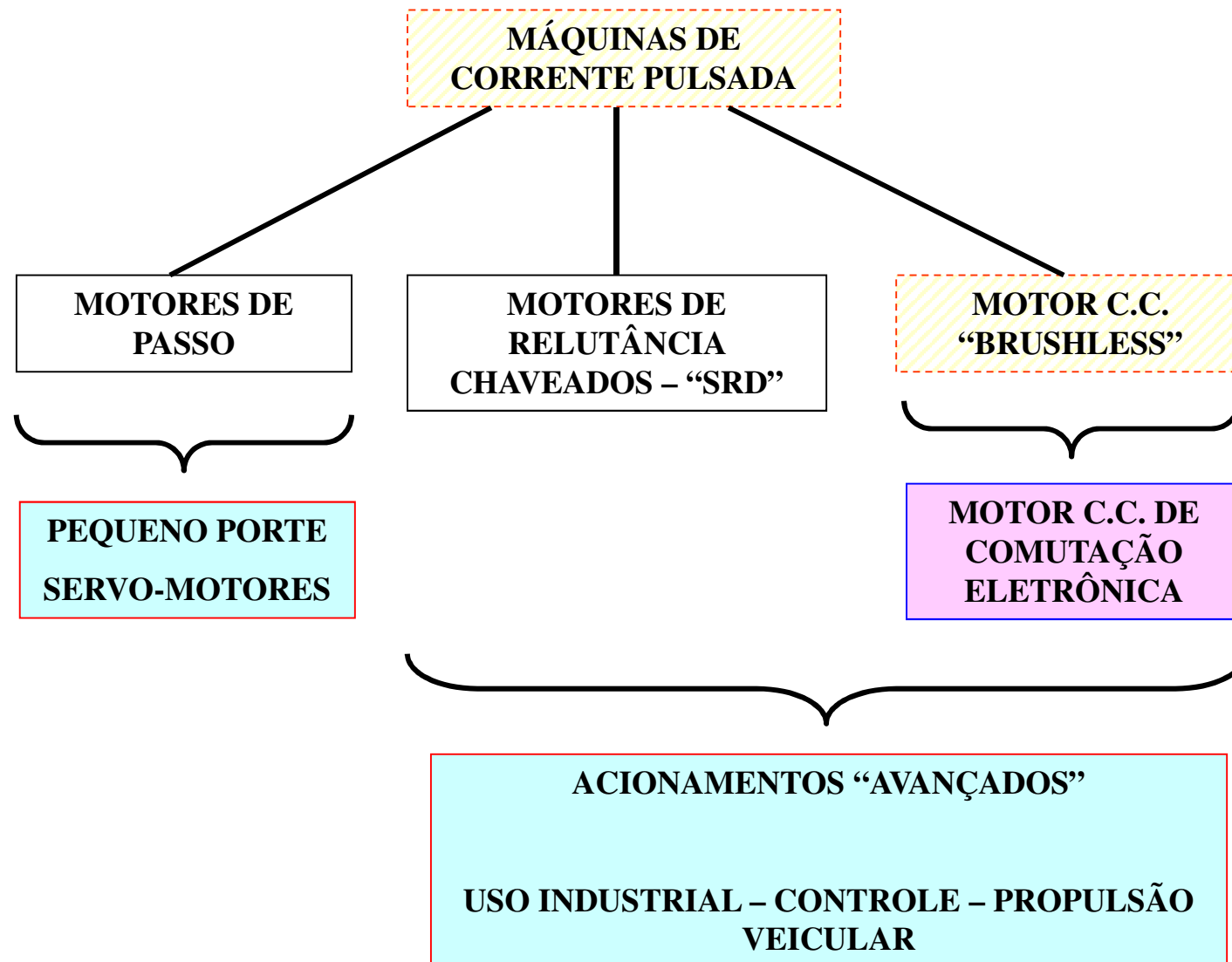
LIMITAÇÕES AMBIENTAIS → ISENÇÃO DE VAPORES E NÉVOAS DE LUBRIFICANTE – MÁXIMA TEMPERATURA DO INVÓLUCRO

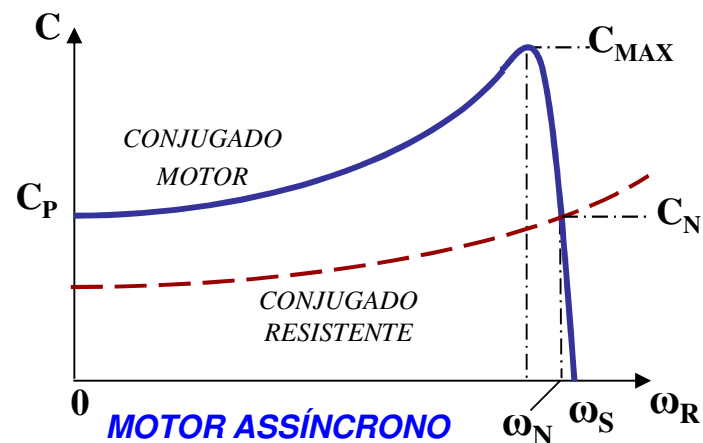
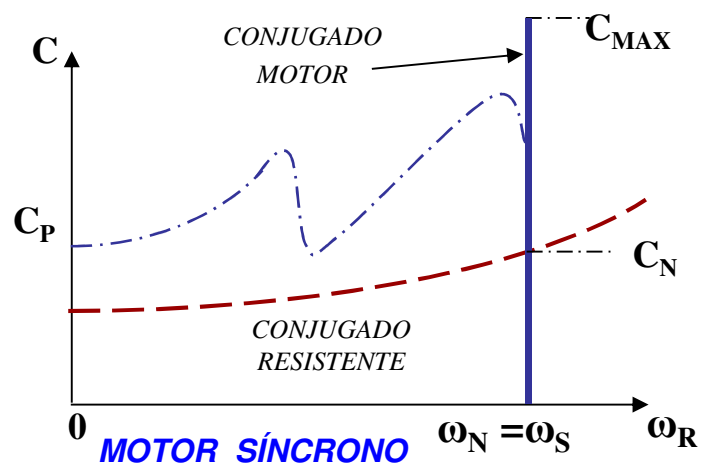
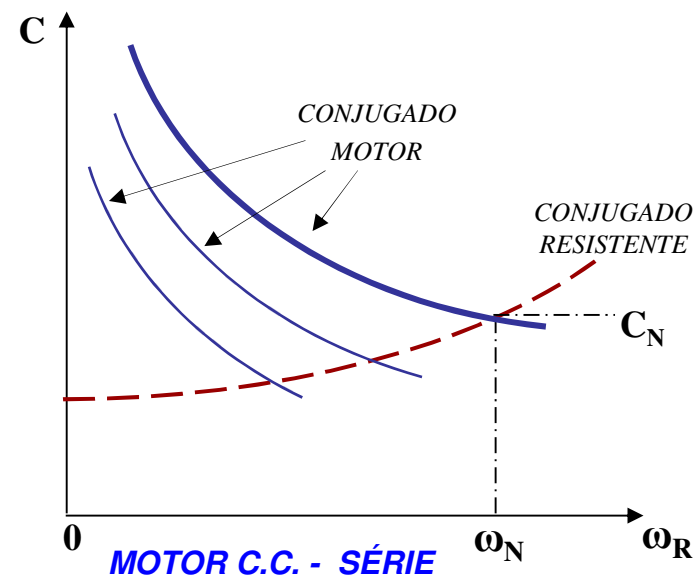
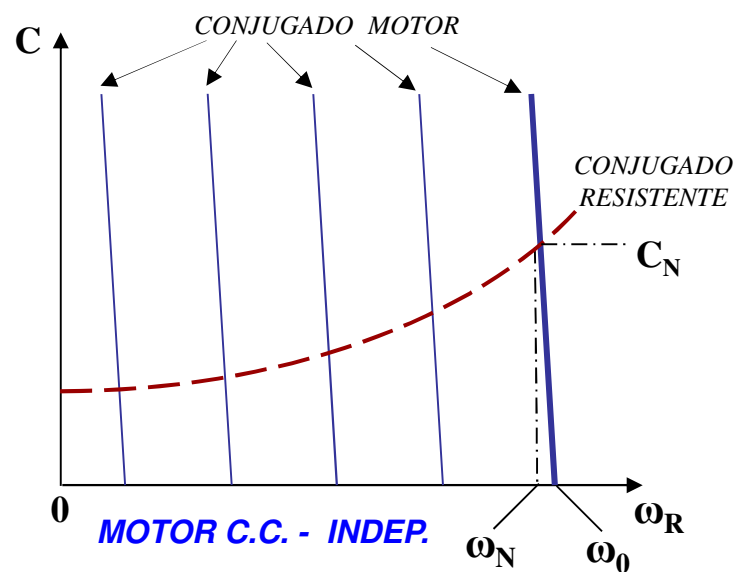
APLICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS TIPOS DE MOTORES ELÉTRICOS**CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GERAL DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS**









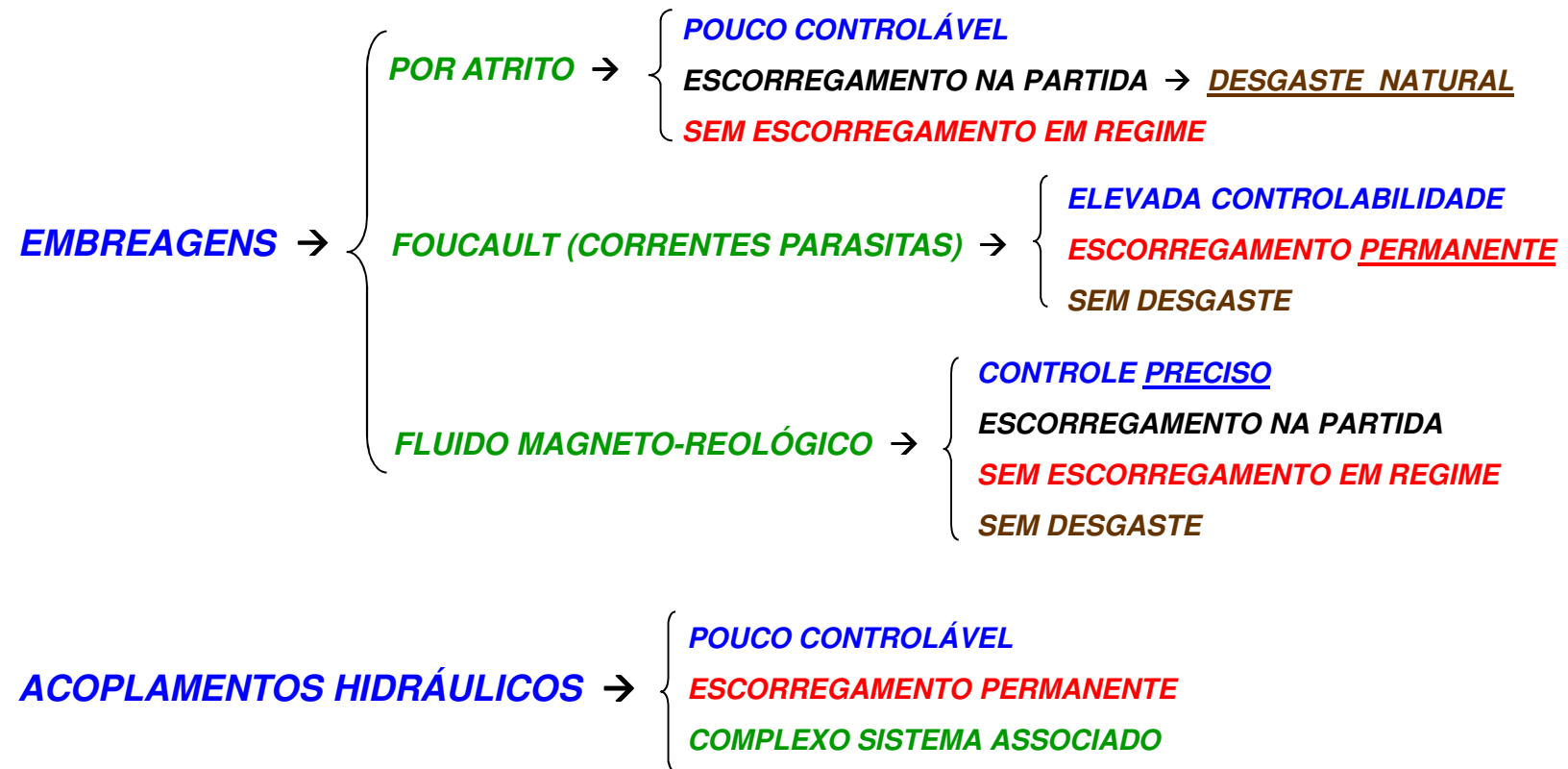
CURVAS CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS TIPOS DE MOTORES ELÉTRICOS

TRANSMISSÃO ENTRE MOTOR E CARGA → ACOPLAMENTOS PERMANENTES

POLIAS E CORREIAS → $\left\{ \begin{array}{l} \text{PLANAS} \\ \text{TRAPEZOIDAIS} \\ \text{DENTADAS} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{APRESENTAM} \\ \text{ESCORREGAMENTO} \\ \rightarrow \text{SEM ESCORREGAMENTO} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{EM GERAL : } i \neq 1 \\ \text{ESFORÇOS EM MANCAIS E EIXOS} \\ \text{RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO } \underline{\text{NÃO RÍGIDA}} \end{array} \right.$

ENGRENAGENS E REDUTORES → $\left\{ \begin{array}{l} \text{DENTES RETOS} \\ \text{DENTES HELICOIDAIS} \\ \text{ROSCA SEM FIM} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{ELEVADO RENDIMENTO} \\ \text{EM GERAL : } i \neq 1 \\ \rightarrow \text{BAIXO RENDIMENTO ; } i \gg 1 \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO} \\ \underline{\text{RÍGIDA}} \\ \text{EM GERAL:} \\ i = \text{NÚMERO } \underline{\text{NÃO INTEIRO}} \end{array} \right.$

LUVAS DE ACOPLAMENTO → $\left\{ \begin{array}{l} \text{RÍGIDO} \\ \text{ELÁSTICO} \\ \text{SEMI-ELÁSTICO} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \rightarrow \text{ALINHAMENTO PRECISO} \\ \text{ALINHAMENTO} \\ \text{CONVENCIONAL} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{SEMPRE : } i = 1 \end{array} \right.$

TRANSMISSÃO ENTRE MOTOR E CARGA → ACOPLAMENTOS DESENGATÁVEIS

PERMITEM TRANSMISSÃO GRADUAL E SUAVE DO CONJUGADO DO MOTOR À CARGA

PERMITEM AJUSTE E CONTROLE DE VELOCIDADE TRANSITORIAMENTE

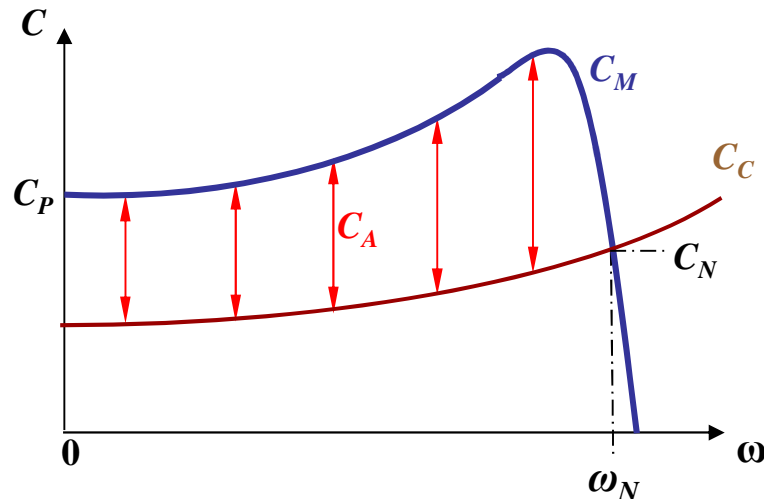
PERMITEM PARTIDA DO MOTOR EM VAZIO

COORDENAÇÃO DO SISTEMA: MOTOR + CARGA + CONTROLADOR**FUNÇÃO DO ACIONAMENTO :**

→ **MOTOR DEVE TIRAR A CARGA DO REPOUSO**

→ **APLICAR CONJUGADO SUFICIENTE PARA IMPRIMIR ACELERAÇÃO ADEQUADA**

→ **LEVAR A CARGA ATÉ A ROTAÇÃO NOMINAL DE OPERAÇÃO, DE FORMA ESTÁVEL**

**DINÂMICA DO ACIONAMENTO:**

$$C_M = C_C + \underbrace{J_T \cdot \frac{d\omega}{dt}}_{C_A}$$

C_M → CONJUGADO MOTOR

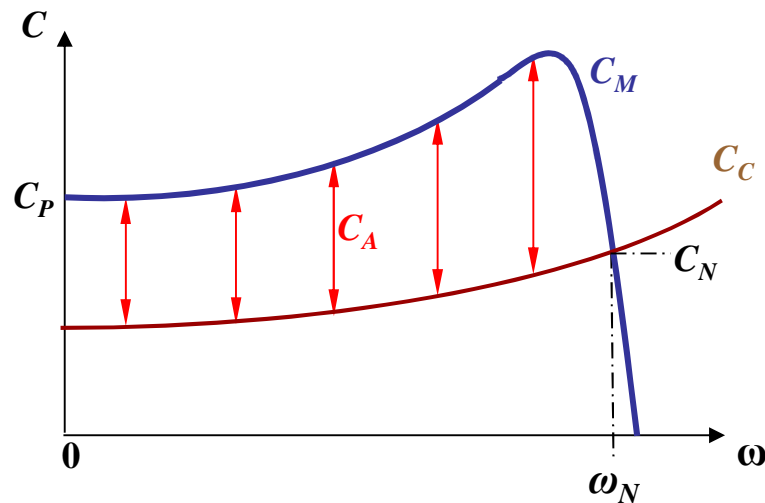
**C_C → CONJUGADO RESISTENTE
(COMPONENTE ATIVA)**

**C_A → CONJUGADO ACELERANTE
(COMPONENTE REATIVA)**

CARACTERIZAÇÃO DE UM ACIONAMENTO ESTÁVEL:

$$C_A = J_T \cdot \frac{d\omega}{dt} > 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{EM TODA A FAIXA : } \omega = 0 \rightarrow \omega = \omega_N \end{array} \right.$$

$$\frac{dC_M}{d\omega} < \frac{dC_R}{d\omega} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NO PONTO DE OPERAÇÃO} \end{array} \right.$$

**TEMPO DE ACELERAÇÃO:**

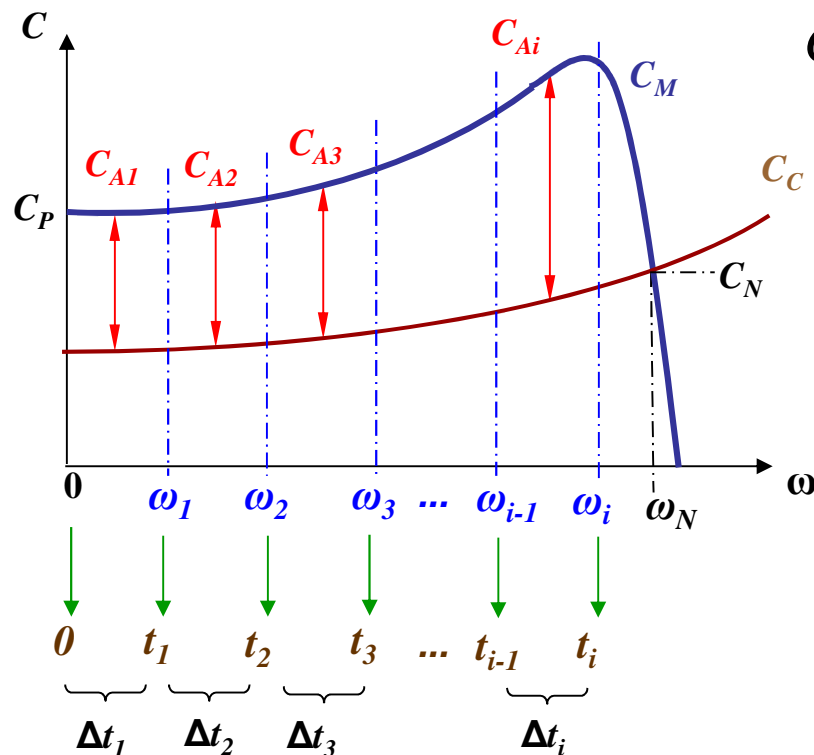
$$(C_M - C_C) \cdot dt = J_T \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

$$t_A = \int_0^{t_A} dt = \int_0^{\omega_N} \frac{J_T}{(C_M - C_C)} \cdot d\omega$$

APENAS EM CASOS PARTICULARES É POSSÍVEL EQUACIONAR : $C_A = f(\omega)$

DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO → MÉTODO GERAL POR APROXIMAÇÃO

C_{Ai} = CONJUGADO ACELERANTE MÉDIO NO INTERVALO ($\omega_i - \omega_{i-1}$)



$$C_A = J_T \cdot \frac{d\omega}{dt} \cong J_T \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t_i = J_T \cdot \frac{\Delta\omega_i}{C_{Ai}}$$

$$\begin{cases} \Delta t_1 = (t_1 - 0) = J_T \cdot \frac{(\omega_1 - 0)}{C_{A1}} \\ \Delta t_2 = (t_2 - t_1) = J_T \cdot \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{C_{A2}} \\ \Delta t_i = (t_i - t_{i-1}) = J_T \cdot \frac{(\omega_i - \omega_{i-1})}{C_{Ai}} \end{cases}$$

TEMPO DE ACELERAÇÃO →

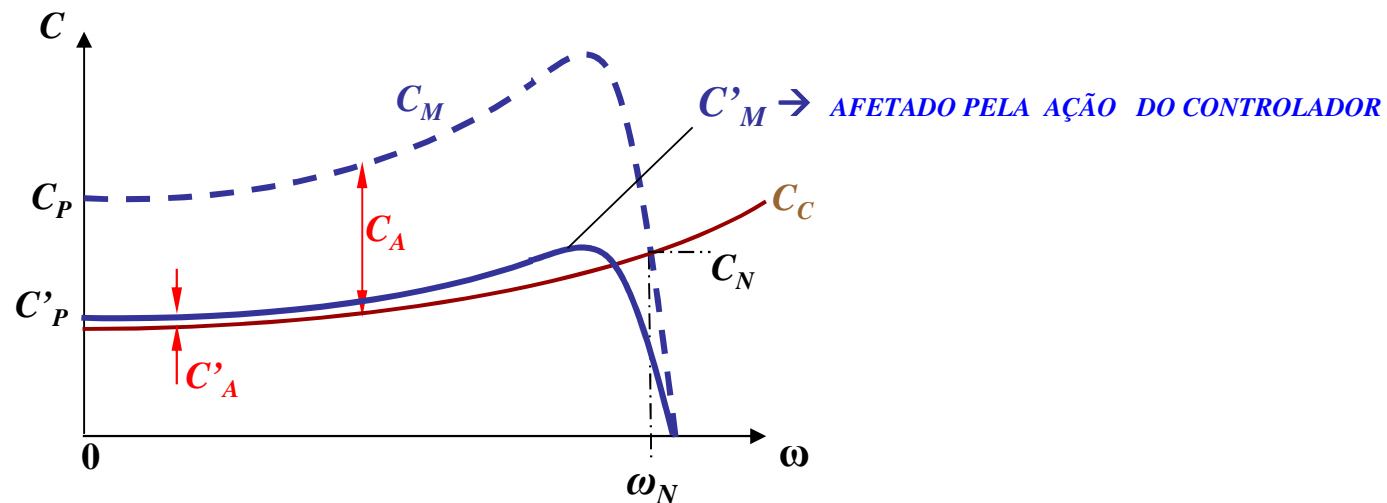
$$t_A = \sum_{i=1}^N \Delta t_i$$

AÇÃO DO CONTROLADOR SOBRE O SISTEMA:

CONTROLADOR → AGE SOBRE O MOTOR, PRINCIPALMENTE PARA LIMITAR O IMPACTO NA REDE ELÉTRICA DURANTE A PARTIDA

EFEITO DO CONTROLADOR SOBRE A CORRENTE, EM GERAL AFETA A CARACTERÍSTICA DE TORQUE DO MOTOR

EFEITO DEVE SER LIMITADO DE TAL MODO A GARANTIR A ESTABILIDADE DO ACIONAMENTO DURANTE A PARTIDA



MÉTODOS DE PARTIDA DOS MOTORES NOS ACIONAMENTOS INDUSTRIAIS

- PARTIDA DIRETA NA REDE
- PARTIDA COM CHAVE ESTRELA – TRIÂNGULO
- PARTIDA COM CHAVE COMPENSADORA
- PARTIDA COM DISPOSITIVO DE PARTIDA SUAVE – “SOFT-STARTER”
- PARTIDA POR MEIO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA

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}) :

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

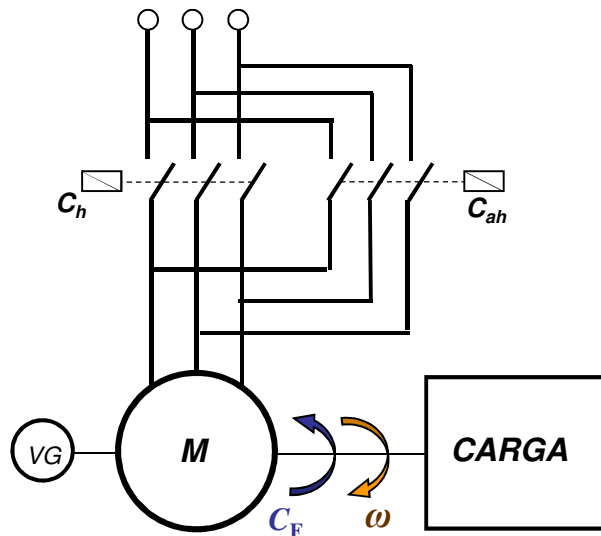
$$\left. \begin{array}{l} J_{tot} : \text{MOMENTO DE INÉRCIA TOTAL TRACIONADO} \\ \omega_n : \text{ROTAÇÃO NOMINAL DO MOTOR} \\ E_{cin} : \text{ENERGIA CINÉTICA ARMAZENADA} \end{array} \right\}$$

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

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

$$\left. \begin{array}{l} r_1 : \text{RESISTÊNCIA POR FASE DO ENROLAMENTO DO ESTATOR} \\ r_2' : \text{RESISTÊNCIA POR FASE DO ROTOR REFERIDA AO ESTATOR} \end{array} \right\}$$

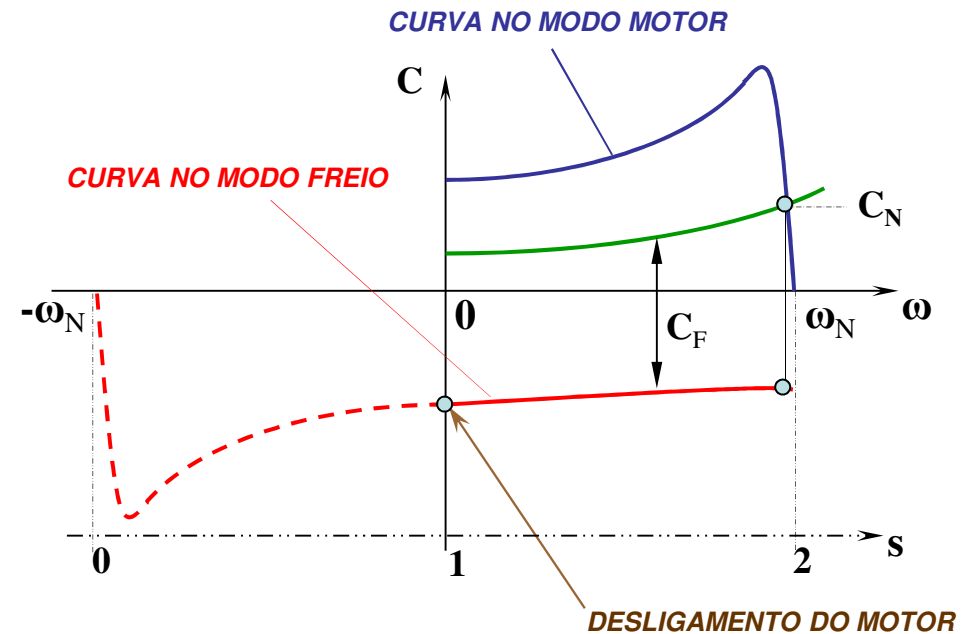
MÉTODOS DE FRENAGEM DOS MOTORES NOS ACIONAMENTOS INDUSTRIAIS

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

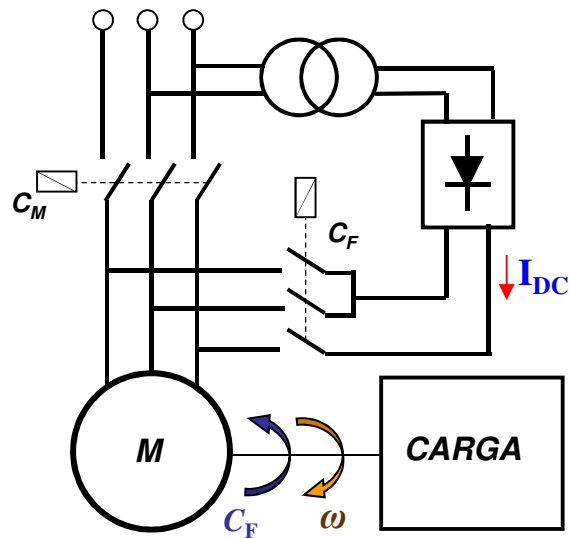
MOTOR É DESLIGADO NA PASSAGEM PELA ROTAÇÃO NULA, DETECTADA PELO VIGIA DE VELOCIDADE



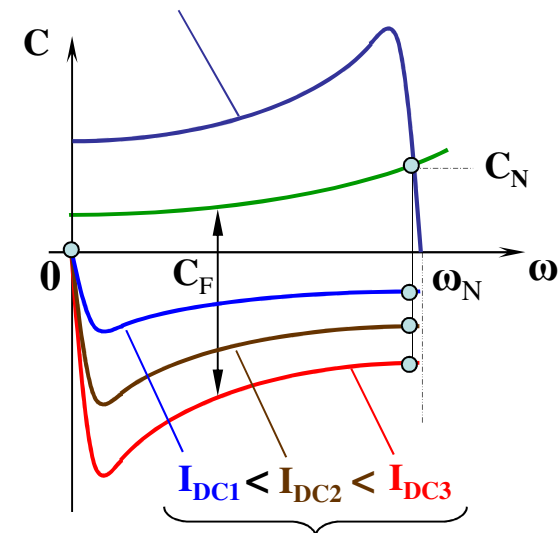
ENERGIA DESENVOLVIDA NO ROTOR DURANTE O TRANSITÓRIO DE FRENAGEM (E_{dF}) :

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

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

2 - FRENAGEM POR INJEÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA NO ESTATOR

CURVA NO MODO MOTOR



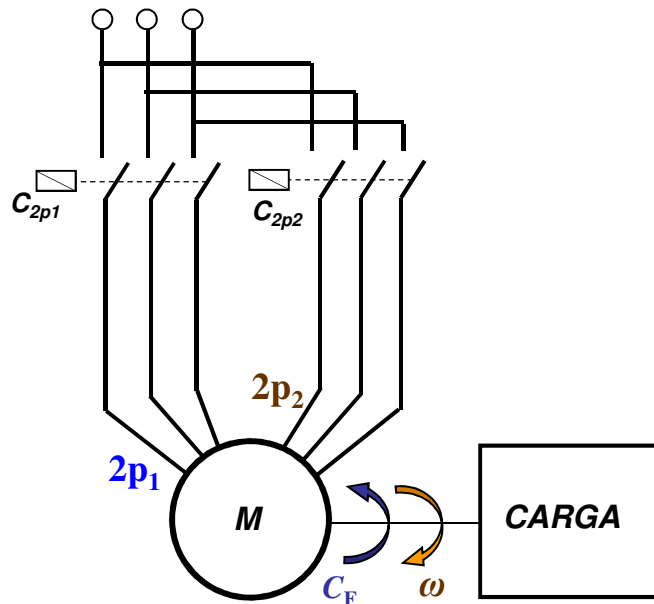
CURVAS DE TORQUE FRENANTE

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}) :

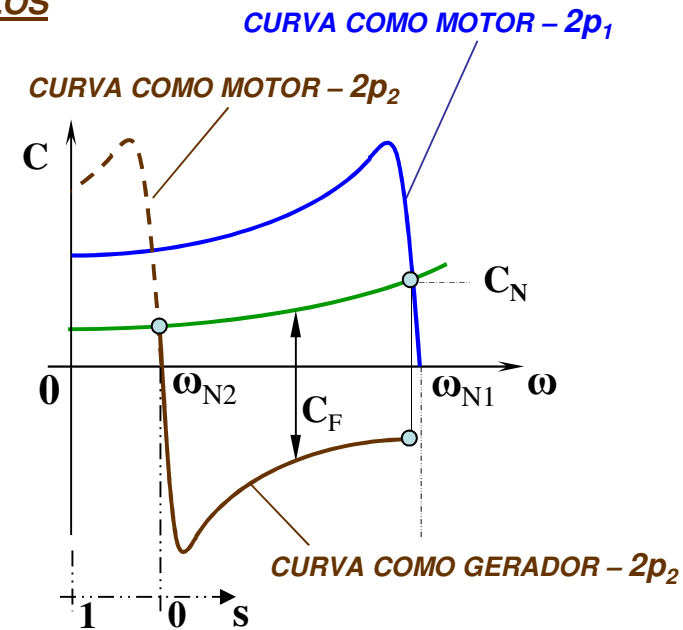
$$E_{dF} = \frac{1}{2} \cdot J_{tot} \cdot \omega_n^2 = E_{cin}$$

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

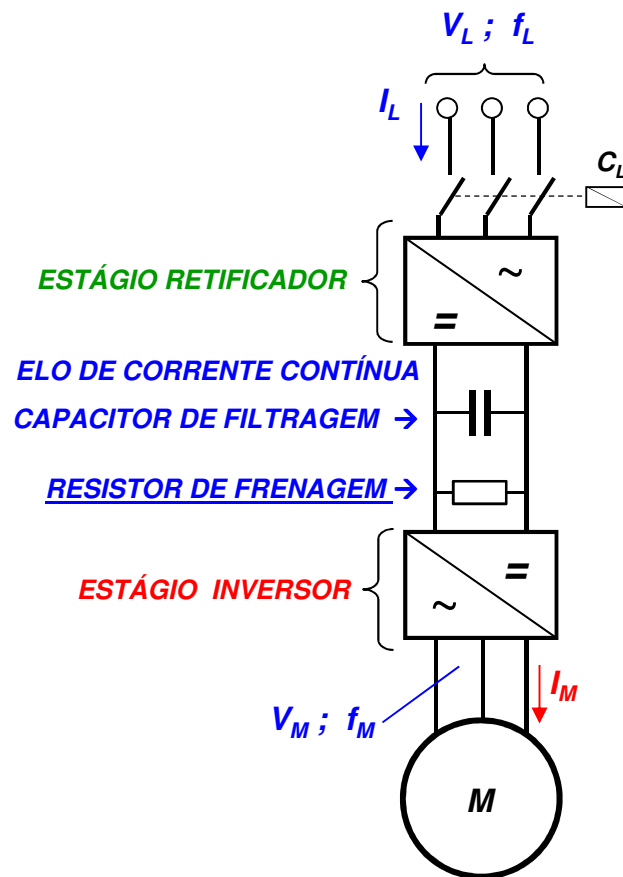


ENERGIA DESENVOLVIDA NO ROTOR DURANTE O
TRANSITÓRIO DE FRENAGEM (E_{dF}):

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

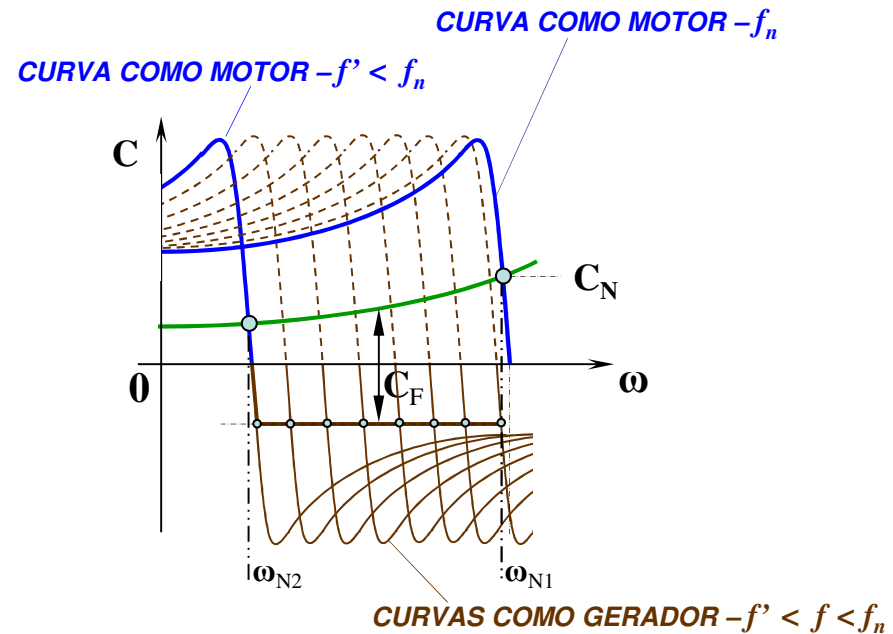
ENERGIA RECUPERADA PARA A LINHA DURANTE O
TRANSITÓRIO DE FRENAGEM (E_{REC}):

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

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