

PEA – 3550

ACIONAMENTOS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

Resumo das notas de aula

PROGRAMA:

Introdução – Noções genéricas de acionamentos e seus componentes

Configuração básica e parâmetros fundamentais referidos ao eixo do motor de acionamento

Principais tipos de cargas mecânicas, reunidas pelas famílias de características de torque x rotação

Tipos de motores elétricos utilizados nos acionamentos das cargas mecânicas – Características externas

Acoplamentos entre motor e carga – Tipos, características, aplicações

Combinação das características do motor + carga + acoplamento

Aceleração e frenagem do sistema motor + carga – Transitórios de partida e parada

Regimes de operação e geração de calor nos motores elétricos

Ciclos de trabalho padronizados

Dimensionamento dos motores em função da carga e do regime de operação

Influência do ambiente no dimensionamento (temperatura e altitude)

Estudos de caso – Exemplos de aplicação

BIBLIOGRAFIA:

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

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

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

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

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

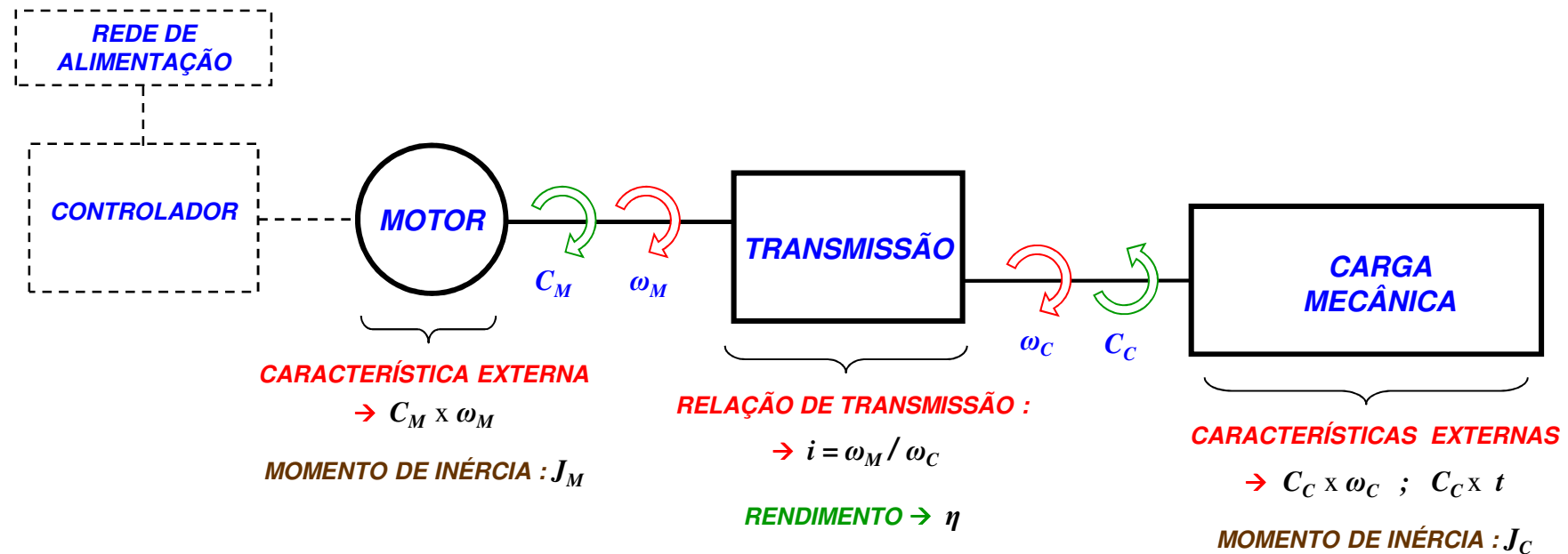
ELECTRIC DRIVE – M. Chilikin – E. Mir – 1976

MÁQUINAS ELÉTRICAS E ACIONAMENTO – E. Bim – Ed. Elsevier - 2009

ACIONAMENTOS ELÉTRICOS – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

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

**INÉRCIA DA CARGA REFERIDA AO EIXO
DO MOTOR : J_{ref}**

MOMENTO DE INÉRCIA TOTAL TRACIONADO $\rightarrow J_{TOT} = J_M + J_{ref}$

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

INÉRCIA DA CARGA REFERIDA AO EIXO DO MOTOR:

→ CARGAS COM MOVIMENTO DE ROTAÇÃO

→ CARGAS COM MOVIMENTO DE TRANSLAÇÃO

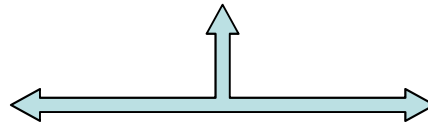
 J_c : MOMENTO DE INÉRCIA DA CARGA [kg.m²] m_c : MASSA DA CARGA [kg] ω_c : VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DA CARGA [rd / s] v_c : VELOCIDADE DE TRANSLAÇÃO DA CARGA [m / s]

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

$$E_{c-carga} = \frac{1}{2} \cdot m_c \cdot v_c^2$$

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

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



$$J_{ref} = m_c \cdot \frac{v_c^2}{\omega_M^2}$$

TRANSMISSÃO REDUTORA: $i > 1 \rightarrow J_{ref} < J_c$ TRANSMISSÃO MULTIPLICADORA: $i < 1 \rightarrow J_{ref} > J_c$

INÉRCIA DA CARGA REFERIDA AO EIXO
DO MOTOR : J_{ref}

MOMENTO DE INÉRCIA TOTAL TRACIONADO → $J_{TOT} = J_M + J_{ref}$

CARACTERÍSTICAS GERAIS A SEREM OBSERVADAS NA ESCOLHA DO MOTOR PARA COMPOR O ACIONAMENTO:

→ TIPO E NATUREZA DA CARGA MECÂNICA ACIONADA → CARACTERÍSTICA $C_c \times \omega_c$

TIPO DE MOTOR : CURVA CARACTERÍSTICA $C_M \times \omega_M$ MAIS APROPRIADA À CURVA DA CARGA

REQUISITOS DA CARGA: VELOCIDADE FIXA; VARIÁVEL OU CONTROLÁVEL

REGIME DE TRABALHO: CONTÍNUO, INTERMITENTE, NÚMERO DE CICLOS DE CARGA POR HORA

DIMENSIONAMENTO: POR REGIME CONTÍNUO O POR REGIME TRANSITÓRIO

→ TIPO DE ALIMENTADOR DISPONÍVEL E LIMITE DE IMPACTO ELÉTRICO PERMITIDO NA REDE

MÉTODO DE PARTIDA : EM VAZIO ; EM CARGA ; COM TRANSMISSÃO FIXA OU VARIÁVEL

MÉTODO DE PARTIDA: DIRETA NA REDE; ATRAVÉS DE DISPOSITIVO LIMITADOR DE CORRENTE

DURAÇÃO E FREQUÊNCIA DE PARTIDAS: DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

PRINCIPAIS TIPOS DE CARGAS MECÂNICAS

TIPOS DE CARGAS MECÂNICAS

EXISTE GRANDE DIVERSIDADE DE TIPOS DE CARGAS MECÂNICAS APLICADAS INDUSTRIALMENTE

PODE-SE AGRUPAR AS CARGAS EM “FAMÍLIAS” DE EQUIPAMENTOS, QUE APRESENTAM CARACTERÍSTICAS EXTERNAS ($C \times \omega$) SEMELHANTES

TIPOS MAIS COMUNS:

→ MÁQUINAS DE FLUXO

→ MÁQUINAS DE LEVANTAMENTO E TRANSPORTE

→ MÁQUINAS DE ELEVADA INÉRCIA

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

→ MÁQUINAS DE TRAÇÃO

CARGAS MECÂNICAS → PRINCIPAIS TIPOS E CARACTERÍSTICAS

MÁQUINAS DE FLUXO →

EM GERAL : CONJUGADO E POTÊNCIA CONSTANTES AO LONGO DO TEMPO

BOMBAS

EM GERAL: $C = k \cdot (\omega)^2$; $P_{mec} = k \cdot (\omega)^3$

VENTILADORES

BAIXO CONJUGADO DE PARTIDA

PARTIDA COM CURVA DE TORQUE REDUZIDA (VAZÃO RESTRINGIDA)

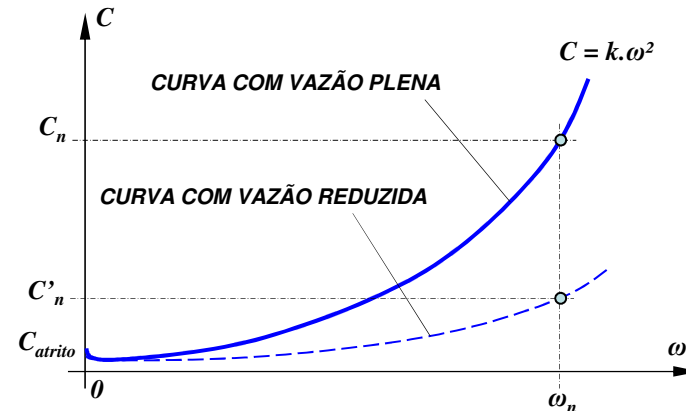
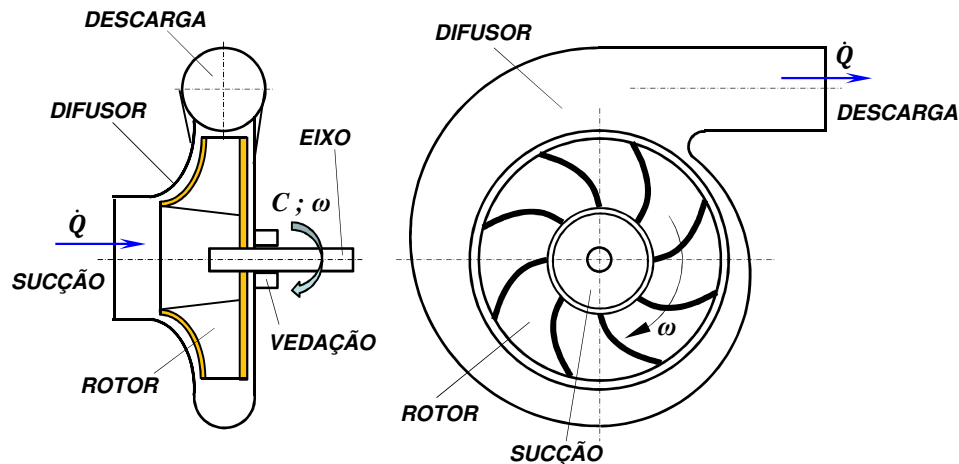
COMPRESSORES

EM GERAL: $C = k$ ou $C = k \cdot \omega$; $P_{mec} = k \cdot \omega$ ou $P_{mec} = k \cdot (\omega)^2$

ELEVADO CONJUGADO DE PARTIDA

PARTIDA COM CONTRA PRESSÃO

ESPECIALMENTE NOS COMPRESSORES A PISTÃO



CARACTERÍSTICA MECÂNICA 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: $P_h [W] = Q \cdot H$ - Q: VAZÃO EM m³/s ; H : GANHO DE PRESSÃO EM Pa OU N/m² (ALTURA MANOMÉTRICA)

POTÊNCIA MECÂNICA REQUERIDA NO EIXO: $P_{mec} = P_h / \eta_h$ → η_h : RENDIMENTO HIDRÁULICO DO EQUIPAMENTO (BOMBA, VENTILADOR, ETC)

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

DESEMPENHO HIDRÁULICO DAS MÁQUINAS DE FLUXO → BOMBAS E VENTILADORES CENTRÍFUGOS DE USO GERAL

DEPENDÊNCIA DAS VARIÁVEIS HIDRÁULICAS COM A ROTAÇÃO:

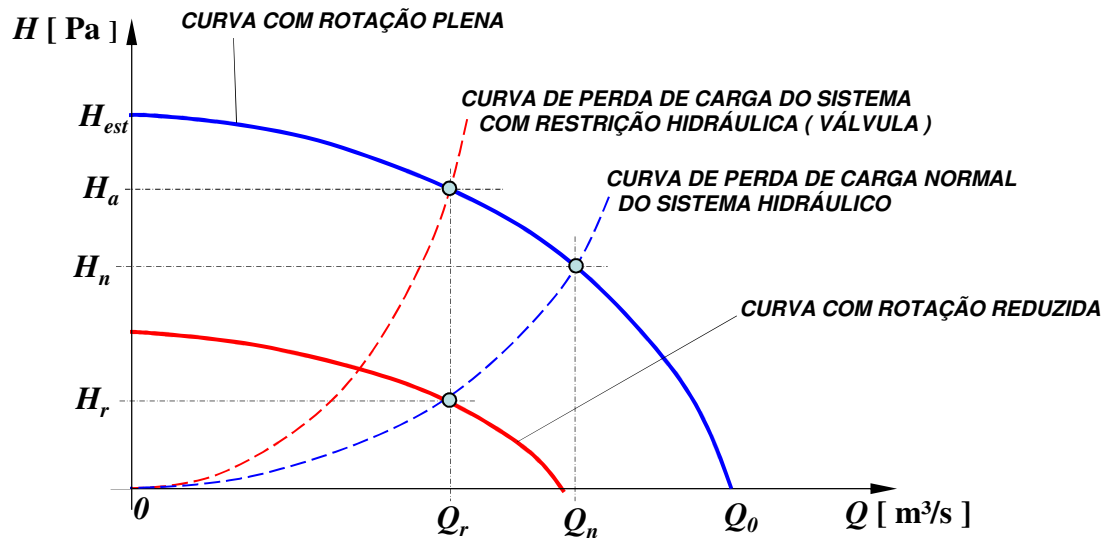
EM GERAL: $Q = k \cdot \omega$; $H = k \cdot (\omega)^2$; $P_{hidr} = k \cdot (\omega)^3$

PERDA DE CARGA HIDRÁULICA DO SISTEMA: $H = k \cdot (Q)^2$

REDUÇÃO OU CONTROLE DE VAZÃO PODE SER OBTIDO POR:

→ RESTRIÇÃO HIDRÁULICA, e.g. VÁLVULA

→ REDUÇÃO DA ROTAÇÃO DO EIXO



CARACTERÍSTICA HIDRÁULICA TÍPICA DE BOMBA / VENTILADOR

$$P_{hidr-n} = H_n \cdot Q_n$$

$$P_{hidr-a} = H_a \cdot Q_r \approx P_{hidr-n}$$

$$P_{hidr-r} = H_r \cdot Q_r \ll P_{hidr-n}$$

CONTROLE DE VAZÃO POR VARIAÇÃO DA ROTAÇÃO → PRODUZ ELEVADO GANHO DE EFICIÊNCIA NO SISTEMA HIDRÁULICO

MOTORES COMUMENTE EMPREGADOS QUANDO NECESSÁRIO CONTROLE DE VAZÃO:
MOTORES DE INDUÇÃO DE GAIOLA ALIMENTADOS POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA

ASPECTOS USUAIS DAS MÁQUINAS DE FLUXO:***BOMBAS - COMPRESSORES DE PISTÃO OU DE PARAFUSO - PEQUENOS VENTILADORES AXIAIS :***

- NORMALMENTE CARGAS DE REDUZIDO MOMENTO DE INÉRCIA – EM GERAL MENOR QUE A INÉRCIA DO MOTOR***
- NA MAIORIA DAS VEZES ACOPLADAS DIRETAMENTE AO EIXO DO MOTOR → $i = 1$ - ROTAÇÃO NOMINAL: 3600 ou 1800 RPM***
- USO CONTÍNUO AO LONGO DO TEMPO – PEQUENA INCIDÊNCIA DE PARTIDAS - DADA A PARTIDA, OPERAM POR DIVERSAS HORAS NA MAIORIA DOS CASOS***

GRANDES VENTILADORES CENTRÍFUGOS :

- CARGAS DE ELEVADO MOMENTO DE INÉRCIA, GERALMENTE MUITO MAIOR QUE INÉRCIA DO MOTOR DE ACIONAMENTO***
- TÍPICAMENTE COM ACOPLAMENTO DIRETO AO EIXO DO MOTOR – EM ALGUNS CASOS, USO DE REDUTORES DE VELOCIDADE → $i > 1$ - ROTAÇÃO NOMINAL: 1200 ; 900 ; 720 RPM***
- USO CONTÍNUO AO LONGO DO TEMPO – DADA A PARTIDA, EM GERAL OPERAM POR VÁRIOS DIAS OU SEMANAS***

COMPRESSORES CENTRÍFUGOS DE REFRIGERAÇÃO (CENTRAIS DE AR CONDICIONADO OU DE ÁGUA GELADA) :

- MOMENTO DE INÉRCIA REFERIDO AO EIXO DO MOTOR COM MAGNITUDE PRÓXIMA À INÉRCIA DO MOTOR***
- NA MAIORIA DAS VEZES, ACOPLADOS AO EIXO DO MOTOR POR UM PAR DE ENGRENAGENS MULTIPLICADORAS DE VELOCIDADE → $i < 1$ - ROTAÇÃO NOMINAL: 6000 ; 8000 RPM***
- USO CONTÍNUO AO LONGO DO TEMPO***

MOTORES TÍPICOS UTILIZADOS NO ACIONAMENTO DESSE TIPO DE CARGA: MOTORES DE INDUÇÃO DE ROTOR EM GAIOLA, COM OU SEM O RECURSO DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR MEIO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA

CARGAS MECÂNICAS → PRINCIPAIS TIPOS E CARACTERÍSTICAS

MÁQUINAS DE LEVANTAMENTO E TRANSPORTE

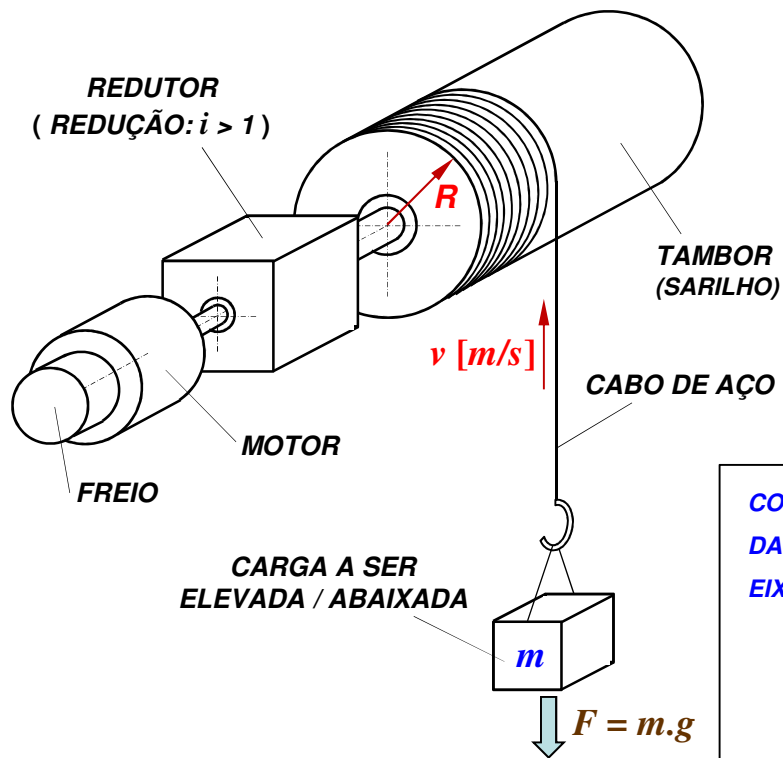
EM GERAL : CONJUGADO E POTÊNCIA AMPLAMENTE VARIÁVEIS NO TEMPO

- PONTES ROLANTES
- GUINCHOS
- GUINDASTES
- GRUAS
- ELEVADORES

EM GERAL: $C = k$; $P_{mec} = k \cdot \omega$

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

PARTIDAS E PARADAS FREQÜENTES

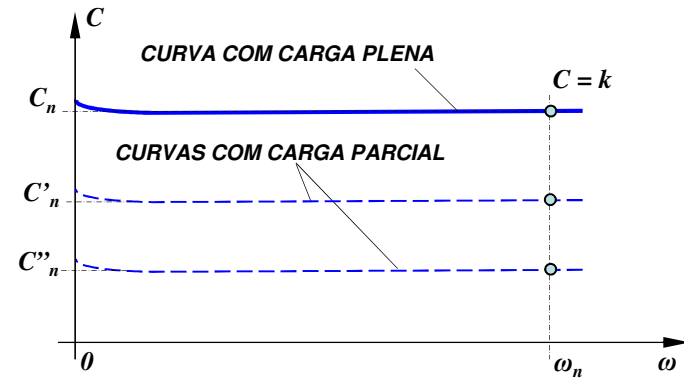


ELEMENTOS BÁSICOS DE UM GUINCHO

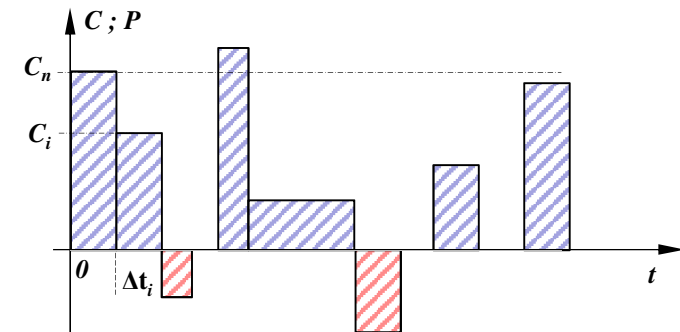
CONJUGADO E VELOCIDADE DA CARGA REFERIDOS AO EIXO DO MOTOR :

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

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



CARACTERÍSTICA TÍPICA DE UM GUINCHO



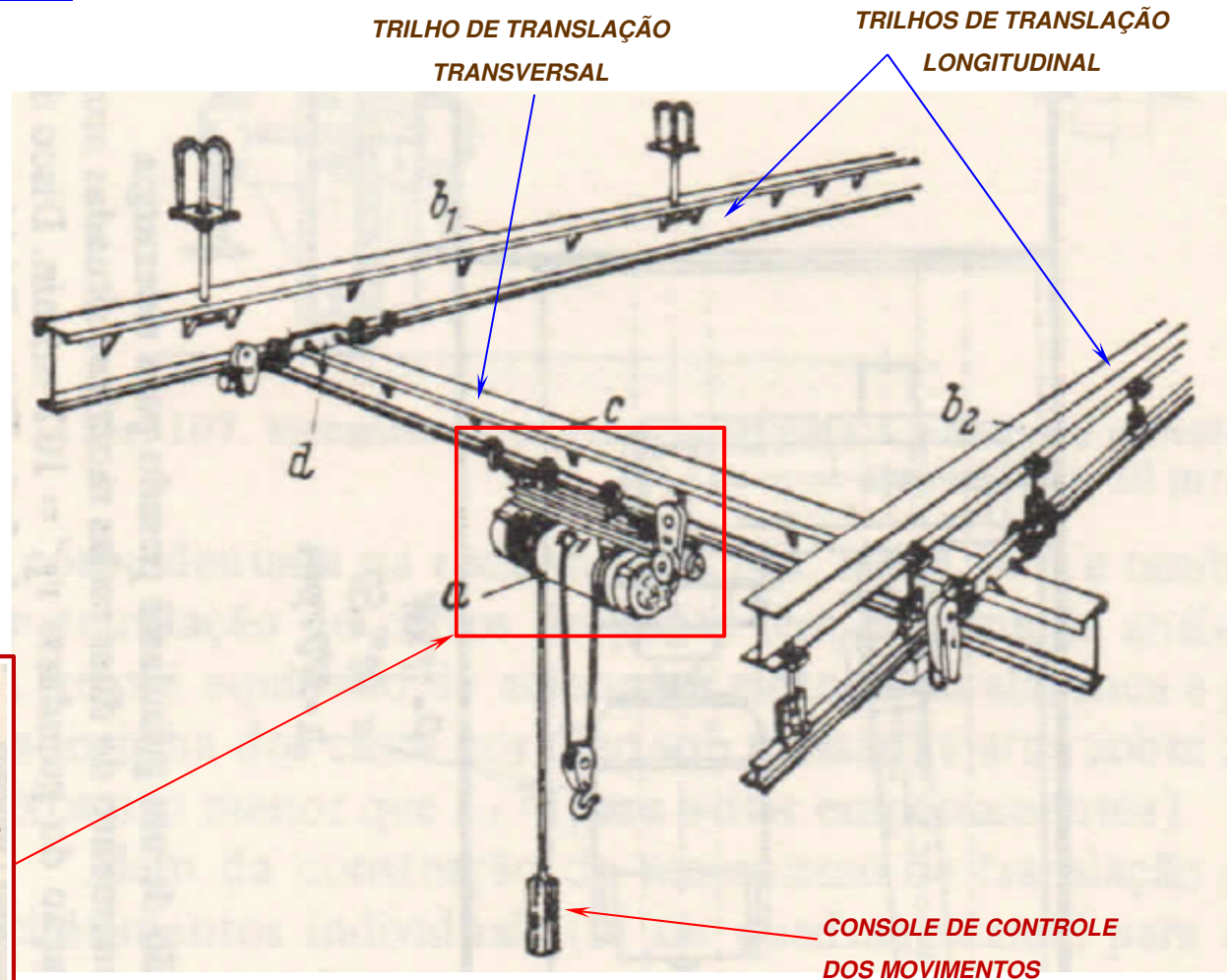
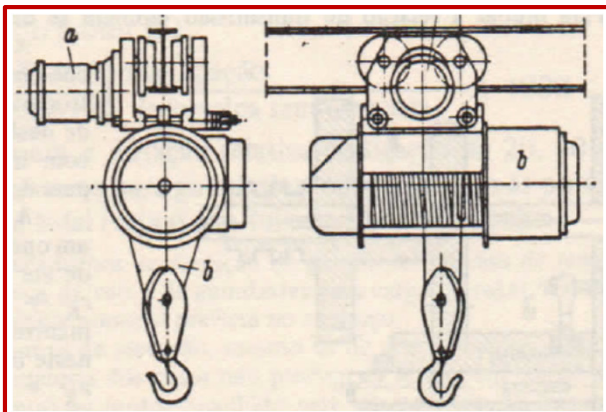
MOTORES COMUMENTE EMPREGADOS: MOTORES DE GAIOLA CATEGORIA "D" COM DUPLA POLARIDADE / MOTORES ASSÍNCRONOS DE ANÉIS

MÁQUINAS DE LEVANTAMENTO E TRANSPORTE → VARIANTES MAIS COMUNS**PONTE ROLANTE DE PEQUENO PORTE**

MOVIMENTAÇÃO DA CARGA EM TRÊS
DIMENSÕES:

- LONGITUDINAL
- TRANSVERSAL
- VERTICAL

CONTROLE DOS MOVIMENTOS A
PARTIR DO SOLO POR MEIO DE
CONSOLE MANUAL

GUINCHO DE ELEVAÇÃO

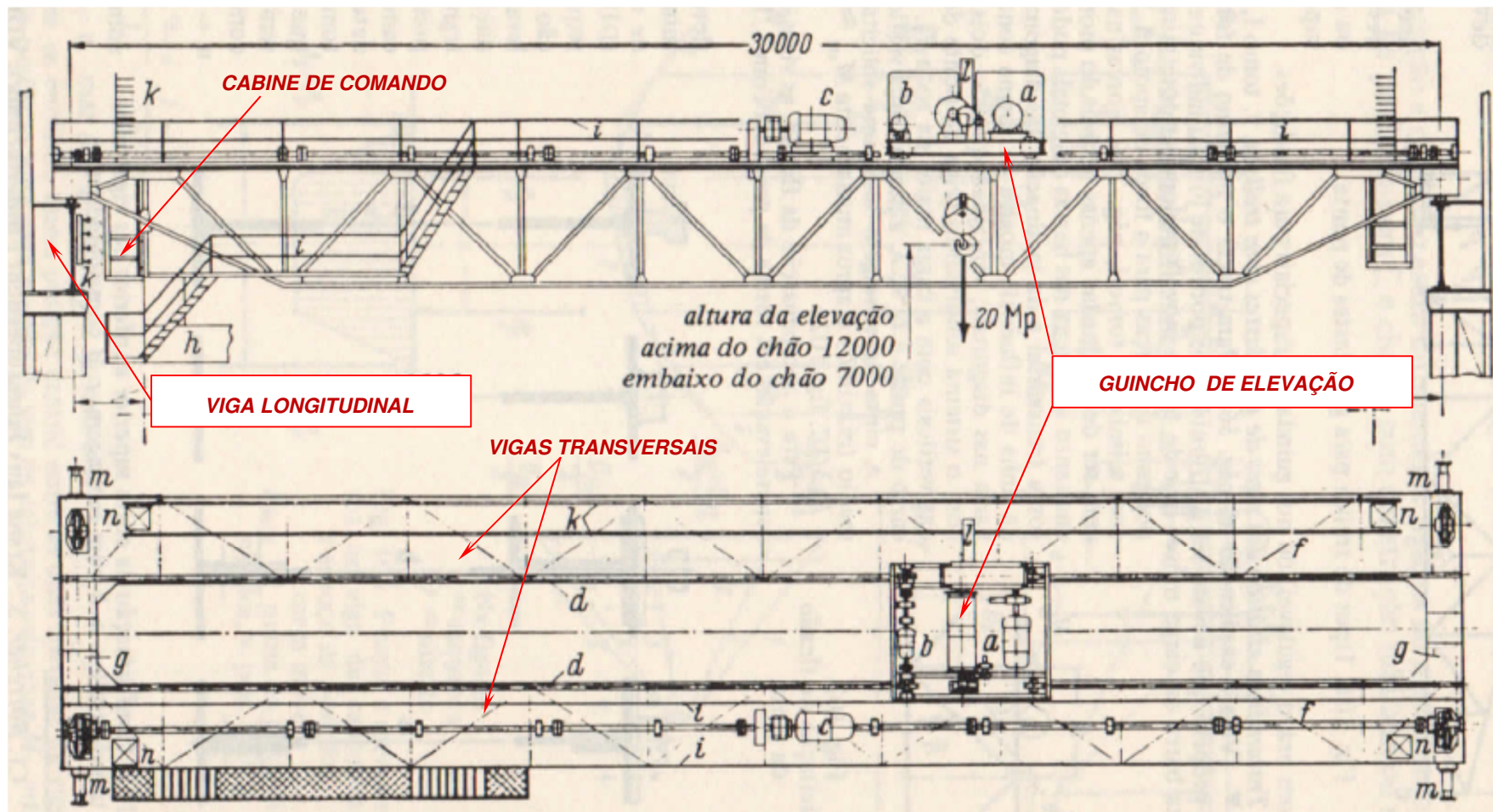
MÁQUINAS DE LEVANTAMENTO E TRANSPORTE → VARIANTES MAIS COMUNS

PONTE ROLANTE DE GRANDE PORTE

MOVIMENTAÇÃO DA CARGA EM TRÊS DIMENSÕES:

→ LONGITUDINAL → TRANSVERSAL → VERTICAL

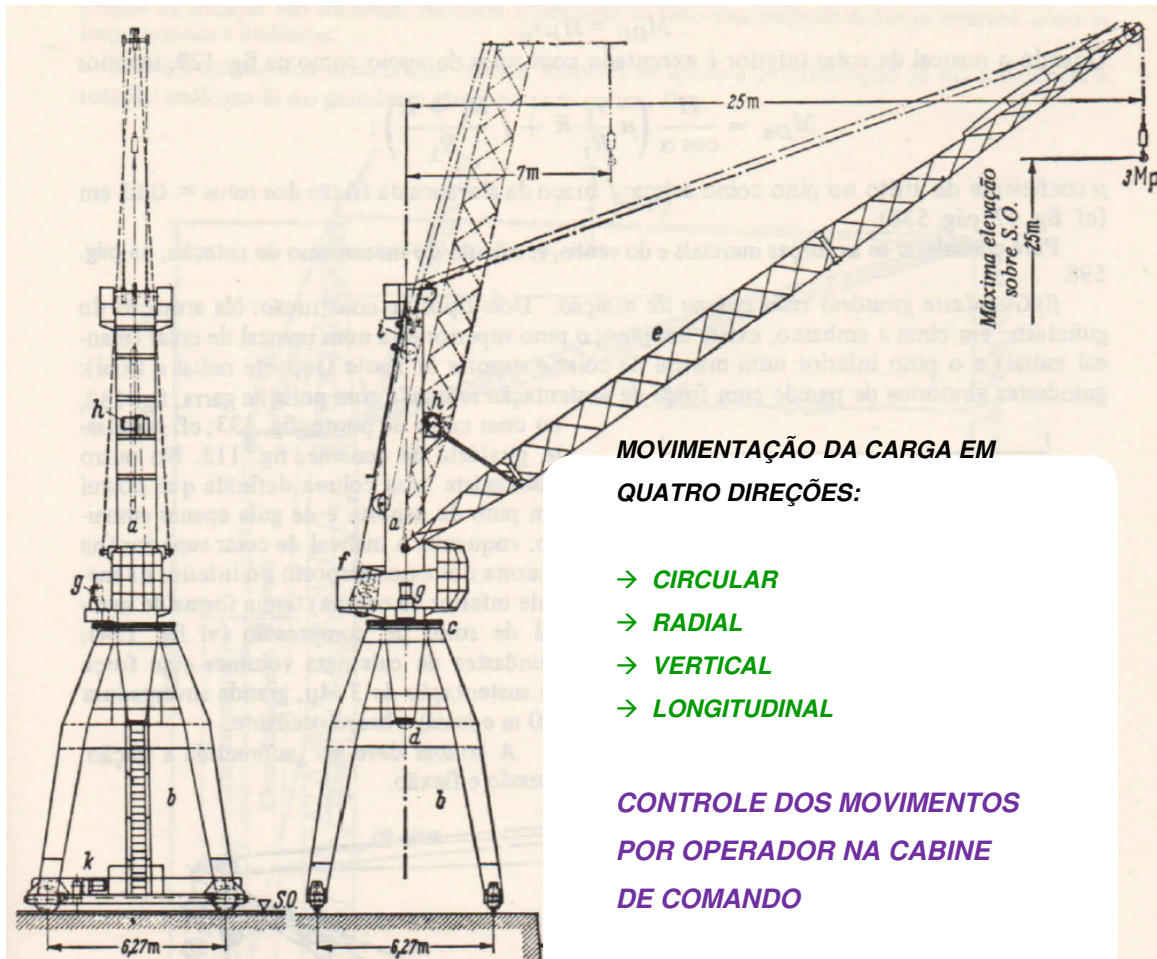
CONTROLE DOS MOVIMENTOS POR OPERADOR NA CABINE DE COMANDO



MÁQUINAS DE LEVANTAMENTO E TRANSPORTE → VARIANTES MAIS COMUNS

GUINDASTE PORTUÁRIO

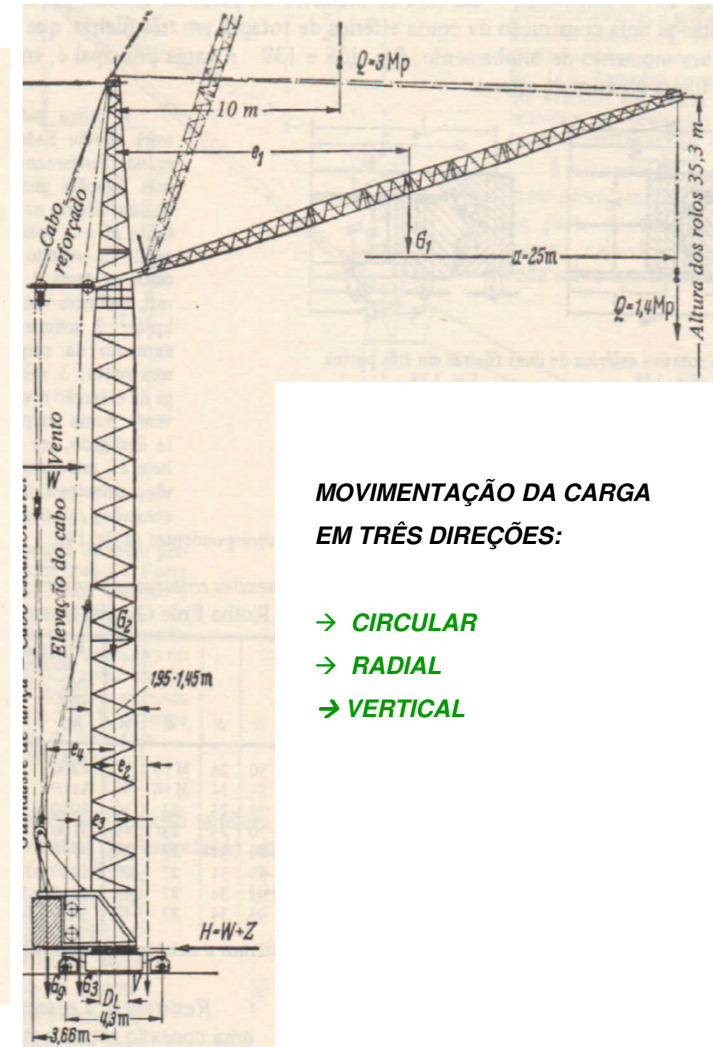
GRUA DE CONSTRUÇÃO



MOVIMENTAÇÃO DA CARGA EM QUATRO DIREÇÕES:

- CIRCULAR
- RADIAL
- VERTICAL
- LONGITUDINAL

CONTROLE DOS MOVIMENTOS POR OPERADOR NA CABINE DE COMANDO



MOVIMENTAÇÃO DA CARGA EM TRÊS DIREÇÕES:

- CIRCULAR
- RADIAL
- VERTICAL

ASPECTOS USUAIS COMUNS A TODAS AS MÁQUINAS DE LEVANTAMENTO E TRANSPORTE:

- **CARGAS COM MOVIMENTO DE TRANSLAÇÃO – CONVERTIDA EM ROTAÇÃO PELO TAMBOR E CABO DE AÇO**
- **SEMPRE ACOPLADAS INDIRETAMENTE AO EIXO DO MOTOR → USO TÍPICO DE REDUTORES DE VELOCIDADE POR MEIO DE ENGRENAGENS → $i > 1$ - MOMENTO DE INÉRCIA REFERIDO EQUIPARÁVEL AO DO MOTOR EM GERAL**
- **REGIME DE TRABALHO INTERMITENTE – ELEVADA INCIDÊNCIA DE PARTIDAS**
- **NA ELEVAÇÃO, O ACIONADOR OPERA NO MODO MOTOR – NA DESCIDA, EM GERAL, OPERA NO MODO GERADOR**
- **REQUER SEMPRE FREIO DE ESTACIONAMENTO**

GUINCHOS DE PEQUENO PORTE – ELEVADORES INDUSTRIAIS E RESIDENCIAIS:

- **ROTAÇÃO NOMINAL TÍPICA: 1800 / 600 ou 1200 / 300 RPM**
- **MOTOR COMUMENTE UTILIZADO – MOTOR DE INDUÇÃO DE ALTO ESCORREGAMENTO DE DUPLA VELOCIDADE, OU ASSOCIADO A INVERSOR DE FREQUENCIA**

PONTES ROLANTES DE MÉDIO E GRANDE PORTE:

- **ROTAÇÃO NOMINAL TÍPICA NA ELEVAÇÃO: 720 ou 900 RPM - NA TRANSLAÇÃO: 1200 / 1800 RPM**
- **MOTOR COMUMENTE UTILIZADO – MOTORES DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO (DE ANÉIS) COM PARTIDA E CONTROLE DE VELOCIDADE POR REOSTATO ROTÓRICO OU MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA (EM GERAL USO SIDERÚRGICO)**

GUINDASTES DE GRANDE PORTE PARA USO PORTUÁRIO:

- **ROTAÇÃO NOMINAL TÍPICA NA ELEVAÇÃO: 900 a 1500 RPM**
- **MOTOR COMUMENTE UTILIZADO – MOTORES DE GAIOLA COM CONTROLE POR INVERSOR, MOTORES DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO (DE ANÉIS) COM PARTIDA E CONTROLE DE VELOCIDADE POR REOSTATO ROTÓRICO OU MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA PARA EQUIPAMENTOS DE ELEVADA DEMANDA**

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: $C = k \cdot (\omega)^2$; $P_{mec} = k \cdot (\omega)^3$

BAIXO CONJUGADO DE PARTIDA

PARTIDA COM CURVA DE TORQUE REDUZIDA

ESTEIRAS TRANSPORTADORAS

MOINHOS

BRITADORES

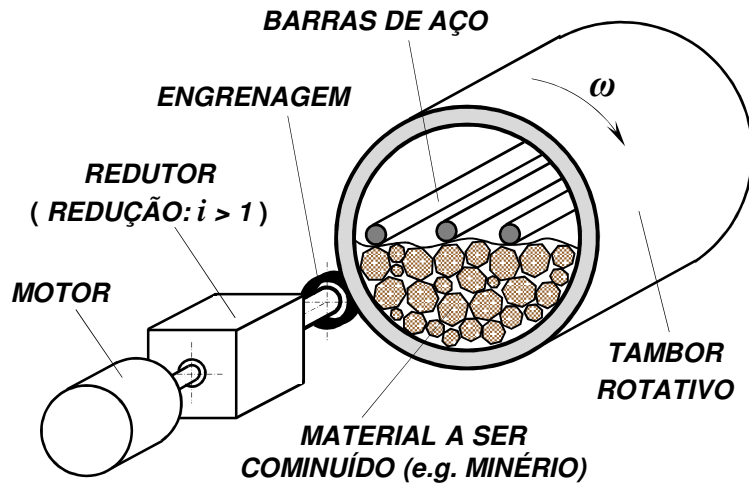
PRENSAS C/ VOLANTE

EM GERAL: $C = f(\omega)$; $P_{mec} = f(\omega) \cdot \omega$

$f(\omega)$ → FUNÇÃO COMPLEXA DA VELOCIDADE

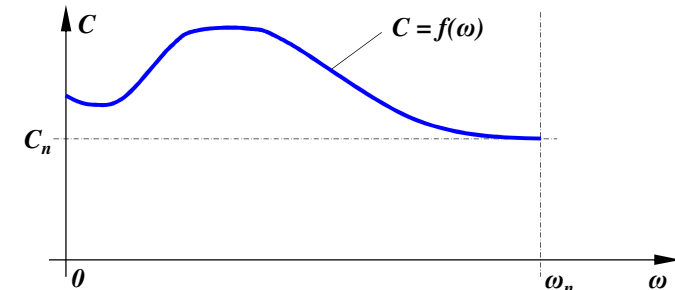
CONJUGADO DE PARTIDA "INDETERMINADO"

PARTIDAS FREQUENTES

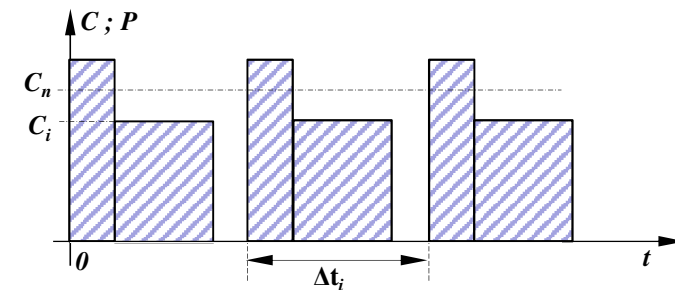


ELEMENTOS BÁSICOS DE UM MOINHO DE BARRAS

PROCESSO DE COMINUIÇÃO (REDUÇÃO DA GRANULAÇÃO), SE DÁ POR IMPACTO DAS BARRAS DE AÇO SOBRE O MATERIAL, COM A ROTAÇÃO DO TAMBOR



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**

- BOBINADEIRAS
- DESBOBINADEIRAS
- CALANDRAS
- LAMINADORES

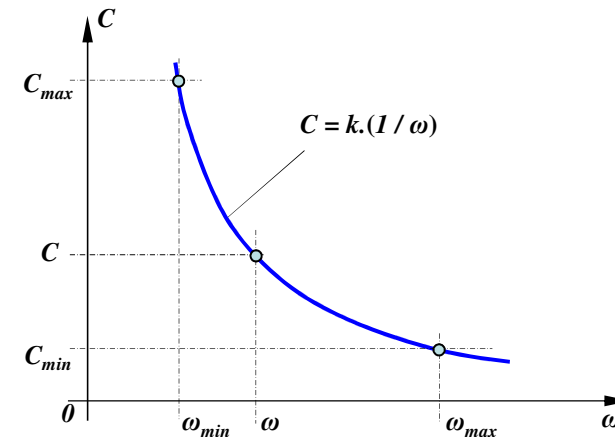
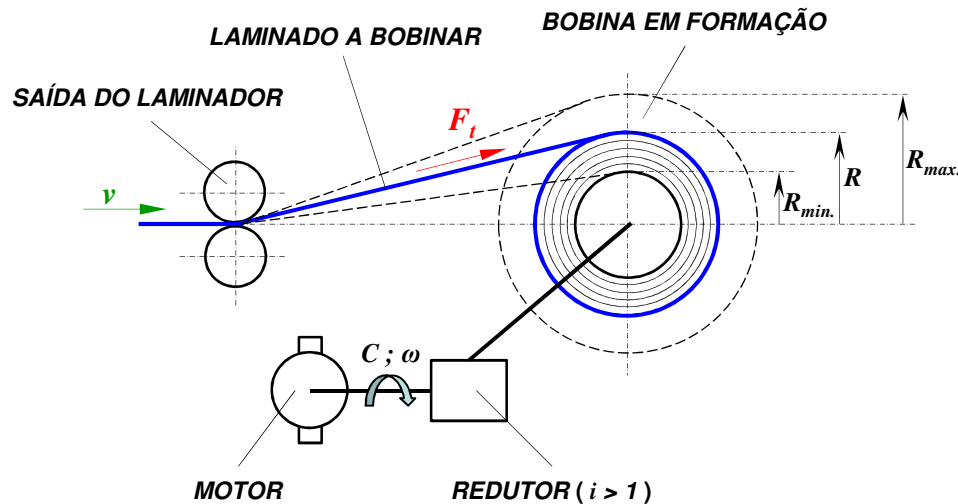
EM GERAL: $C = k \cdot (1 / \omega)$; $P_{mec} = k$

VELOCIDADE VARIÁVEL EM AMPLA FAIXA

CONTROLE RIGOROSO DE TORQUE E VELOCIDADE

**EM GERAL: PERFIL DE TORQUE
VARIÁVEL AO LONGO DO TEMPO**

**OPERAÇÃO EM MALHA FECHADA
DE CONTROLE**



CARACTERÍSTICA TÍPICA DE UMA BOBINADEIRA

**CONJUGADO E VELOCIDADE DA CARGA
REFERIDOS AO EIXO DO MOTOR :**

$$C = F_t \cdot R / i \quad \omega = (v / R) \cdot i$$

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

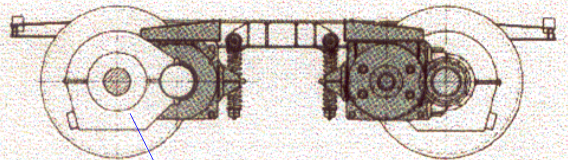
CARGAS MECÂNICAS → PRINCIPAIS TIPOS E CARACTERÍSTICAS

MÁQUINAS DE TRACÇÃO →

EM GERAL: PERFIL DE TORQUE VARIÁVEL AO LONGO DO TEMPO
 FREQUENTE REGENERAÇÃO DE ENERGIA PARA FRENAGEM

- VEÍCULOS METRO-FERROVIÁRIOS
- VEÍCULOS RODOVIÁRIOS
- EMPILHADEIRAS
- TRANSLAÇÃO DE PONTES ROLANTES

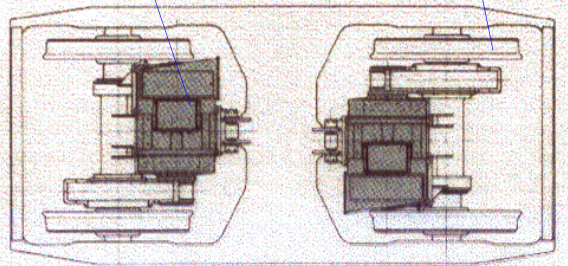
EM GERAL: $C = k_1 + k_2 \cdot \omega + k_3 \cdot (\omega)^2$
 ELEVADA TAXA DE ACELERAÇÃO REQUERIDA
 PARTIDAS FREQUENTES
 VELOCIDADE VARIÁVEL EM AMPLA FAIXA



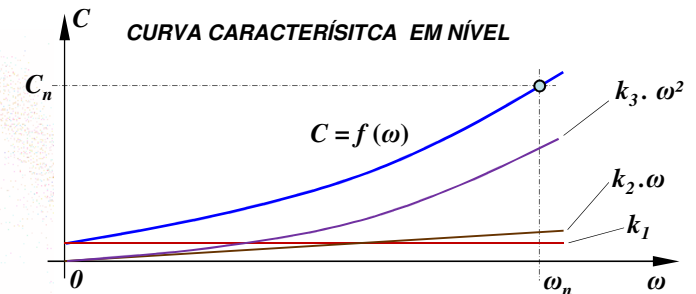
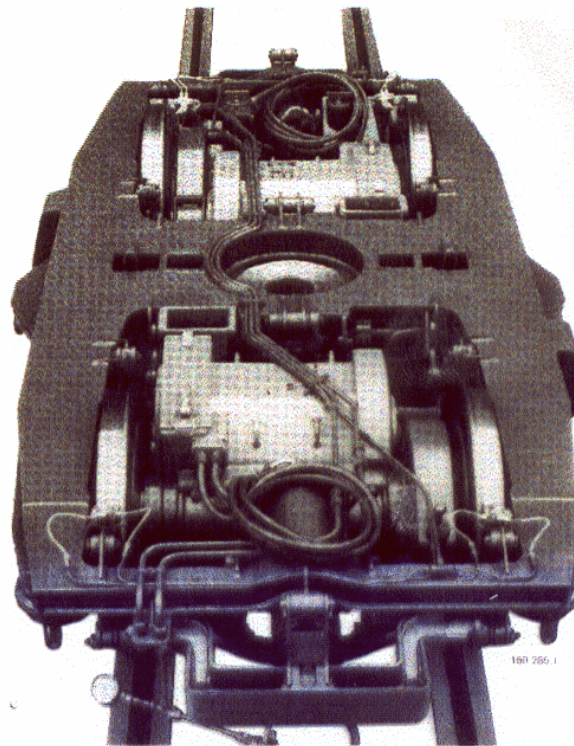
ENGRENAGEM DE ACOPLAMENTO ($i > 1$)

MOTOR DE TRACÇÃO

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 ESTRUTURAIIS

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