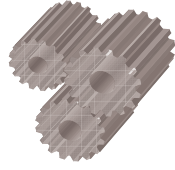




DEE  
IPT



**ACCIONAMIENTOS ELECTROMECAÑICOS**

# Accionamentos Electromecânicos Sistemas Mecânicos (continuação)



## Redutores de velocidade:

### Objectivos de utilização:

- Gama de velocidade menor do que a do motor
- Binário mais elevado
- Boa resolução de posicionamento (velocidade menor)

### Analogia com transformador:

#### Transformador (ideal):

U (tensão)

I (intensidade de corrente)

$$n = U_1/U_2, n = I_2/I_1, R = U/I$$

$$Z'_1 = n^2 Z_2$$

#### Redutor de velocidade (ideal):

T (binário)

w (velocidade angular)

$$i = w_1/w_2, K_D = T/w,$$

$$K'_D = i^2 K_D$$

## Redutores de velocidade:

Modelação:

$$T_1 = \frac{T_2}{i} = \frac{\overset{\text{inércia}}{J_2 * \dot{\omega}_2} + \overset{\text{atrito}}{K_{D2} * \omega_2} + \overset{\text{atrito com o ar}}{K_{A2} * \omega_2^2}}{i} = \frac{J_2}{i^2} * \dot{\omega}_1 + \frac{K_{D2}}{i^2} * \omega_1 + \frac{K_{A2}}{i^3} * \omega_1^2$$

reduzidos ao primário

Vistos do veio de entrada do redutor (reduzidos ao primário):

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = J_2 * \dot{\omega}_1 + K'_{D2} * \omega_1 + K'_{A2} * \omega_1^2 \\ J_2 = \frac{J_2}{i^2} \\ K'_{D2} = \frac{K_{D2}}{i^2} \\ K'_{A2} = \frac{K_{A2}}{i^3} \end{array} \right.$$

## Redutores de velocidade:

Considerando o rendimento:

$$P_2 = \omega_2 * T_2 = \eta * P_1 = \eta \omega_1 * T_1$$

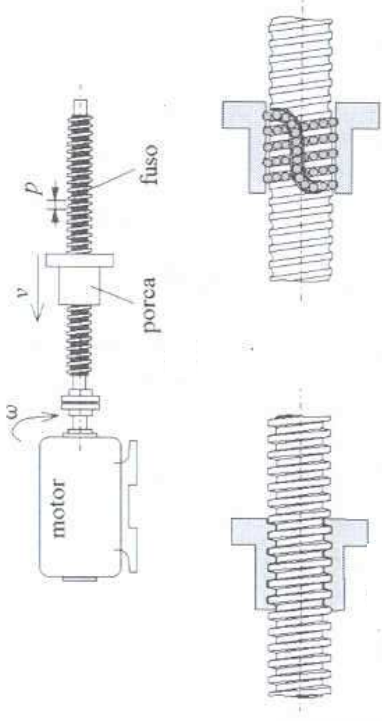
$$\left\{ \begin{array}{l} i = \frac{1}{\eta} * \frac{T_2}{T_1} \\ T_1 = J_2 * \dot{\omega}_1 + K_{D2} * \omega_1 + K_{A2} * \omega_1^2 \\ J_2 = \frac{J_2}{\eta * i^2} \\ K_{D2} = \frac{K_{D2}}{\eta * i^2} \\ K_{A2} = \frac{K_{A2}}{\eta * i^3} \end{array} \right.$$

Atenção: o rendimento só afecta o binário, a relação entre as velocidades angulares permanece igual (tal como as quedas de tensão num circuito série).

## Redutores de velocidade:

Conversão para sistemas lineares:

$$\left\{ \begin{array}{l} i = \frac{\omega_1}{v_2} = \frac{1}{\eta} * \frac{F_2}{T_1} \\ T_1 = \dot{J}_2 * \dot{\omega}_1 + K'_{D2} * \omega_1 + K'_{A2} * \omega_1^2 \\ \dot{J}_2 = \frac{M_2}{\eta * i^2} \\ K'_{D2} = \frac{K_{D2}}{\eta * i^2} \\ K'_{A2} = \frac{K_{A2}}{\eta * i^3} \end{array} \right.$$

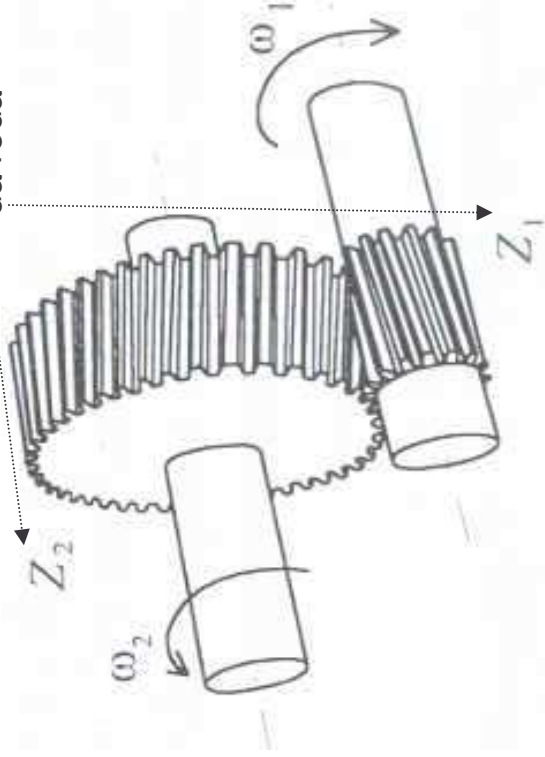


## Redutores de velocidade: exemplos

Redutor de engrenagens:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$$

n.º de dentes  
da roda

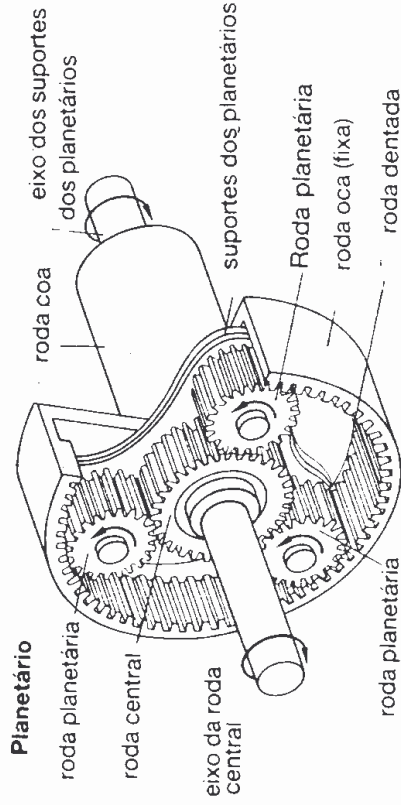


1 trem ( $i \leq 6$ )	$\eta > 97\%$
2 trens ( $6 \leq i \leq 40$ )	$\eta > 95\%$
3 trens ( $i \geq 40$ )	$\eta > 90\%$

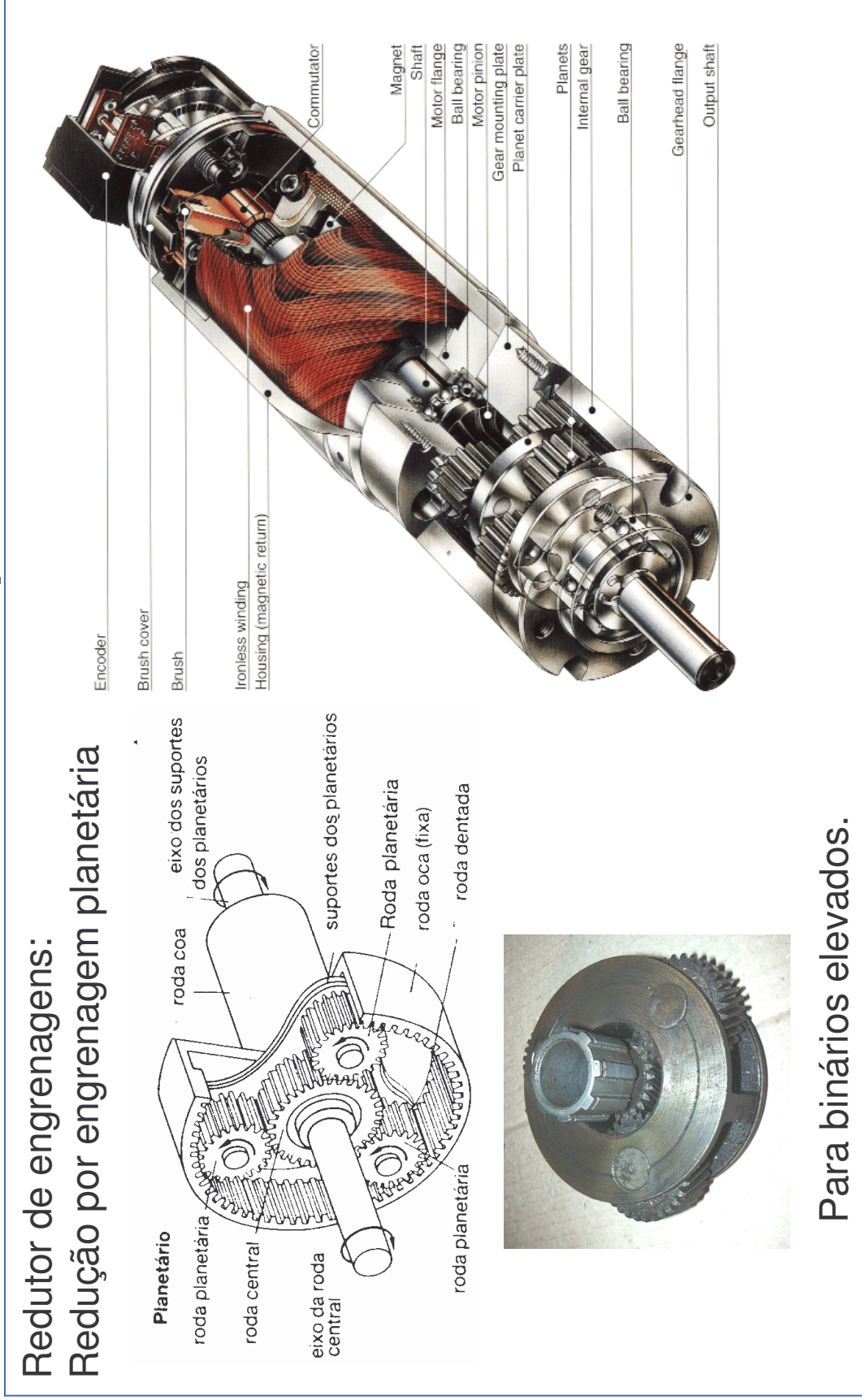
Baixo atrito e folgas desprezáveis.

## Redutores de velocidade: exemplos

Redutor de engrenagens:  
Redução por engrenagem planetária



Para binários elevados.

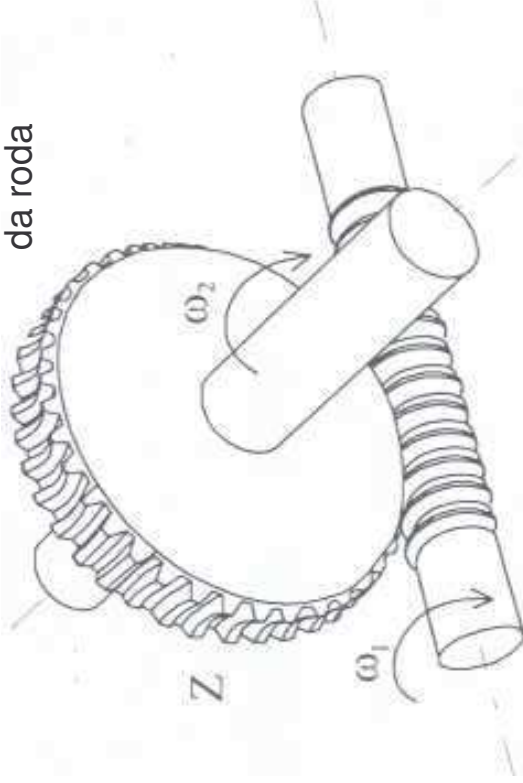


## Redutores de velocidade: exemplos

Redutor sem-fim e coroa:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = Z$$

n.º de dentes  
da roda



$$20 \leq i \leq 200 \rightarrow 80\% > \eta > 50\%$$

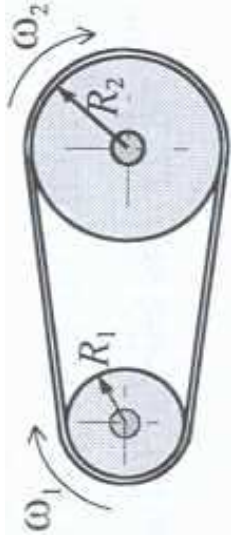


Atrito estático e viscoso elevados, normalmente não é reversível  
(a entrada é o sem fim).

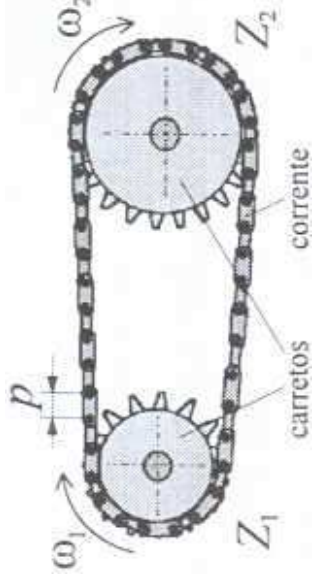


## Redutores de velocidade: exemplos

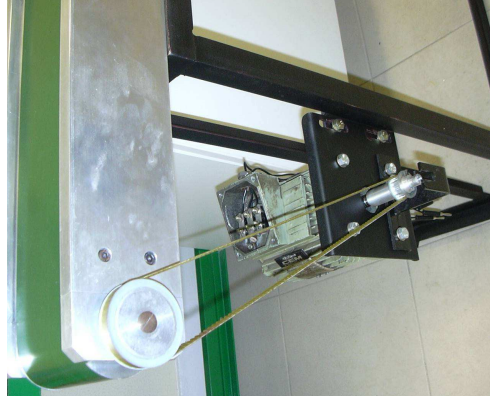
Corrente ou tambor e correia:



$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1}$$



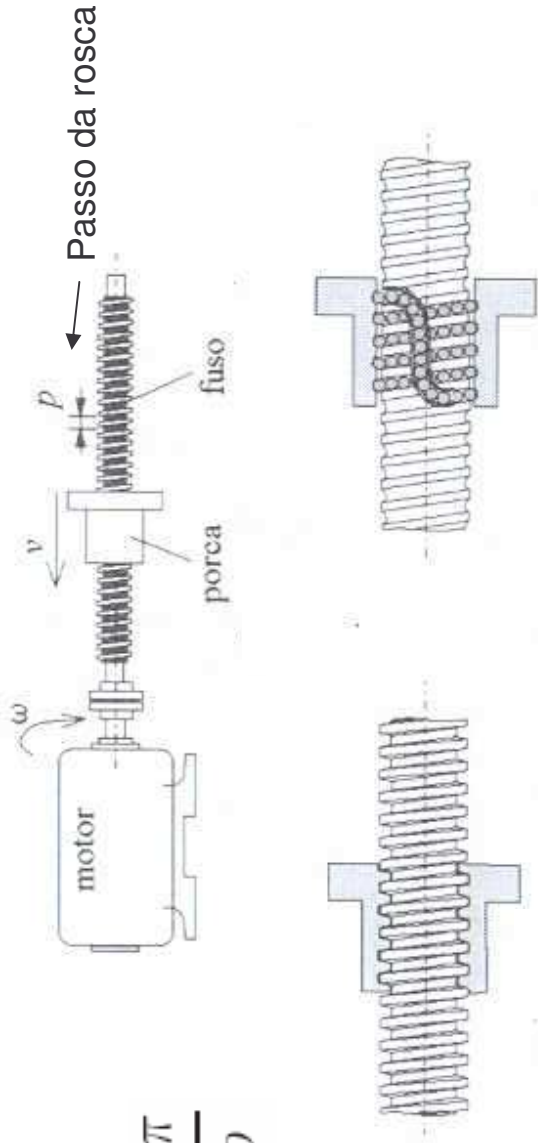
$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$$



## Redutores de velocidade: exemplos

Parafuso-porca:

$$i = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{p}$$



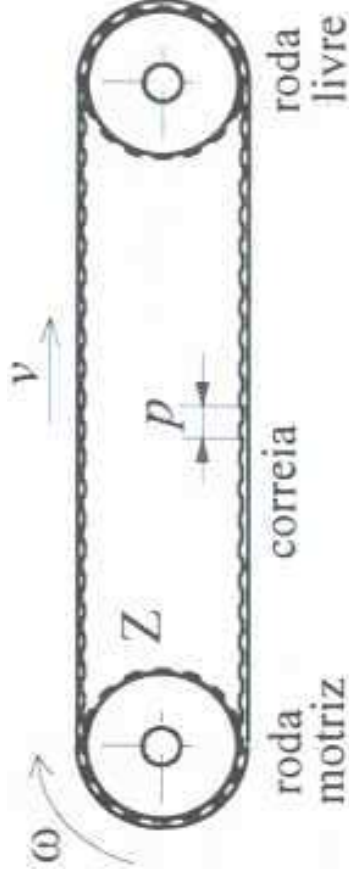
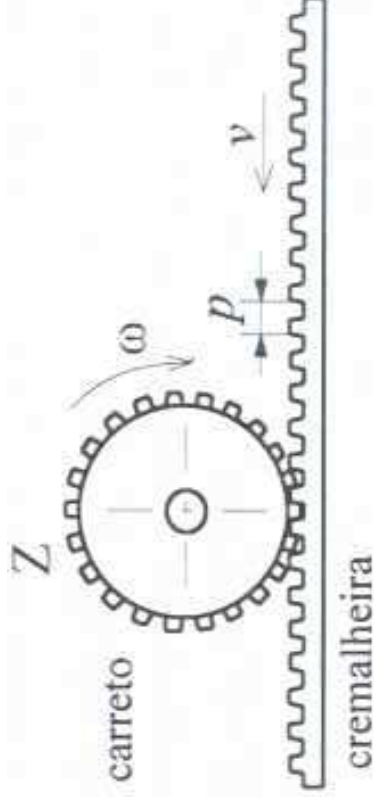
Possui atritos elevados, a não ser na versão com porca de esferas, normalmente não é reversível.

## Redutores de velocidade: exemplos

Carreto cremalheira:

$$i = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{Zp}$$

n.º de dentes



Possui folgas elevadas.

Correias dentadas: sem folgas e actualmente não são extensíveis.

## Freios e limitadores de binário:

### Máquina:

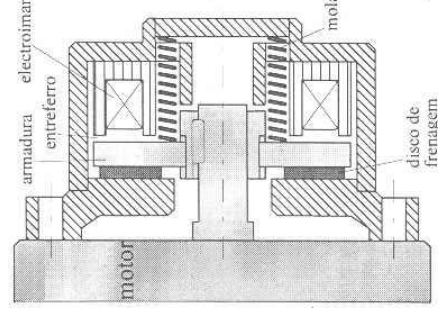
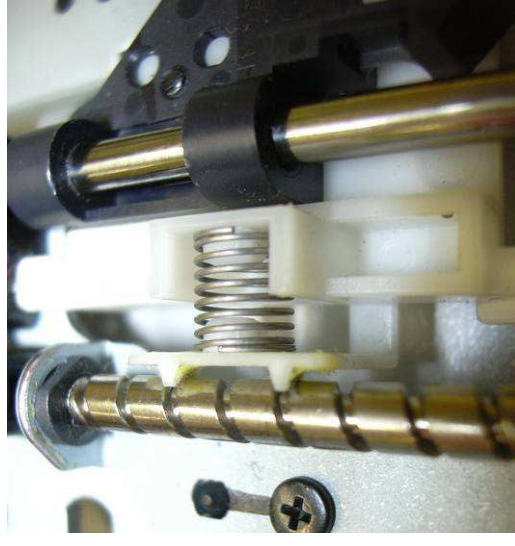
- Motoriza
- Trava
- Não permite bloquear firmemente

### Conversores electrónicos:

Controlados para impedir T acima de um certo limite:  
corrente máxima; robustez mecânica

### Travagem alternativa ou complementar, ou limitadores mecânicos:

- Freios (exemplo: elevador)
- Embraiagens (centrífugas, outras)



## Freios e limitadores de binário:

**Safety Couplings**  
*for large drives*



R+W's ST series safety couplings reduce downtime in the aftermath of a machine crash, thereby increasing the availability and production performance of the equipment. Designed for use in shredders, crushers, rolling mills, steel mills, conveyor equipment and extruders, the compact, robust design of the coupling makes maintenance-free operation possible throughout its service life. This safety coupling can limit torque up to values of 160,000Nm, with an available shaft diameter range of 40-290mm.

► 29549 at [www.ien.eu](http://www.ien.eu)

## Determinação dos parâmetros mecânicos:

Modelação completa-se com a determinação numérica dos parâmetros:

- Cálculos: exige o conhecimento dos detalhes construtivos
- Ensaios: exige que tenhamos a máquina em nossa posse



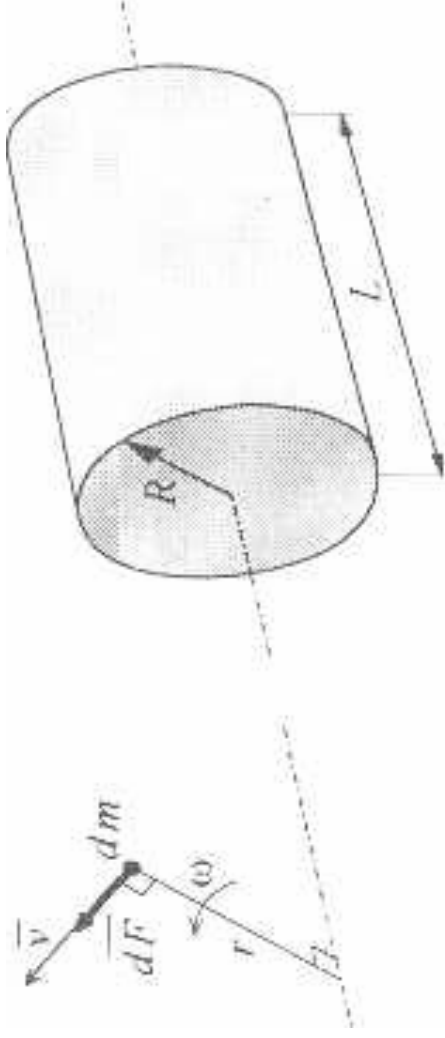
## Determinação dos parâmetros mecânicos:

Cálculo do momento de inércia (cilindro):

$$J \text{ para massa específica, } \mu: \quad J = \int_V dJ = \int_V \mu * r^2 * dV$$

$$J = \int_0^L \int_0^R \int_0^{2\pi} r^2 * \mu * r * d\theta dr dl = \frac{\pi * L * R^4 * \mu}{2}$$

$$J = \frac{M * R^2}{2}$$

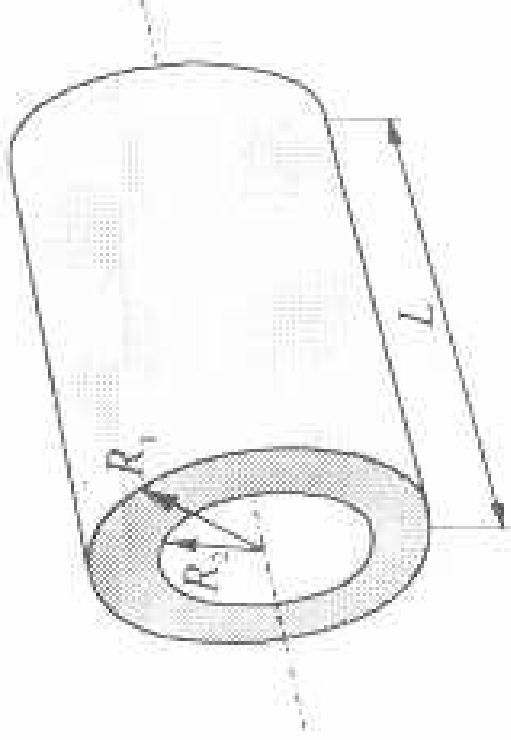


## Determinação dos parâmetros mecânicos:

Cálculo do momento de inércia (coroa circular):

$$J \text{ para massa específica, } \mu: \quad J = \int_V dJ = \int_V \mu * r^2 * dV$$

$$J = \frac{M * (R_1^2 - R_2^2)}{2}$$





## Determinação dos parâmetros mecânicos:

Determinação experimental dos parâmetros:

Determinar  $J$  e  $K_D$  (coef. de atrito linear):

1. Mede-se a potência eléctrica  $P(w_i)$  absorvida em funcionamento estacionário para diversos valores de  $w$ . Simultaneamente medem-se tb. As correntes eléctricas,  $I$  (para cada  $w_i$ ), para estimar a potência de perdas  $P_P(w_i)$  (esta estimativa depende da máquina em questão (AC, DC, PM, etc.).

A característica de carga é:

$$T_r(w_i) = (P(w_i) - P_P(w_i)) / w_i$$

## Determinação dos parâmetros mecânicos:

Determinação experimental dos parâmetros:

Determinar  $J$  e  $K_D$  (coef. de atrito linear):

- Após ter atingido uma velocidade apreciável, desliga-se a alimentação eléctrica e regista-se a evolução de  $w(t)$  em amortecimento natural até parar. Teoricamente, tratando-se de um sistema regido por:  $T_m = J \frac{dw}{dt} + T_r$ , para qualquer valor de velocidade resultará sempre no mesmo momento de inércia:

$$J = T_f \frac{dw/dt}{w} \Big|_{w=w_i}$$

$$K_D = T_f \frac{w_i}{w_i}$$

Na prática e devido a variações efectua-se a média de várias medidas.

## Exigências de serviço:

Accionamentos têm que satisfazer os objetivos de:

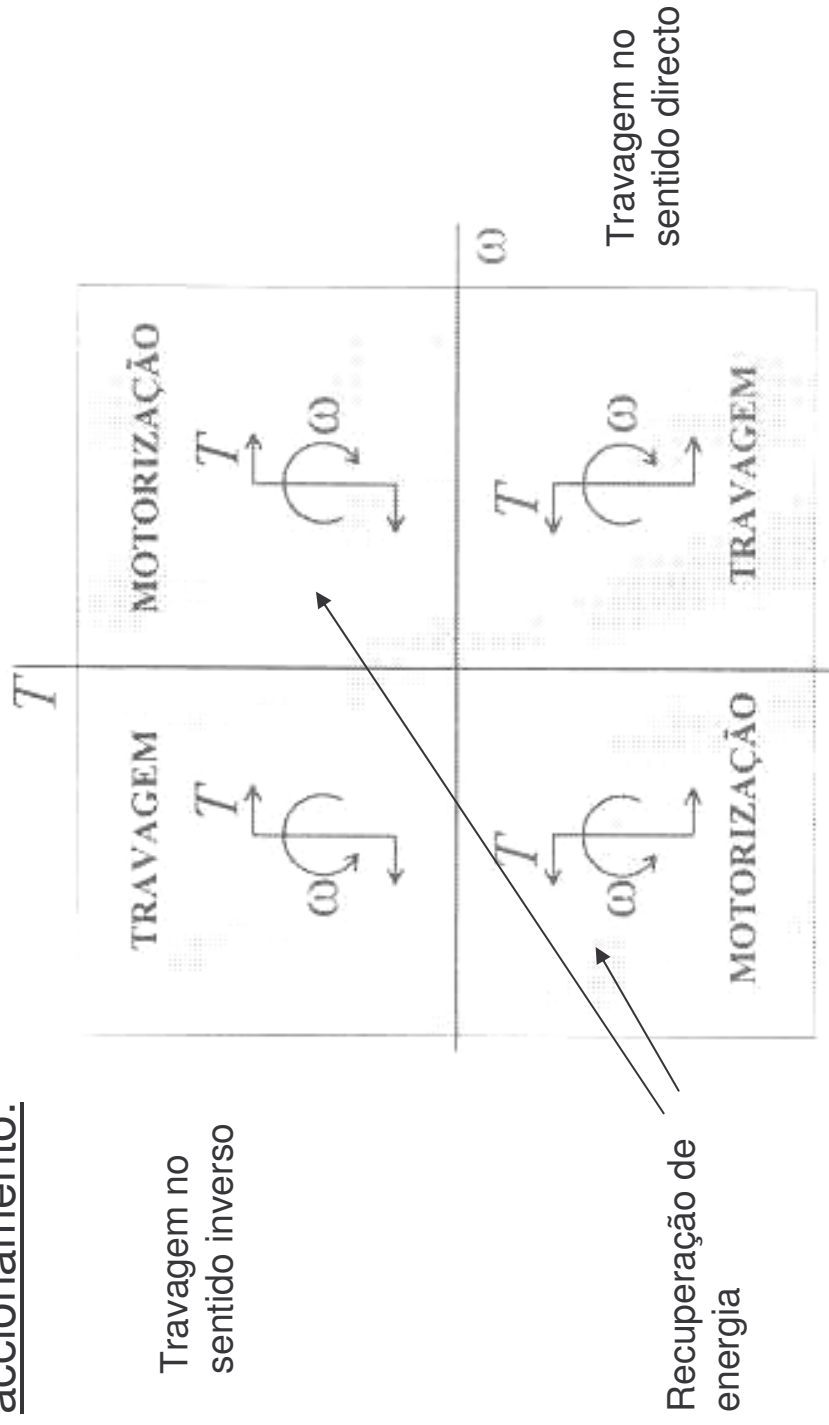
- Regime estacionário (evolução de posição)
- Regime dinâmico (evolução da velocidade)

Assim, é exigido que:

- Os conversores utilizados permitam que a energia possa fluir nos sentidos convenientes
- As máquinas permitam obter binários e velocidades (portanto potências) com amplitudes e sentidos correctos.

## Exigências de serviço:

Assim surgem as exigências de serviço ou quadrantes de operação de um accionamento:

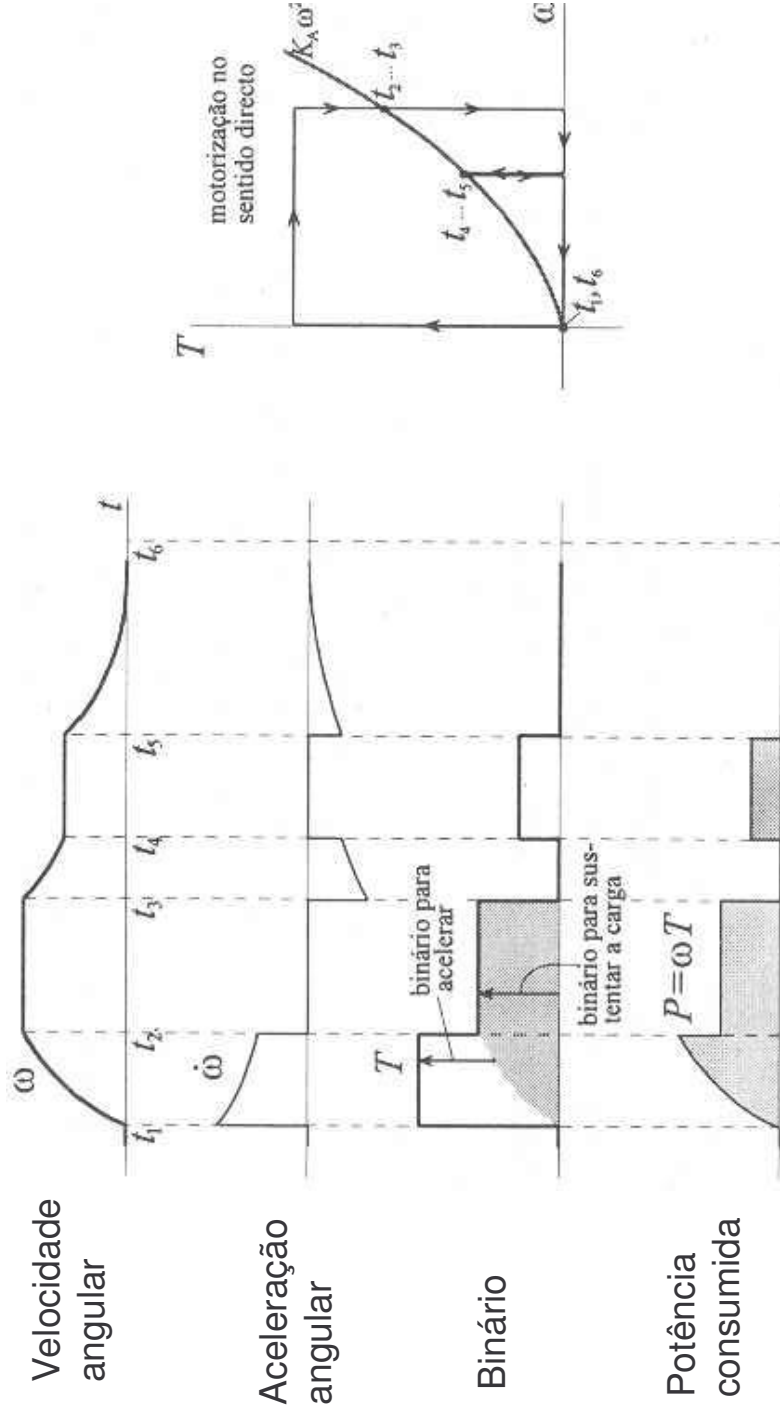




## Exigências de serviço:

Regime dinâmico:

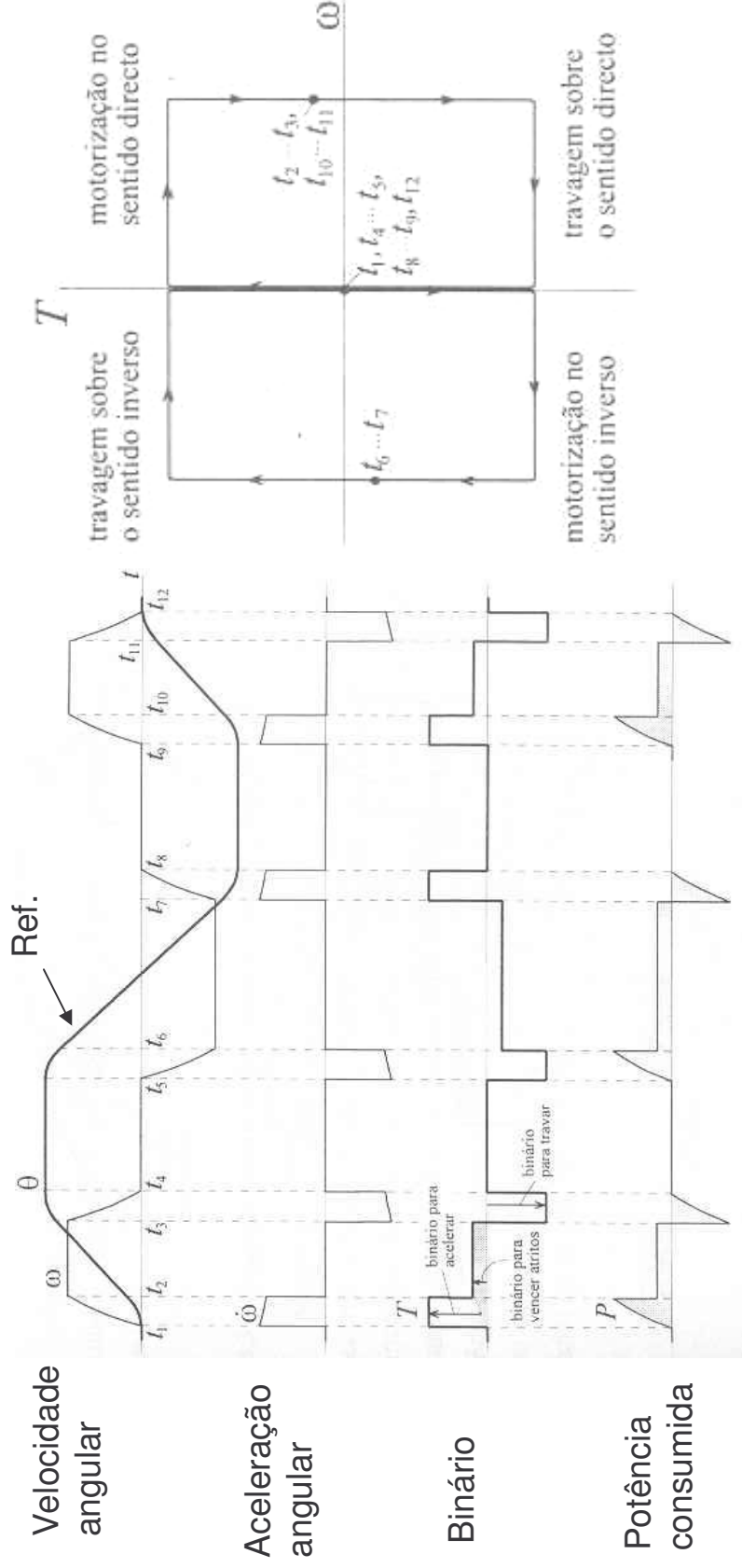
Ex1: bomba centrífuga com movimento unidirecional 1ºQ



## Exigências de serviço:

Regime dinâmico:

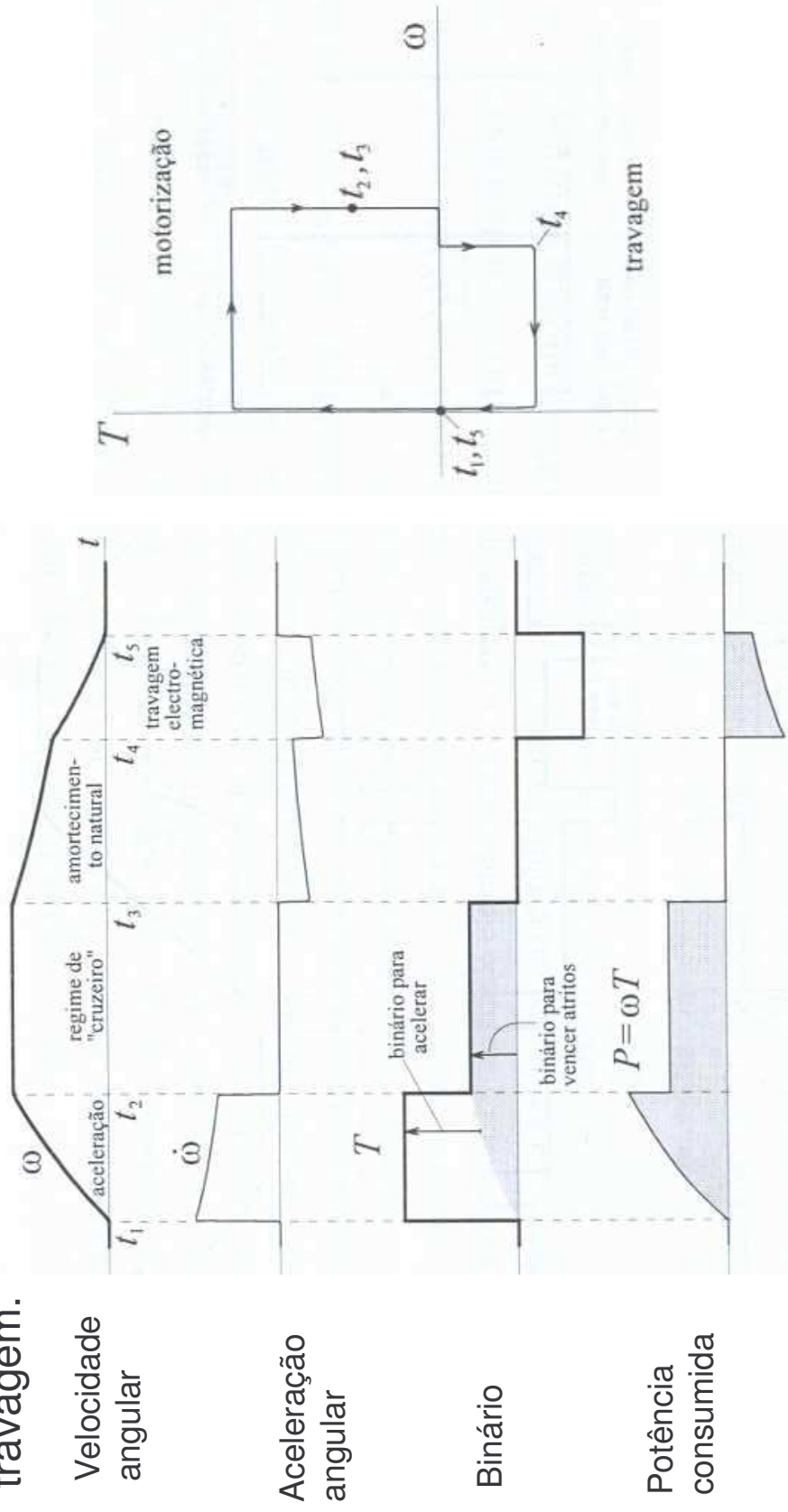
Ex2: sistema servo de regulação de posição 1º, 2º, 3º e 4ºQ



## Exigências de serviço:

Regime dinâmico:

1º e 4ºQ  
Ex3: tracção horizontal de um veículo em plano horizontal com binário de travagem.



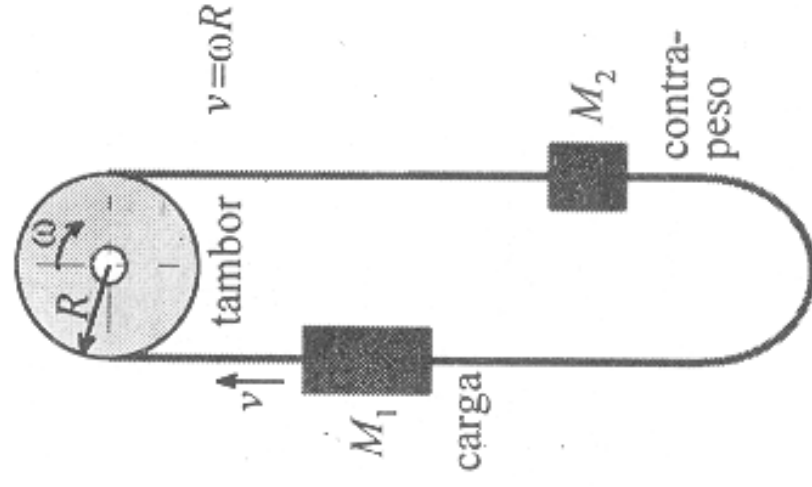


## Exigências de serviço:

Regime dinâmico:

Ex4: guindaste e ascensores

1º e 2ºQ

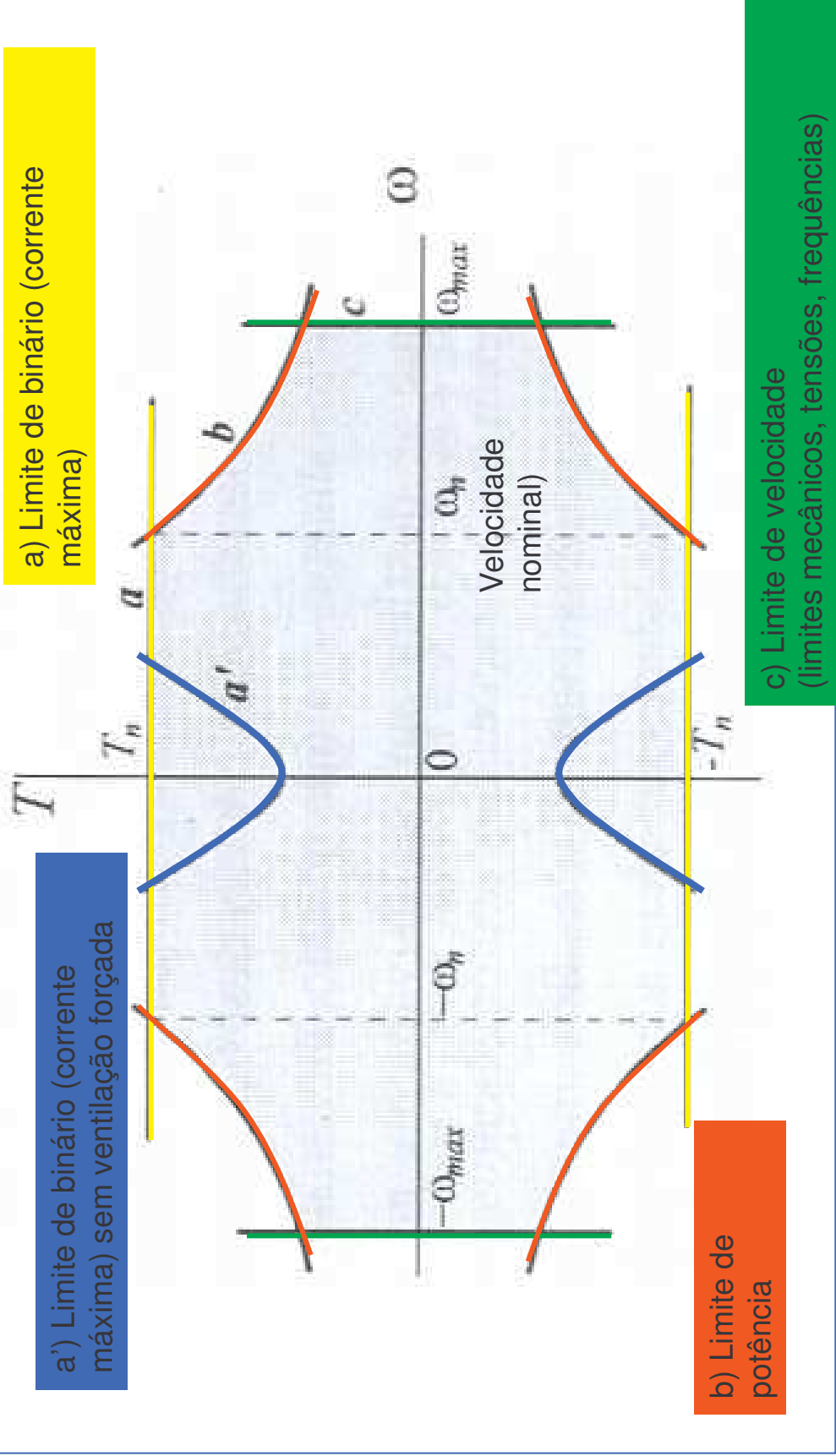


Binário sempre na mesma direcção

Rotação nos dois sentidos

## Exigências de serviço:

Restrições impostas pela máquina eléctrica:



## Exigências de serviço:

Restrições impostas pelo conversor:

- Dependendo da sua topologia estes não permitem que as grandezas eléctricas, tensão e corrente tomem os valores adequados aos quatro quadrante mecânicos.
- O trânsito de potência pode ter vários sentidos.
- Este item será estudado quando forem abordados os conversores.

## Exigências de serviço:

Efeitos parasitas e oscilatórios:

Causas:

No motor: desequilíbrios, assimetrias, desalinhamento e irregularidades inerentes (ex. motor de passo), etc.

Na carga: desequilíbrios, assimetrias, desalinhamento e irregularidades inerentes (ex. bombas de êmbolos), etc.

No conversor: tremor da corrente devido à comutação, motores universais (100Hz), etc.

Nos sistemas de apoio e carcaças: ressonâncias estruturais (sistemas massa-mola), etc.

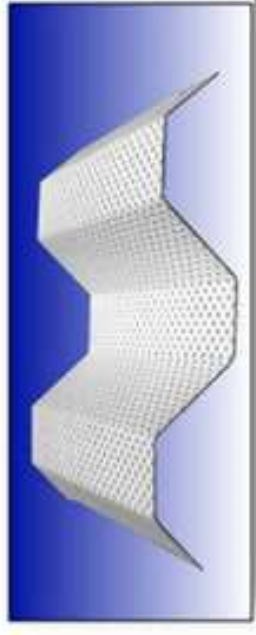
Consequências:

Ruído acústico, esforços mecânicos e falhas.

## Exigências de serviço:

### Soluções:

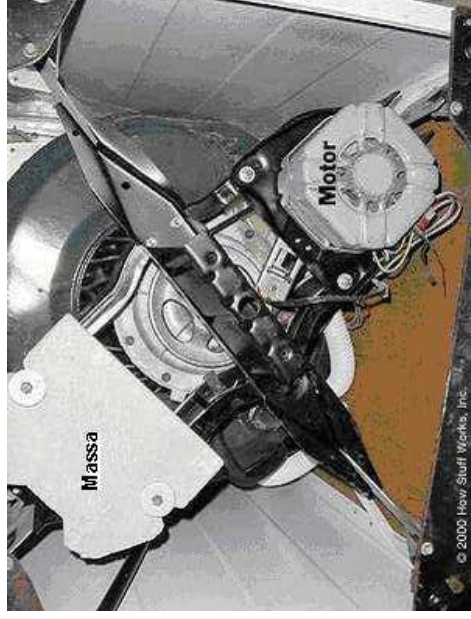
- Equilibragem das partes rotativas
- Perfuração de chapas (diminuir radiação)
- Amortecer
- Apoios resilientes
- Frequência de comutação  $> 20\text{kHz}$



## Exigências de serviço:

Soluções (cont.):

- Filtros
- Programação dos VEV's para evitar certas faixas de frequência
- Redesenho do sistema
- Variar a frequência de ressonâncias (ex.: adicionar massas)





DEE  
IPT

# Sistemas mecânicos ACCIONAMENTOS ELECTROMECAÑICOS

---

**Fim**