

**Manuel Vaz Guedes**

**O Motor de Indução Trifásico**  
*selecção e aplicação*

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

**1994**

# O Motor de Indução Trifásico

## selecção e aplicação

Manuel Vaz Guedes

(Prof. Associado Agregado)

**Faculdade de Engenharia**  
**Universidade do Porto**

### ÍNDICE

1. *Sistema Alternado Trifásico*
  - 1.1 Grandeza Alternada Monofásica
  - 1.2 Sistema Alternado Trifásico
  - 1.3 A Instalação de Utilização de Energia Eléctrica
  - 1.4 Síntese
  
2. *O Motor de Indução Trifásico*
  - 2.1 Aspectos Construtivos
  - 2.2 Princípio de Funcionamento
  - 2.3 Método de Estudo
  - 2.4 Aspectos do Funcionamento
  - 2.5 Instalação do Motor de Indução Trifásico
  - 2.6 Caracterização do Motor de Indução Trifásico
  
3. *Sistemas de Accionamento com o Motor de Indução Trifásico*
  - 3.1 Dinâmica do Sistema
  - 3.2 Funcionamento do Sistema de Accionamento Electromecânico
  - 3.3 Tipos de Serviço
  - 3.4 Consumo de Energia e Análise Económica
  - 3.5 Manutenção
  
4. *Seleccção e Aplicação do Motor de Indução Trifásico*
  - 4.1 Seleccção e Aplicação
  - 4.2 Seleccção e Serviço
  - 4.3 Elementos de Classificação
  
5. *Exemplo de Aplicação*
  - Accionamento de uma Bomba Centrífuga

#### *Bibliografia*

#### *Apêndices*

- A *Símbolos para Grandezas e Unidades*
- B *Ficheiro de Dados*

# O Motor de Indução Trifásico

## *selecção e aplicação*

Manuel Vaz Guedes

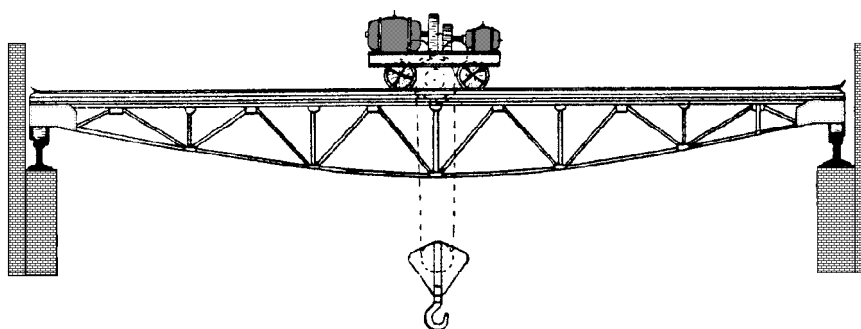
(Prof. Associado Agregado)

**Faculdade de Engenharia**

**Universidade do Porto**

No accionamento de cargas mecânicas utilizam-se *motores eléctricos*, que são máquinas capazes de promoverem uma transformação de energia eléctrica em energia mecânica com algumas perdas de energia. Como essas perdas de energia são pequenas, o motor eléctrico apresenta a vantagem de ser uma máquina com um rendimento energético elevado.

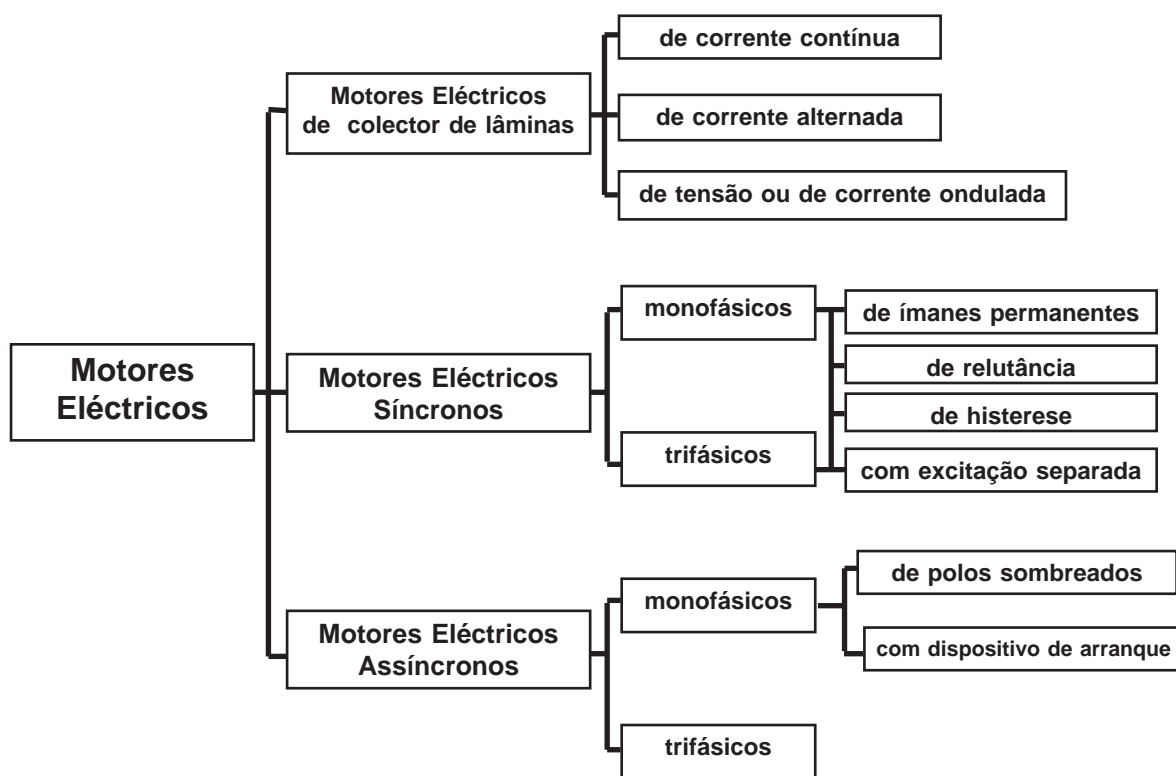
Entre os diversos tipos de motores eléctricos *o motor de indução trifásico* é uma máquina com um princípio de funcionamento simples, com uma construção robusta, com pequena manutenção, e que devido à automação do seu processo de fabrico tem um preço pouco elevado. Como o progresso tecnológico permitiu o desenvolvimento de métodos de controlo desta máquina eléctrica, que, não sendo dissipativos de energia, contribuem para uma utilização racional da energia eléctrica, o domínio de aplicação do motor de indução trifásico tem vindo a alargar-se.



*Sistema de Accionamento Electromecânico — ponte rolante*

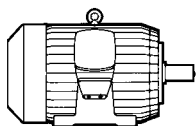
No accionamento de uma carga mecânica podem ser utilizados outros motores eléctricos: como os motores de corrente contínua, os motores de corrente alternada síncronos, os motores de

indução monofásicos, ou motores eléctricos especiais. Esses diversos tipos podem ser agrupados num esquema representativo como o figurado.



Devido às suas *características de funcionamento* serem diferentes, cada tipo de motor eléctrico tem, normalmente, um tipo de aplicação específico. No entanto, actualmente, com a alimentação dos motores eléctricos por conversores electrónicos de potência é possível, através da estratégia de controlo desses conversores, adaptar as características de funcionamento naturais de um determinado tipo de motor eléctrico às necessidades da carga mecânica que ele vai accionar.

Existem, desta forma, muitas possibilidades de aplicação de um motor eléctrico. Por isso, a selecção do motor e a sua aplicação constituem um assunto complexo, que envolve a análise de diversos parâmetros: rede eléctrica disponível para alimentação do motor, características de funcionamento do motor eléctrico, ligação do motor eléctrico à carga mecânica, necessidades e características da carga mecânica, controlo do motor eléctrico, exploração económica do sistema de accionamento, ...



Devido às suas excelentes características, o motor de indução trifásico tem sido utilizado como o “*cavalo de força*” nos mais diversos accionamentos electromecânicos: desde o accionamento de simples ventiladores (1,5 kW) até aos motores dos veículos de tracção eléctrica (ICE ≈ 1 250 kW), ou o accionamento de poderosos compressores utilizados

na indústria química (200 a 1 800 kW), passando pelo vulgar accionamento de máquinas ferramentas (4 a 30 kW).

O motor de indução trifásico tem um princípio de funcionamento simples, baseado na Lei da Indução, que se encontra materializado num motor com aspectos construtivos de fácil execução e que, se for bem aplicado, permite obter sistemas de accionamento estáveis, e com boa qualidade.

Na aplicação do motor de indução trifásico são importantes os aspectos relacionados com o

*sistema alternado trifásico* (1.) das grandezas eléctricas da alimentação do motor, com a caracterização do funcionamento do *motor de indução trifásico* (2.), com a *dinâmica do sistema de accionamento* (3.), o que, globalmente, permite atender aos problemas de *selecção e aplicação do motor de indução trifásico* (4.).

## 1. Sistema Alternado Trifásico

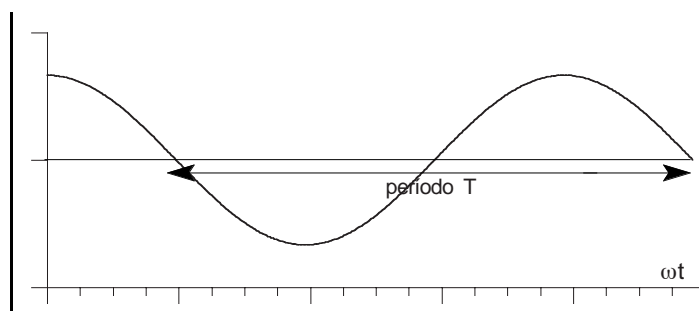
No accionamento electromecânico de uma carga mecânica é necessário fornecer energia eléctrica ao motor de indução trifásico. Actualmente, essa energia provém de uma rede eléctrica geral, como a rede nacional, através de uma ligação entre o motor e essa rede, que terá de respeitar as Normas de Segurança em vigor.

### 1.1 Grandeza Alternada Monofásica

Devido a um conjunto de qualidades as grandezas eléctricas alternadas têm uma variação sinusoidal no tempo, [MVG-1]. Essa forma de onda tem uma expressão analítica:

$$g = G_m \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

Esta expressão está representada graficamente na figura, onde a semionda positiva mais a semionda negativa constituem um *ciclo*. O número de ciclos por segundo é a *frequência*  $f$  da grandeza alternada, tal que  $f = 1/(\text{período}) = 1/T$ .



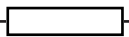
Na expressão representativa de uma grandeza alternada sinusoidal há a considerar os seguintes valores:

- $g$  — *valor instantâneo* - valor assumido pela grandeza em cada momento. (Representa-se por uma letra minúscula  $g(t)$ ).
- $G_m$  — *valor máximo ou amplitude* - ou valor de pico - é o maior valor assumido pela função durante um semi-período. (Representa-se por uma letra maiúscula com o índice  $m$  ou por uma letra maiúscula acentuada com um til,  $\tilde{N}$ ).
- $\omega t + \varphi$  — *ângulo de fase* - costuma dizer-se simplesmente *fase*. É um ângulo e exprime-se em radianos, [rad]
- $\omega$  — *pulsção* - é uma velocidade angular, que se exprime em radianos por segundo, [rad/s]. Verifica-se que  $\omega = 2\pi f$ .
- $\varphi$  — *esfasamento* - é o valor do ângulo de fase na origem do tempo. Pode tomar um valor positivo (avanço de fase) ou negativo (atraso de fase). Também se exprime em radianos, [rad]

Na rede eléctrica nacional a frequência das grandezas alternadas é de 50 Hz. Assim, considerando a tensão eléctrica da rede como origem do ângulo de fase ( $\varphi = 0$ ), o valor instantâneo da tensão seria representado pela expressão:  $u(t) = U_m \cdot \text{sen}(\omega t)$ , com  $[u]$  em volt.

Numa rede eléctrica alternada monofásica há que considerar cargas eléctricas constituídas por resistência, bobina, ou condensador. Quando se aplica uma tensão alternada sinusoidal a uma

destas cargas, interessa verificar o que sucede à intensidade da corrente eléctrica  $i(t)$ , com  $[i]$  em ampere.

resistência 

Uma resistência eléctrica é formado por um condutor eléctrico que oferece uma certa oposição à passagem da corrente eléctrica. Quando é aplicada uma tensão alternada sinusoidal aos terminais de uma resistência eléctrica verifica-se a relação entre os valores eficazes  $I = U/R$  (Lei de Ohm), sem que a corrente eléctrica fique esfasada em relação à tensão.

bobina 

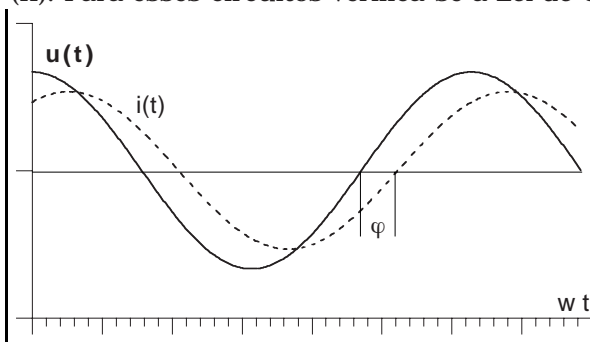
Uma bobina eléctrica é formada por um condutor eléctrico enrolado em torno de uma superfície cilíndrica oca. Aplicando uma tensão alternada sinusoidal nos terminais da bobina, resulta que a corrente eléctrica ainda tem um comportamento sinusoidal no tempo, mas fica esfasada  $\pi/2$  em atraso (quadratura atraso) e o seu valor eficaz é dado pela relação  $I = U/X$ . Em que  $X$  é a *reactância* da bobina que é igual ao produto da pulsação pelo valor da indutância da bobina:  $X = \omega L$ . Com  $[L]$  em henry,  $[\omega]$  em rad/s, e  $[X]$  em ohm ( $\Omega$ ).

No estudo das máquinas eléctricas é muito importante o conhecimento do comportamento das grandezas eléctricas numa bobina com núcleo de material ferromagnético, que é uma carga com um comportamento não linear.

condensador 

Um condensador é um dipolo formado por duas placas condutoras a potenciais eléctricos diferentes, separadas por um meio dieléctrico. Neste caso, quando se aplica uma tensão alternada sinusoidal nos terminais do condensador, a corrente eléctrica no circuito vem esfasada de  $\pi/2$  em avanço (quadratura avanço) e o seu valor eficaz é dado pela relação  $I = U/X$ , em que  $X$  é a *reactância* do condensador que é igual a  $X = 1/\omega C$ . Com  $[C]$  em farad,  $[\omega]$  em rad/s, e  $[X]$  em ohm ( $\Omega$ ).

Geralmente as cargas eléctricas monofásicas têm uma parte formada por uma resistência e outra parte formada por uma reactância (essencialmente indutiva, mas que também pode ser capacitiva). Nessa situação a carga é representada pela respectiva impedância  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ , com  $[Z]$  em ohm ( $\Omega$ ). Para esses circuitos verifica-se a *Lei de Ohm* em corrente alternada.



A presença de uma carga indutiva (formada por um circuito com resistência eléctrica  $R$  associada a uma indutância  $L$ ), traduz-se por um esfasamento em atraso da corrente eléctrica em relação à tensão de alimentação, com um ângulo de esfasamento  $\varphi$ , tal que  $0 < \varphi < \pi/2$ ; (ver a figura).

A presença de uma carga capacitiva traduz-se por um esfasamento em avanço em relação à tensão

de alimentação, com um ângulo de esfasamento  $\varphi$ , tal que  $0 < \varphi < \pi/2$ .

No estudo das *grandezas alternadas sinusoidais* definem-se alguns valores importantes, como o:

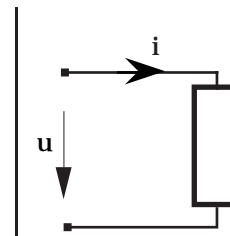
Valor Eficaz (ou valor médio quadrático) —  $G = G_{ef} = \sqrt{(1/T) \cdot \int_0^T g^2(t) dt}$  — é um valor que, no caso da corrente eléctrica, é igual à intensidade da corrente contínua que no mesmo intervalo de tempo, e na mesmas condições, liberta, por efeito Joule, a mesma quantidade de calor, numa mesma resistência eléctrica.

Para uma grandeza alternada sinusoidal determina-se  $G = G_{ef} = (1/\sqrt{2}) \cdot G_m$ . Assim, as grandezas alternadas sinusoidais podem ser escritas na forma da expressão:  
 $g = \sqrt{2} G \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)$ .

Quando não se caracteriza o valor de uma grandeza alternada sinusoidal, deve-se considerar que é um *valor eficaz*. Este é o valor lido nos aparelhos de medida usuais, que são utilizados na prática corrente.

Num dipolo receptor que se encontra alimentado por uma tensão instantânea  $u$ , e que é percorrido por uma corrente eléctrica instantânea  $i$ , o valor da potência instantânea consumida pelo dipolo é,  $p = u \cdot i$ .

Se  $u = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos \omega t$ , e  $i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos(\omega t - \varphi)$ , verifica-se que  $p = u \cdot i = UI \cdot \cos \varphi + UI \cdot \cos(2\omega t - \varphi)$ . A potência instantânea é pulsatória e formada pela soma de um termo constante,  $P = UI \cdot \cos \varphi$ , e de um termo alternado sinusoidal,  $UI \cos(2\omega t - \varphi)$ , com uma frequência dupla da frequência da tensão de alimentação.



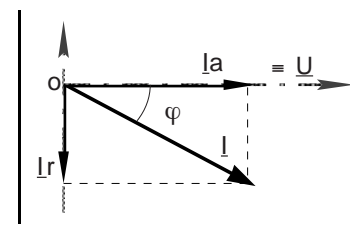
Ao valor  $P = UI \cos \varphi$  chama-se *potência activa* absorvida pelo circuito. A unidade em que se exprime é o *watt*, W.

Ao valor  $S = UI$  chama-se *potência aparente* do circuito. A unidade em que se exprime é o *volt-ampere*, VA. A potência aparente dá sempre uma indicação da capacidade de um sistema eléctrico produzir uma dada transformação de energia.

À relação entre a potência activa e a potência aparente,  $\lambda = P/S$ , chama-se *factor de potência*. No caso da tensão e da corrente eléctrica serem grandezas alternadas sinusoidais o valor do factor de potência é dado pelo coseno do ângulo de esfasamento entre aquelas grandezas,  $\lambda = P/S \equiv \cos \varphi = (UI \cos \varphi)/UI$ .

O factor de potência de um circuito ou de uma instalação eléctrica é um valor importante porque dá uma informação sobre o ângulo de esfasamento entre a tensão e a corrente eléctrica, nos terminais da instalação.

Quando no circuito receptor está a passar uma corrente eléctrica esfasada, em atraso, de um ângulo  $\varphi$ , sobre a tensão (caso de uma carga indutiva) aplicada ao circuito, essa corrente pode-se considerar resultante da composição de uma *componente activa* de corrente eléctrica  $I_a = I \cdot \cos \varphi$  e de uma *componente reactiva*  $I_r = I \cdot \text{sen} \varphi$ .



A *corrente eléctrica reactiva* não produz trabalho útil, apenas serve para criar e manter o campo magnético, nas cargas indutivas, que constituem o receptor. Atendendo a que são grandezas fasoriais entre as três correntes eléctricas existe a relação  $I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$ . Assim, num circuito indutivo em que a componente reactiva tenha um valor significativo, o valor da corrente, realmente, absorvida pelo circuito ( $I$ ), é superior ao valor da corrente activa ( $I_a$ ). Este aumento do consumo real de corrente eléctrica costuma ser onerado pelos serviços fornecedores de energia eléctrica: *factura da energia reactiva*.

Define-se *potência reactiva* —  $Q = UI \text{sen} \varphi$  — como o produto do valor eficaz da tensão pela corrente eléctrica reactiva. A unidade de potência reactiva é o *volt-ampere reactivo*, var.

*Exemplo\_1.1* — Um motor eléctrico monofásico tem uma montagem de medida como a representada na figura. No voltímetro lê-se o valor da tensão alternada de alimentação, e indica o valor eficaz dessa tensão: 220 V. O amperímetro indica o valor eficaz da corrente eléctrica absorvida pelo motor: 5 A. O wattímetro

indica o valor da potência activa absorvida pelo motor: 825 W.

A potência aparente do motor nesta situação de carga é:  $S = U \cdot I$ , ou  $S = 220 \times 5 = 1100 \text{ VA}$  (valor que nesta situação não tem um significado físico importante).

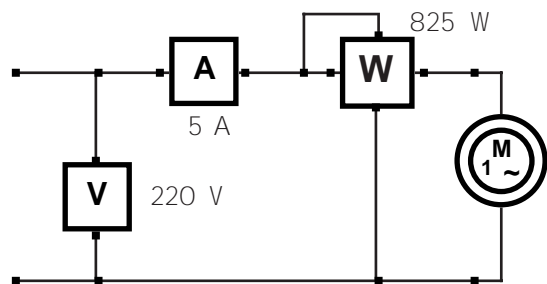
Com os valores conhecidos pode-se determinar o valor do factor de potência do motor.

$$\lambda = P/S = (U \cdot I \cdot \cos \varphi)/(U \cdot I),$$

$$\text{ou } \lambda = \cos \varphi = 825/(220 \times 5) = 0,75.$$

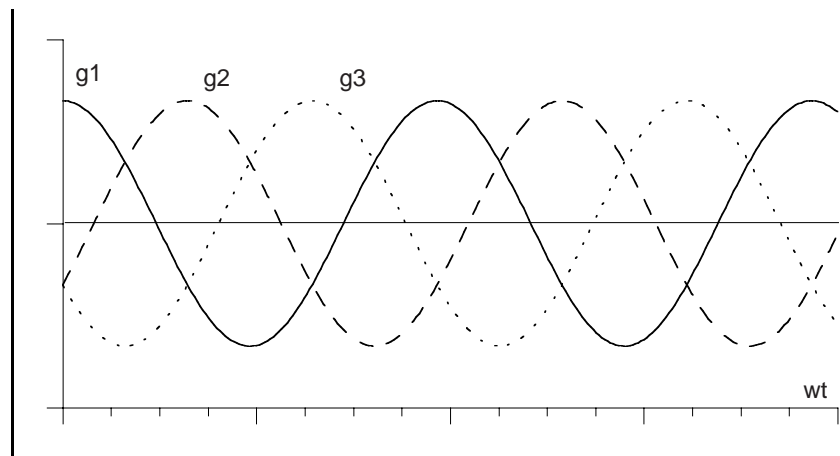
O valor da potência reactiva consumida pelo motor é:  $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$  ou  $Q = 220 \times 5 \times 0,661 = 727,58 \text{ var}$ .

Verifica-se que  $S^2 = P^2 + Q^2$ , ou  $S = \sqrt{825^2 + 727,58^2} = 1100 \text{ VA}$



## 1.2 Sistema Alternado Trifásico

Nas redes eléctricas de energia utiliza-se um sistema trifásico porque apresenta algumas vantagens sobre a utilização de um sistema monofásico, [MVG-1]. Para o mesmo volume e preço da máquina, um alternador trifásico tem uma potência superior a um alternador monofásico. A secção total



dos condutores utilizados no transporte de uma dada quantidade de energia é menor do que no caso de um sistema monofásico que, no mesmo tempo, tivesse de transmitir a mesma energia. No sistema trifásico dispõe-se de dois valores de tensão. O sistema trifásico permite utilizar o motor de indução trifásico, que é um motor robusto, de construção simples e muito fiável.

Os sistemas trifásicos são sistemas formados por três grandezas alternadas sinusoidais, de igual amplitude e esfasadas de  $2\pi/3$  radianos. ( $f = 50 \text{ Hz}$ ;  $T = 20 \text{ ms}$ ; intervalo entre os zeros de duas fases consecutivas  $\Delta t = 20/3 \approx 6,7 \text{ ms}$ ).

As três grandezas trifásicas,  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$ , podem suceder-se segundo duas sequências distintas, formando um sistema de grandezas *directo*, ou um sistema de grandezas *inverso*, (tomando como positivo o sentido trigonométrico, ou contrário ao movimento dos ponteiros de um relógio).

### Sistema directo

$$g_1 = \sqrt{2} G \cos(\omega t + \varphi)$$

$$g_2 = \sqrt{2} G \cos(\omega t + \varphi - 2\pi/3)$$

$$g_3 = \sqrt{2} G \cos(\omega t + \varphi - 4\pi/3)$$

### Sistema inverso

$$g_1 = \sqrt{2} G \cos(\omega t + \varphi)$$

$$g_2 = \sqrt{2} G \cos(\omega t + \varphi + 2\pi/3)$$

$$g_3 = \sqrt{2} G \cos(\omega t + \varphi + 4\pi/3)$$

No caso de um sistema trifásico de tensões existe um ponto, acessível ou não, em que a tensão é nula — trata-se do *ponto neutro*.

Num sistema trifásico de tensões pode-se ter disponível o valor da tensão entre fase e neutro, que na figura adiante está representada pelo fasor  $\underline{U}_1$ , ou pelo fasor  $\underline{U}_2$ , ou pelo fasor  $\underline{U}_3$ : trata-se da

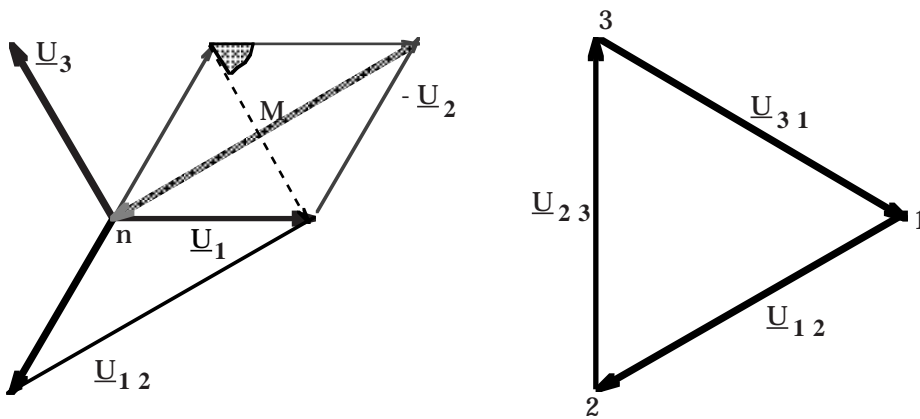


tensão simples.

Num sistema trifásico de tensões tem-se acessível a tensão entre duas fases, por exemplo  $\underline{U}_{12} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2$ , que é uma *tensão composta*.

Verifica-se, através da construção geométrica, que  $U_C = \sqrt{3} U_S$ ,  
 e que  $\underline{U}_{12} + \underline{U}_{23} + \underline{U}_{31} = 0$ .

Note-se que na figura, como  $|\underline{U}_1| = |-\underline{U}_2|$  a parte do desenho a ponteados é um losango, em que  $|\underline{U}_{12}|$  é uma diagonal e M o seu ponto médio. Assim, como  $|\underline{U}_{12}| = 2 \cdot nM = 2 \cdot (|\underline{U}_1| \cdot \text{sen } 60^\circ) = \sqrt{3} \cdot |\underline{U}_1|$ , ou  $U_C = \sqrt{3} \cdot U_S$ .



Tensões simples e tensões compostas



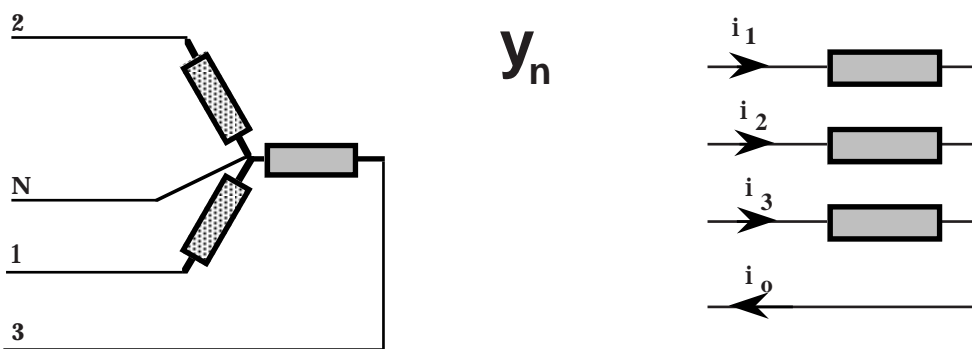
Na rede eléctrica nacional de distribuição, em baixa tensão, o valor eficaz da *tensão simples* é 220 V, e o valor eficaz da *tensão composta* é 380 V.

Os circuitos receptores trifásicos são formados por três elementos que podem ser ligados de três formas diferentes

\* Estrela com o neutro acessível

Os elementos estão derivados entre fase e neutro. Portanto, é-lhes aplicada a tensão simples. A lei dos nós aplicada à estrela permite escrever  $i_0 = i_1 + i_2 + i_3$ .

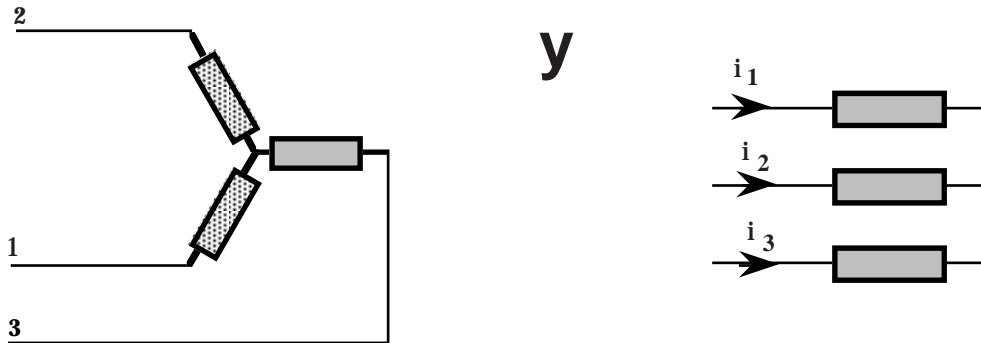
A cada elemento da carga está aplicada a tensão simples, assim  $I_1 = U_1/Z_1$ ,  $I_2 = U_2/Z_2$ ,  $I_3 = U_3/Z_3$ .



Ligação de receptores em estrela com o neutro acessível

Se os três elementos da carga forem iguais, as correntes eléctricas são grandezas iguais, esfasadas de  $2\pi/3$  radianos e a sua soma fasorial é nula; não circula corrente eléctrica no condutor neutro.

\* Estrela sem o neutro acessível

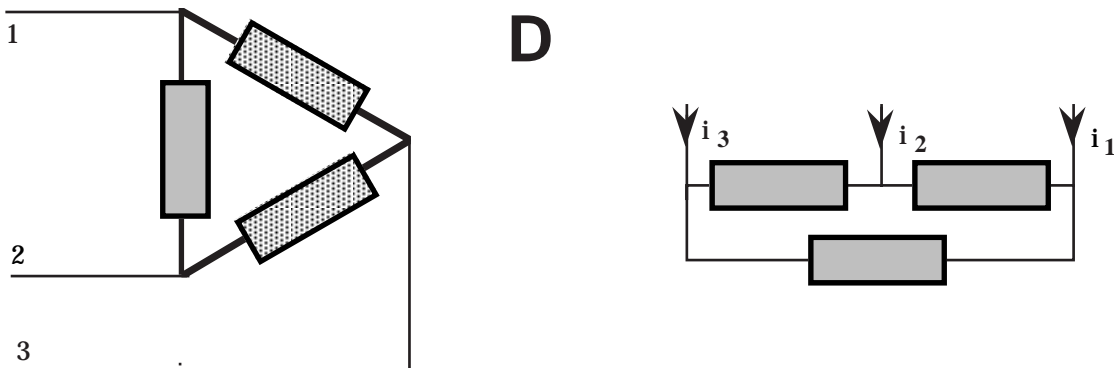


Ligação de receptores em estrela sem neutro acessível

No caso da ligação dos receptores em estrela sem neutro acessível, aplicando a lei dos nós, verifica-se a relação entre as diferentes correntes eléctricas  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ .

▲ Triângulo

Nesta situação a cada elemento da carga está aplicada a tensão composta  $U_c = \sqrt{3} \cdot U_s$ , e a corrente eléctrica em cada linha é a diferença das correntes eléctricas em cada ramo que converge nessa linha,  $I_1 = I_{12} - I_{31}$ ,  $I_2 = I_{32} - I_{12}$ ,  $I_3 = I_{31} - I_{23}$ .



Ligação dos elementos do receptor em triângulo

No caso do triângulo ser equilibrado, isto é quando as impedâncias dos elementos são iguais, demonstra-se, por uma construção geométrica análoga à utilizada para a relação entre tensão composta e simples, que a corrente eléctrica na linha é igual a  $\sqrt{3}$  vezes a corrente eléctrica em cada ramo do triângulo (corrente na malha);

$$\text{▲} \quad I_{\text{linha}} = \sqrt{3} \cdot (I_A - I_B) = \sqrt{3} \cdot I_{\text{malha}}$$

Os receptores em corrente alternada trifásica podem ser ligados em estrela ou em triângulo. Existe um teorema, o teorema de Kenelly, ou da transfiguração, que permite passar de uma configuração para outra que lhe é equivalente, [MVG-1].

Num sistema trifásico a potência activa absorvida por um agrupamento de cargas em estrela ou em triângulo é a soma da potência activa absorvida por cada elemento:  $P = P_1 + P_2 + P_3$ . A potência reactiva absorvida pelo agrupamento é a soma da potência reactiva absorvida por cada

elemento:  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$ .

A potência aparente absorvida pelo conjunto é dada por  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ , porque é constante ( $2\pi/3$ ) o esfasamento entre as grandezas de duas fases consecutivas. O factor de potência do conjunto é dado pela razão entre o valor da potência activa e o valor da potência aparente do conjunto, *factor de potência*  $\lambda = P/S$ .

Conforme o tipo de montagem equilibrada utilizada podem obter-se diferentes relações.

#### \* Ligação em estrela equilibrada

*Potência activa* — os três receptores estão submetidos à tensão simples  $U$ , e são atravessados pelas correntes eléctricas na linha, que têm o mesmo valor eficaz,  $I$ .

$$P_1 = P_2 = P_3 = UI \cos \varphi \quad P = P_1 + P_2 + P_3 = 3 UI \cos \varphi$$

como  $U_s = U = U_c/\sqrt{3}$ , resulta que  $P = \sqrt{3} \cdot U_c I \cos \varphi$ .

*Potência reactiva* —

$$\text{Também é } Q_1 = Q_2 = Q_3 = UI \sin \varphi \quad \text{e} \quad Q = \sqrt{3} U_c I \sin \varphi$$

#### ▲ Ligação em triângulo equilibrado

*Potência activa* — os três receptores estão submetidos à tensão composta  $U_c$ , e são atravessados pelas correntes eléctricas na malha, que têm um mesmo valor eficaz,  $I_{ma}$ .

$$P_1 = P_2 = P_3 = U_c I_{ma} \cos \varphi \quad P = P_1 + P_2 + P_3 = 3 U_c I_{ma} \cos \varphi$$

como  $I_{malha} = I_{linha}/\sqrt{3} = I/\sqrt{3}$  resulta que  $P = \sqrt{3} \cdot U_c I \cos \varphi$ .

*Potência reactiva* —

$$\text{Também é } Q_1 = Q_2 = Q_3 = U_c \cdot I_{ma} \cdot \sin \varphi \quad \text{e} \quad Q = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Desde que os sistema seja trifásico e esteja equilibrado, as expressões para a potência em corrente alternada sinusoidal, considerando a tensão composta  $U_c$  (valor eficaz) e a corrente eléctrica na linha  $I$  (valor eficaz), são:

$$\| \quad P = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I \cos \varphi; \quad Q = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I \sin \varphi; \quad S = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I; \quad \text{e} \quad \lambda = P/S \equiv \cos \varphi$$

*Exemplo\_1.2* — Os valores nominais das grandezas de uma máquina eléctrica são sempre valores máximos. Um motor de indução trifásico tem os seguintes valores nominais de catálogo:

$$P_{mec} = 11 \text{ kW}, \quad U_c = 380 \text{ V}, \quad n = 1425 \text{ rot/min}, \quad \eta = 84,5 \%, \quad \lambda \equiv \cos \varphi = 0,83$$

Com estes valores é possível determinar:

$$\text{a potência eléctrica absorvida} \text{ — } P_{el} = P_{total} = P_{\text{útil}}/\eta = P_{mec}/\eta, \quad P_{el} = 11 \times 10^3 / 0,845 = 13,02 \text{ kW}$$

como a potência eléctrica absorvida é uma potência activa  $P = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_n \cdot \cos \varphi$ , pode-se determinar

$$\text{a intensidade da corrente eléctrica nominal} \text{ — } I_n = P_{el}/(\sqrt{3} \cdot U_c \cdot \cos \varphi), \quad I_n = 13,02 \times 10^3 / 546,3 = 23,8 \text{ A}$$

Para medir a potência activa utilizam-se wattímetros numa montagem de medida que depende

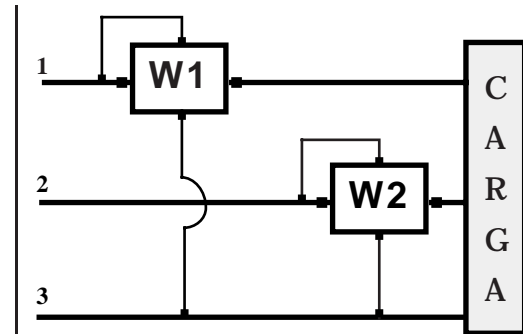
das características do sistema, [MVG-6].

Se o sistema está equilibrado e tiver o neutro acessível basta medir a potência consumida por uma fase e multiplicá-la por três. É por isso necessário só um wattímetro numa montagem de medida análoga à utilizada com uma carga monofásica.

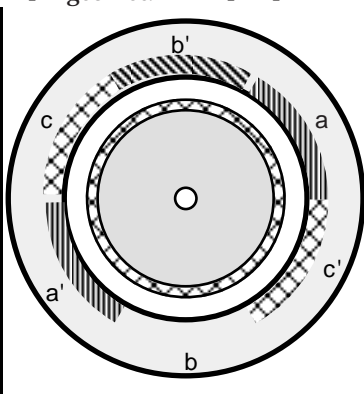
Se o sistema trifásico está desequilibrado, é necessário medir a potência consumida por cada circuito e adicionar as três potências. A montagem de medida será constituída por três wattímetros, um por cada fase.

Quer o circuito esteja equilibrado, ou não, *mas desde que não possua o condutor neutro*, a potência total pode ser medida com o auxílio de dois wattímetros, segundo uma montagem de medida como a da figura no lado direito, necessitando do devido cuidado na interpretação do sentido do desvio dos ponteiros dos aparelhos, [MVG-6].

Numa máquina eléctrica, através da Técnica dos Enrolamentos para máquinas de corrente alternada, é possível distribuir um conjunto de condutores pelas ranhuras de um estator, ou de um rotor, de tal forma que a distribuição do enrolamento no espaço, caracterizado pelo ângulo eléctrico  $\alpha$ , seja, praticamente, igual à de um bobina com  $N$  espiras efectivas com uma distribuição sinusoidal:  $N(\alpha) = N \cdot \cos \alpha$ . (Note-se que  $\alpha_{\text{elect.}} = p \cdot \theta_{\text{geomet.}}$ , em que  $p$  é o número de pares de pólos da máquina).



Montagem com dois wattímetros



Uma das formas mais simples para obter um campo de força magnetomotriz girante num só sentido é com a utilização de um sistema trifásico simétrico de correntes eléctricas. Esta técnica é aplicada no motor de indução trifásico.

Para criar o campo de forças magnetomotrices girantes a partir de um sistema trifásico de correntes eléctricas, utilizam-se três bobinas distribuídas, com um mesmo número de espiras efectivas  $N$ , mas esfasadas no espaço do entreferro de  $2\pi/3$  radianos eléctricos, a b c.

Cada bobina, percorrida pela corrente eléctrica, dará origem a uma força magnetomotriz alternada, e as três ondas de força magnetomotriz adicionar-se-ão no entreferro da máquina, formando um campo girante (Teorema de Ferraris).

$$\left. \begin{aligned} N \cdot i_a &= \sqrt{2} \cdot N \cdot I \cdot \cos \omega t \cdot \cos \alpha \\ N \cdot i_b &= \sqrt{2} \cdot N \cdot I \cdot \cos (\omega t - 2\pi/3) \cdot \cos (\alpha - 2\pi/3) \\ N \cdot i_c &= \sqrt{2} \cdot N \cdot I \cdot \cos (\omega t - 4\pi/3) \cdot \cos (\alpha - 4\pi/3) \end{aligned} \right\} F(\alpha, t) = N i = N i_a + N i_b + N i_c = \left( \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} N \cdot I \right) \cdot \cos(\omega t - \alpha)$$

O *campo girante* obtido é uma onda de força magnetomotriz caracterizada por ser função do espaço e do tempo; num dado ponto do espaço,  $\alpha$  fixo, a variação do campo com o tempo é sinusoidal; num dado instante,  $t$  fixo, o campo varia sinusoidalmente ao longo da periferia do entreferro.

Note-se que o campo de força magnetomotriz girante desloca-se no espaço do entreferro com uma velocidade angular  $\omega_s$  com um valor que coincide com o valor da pulsação da corrente alternada

sinusoidal que o cria, porque  $\omega_S \equiv \omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ .

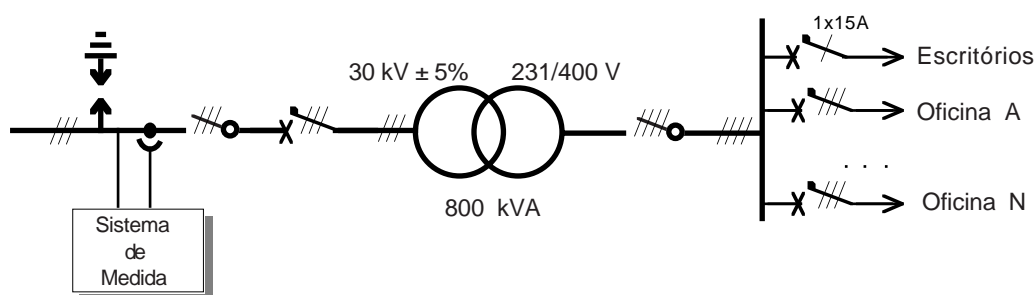
### 1.3 A Instalação de Utilização de Energia Eléctrica

Como unidade conversora de energia eléctrica em energia mecânica o motor de indução trifásico necessita de ser alimentado em energia eléctrica a partir de um sistema trifásico de tensões. Poderia ser criada uma fonte de alimentação própria para a instalação em que se encontra inserido o motor — *autoprodução* — mas, como a rede nacional de energia eléctrica distribui a energia em corrente alternada trifásica, normalmente, apenas se torna necessário estabelecer uma ligação entre o motor de indução trifásico e a rede eléctrica de utilização de energia. No entanto, das condições de funcionamento do motor eléctrico podem resultar problemas para a rede eléctrica, por isso há que assegurar que aquela ligação será feita através de um conjunto de *protecções*, enquanto que as características da energia fornecida pelo distribuidor de energia através da rede eléctrica — a *qualidade de serviço* — afectarão o funcionamento do motor de indução trifásico.

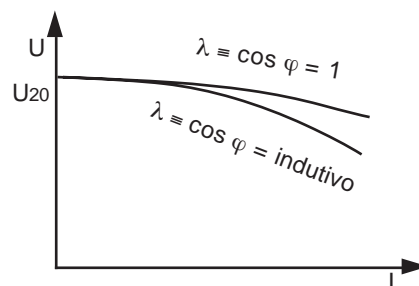
#### Aspectos Gerais da Instalação

Existem muitos tipos de empresas industriais, quanto aos seus fins, mas também quanto ao valor da energia eléctrica que consomem. Uma empresa industrial grande consumidora de energia tem de ser ligada a uma rede eléctrica com uma tensão mais elevada do que uma empresa com um pequeno consumo de energia. Por isso, a rede primária industrial estabelecendo a ligação entre a rede eléctrica geral e o consumidor inclui uma unidade transformadora das características (tensão e corrente) da energia eléctrica — *um transformador*. Conforme o escalão de tensão da rede de transporte de energia geral a que irá ser ligado a unidade transformadora, assim existirá à entrada da rede industrial uma *subestação* ou um *posto de transformação* (PT); a situação mais frequente é a existência de um posto de transformação.

No posto de transformação além do transformador (trifásico) existe aparelhagem de protecção que permite desligar (com segurança) a rede industrial da rede eléctrica geral, assim como existe aparelhagem de medida que permite conhecer o valor das diferentes grandezas (tensão, intensidade de corrente,) ou situações (presença de fase) e medir o valor das diferentes formas de energia (activa e reactiva) consumida, [RSSPTS].



O transformador, existente no posto de transformação, tem uma tensão nos terminais de saída que depende do valor da corrente eléctrica que o transformador fornece e do factor de potência com que ela é fornecida, [CCC-1]. Também um desequilíbrio de cargas pode ser responsável pela diminuição da tensão nos terminais de uma das fases do transformador. É por isso que existe a possibilidade de alterar a razão de transformação, através da alteração do número de espiras do enrolamento primário ( $\pm 5\%$ ), manobra efectuada com o transformador fora de serviço.



No posto de transformação existe um quadro geral de onde saem os circuitos de distribuição da energia eléctrica pelos diferentes sectores da instalação de utilização de energia. Esta instalação deverá ser projectada na estrita obediência às disposições dos Regulamentos de Segurança aplicáveis, [RSIUEE].

Os circuitos de distribuição de energia eléctrica são constituídos por cabos; quando a corrente eléctrica circula nesses condutores existem perdas de energia (perdas por efeito Joule) que se traduzem por uma degradação da energia em calor, e há uma queda de tensão provocada pela impedância complexa do condutor. É necessário atender a estes dois fenómenos no correcto dimensionamento dos condutores e na definição do projecto da instalação de utilização de energia eléctrica.

O motor de indução trifásico actuando como carga na instalação de utilização de energia sofre a influência das características da energia eléctrica de alimentação e simultaneamente contribui para o comportamento e para a alteração das características daquela instalação.

Para que um motor de indução trifásico tenha um funcionamento suave e eficiente necessita que a energia eléctrica que lhe é fornecida pela instalação eléctrica tenha como características uma frequência constante e um valor da tensão de alimentação muito pouco variável com o valor da carga que a instalação tem de alimentar. Essa instalação deverá suportar, só com uma ligeira interrupção do fornecimento de energia eléctrica, condições de funcionamento transitório como os curto-circuitos, as sobretensões, e razoáveis valores da intensidade da corrente eléctrica de arranque dos motores eléctricos (sobrentensões de arranque).

A tensão de alimentação de um motor de indução trifásico tem de coincidir com o valor nominal para que as suas características de funcionamento, e a sua esperança de vida, não sejam diferentes das que o fabricante assegura. No entanto, como a tensão de alimentação não pode permanecer constante é admitido, pela legislação vigente, que a tensão possa variar numa gama limitada de valores. Dentro desses valores de tolerância o motor funcionará razoavelmente, mas não com as suas melhores características de funcionamento.

RSIUEE; § 425 — *queda de tensão admissível* — a queda de tensão admissível desde a origem da instalação de utilização até ao aparelho de utilização electricamente mais afastado, supostos ligados todos os aparelhos de utilização que possam funcionar simultaneamente, não deverá ser superior a 3% ou a 5% da tensão nominal da instalação, respectivamente para circuitos de iluminação e para circuitos de outros usos.

Assim, numa instalação de alimentação de um motor de indução trifásico a tensão de alimentação, nos terminais do motor, não poderá ter uma queda superior a 5%, quando todas as cargas da instalação estão ligadas, ou quando o *factor de simultaneidade* da instalação é unitário.

Esta disposição regulamentar obriga a que, na fase de projecto, a instalação de utilização de

energia eléctrica seja dimensionada e construída de forma assegurar um valor muito pouco diferente do valor da tensão nominal. Mas o futuro desenvolvimento da instalação, ou as condições de fornecimento da energia pela rede eléctrica geral, podem levar á existência de situações em que são consideráveis as variações do valor da tensão da rede eléctrica face ao valor da tensão nominal do motor eléctrico. Tais situações provocarão um funcionamento deficiente, ou podem mesmo causar a avaria do motor. Em tais circunstâncias, é normal proceder-se à *desclassificação* (ou *desgradação*) do motor; isto é: à diminuição do valor da sua potência nominal.

Ⓒ No catálogo do fabricante está expresso o valor da tensão nominal. Também está expressa uma recomendação para se considerar que se as variações da tensão forem iguais ou inferiores a 5% (como admite o RSIUEE) o motor fornece a sua potência nominal, mas se a variação da tensão for superior àquele valor, então o valor da potência nominal deverá ser reduzido de acordo com os valores de uma tabela fornecida, (*desclassificação* do motor).

Numa instalação de utilização de energia eléctrica ligada à rede geral é excelente a estabilidade do valor da frequência das grandezas eléctricas alternadas — 50 Hz. Mas, quando a alimentação da instalação é feita por um sistema produtor independente, podem ocorrer variações no valor da frequência da rede. Tais variações terão de ser consideradas na previsão das características de funcionamento do sistema motor de indução trifásico—carga mecânica. As Normas internacionais de construção de motores permitem uma variação de 5% no valor da frequência nominal. Também nesta situação o motor funcionará razoavelmente, mas não com as suas melhores características.

Ⓒ No catálogo do fabricante de motores de indução trifásicos está expresso o valor da frequência nominal para o motor. Mas, como actualmente o mercado de máquinas eléctricas é global, frequentemente, também aparece referência a valores de frequência (p. exp: 60 Hz) utilizados em redes eléctricas estrangeiras. O valor da frequência nominal tem muita importância porque, conjuntamente com o número de pares de pólos magnéticos, condiciona o valor da *velocidade de sincronismo* do motor.

Quando o sistema trifásico de tensões de alimentação é desequilibrado, torna-se necessário promover uma *desclassificação* (*desgradação*) do motor de indução trifásico, porque o aquecimento do motor provocado por aquela situação pode ser demasiado, pondo em risco a segurança do motor, [MVG-4].

Recentemente, com a divulgação dos sistemas de controlo de máquinas eléctricas com conversores electrónicos de potência, devido à constante comutação de estado dos elementos electrónicos as formas de ondas das grandezas eléctricas características da rede são *distorcidas*, e os termos *harmónicos* componentes dessas formas de onda são responsáveis pelo aumento das perdas de energia no sistema de accionamento electromecânico, principalmente no motor eléctrico, e pelo aparecimento de binários parasitas, susceptíveis de causarem problemas de ruído e de vibrações no motor eléctrico e na carga mecânica.

Verifica-se, assim, que uma correcta utilização de um motor de indução trifásico obriga a um projecto cuidadoso da instalação de utilização de energia eléctrica e a uma elevada qualidade de serviço da entidade que fornece essa energia (tensão constante, frequência constante, ondas sinusoidais, sistema trifásico equilibrado, e permanência de fornecimento de energia).

Existem também situações, que é necessário acautelar, em que o motor de indução trifásico tem

influência sobre o comportamento do instalação de utilização de energia. Uma das situações mais importantes é a situação de *arranque*, em que o motor oferece uma pequena oposição à passagem da corrente eléctrica, que, por isso, toma valores de intensidade muito elevados. Tal situação, que provoca uma queda de tensão elevada nos condutores da instalação, é responsável pela variação do valor da tensão nominal da instalação de distribuição, o que tem uma influência nefasta (flicker) no funcionamento da aparelhagem de iluminação, principalmente se ela estiver directamente ligada ao circuito alimentador do motor eléctrico.

O Regulamento de Segurança [RSIUEE] contempla esta situação.

RSIUEE; § 431.2 — A intensidade absorvida por um motor durante o seu arranque ou por um conjunto de motores que possam arrancar simultaneamente deverá ser limitada a um valor que não seja prejudicial à canalização que os alimenta nem cause perturbações inaceitáveis ao funcionamento de outros aparelhos ligados à mesma fonte de energia.

Como no arranque a intensidade da corrente eléctrica é sempre elevada  $I_a$ , para que a queda de tensão não ultrapasse os valores admissíveis [RSIUEE; § 425], torna-se necessário que a resistência eléctrica do condutor não seja elevada. Como a resistência eléctrica do condutor é inversamente proporcional à sua secção recta ( $R = \rho \cdot l/S$ ), está normalizado [RSRDEEBT] um valor da secção nominal mínima para os condutores.

RSIUEE; § 426.a — Nas canalizações não poderão ser empregados condutores com secções nominais inferiores às seguintes; ... a) Em circuitos de tomadas, força motriz ou climatização: 2,5 mm<sup>2</sup>.

**Para dimensionar a secção dos condutores da instalação de alimentação do motor deverá considerar-se uma intensidade de corrente eléctrica dada por:  $I_S = I_N + (I_a/3)$ .**

Exemplo\_1.3 — Para accionar uma pequena carga mecânica utiliza-se um motor de indução trifásico com uma potência nominal de 1,1 kW, e as seguintes características de catálogo [EFA-c].

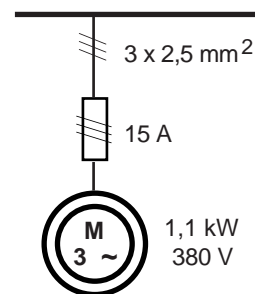
BF5 80 M42	$n_n = 2825 \text{ rot/min}$	$U_n = 380 \text{ V}$	$P_n = 1,1 \text{ kW}$
$\eta_n = 77\%$	$\lambda_n = \cos \varphi_n = 0,82$	$I_a/I_n = 5,3$ (arranque directo)	

A partir destes valores pode-se determinar a corrente nominal (ver exemplo\_1.2), apesar do seu valor fazer parte dos dados de catálogo ( $I_n = 2,6 \text{ A}$ ).

$$I_n = (P_{\text{mec}}/\eta)/(\sqrt{3} \cdot U_c \cdot \cos \varphi), \quad I_n = (1,1 \times 10^3 / 0,77) / (\sqrt{3} \times 380 \times 0,82) = 2,6 \text{ A}$$

a intensidade da corrente de arranque será de  $I_a = 5,3 \times 2,6 = 14 \text{ A}$

Consultando uma tabela verifica-se que o valor regulamentado da secção dos condutores de cobre em cabo de três condutores, capazes de admitirem um intensidade de corrente de  $(I_n + I_a/3)$  em regime permanente,  $(2,6 + 14/3) = 7,3 \text{ A}$ , é de  $1,5 \text{ mm}^2$ . No entanto teria de ser aplicado um cabo com condutores com a secção de  $2,5 \text{ mm}^2$ , que em regime permanente admitem uma intensidade de corrente máxima de 28 A. Neste caso está-se a sobredimensionar a instalação, (elevado coeficiente de segurança).



A maioria das instalações de utilização de energia eléctrica que alimentam motores de indução trifásicos estão alimentadas a partir de uma rede geral de alimentação, sendo raros os casos de alimentação por energia auto-produzida na empresa industrial. Por isso, há que ter em atenção o Regulamento de Segurança [RSIUEE], que impõe um valor limite para a potência de arranque, a partir do qual é necessário criar uma instalação de alimentação para o motor, ou utilizar sistemas especiais de arranque.



RSIUEE; § 431.3 — Em instalações de utilização alimentadas a partir de uma rede de distribuição pública não poderão ser ligados, salvo acordo prévio do distribuidor, motores cuja potência pedida no arranque seja superior a 10 kVA ou 30 kVA, respectivamente para motores monofásicos ou trifásicos.

Exemplo\_1.4 — O artigo 431º .b do RSIUEE é acompanhado de um comentário que estabelece uma relação entre os valores limites da potência de arranque e o valor da potência nominal admissível para um motor alimentado por uma rede de distribuição pública.

Considerando que o arranque é directo esclarece o comentário que a potência nominal do motor de indução trifásico com o rotor em curto-circuito, não deverá exceder 4 kW.

Atendendo a que a potência nominal de um motor é a potência mecânica  $P_{umax}$  no veio, a  $P_{umax} = \eta_n \cdot P_{el}$  em que a potência eléctrica será dada por  $P_{el} = \sqrt{3} \cdot U_C \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$ , ou  $P_{el} = \sqrt{3} \cdot U_C \cdot (I_a / (I_n)) \cdot \cos \varphi_n$ , ou

$$P_{el} = S_a \cdot (I / (I_n)) \cdot \cos \varphi, \text{ com } S_a = \sqrt{3} \cdot U_C \cdot I_a$$

Assim, a potência mecânica máxima que verifica a condição é:  $P_{umax} = \eta_n \cdot S_a \cdot (I / (I_n)) \cdot \cos \varphi_n$

Com os dados de um motor (BF5 112 M44) de 4 kW obtinha-se para um arranque directo  $P_{umax} = 0,82 \times 30 \times 10^3 \times (1/5,5) \times 0,78 = 3,48$  kW, que é inferior à potência nominal do motor e não verifica a determinação. Era necessário utilizar um arrancador estrela-triângulo ( $(I_a / I_n) = 1,7$ ), porque nessa situação, o valor limite  $P_{umax} = 0,82 \times 30 \times 10^3 \times (1/1,7) \times 0,78 = 11,29$  kW será muito superior ao valor da potência nominal do motor.


**Com os valores impostos pelas normas de construção dos motores de indução trifásicos, a determinação — RSIUEE; § 431.3 — é verificada pelos motores de indução trifásicos com o rotor em curto-circuito com um valor da potência nominal (mecânica) que é inferior a**

**no arranque directo:  $P_u = 4$  kW**

**no arranque estrela-triângulo:  $P_u = 11$  kW.**

Para que um motor de indução trifásico possa funcionar necessita de ser alimentado pela rede em energia reactiva, que serve, exclusivamente, para estabelecer e manter o campo magnético girante que o motor necessita para funcionar numa dada situação de carga.

A situação de carga de um motor de indução trifásico é dada pela respectiva *fracção de carga*, que é a razão entre a potência útil e a potência nominal ( $P_u / P_n$ ). Note-se que como o factor de potência do motor depende da situação de carga a fracção de carga, para esta máquina eléctrica, nunca poderá ser dada por uma relação entre valores da intensidade de corrente eléctrica.

 Nalguns catálogos o valor do rendimento do motor e do factor de potência vêm dados para alguns poucos valores da fracção de carga (5/4 ; 4/4 ; 3/4 ; 2/4). Caso sejam conhecidos os parâmetros de ensaio do motor pode traçar-se uma curva de variação daquelas grandezas com o valor da fracção de carga do motor.

[EFA-c ; BF6 355 M26] ( $\eta = 95,9\% \Leftrightarrow 4/4$ ) ( $\eta = 96\% \Leftrightarrow 3/4$ ) ( $\eta = 95\% \Leftrightarrow 2/4$ )

Quando as grandezas eléctricas de alimentação do motor são sinusoidais, e se considera o motor equilibrado (com as três fases iguais), o valor da energia reactiva absorvida pelo motor de indução trifásico num determinado momento (em que absorve uma corrente eléctrica de  $I \{A\}$  com um factor de potência  $\lambda = \cos \varphi$ ) é dado por:  $Q = \sqrt{3} \cdot U_C \cdot I \cdot \text{sen } \varphi \{var\}$ . O valor da energia reactiva depende do seno do ângulo de esfasamento ( $\text{sen } \varphi$ ) entre a corrente eléctrica e a tensão eléctrica, e, portanto, do valor desse ângulo ( $\varphi$ ); no caso do motor de indução trifásico esse ângulo tem um valor que

depende da situação de carga. Assim, quando as grandezas eléctricas são sinusoidais, a importância do valor da energia reactiva depende do valor do factor de potência  $\lambda$ , que coincide com o coseno do ângulo de esfasamento ( $\lambda = \cos \varphi$ ) entre a corrente eléctrica e a tensão eléctrica.



Nalguns catálogos são fornecidos valores do factor de potência para diversas situações de carga (5/4 ; 4/4 ; 3/4 ; 2/4).

[EFA-c ; BF6 355 M26] ( $\cos \varphi = 0,87 \Leftrightarrow 4/4$ ) ( $\cos \varphi = 0,86 \Leftrightarrow 3/4$ ) ( $\cos \varphi = 0,80 \Leftrightarrow 2/4$ )

A partir de um determinado valor da energia reactiva, definido pelo valor do factor de potência da instalação de utilização de energia eléctrica, a entidade que fornece a energia eléctrica à instalação de utilização exige o pagamento de parte dessa energia [EDP-t.94], que tem uma tarifa própria, o que exige a instalação de um sistema de contagem específico.

Preços da Energia Reactiva (\$/kvarh) 1994		
Tensão	Indutiva	Capacitiva
Baixa	3\$33	2\$51
Média	3\$00	2\$26

A tarifa que incide sobre a energia reactiva não pretende compensar qualquer serviço efectuado pela entidade fornecedora da energia eléctrica, mas pretende estabelecer uma *penalização* sobre o consumidor com baixo factor de potência, pelos inconvenientes que esta situação causa à rede eléctrica.

É a existência de transformadores, ou de motores eléctricos de indução *muito pouco carregados* a principal causa de um baixo factor de potência numa instalação eléctrica de utilização.

Exemplo\_1.5 — Para accionar, em regime contínuo (SI), uma carga mecânica de 4 kW ( $T = 41,07 \text{ Nm}$  ;  $n = 930 \text{ rot/min}$ ) aplicou-se um motor de indução trifásico de 7,5 kW, que estava disponível.

Atendendo ao catálogo o factor de potência e o rendimento do motor de indução trifásico (BF5 160 M66) variam com a carga da seguinte forma:

[EFA-c ; BF5 160 M66] ( $\eta = 86\% \Leftrightarrow 4/4$ ) ( $\eta = 87\% \Leftrightarrow 3/4$ ) ( $\eta = 85,5\% \Leftrightarrow 2/4$ )

[EFA-c ; BF5 160 M66] ( $\cos \varphi = 0,77 \Leftrightarrow 4/4$ ) ( $\cos \varphi = 0,72 \Leftrightarrow 3/4$ ) ( $\cos \varphi = 0,58 \Leftrightarrow 2/4$ )

Como o motor vai funcionar permanentemente (SI), sensivelmente (...) a *meia carga* ( $P_u/P_n$  ;  $4/7,5 \approx 0,5$ ), o motor funcionará permanentemente com um rendimento de 85,5% e com um factor de potência de  $\lambda = \cos \varphi = 0,58$ .

Assim a corrente absorvida pelo motor será  $I = P_u / (\eta \cdot \sqrt{3} \cdot U_c \cdot \cos \varphi)$ , ou  $I = 4 \times 10^3 / (0,855 \times \sqrt{3} \times 380 \times 0,58)$   
 $= 12,3 \text{ A}$

A potência reactiva associada ao motor nessa situação é de

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I \cdot \sin \varphi, \text{ ou } Q = \sqrt{3} \times 380 \times 12,3 \times 0,815 = 6,6 \text{ kvar}$$

Atendendo a que num mês (22 dias) o motor trabalha 8 horas por dia, ou seja  $22 \times 8 = 176 \text{ h}$ , a energia reactiva associada ao funcionamento mensal do motor é de  $W_Q = Q \cdot t$ , ou  $W_Q = 176 \times 6,6 = 1,16 \text{ Mvarh}$ .

Se fosse aplicado no accionamento da carga um motor com uma potência nominal de 4 kW (igual à potência da carga) o motor funcionaria permanentemente à *plena carga* ( $P_u/P_n = 1$ ).

Atendendo ao catálogo

[EFA-c ; BDF 132 M86] ( $I_n = 9,7 \text{ A}$ ) ( $\cos \varphi = 0,75 \Leftrightarrow 4/4$ ) ( $\eta = 80\% \Leftrightarrow 4/4$ )

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I \cdot \sin \varphi, \text{ ou } Q = \sqrt{3} \times 380 \times 9,7 \times 0,661 = 4,2 \text{ kvar}$$

A energia reactiva associada ao funcionamento mensal do motor é de  $W_Q = 176 \times 4,2 = 0,742 \text{ Mvarh}$ .

Com um motor devidamente seleccionado e aplicado o valor da energia reactiva é de 64% do valor associado à utilização de outro qualquer motor que estava disponível.

Nos estudos e nos exemplos apresentados considerou-se sempre que as grandezas eléctricas de alimentação do motor eram sinusoidais. Habitualmente era essa a situação das redes eléctricas de utilização de energia. Mas, actualmente, devido a certo tipo de cargas industriais (fornos eléctricos de indução) e à utilização de sistemas electrónicos de potência com elementos semicondutores em comutação, as formas de onda das grandezas eléctricas são *distorcidas*. A decomposição dessas formas de onda em série de termos harmónicos (série de Fourier) mostra que as grandezas eléctricas possuem termos harmónicos com frequências múltiplas da frequência fundamental da rede eléctrica, [MVG-2].

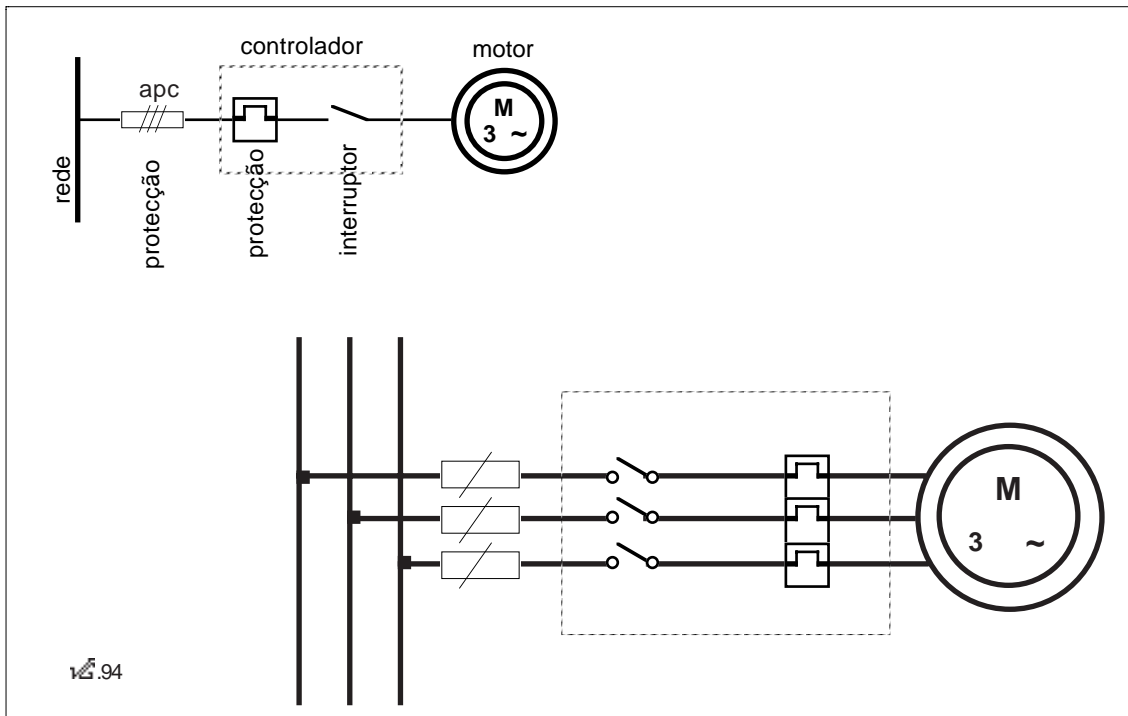
A presença dos harmónicos nas grandezas eléctricas de alimentação dos motores de indução trifásicos altera o estudo e o tratamento dos problemas apresentados. Na actualidade, os problemas da presença de harmónicos nas redes eléctricas, provocados por sistemas de controlo da potência do motor de indução trifásico do accionamento, são considerados relevantes e estão a ser causa de estudos, de investigações e da adopção de normas restritivas dessa presença.

#### 1.4 Síntese

Na aplicação de um motor de indução trifásico é necessário considerar a instalação eléctrica de alimentação do motor; o projecto da instalação é influenciado pela presença do motor, e o comportamento da instalação em serviço condiciona o funcionamento do motor eléctrico.

Enquanto que, num passado recente, era possível considerar a rede eléctrica de alimentação com grandezas eléctricas alternadas sinusoidais simétricas e com cargas lineares e equilibradas, a actual situação dessas redes, com grandezas eléctricas não sinusoidais e com cargas não lineares e desequilibradas, obriga a um maior cuidado no estudo e na resolução dos problemas de selecção e aplicação de um motor de indução trifásico.

Por isso, deve-se considerar que os estudos e os valores obtidos para situações ideais, devem ser sempre submetidos a uma análise crítica que entre em consideração com a situação real da instalação de utilização de energia eléctrica.

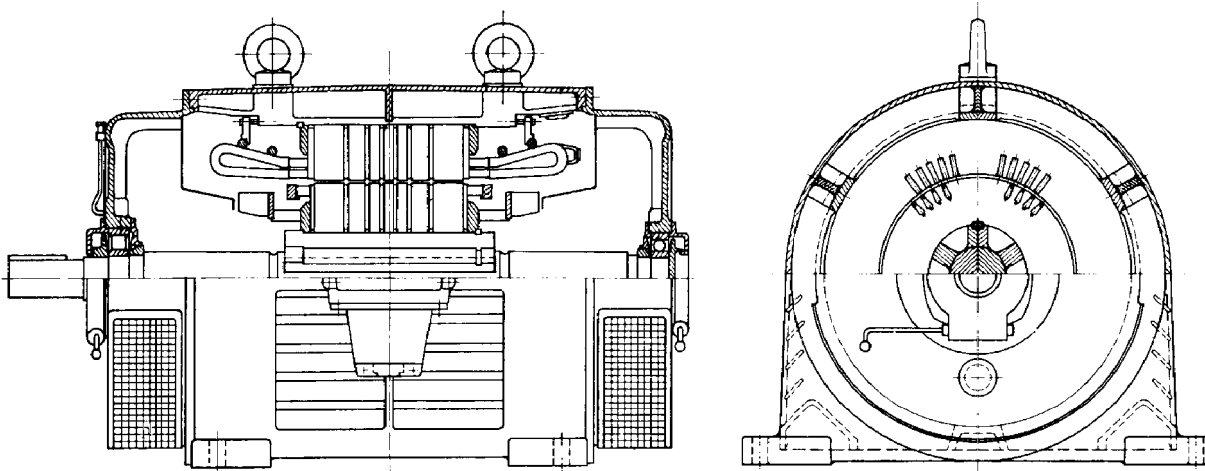


## 2. O Motor de Indução Trifásico

O motor de indução trifásico é a máquina eléctrica de corrente alternada mais utilizada no accionamento de cargas mecânicas. Devido às suas qualidades — robustez e simplicidade de manutenção — tem vindo a substituir os motores eléctricos de colectores de lâminas nas suas aplicações típicas, e devido a um aumento do conhecimento do seu princípio de funcionamento foi possível desenvolver novas estratégias de controlo que permitem uma boa adaptação da suas características de funcionamento às necessidades da carga mecânica accionada.

### 2.1 Aspectos Construtivos

O motor de indução trifásico é uma máquina eléctrica rotativa de corrente alternada, assíncrona, cuja construção respeita o estabelecido nas normas, [CEI-34-1] e [MG-1], e é condicionada pelos meios de produção do fabricante. Esta máquina eléctrica pode ser construída para valores de potência nominal que se estendem por uma gama muito ampla.

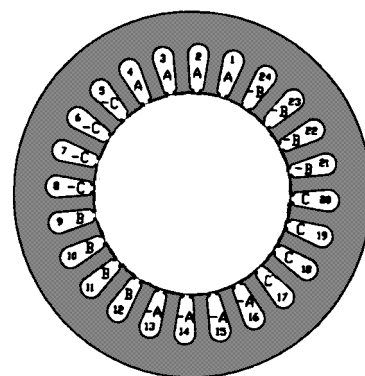


Aspectos Construtivos de um Motor de Indução Trifásico (AEG)

Um motor de indução trifásico tem as seguintes partes construtivas:

#### Estator

O estator do motor de indução trifásico é constituído por um empacotamento de chapa de ferro magnético silicioso, com baixa densidade de perdas magnéticas {p. exp:  $e = 0,5 \text{ mm}$  ;  $3 \text{ W/kg}$  a  $1 \text{ T}$ } que forma o circuito magnético estático. As chapas têm uma forma de coroa circular ranhurada {p. exp: 36 ou 48 ou 54 ranhuras} na periferia interior; as chapas estão revestidas de um verniz isolante. As ranhuras são semifechadas, e destinam-se a conter os condutores do circuito eléctrico estático. Entre conjuntos de chapas magnéticas podem existir canais de ventilação, que servirão para a passagem do ar de refrigeração.

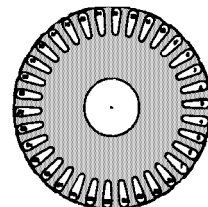


O circuito eléctrico estático é formado por um enrolamento com três bobinas afastadas no espaço de  $2\pi/3 \text{ rad. elect.}$ , e destinadas a serem alimentadas por cada uma das fases de um sistema

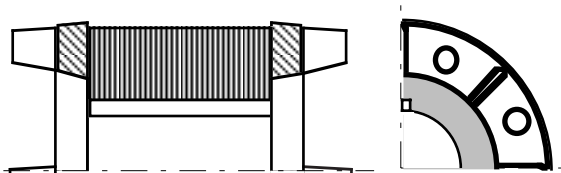
trifásico, [CCC-2]. Os condutores eléctricos que formam as diversas espiras das bobinas são isolados a esmalte, estão dispostos a duas camadas na ranhura, encontram-se isolados do material magnético por um material isolante plástico, que forra a parte inferior da ranhura, e estão travados na ranhura por regletes plásticas. Nas máquinas de maior potência os enrolamentos estatóricos são formados por bobinas rígidas, construídas por barra de cobre isolado por materiais sintéticos polimerizados.

### Rotor

O núcleo magnético rotórico é, também, folheado e construído com o mesmo tipo de chapa magnética utilizada no núcleo estatórico. As chapas magnéticas têm uma forma de coroa circular que possui ranhuras fechadas perto da periferia exterior. O número de ranhuras rotóricas {por exemplo: 34} está relacionado com o número de ranhuras estatóricas para evitar o aparecimento de ruído no funcionamento do motor.



O enrolamento rotórico pode ser do tipo “gaiola de esquilo” ou pode ser bobinado. O enrolamento rotórico em gaiola é constituído por uma gaiola de alumínio, dopado com uma pequena percentagem de impurezas, que é obtida por injeção. Trata-se de um circuito eléctrico polifásico em curto-circuito permanente, constituído com um material com muito menor resistividade  $\{\rho_{Al} = 3,2 \cdot 10^{-8} \Omega m\}$  do que o material ferromagnético em que está envolvido  $\{\rho_{Fe} = 100 \cdot 10^{-8} \Omega m\}$ ; por isso os condutores da gaiola não estão envolvidos por qualquer tipo de material isolante.



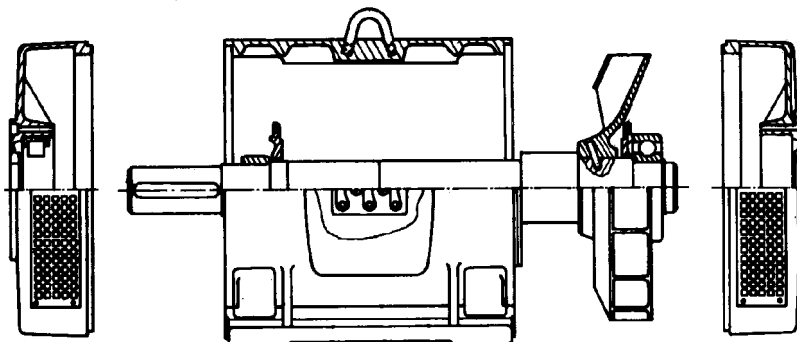
Desenho esquemático dos anéis de um circuito rotórico em gaiola

Quando o circuito rotórico é em cobre as barras de cobre  $\{\rho_{Cu} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega m\}$  são colocadas manualmente nas ranhuras, e os anéis de topo são ligados às barras por soldadura a alta frequência. As barras são travadas nas ranhuras para evitar vibrações durante o funcionamento do motor de indução trifásico.

O circuito eléctrico de um motor de indução trifásico com rotor bobinado contacta com a parte fixa da máquina através de um sistema colector de anéis-escovas. Desta forma é possível alterar o valor dos parâmetros (resistência rotórica) durante o funcionamento da máquina.

### Estrutura Mecânica

Para um bom funcionamento do motor de indução trifásico é necessário que as diferentes partes sejam montadas e permaneçam nas respectiva posição, que as partes móveis possam rodar à velocidade conveniente, e que todas as partes estejam protegidas das

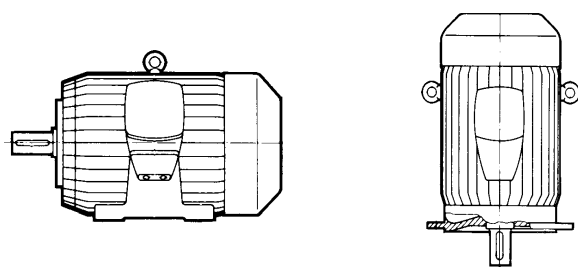
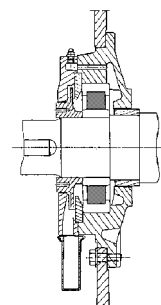


agressões ambientais, ou que não constituam perigo dentro da zona circundante da máquina. Para assegurar essas diversas necessidades de funcionamento de uma máquina eléctrica existe um conjunto de órgãos mecânicos.

O veio da máquina é fabricado em aço, por torneamento. Sobre este veio é, normalmente, montado a quente, e eventualmente enchavetado, o núcleo rotórico da máquina. No caso das máquinas de potência elevada sobre o veio estão posicionados vários braços (4 a 6) que suportam a restante parte do rotor.

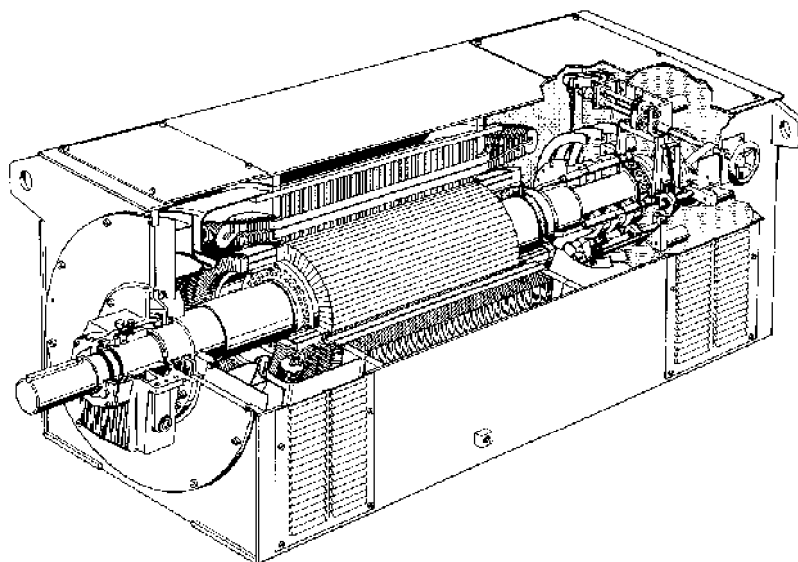
O veio apoia-se em mancais de rolamento (eventualmente de escorregamento) colocados nas tampas da carcaça. O motor de indução trifásico pode ser construído para funcionar com o eixo em posição horizontal, ou em posição vertical, ou inclinado.

O motor de indução trifásico pode estar montado com patas, ou sobre flange (de furos lisos ou de furos roscados).



*Motor de Indução Trifásico (EFACEC)*

A parte rotórica e a parte estatórica da máquina encontram-se protegidas do meio exterior por uma carcaça, que pode ser de alumínio (com uma razoável percentagem de impurezas) injectado a baixa ou a alta pressão, de ferro fundido ou em chapa de aço soldada.

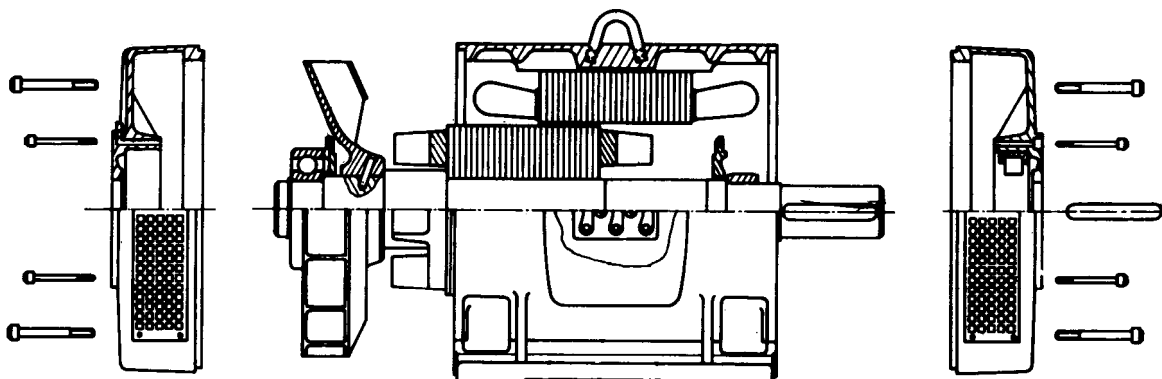


*Motor de indução trifásico com o rotor bobinado, carcaça em chapa de aço soldada (ABB)*

Apesar do motor de indução trifásico ser um motor robusto pode suceder, com uma pequena probabilidade, que haja necessidade de substituir uma peça. O fabricante pode fornecer um catálogo em que estão discriminadas as peças de reserva para motores.



Existe um catálogo especial com a designação das peças de reserva ou que o utilizador deverá possuir como sobressalentes (motor completo; bobinas estatóricas; chaveta; *rolamentos*) em caso de laboração contínua.

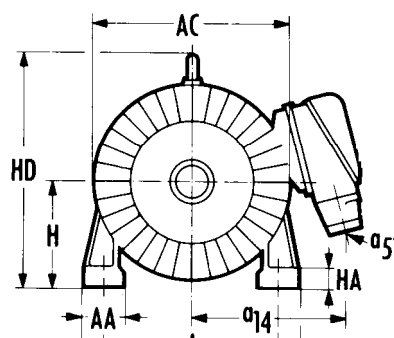


Muitas das dimensões dos diferentes órgãos do motor de indução trifásico estão normalizadas. O motor tem um conjunto de dimensões que o fabricante costuma apresentar no catálogo e que se destinam a permitir a integração do motor de indução trifásico no projecto total da máquina accionada. Actualmente, existe a tendência para que estes dados possam ser fornecidos directamente em ficheiros de programas de CAD.



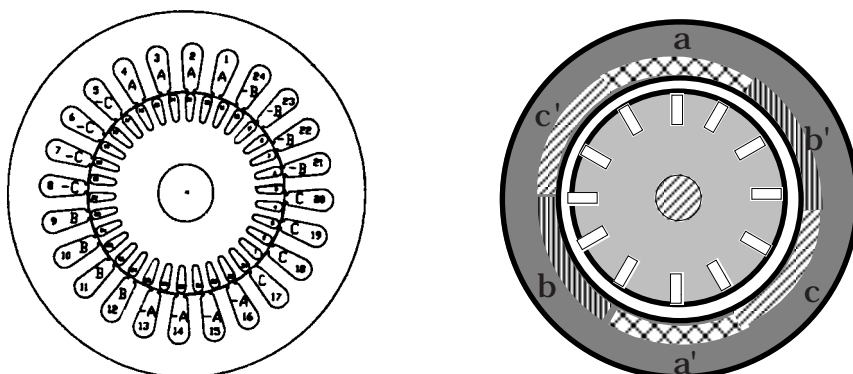
No catálogo aparecem descritas, sobre o nome de *atravancamentos*, todas as dimensões físicas dos diversos tipos construtivos de motor de indução trifásico (com patas; com flange; antideflagrante). Pela sua importância na classificação dos motores, e na sua designação, salienta-se a *altura de eixo H*.

Também são fornecidos os valores das tolerâncias.



## 2.2 Princípio de Funcionamento

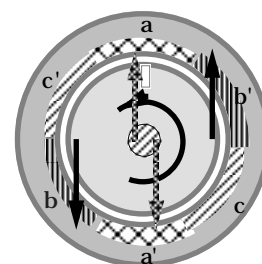
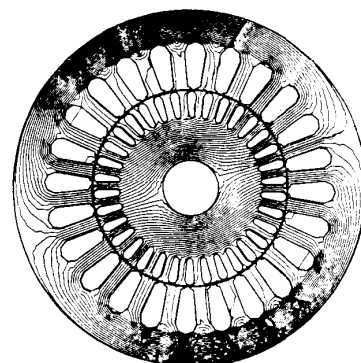
O motor de indução trifásico é uma máquina eléctrica de corrente alternada, com o circuito eléctrico de uma parte (a parte estatórica) formado por três bobinas de fase afastadas de  $2\pi/3$  rad. elect. e ligado a um sistema de alimentação trifásico, e com o circuito eléctrico da outra parte (a parte rotórica) formado por uma bobina polifásica com os condutores curto-circuitados, submetido a fenómenos de indução magnética.





O princípio de funcionamento do motor de indução trifásico pode ser enunciado da seguinte forma:

- o circuito eléctrico estatórico é alimentado por um sistema de tensões trifásico, que provocam a circulação de corrente eléctrica nos condutores das bobinas das fases que formam o enrolamento; da passagem das correntes eléctricas nas espiras das bobinas de fase do enrolamento resulta um campo girante de força magnetomotriz, que roda no espaço do entreferro à velocidade de sincronismo  $n_s = f/p$  {rot/s ; Hz};
- o campo girante de força magnetomotriz cria no circuito magnético principal da máquina um campo magnético girante (com um fluxo magnético  $\psi_s$ ), que se desloca no espaço do entreferro à velocidade de sincronismo,  $n_s$ ;
- o movimento do campo magnético girante dá origem a dois fenómenos de indução magnética;
  - nos condutores eléctricos das bobinas de fase estatóricas (indutoras) induzem-se forças electromotrizes alternadas,  $e_{sa}$ ,  $e_{sb}$ ,  $e_{sc}$ ;
  - nos condutores do circuito eléctrico rotórico (gaiola) induzem-se forças electromotrizes alternadas,  $e_{ri}$ , com uma amplitude e uma frequência que dependem da velocidade relativa entre o campo girante ( $n_s$ ) e os condutores do rotor ( $n_r$ ):  $n_s - n_r$ ;
- como o circuito eléctrico rotórico está curto-circuitado, as forças electromotrizes alternadas rotóricas dão origem a correntes eléctricas que circulam nos condutores do enrolamento rotórico;
- estas correntes eléctricas rotóricas encontram-se a circular no interior de um campo magnético, o que provoca o aparecimento de forças mecânicas que se exercem sobre os condutores rotóricos, dispostos no interior das ranhuras rotóricas; as forças mecânicas combinando-se criam um binário (electromagnético)  $T_{el}$  que faz rodar o rotor (o valor do binário é proporcional ao fluxo magnético indutor e à corrente eléctrica rotórica  $T_{el} \propto \psi_s \cdot i_r$ );
- o movimento do rotor tende a contrariar a causa que lhe deu origem — a velocidade relativa entre o campo magnético e os condutores rotóricos (responsável pela indução das forças electromotrizes no circuito rotórico) — por isso, o rotor, por acção do binário electromagnético, tende a atingir a velocidade do campo girante; que nunca chega a atingir devido aos atritos,  $n_r < n_s = f/p$ .



Durante o funcionamento do motor de indução trifásico o rotor roda com uma velocidade ligeiramente inferior à velocidade do campo magnético girante, e com uma diferença que depende dos binários de carga (binário resistente) no veio do motor. Assim, o motor de indução trifásico é uma Máquina Eléctrica *Assíncrona* — porque não existe uma relação constante entre a velocidade de rotação da máquina  $n_r$  e a frequência das grandezas eléctricas de alimentação  $f$ .

Um observador colocado no campo magnético girante veria o rotor rodar em sentido contrário com uma velocidade muito reduzida: o rotor *desliza* em relação ao campo magnético. Por isso, chama-se *deslizamento* ( $s$ ) a uma grandeza que dá uma razão entre a diferença de velocidade do rotor relativamente ao campo magnético e a velocidade do campo magnético,

$$\ominus \quad s = \left( \frac{n_s - n_r}{n_s} \right)$$

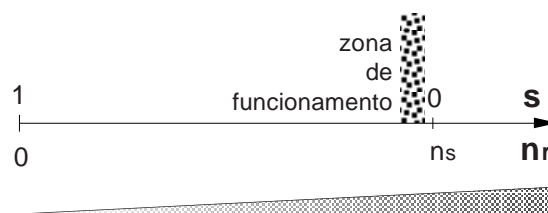
Utilizando o conceito de deslizamento na análise do funcionamento do motor de indução trifásico surgem as situações e os pontos principais:

*arranque*  $n_r = 0$  e  $s = 1$

*hiposincronismo*  $n_r < n_s$  e  $0 < s < 1$

*sincronismo*  $n_r = n_s$  e  $s = 0$  (só pode ser atingido se a carga accionar o motor ...)

*hipersincronismo*  $n_r > n_s$  e  $s < 0$  (só pode ser atingido se a carga accionar o motor ...)



Exemplo\_2.1 — No catálogo dos motores de indução trifásicos é dado o valor da frequência, da velocidade de sincronismo e da velocidade nominal:

[EFA-c; BF5 100 L48]  $f = 50$  Hz  $n_s = 750$  rot/min  $n_n = 695$  rot/min

Pode-se verificar que este motor tem um campo magnético com  $p = f/n_s$  pares de pólos magnéticos,

$$p = 60 \cdot f / n_s \quad p = 60 \cdot 50 / 750 = 4 \text{ pares de pólos} \quad \text{ou} \quad 2p = 8 \text{ pólos}$$

Em regime nominal, com o motor à plena carga, o deslizamento tem o valor:

$$s = (n_s - n_r) / n_s \quad s = (750 - 695) / 750 = 0,073$$

### 2.3 Método de Estudo

Para se efectuar o estudo do funcionamento do motor de indução trifásico existem vários métodos: Método Simbólico, Teoria Generalizada, Método dos Fasores Espaciais.

Todos estes métodos começam por estabelecer, implícita ou explicitamente, as respectivas condições de estudo; trata-se de um conjunto de hipóteses simplificativas da realidade física muito complexa que constitui o motor de indução trifásico e que permitem construir um modelo matemático (*modelização*) capaz de descrever, dentro da aproximação desejada, o comportamento do motor.

A forma mais simples de estudar o motor de indução trifásico é utilizada pela Teoria Clássica das Máquinas Eléctricas que considerando que todas as propriedades físicas dos materiais são lineares, e, como todas as grandezas físicas têm um comportamento sinusoidal no tempo (regime permanente sinusoidal simétrico), ou no espaço, pode utilizar o Método Simbólico para representação dessas grandezas, [MCB-1] [CCC-2]. Assim, porque todas as grandezas são funções sinusoidais do tempo, ou do espaço, são representadas por quantidades complexas — *fasores*,

$$g(t) = G_m \cdot \cos(\omega t + \phi) \quad \Leftrightarrow \quad \underline{G} = |\underline{G}| \angle \phi \quad \Leftrightarrow \quad \underline{G} = G_m \cdot \exp(j\phi)$$

Uma análise energética do comportamento do motor permite estabelecer as expressões

relacionando as grandezas eléctricas e mecânicas (intensidades de corrente, factor de potência, binário deslizamento) com os parâmetros dos circuitos eléctricos (resistências e indutâncias) e magnéticos que, por condição de estudo, são lineares (!).

No caso de um motor de indução trifásico, máquina eléctrica que promove a conversão de energia eléctrica em energia mecânica com perdas de energia, a aplicação do princípio da conservação de energia leva ao seguinte *balanço energético*, [MVG-3]:

$$\begin{aligned} \textcircled{M} \quad & (\text{a energia eléctrica consumida} - \text{a energia de perdas eléctricas}) = \\ & = (\text{energia mecânica fornecida} + \text{a energia de perdas mecânicas}) + \\ & + (\text{aumento de energia armazenada no campo magnético} + \text{a energia} \\ & \text{dissipada em perdas magnéticas}) \end{aligned}$$

O diagrama energético para um motor está representado na figura seguinte:

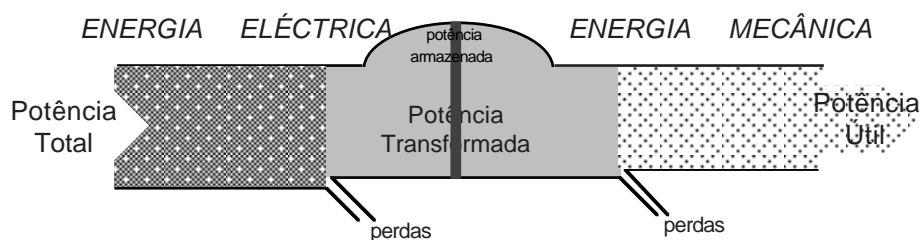


Diagrama energético para um motor de indução trifásico

Ao efectuar-se a análise energética do motor de indução trifásico em regime permanente sinusoidal simétrico, tem de se atender a que se trata de uma análise global do comportamento energético do motor.

Nesta análise energética quando se considera que as grandezas eléctricas de alimentação estão representadas pelos seus valores eficazes  $U_S$  e  $I_S$ , verifica-se que a *potência total* consumida pelo motor de indução trifásico é dada pela potência activa eléctrica  $P_t = 3 \cdot \text{Re}(\underline{U}_S \cdot \underline{I}_S^*) = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi_S = \sqrt{3} \cdot U_C \cdot I_S \cdot \cos \varphi_S$ . Esta potência eléctrica destina-se a alimentar as perdas Joule no circuito estatórico  $P_{JS} = 3 \cdot R_S \cdot I_S^2$  mais a potência eléctrica activa que vai ser transferida para o rotor  $P_{SR} = 3 \cdot E_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi_S$ .

Como se considerou que no motor não existiam perdas magnéticas nas condições de estudo, a potência eléctrica total não alimenta essas perdas. E surge, assim, uma forma de considerar as perdas magnéticas realmente existentes na dedução adoptada para obtenção das equações de funcionamento do motor: considera-se que a potência total do motor é o valor da potência eléctrica absorvida pelo motor menos o valor das perdas magnéticas da máquina.

Parte da potência eléctrica activa que foi transferida para o rotor é dissipada em calor, por perdas Joule, no enrolamento rotórico  $P_{JR} = 3 \cdot R'_r \cdot I_r^2 = s \cdot P_{SR}$ , e a restante parte é convertida, integralmente, em potência mecânica

$$P_{el} = P_{SR} - P_{JR} = (1 - s) \cdot P_{SR} = \omega_r \cdot T_{el}$$

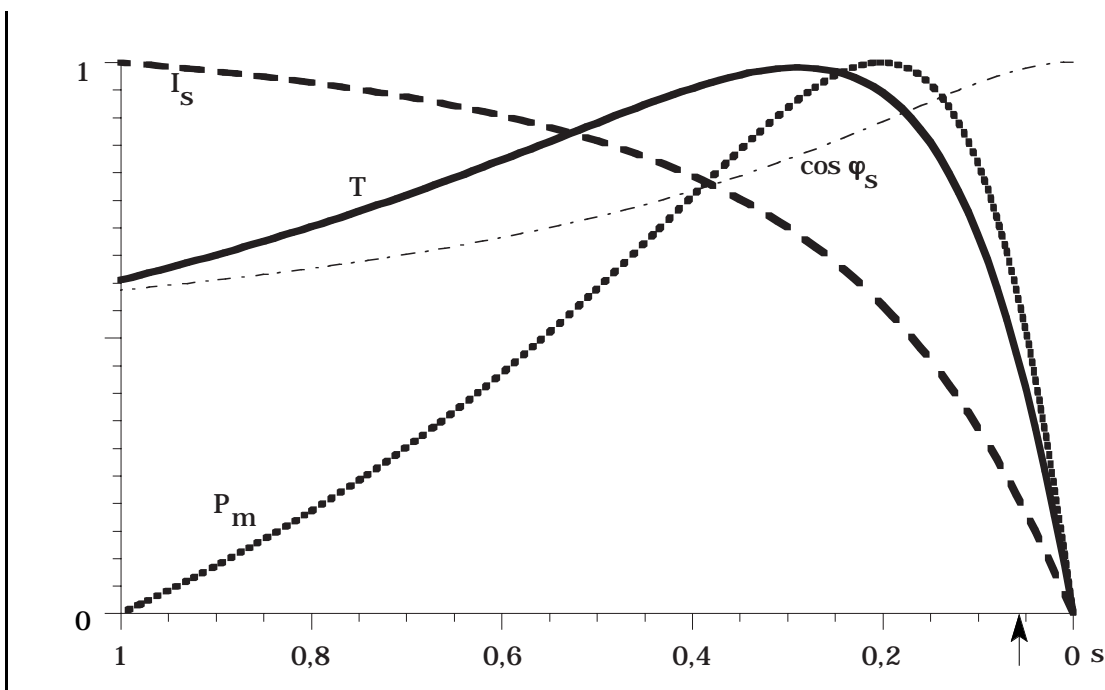
Parte daquela potência mecânica alimenta as perdas mecânicas da máquina  $P_{mec}$  (perdas por atrito e de ventilação), enquanto que a parte restante fica disponível no veio da máquina como *potência útil*,  $P_u = \omega_r \cdot T_m$ .

Para o motor de indução trifásico funcionar necessita que lhe seja fornecida uma energia eléctrica reactiva para criar e manter o campo magnético da máquina. A potência reactiva total

associada ao funcionamento do motor é:  $Q_t = 3 \cdot U_s \cdot I_s \cdot \sin \varphi_s = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_s \cdot \sin \varphi_s$ . Como o motor de indução apresenta sempre um factor de potência indutivo menor do que a unidade é importante a análise do seu comportamento como consumidor de energia reactiva.

As condições de estudo utilizadas nesta modelização do motor de indução trifásico permitem representar cada fase do motor de indução trifásico por um circuito eléctrico equivalente. Relacionando as diversas grandezas físicas com os parâmetros do circuito eléctrico é possível estabelecer um conjunto de expressões que caracterizam a variação das grandezas físicas principais durante o funcionamento do motor de indução trifásico. Torna-se possível traçar as *características de funcionamento* — representação gráfica da relação entre duas ou mais variáveis .

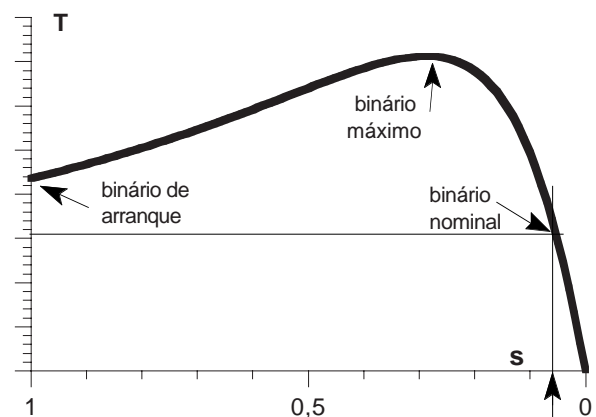
O andamento típico das *características de funcionamento* de um motor de indução trifásico — característica electromecânica  $I_s(s)$ , característica mecânica  $T(s)$ , característica de variação da potência mecânica  $P_m(s)$ , característica do factor de potência  $\cos \varphi_s(s)$  — estão representados na figura junta.



Como se pode verificar o factor de potência do motor de indução trifásico depende da situação de carga do motor. Por isso, a *fracção de carga* só pode ser definida como uma razão entre potências.

É importante notar que as características traçadas são *características estáticas*, formadas por uma acumulação de valores correspondentes a diferentes situações de funcionamento, sem que traduzam os diferentes fenómenos (rápidos) que ocorrem

(fenómenos dinâmicos que põem em jogo os armazenamentos de energia nos diferentes campos do motor) quando o motor passa de uma situação para outra (de um ponto de funcionamento para outro).



### 2.4 Aspectos do Funcionamento

Quando o motor de indução trifásico acciona uma carga torna-se necessário que a característica mecânica do motor  $T(s)$  esteja adaptada às necessidades da carga mecânica, caracterizada pela sua característica mecânica  $T_{res}(n)$ . Esta característica tem uma forma geral,

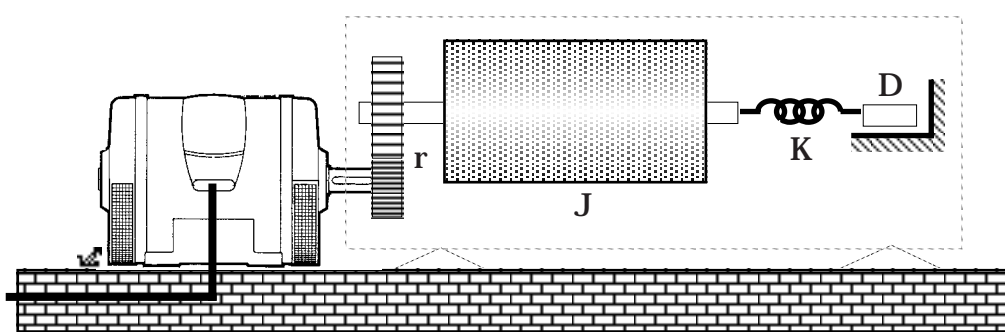
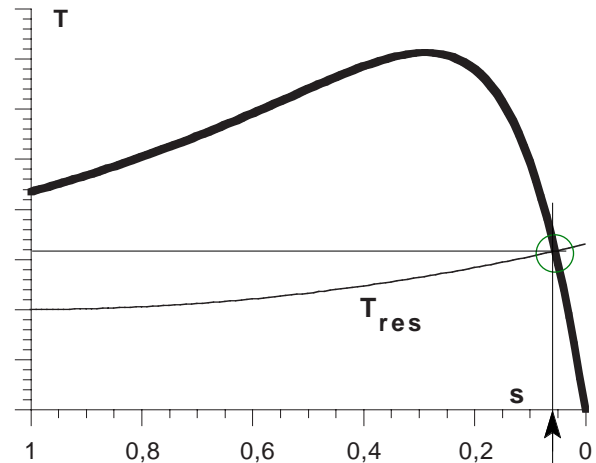
$$T_{res} = T_{atrc} + (T_{resn} - T_{atrc}) \cdot (n/n_n)^x$$

em que:  $T_{res}$  — binário da carga (resistente);  $T_{atrc}$  — binário de atrito da carga;  $T_{resn}$  — binário de carga (resistente) à velocidade nominal  $n_n$ ;  $x$  — expoente que caracteriza a variação do binário resistente com a velocidade.

Existem vários tipos de cargas mecânicas (receptores mecânicos). Essas cargas podem ser classificadas quanto à variação do binário resistente com a velocidade de rotação do respectivo veio  $T_{res}(n)$ :

	$n^2$ Binário Variável	constante Binário Constante	$1/n$ Potência Constante
Binário resistente $T_{res}$ proporcional a	Bombas centrífugas Ventiladores Compressores Agitadores	Compressores de pistões Bombas de engrenagem Laminadores Elevadores Bandas transportadoras	Bobinadoras Tornos Descascadores de madeira

Quando o motor de indução trifásico está a accionar uma em regime permanente existe uma situação de equilíbrio entre o binário motor desenvolvido pelo motor eléctrico e o binário resistente apresentado pela carga mecânica:  $T_m = T_{res}$ . É importante que qualquer pequena alteração da velocidade ou do binário desenvolvido pelo motor seja automaticamente compensada, de forma a que o sistema de accionamento electromecânico apresente um funcionamento *estável*.



Durante o funcionamento do sistema de accionamento existem diversas situações, com um

aspecto típico e com uma caracterização, que é importante conhecer na selecção e na aplicação de um motor de indução trifásico.

As situações características do funcionamento em regime permanente do motor de indução trifásico são: o *arranque*, o *funcionamento em carga*, e a *frenagem*.

#### o Arranque

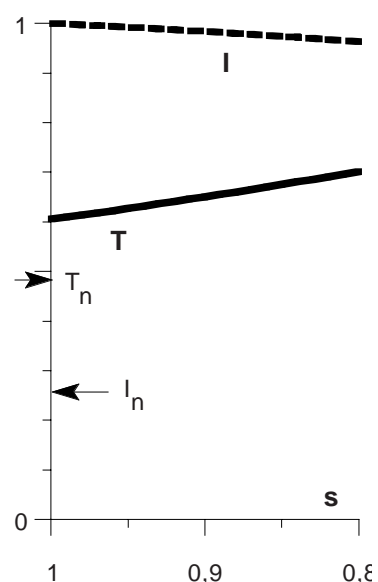
Quando é aplicada a tensão nominal (directamente) aos terminais do motor de indução trifásico (ligado à rede eléctrica), nos momentos iniciais, a intensidade da corrente eléctrica apenas é limitada pela impedância complexa do circuito, enquanto que no funcionamento em regime normal é limitada pela impedância complexa e pela força electromotriz que o campo magnético girante induz no circuito estatórico. Por esse motivo a intensidade de corrente eléctrica — a *corrente de arranque*  $I_a$  — é muito elevada, o que tem dois inconvenientes:

- existe uma queda de tensão na instalação eléctrica de alimentação, cuja importância depende da potência de curto-circuito no ponto de ligação da instalação de utilização de energia;
- há um aquecimento do motor, e de todos os condutores que são percorridos pela corrente de arranque, devido às perdas de energia por efeito Joule.

Se, num esforço de limitar os inconvenientes da corrente de arranque, por construção, se reduz muito o seu valor, resulta que o binário que o motor desenvolve no arranque — o *binário de arranque*  $T_a$  — vem reduzido, o que compromete o arranque do motor quando acciona uma carga. Surge, assim, mais uma restrição ao arranque de um motor,

- o binário de arranque deve ser elevado para promover o crescimento da velocidade do motor, e da carga mecânica acoplada, até à velocidade de regime.

No projecto do motor estas restrições são consideradas e resulta, que por construção o motor de indução trifásico apresenta (no arranque directo) um binário de arranque superior (1,5x a 3x) ao binário motor nominal, e uma corrente de arranque muito superior (4x a 8x) à intensidade da corrente nominal.



No catálogo do fabricante é dada uma informação sobre os valores relativos do binário de arranque ( $T_a/T_n$ ) e da corrente de arranque ( $I_a/I_n$ ), para o arranque directo. Em [EFA-c], para motores com  $U_n = 380$  V, 50 Hz,

BF5 80 M42	0,75 kW	2 855 rot/min	$(T_a/T_n) \equiv (B_a/B_n) = 2,6$	$(I_a/I_n) = 6,1$
BF5 112 M44	4 kW	1 410 rot/min	$(T_a/T_n) \equiv (B_a/B_n) = 2,3$	$(I_a/I_n) = 5,5$
BF5 160 M66	7,5 kW	960 rot/min	$(T_a/T_n) \equiv (B_a/B_n) = 2,2$	$(I_a/I_n) = 5,2$
BF4 250 M42	55 kW	2 970 rot/min	$(T_a/T_n) \equiv (B_a/B_n) = 2,5$	$(I_a/I_n) = 8$
BF6 400 L64	500 kW	1 490 rot/min	$(T_a/T_n) \equiv (B_a/B_n) = 2$	$(I_a/I_n) = 7$

Com uma consulta do catálogo pode comprovar-se a escolha de um determinado tipo de motor e retirar informação para o dimensionamento, ou análise do comportamento, da instalação eléctrica de alimentação.

Exemplo\_2.2 — Pretende-se seleccionar um motor eléctrico para accionar uma carga mecânica com as seguintes características:

$$T_{res} = 4 \text{ Nm} \quad n = 1400 \text{ rot/min} \quad \text{binário de arranque } T_a = 3,5 \text{ Nm}$$

Consultando o catálogo verifica-se um motor com  $P_n > T_{res} \cdot \omega$ ,  $P_n > 4 \times 2\pi \times 1400 / 60 = 4 \times 146,6 = 586 \text{ W} = 0,59 \text{ kW}$  para uma velocidade de sincronismo  $n_s > 1400 \text{ rot/min}$ ,  $n_s = 1500 \text{ rot/min}$ , SERVIA (!...). O motor BF5 80 M44  $P_n = 0,75 \text{ kW}$   $n_n = 1375 \text{ rot/min}$  iria trabalhar a  $(0,59/0,75) = 0,787 (\approx 3/4)$  da carga.

VERIFICANDO:

No arranque, o motor apresenta um binário dado por  $(T_a/T_n) = 1,8$  com uma corrente  $(I_a/I_n) = 4,1$ ; assim

$$T_a = 2,3 \times 2,5 = 4,5 \text{ Nm} \text{ que é superior ao binário que a carga apresenta no arranque.}$$

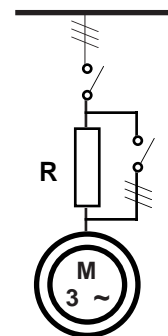
$I_a = 4,1 \times 1,7 = 6,9 \text{ A}$ , que é inferior ao valor (em regime permanente) correspondente à secção mínima do condutor de cobre imposto pelo Regulamento de Segurança ( $S = 2,5 \text{ mm}^2 \Leftrightarrow 28 \text{ A}$ ) [RSIUEE ; § 426.a].

A potência aparente de arranque seria  $S_a = \sqrt{3} \cdot 380 \times 10,37 = 6,83 \text{ kVA} < 30 \text{ kVA}$ , [RSIUEE ; § 413.3]

Mas existem situações em que não é possível, sem gravíssimos riscos para a instalação eléctrica, promover o arranque directo de um motor de indução trifásico. Existem algumas soluções para esse problema baseadas numa diminuição da tensão aplicada ao motor no momento do arranque.

**queda de tensão** — mediante a introdução de um elemento de circuito antes do motor eléctrico pode-se provocar uma queda de tensão nesse elemento — *resistência* ou bobina. Na realidade apenas se pode utilizar uma resistência, porque uma bobina, sendo um elemento altamente indutivo, iria provocar uma descida do valor do factor de potência global no momento do arranque, o que agravaria as condições naturais de arranque do motor de indução trifásico que já tem um factor de potência baixo no arranque ( $< 0,5$ ).

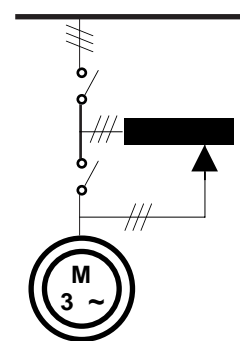
$$T_{res} = 0,2 \cdot T_n \text{ a } 0,6 \cdot T_n \quad \text{e} \quad I_a = 0,45 \cdot I_{ad} \text{ a } 0,8 \cdot I_{ad}$$



**diminuição da tensão** — a diminuição da tensão (alternada sinusoidal) pode ser provocada por um transformador (valor fixo) ou por um auto-transformador variável, que permite fazer uma evolução da tensão ( $U_a \rightarrow U_n$ ) durante o arranque.

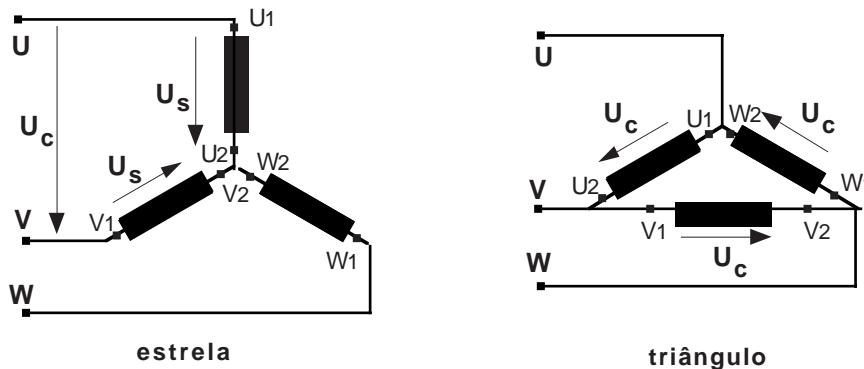
$$T_{res} = 0,25 \cdot T_n \text{ a } 0,65 \cdot T_n \quad \text{e} \quad I_a = 0,25 \cdot I_{ad} \text{ a } 0,65 \cdot I_{ad}$$

Uma possibilidade de diminuir a tensão aplicada ao motor consiste em aproveitar a existência de dois valores de tensão num sistema trifásico: a tensão simples (220 V) e a tensão composta (380 V). Mediante uma montagem (simples) pode-se alimentar a bobina de uma fase do motor com a tensão simples (no momento do arranque) e passado algum tempo (quando a velocidade já atingiu um valor julgado conveniente) desfaz-se aquela ligação e provoca-se o aparecimento de uma outra ligação em que cada fase está alimentada com a tensão composta (ver figura).

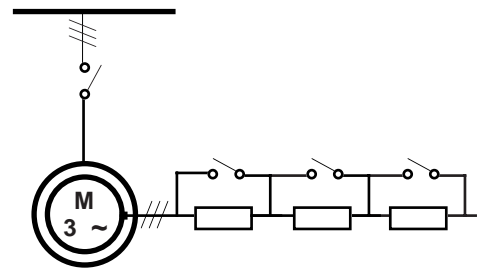


Na realidade, simplesmente, se ligam as três bobinas do enrolamento estatórico do motor em estrela, a cada uma fica aplicada a tensão simples; passado algum tempo muda-se para uma ligação das bobinas de fase em triângulo, e cada uma fica

alimentada pela tensão composta. Existem vários tipos de aparelhos comerciais capazes de efectuarem esta manobra de arranque.



Quando, qualquer uma das soluções apresentadas não permite corresponder às restrições regulamentares, existe a possibilidade de utilizar um *motor com o rotor bobinado*, que permite obter um binário de arranque com o valor do binário máximo, mas absorvendo uma corrente no arranque da ordem de grandeza da corrente nominal; e isto porque é possível durante o arranque alterar a resistência do circuito rotórico por inserção de um reóstato de pontos. O reóstato, que está ligado ao circuito rotórico do motor através de um sistema colector de anéis-escovas, é introduzido com o seu máximo valor no arranque e depois vai-se gradualmente reduzindo a resistência, sem que a intensidade da corrente eléctrica ultrapasse o valor máximo admissível; no fim do arranque o enrolamento rotórico é curto-circuitado.



Ⓒ No catálogo do fabricante é dada uma informação sobre os valores relativos do binário de arranque ( $T_a/T_n$ ) e da corrente de arranque ( $I_a/I_n$ ), para o *arranque estrela-triângulo*. Em [EFA-c], para motores com  $U_n=380$  V, 50 Hz,

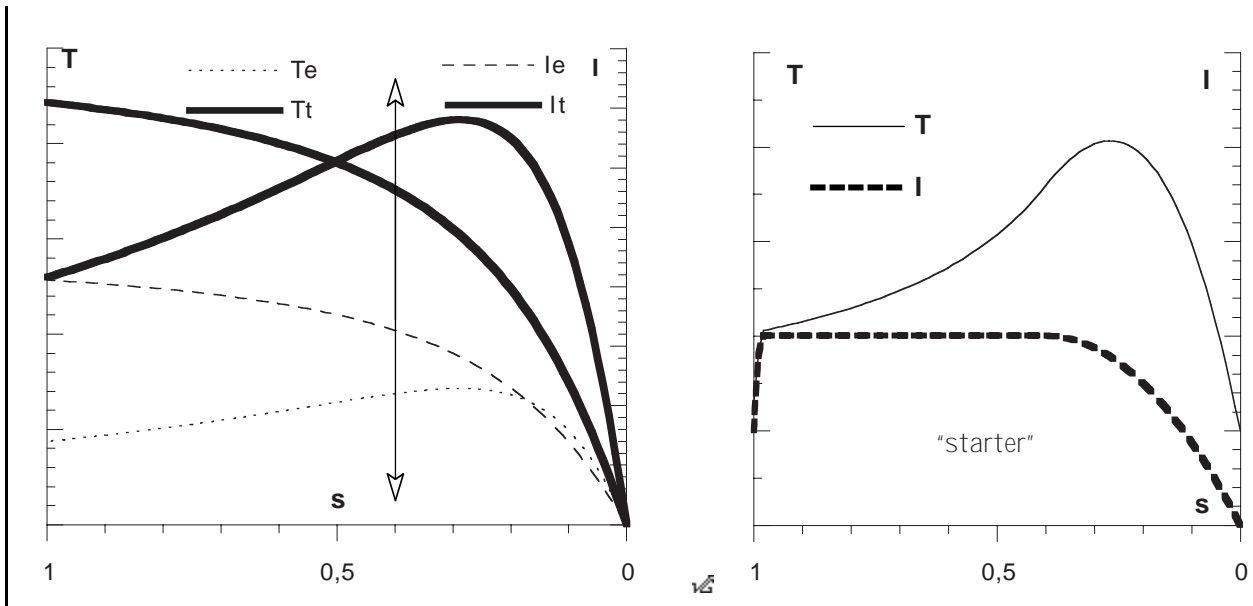
BF5 80 M42	1,1 kW	2 825 rot/min	$(T_a/T_n) \equiv (B_a/B_n) =$	$(I_a/I_n) =$
BF5 112 M44	4 kW	1 410 rot/min	$(T_a/T_n) \equiv (B_a/B_n) = 0,54$	$(I_a/I_n) = 1,7$
BF5 160 M66	7,5 kW	960 rot/min	$(T_a/T_n) \equiv (B_a/B_n) = 0,6$	$(I_a/I_n) = 1,6$
BF5 250 M42	55 kW	2 970 rot/min	$(T_a/T_n) \equiv (B_a/B_n) = 0,67$	$(I_a/I_n) = 2,5$
BF6 400 L64	500 kW	1 490 rot/min	$(T_a/T_n) \equiv (B_a/B_n) = 0,58$	$(I_a/I_n) = 2,3$

Actualmente existem sistemas electrónicos de arranque, que permitem durante o arranque gerar uma forma de onda (não sinusoidal) da tensão de alimentação com amplitude crescente (rampa de tensão). Estes sistemas de arranque utilizam elementos semicondutores de potência.

Mediante sensores (p. exp: do factor de potência) estes sistemas podem adaptar a forma de onda de tensão gerada à velocidade momentânea do motor conseguindo, assim, manter a corrente dentro de valores aceitáveis (praticamente constantes) e sem variações bruscas (como no arranque estrela-triângulo). Normalmente, estes sistemas necessitam da presença de filtros para proteger a instalação eléctrica dos harmónicos criados durante o seu funcionamento. Estes sistemas electrónicos (“starter”) podem, também, estar associados ao controlo de velocidade do motor e a

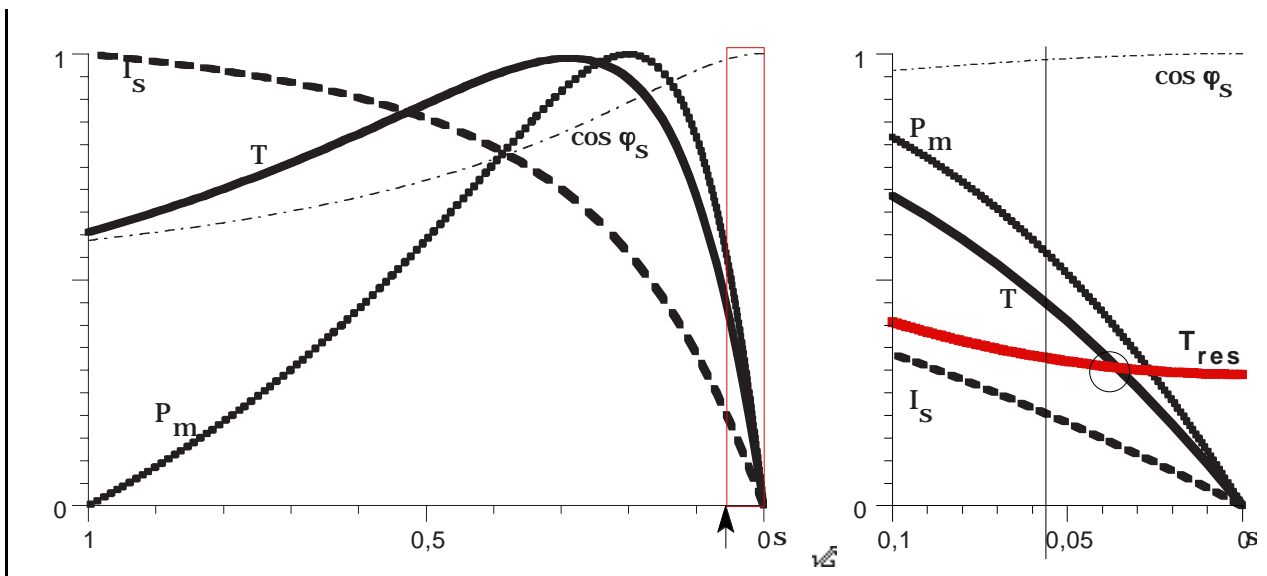


sistemas de utilização racional de energia eléctrica.



Funcionamento em Carga

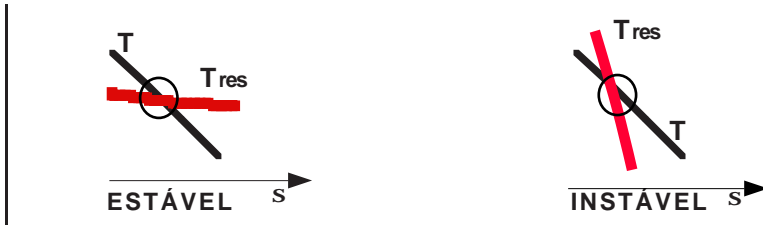
Durante o funcionamento em carga (regime permanente) o motor de indução trifásico encontra-se numa situação de o binário motor desenvolvido igualar o binário resistente oposto pela carga mecânica:  $T_m = T_{res}$ . Nesta situação a velocidade do motor é constante, e para este tipo de motor eléctrico apresenta a particularidade de diferir muito pouco da velocidade de sincronismo  $n_s$ .



No funcionamento em carga, o motor de indução trifásico tem um *ponto de funcionamento* que fica caracterizado, no seu aspecto mecânico pelo binário motor desenvolvido  $T_m$  e pela velocidade de rotação  $n_r$  (ou pelo deslizamento  $s$ ), e no aspecto eléctrico pela potência activa absorvida da rede  $P_t$ , pela corrente eléctrica absorvida da rede  $I$ , pelo factor de potência  $\lambda \equiv \cos \varphi$ , considerando-se que a tensão  $U$  e a frequência  $f$  têm amplitude constante.

Para que o accionamento tenha qualidade torna-se necessário que apresente *estabilidade* estática no ponto de funcionamento. Considera-se que um accionamento apresenta estabilidade

estática, quando para uma pequena variação da velocidade, o motor recupera o anterior ponto de funcionamento. Quando uma pequena variação da velocidade (aumento ↗) provoca uma diminuição do binário motor (↘) e portanto, conservando-se o binário resistente constante, cria-se uma situação em que o binário resistente é maior do que o binário motor ( $T_{res} > T_m$ ) e a velocidade diminui (↘) até ao valor do anterior ponto de funcionamento (✱).



Na situação apresentada o motor funciona num regime de velocidade constante (praticamente). No entanto existem situações em que se pretende um accionamento com um motor de indução trifásico e com *velocidade variável*. Perante o princípio de funcionamento do motor verifica-se que se pode alterar a velocidade deste motor de duas formas:

*de uma forma discreta* — por alteração do número de pares de pólos do enrolamento indutor,  $n = f/p$ . Tal manobra altera a velocidade de sincronismo de uma forma escalonada. Existem motores com vários enrolamentos estatóricos ou com um enrolamento especial que permitem esta alteração; normalmente, comercializam-se motores que possuem dois valores de velocidade de sincronismo.

*de uma forma contínua* — por alteração da frequência da tensão trifásica de alimentação,  $n = f/p$ . Esta manobra é feita por conversores electrónicos de potência e o seu estudo e aplicação são feitos noutra publicação.

### Frenagem

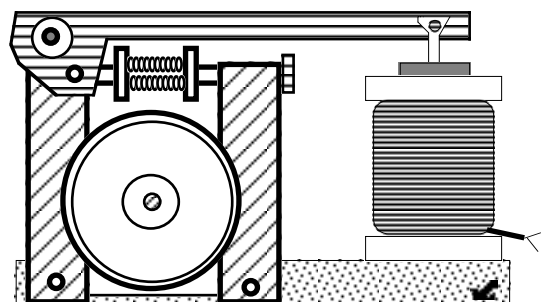
Quando um motor de indução trifásico, accionando uma carga, é desligado da instalação eléctrica de alimentação a sua velocidade diminui devido à existência dum binário resistente — o motor é *frenado*.

A paragem do motor pode ocorrer em tempo menor se, durante a frenagem, se adicionar ao binário resistente um binário de frenagem devido à actuação de um *freio mecânico*; o que é diferente da situação de *deriva* em que apenas actua, como binário resistente, o binário de atrito das peças em movimento.

Um problema importante na frenagem de um sistema de accionamento electromecânico ocorre quando se pretende efectuar uma frenagem precisa (com duração constante ou com o móvel a parar numa posição fixa). Existem, para isso métodos de frenagem próprios.

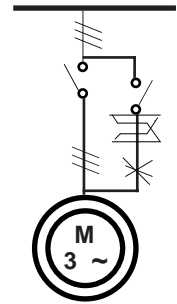
Os métodos de frenagem para motores de indução trifásicos são:

*frenagem com corrente contínua* — neste tipo de frenagem o enrolamento estatórico é desligado da instalação de alimentação de energia e é alimentado em corrente contínua por uma bateria ou por um circuito rectificador. Os condutores rotóricos vão ser sede de forças electromotrizes induzidas, e como estão curto-circuitados, são percorridos por corrente eléctrica que, no seio do campo



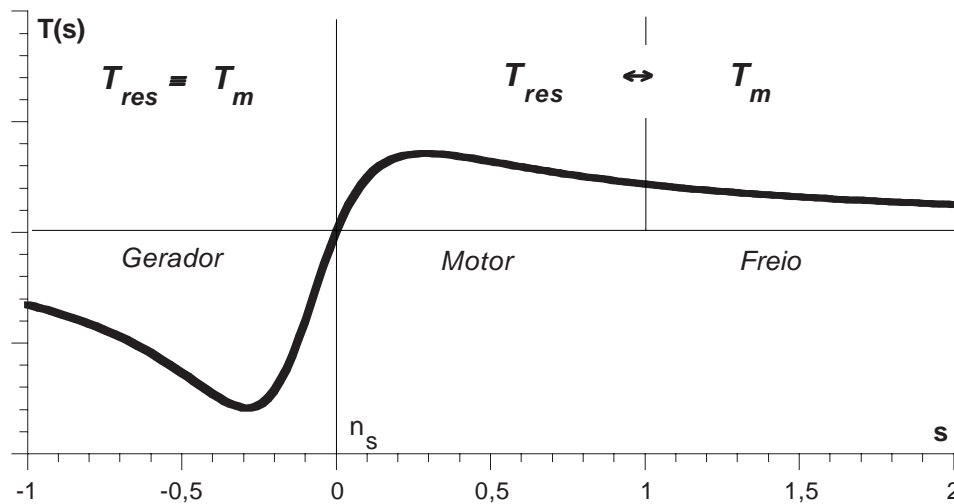
magnético constante e fixo no espaço, criam um binário que se opõem ao anterior accionamento.

**frenagem por contra corrente** — quando se trocam duas fases do sistema de tensão de alimentação, o campo magnético girante roda em sentido contrário, desenvolvendo-se um binário motor com sentido contrário ao de accionamento da carga mecânica; esta tenderá a parar e, depois, a acelerar na direcção oposta. Por isso a troca de duas fases só deve durar o tempo de frenagem ( $n_r \rightarrow 0$ ).



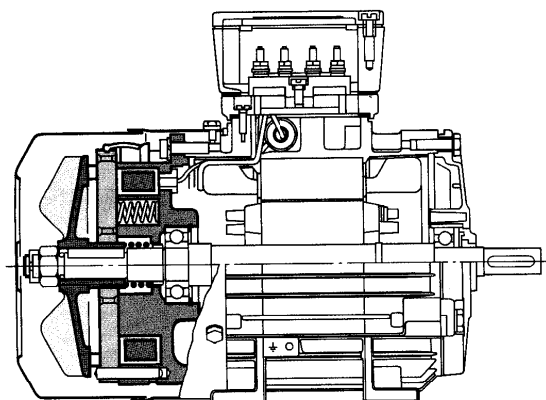
**frenagem como gerador assíncrono** — durante o accionamento de uma carga mecânica podem ocorrer situações em que o binário motor e o binário resistente actuem no mesmo sentido; nessas situações a velocidade do motor torna-se superior à velocidade de sincronismo, e, desde que continue a ser fornecida energia reactiva ao motor para criar e manter o campo magnético, o motor passa a funcionar como gerador de corrente alternada. Conforme a energia eléctrica produzida durante a frenagem é dissipada em resistências, ou devolvida à rede eléctrica, assim a frenagem se chama **frenagem reostática** ou **frenagem regenerativa** [MVG-5].

O funcionamento de um motor de indução trifásico pode, assim, realizar-se com as seguintes funções: *motor*, *freio*, ou *gerador*.



Para resolver o problema da frenagem de uma forma integrada alguns fabricantes têm uma produção estandardizada de motores de indução trifásicos com rotor em curto-circuito e com um freio mecânico actuado por um electroíman — **motor freio**. Desta forma é possível, no momento da frenagem, fazer actuar um binário de frenagem que pode ter um valor duplo do valor do binário nominal do motor.

O circuito eléctrico do electroíman é alimentado em corrente contínua, resultante da rectificação da



Motor freio (SIEMENS)

tensão de uma fase, e quando actuado provoca a fricção de duas superfícies de material com grande resistência ao atrito, o que permite um grande número desse tipo de manobras.



Alguns fabricantes (ABB; SIEMENS; EFACEC, ...) apresentam um catálogo de *motores freio* em que indicam o binário de frenagem nominal, assim como dão informação sobre a altura de substituição de peças (disco de frenagem) ou de reajustes, assim como os tempos de actuação do freio.

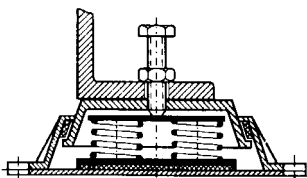
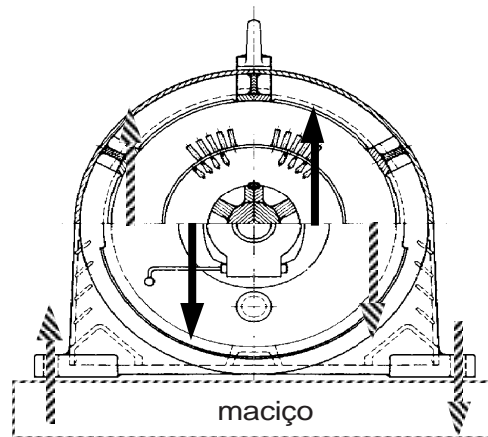
Note-se que este tipo de motor tem mais problemas de manutenção que o motor de indução trifásico normal.

## 2.5 Instalação do Motor de Indução Trifásico

Para um motor de indução trifásico accionar uma carga mecânica tem de ser instalado no local. Esta instalação tem de obedecer a certos critérios, e tem de atender a aspectos importantes do funcionamento do motor, para que o accionamento possa ser feita nas condições pretendidas.

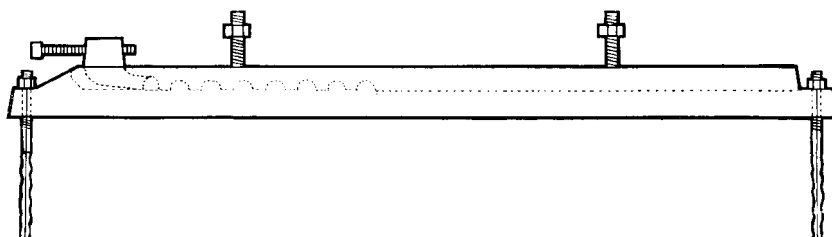
Devido ao seu princípio de funcionamento, ao desenvolvimento do binário motor na parte rotórica da máquina corresponde, pelas Leis da Mecânica, o desenvolvimento de um binário igual e com o sentido contrário na parte estatórica da máquina. É assim comunicado à base de sustentação um esforço mecânico que esta deve estar dimensionada para suportar.

Como base de apoio de um motor de indução trifásico, e eventualmente da sua carga mecânica é utilizado um *maciço* de betão, capaz de aguentar o peso das máquinas e a solicitações mecânicas transmitidas pelos *pernos de fixação*.



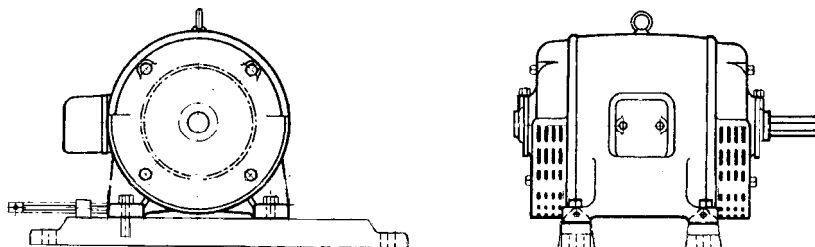
O betão utilizado deverá ter uma boa capacidade de absorção de vibrações. Para amortecer as vibrações provocadas com o funcionamento do motor, também se utilizam, *amortecedores* de mola, ou de borracha, nas patas do motor eléctrico.

O motor eléctrico, e a sua carga mecânica podem ser montados sobre *carris tensores*, essencialmente, se tiverem uma transmissão de movimento por correia (!..). Estes carris tensores, também são úteis para resolver um problema importante na instalação de um motor de indução trifásico: o *problema do alinhamento*.

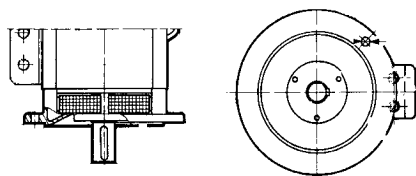


Em qualquer accionamento electromecânico, é necessário que o eixo do motor eléctrico e das cargas mecânicas *sejam paralelos*; diminuem-se, assim, os esforços mecânicos transversais nos

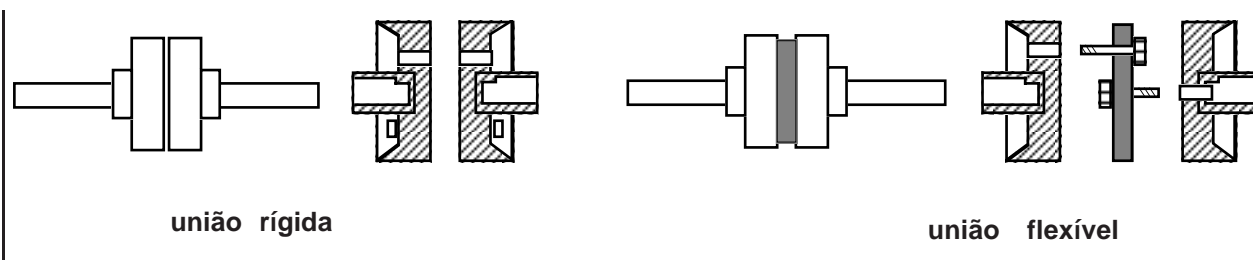
mancais de apoio dos diferentes eixos. Por isso, na fase de montagem das diferentes máquinas terá de existir um especial cuidado com o alinhamento e com o posicionamento dos diferentes veios; recorre-se a uma vasta aparelhagem de medida (de precisão) para se obter um posicionamento correcto das máquinas.



Quando se torna necessário fixar o motor de indução trifásico à máquina accionada pode utilizar-se um motor de indução trifásico com *flange*, de furos lisos ou de furos roscados, sendo o motor eléctrico fixado com *parafusos de fixação*.



Na ligação dos veios das diferentes máquinas, motor e carga mecânica, utiliza-se uma *união*, que é um conjunto de duas peças aptas a fazerem a ligação entre os dois veios. A união pode ser *rígida* ou *flexível*, existindo diversos tipos de uniões flexíveis.

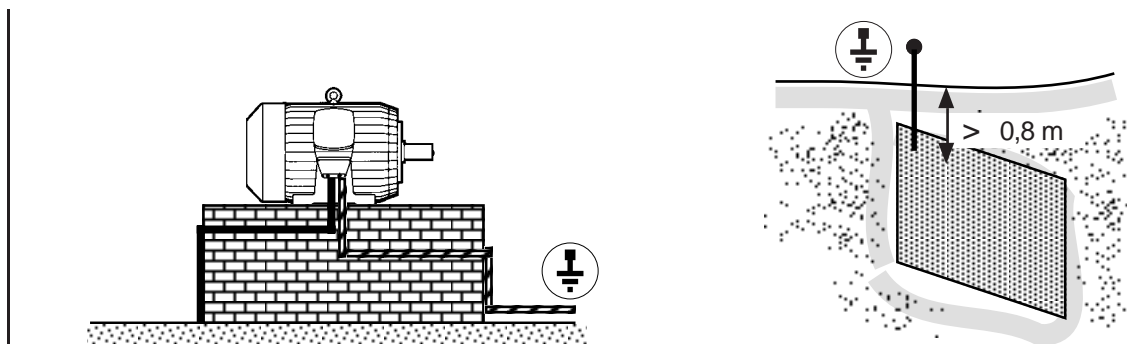


Para além destes problemas, de *carácter mecânico*, existem também na instalação de um motor eléctrico problemas de *carácter eléctrico*. Esses problemas dizem respeito às ligações eléctricas e às protecções do motor.

A instalação eléctrica de alimentação em energia do motor de indução trifásico deverá obedecer aos *Regulamentos de Segurança* aplicáveis na situação concreta de utilização do motor. Esta imposição legal obriga a um cuidadoso projecto da instalação eléctrica do motor de indução trifásico, porque, como já se apresentou, o bom funcionamento do motor condiciona e é condicionado pelas condições estruturais da instalação eléctrica.

Nos sistemas de protecção a utilizar com um sistema de accionamento electromecânico accionado por motor de indução trifásico têm de ser adoptadas disposições destinadas a garantir a protecção das pessoas contra os contactos directos com partes activas (metálicas) dos elementos do sistema de accionamento electromecânico. Mas, também podem existir contactos com partes

do sistema que não devendo estar em tensão, por acidente, se encontram em contacto com qualquer parte activa: trata-se de contactos indirectos, que se evitam procurando que o valor da tensão de contacto entre qualquer parte metálica (não activa) e a terra seja inferior a 25 V [RSIUEE; § 598.b].



A protecção contra contactos indirectos é, normalmente, realizada ligando-se as partes metálicas do motor de indução trifásico (carcaça) a uma *terra de protecção*; trata-se de um circuito eléctrico formado por um condutor de protecção, de pequena resistência, que liga as massas metálicas do motor a um eléctrodo de terra (chapa, vareta, ..). A constituição dos condutores de protecção, a sua secção e a cor do seu isolamento (*verde e amarelo*) encontram-se regulamentadas: [RSIUEE ; § 614], [RSIUEE ; § 615] e [RSIUEE ; § 618.2].

As restantes protecções que se efectuam numa instalação de um motor de indução trifásico dependem da potência instalada e da importância da instalação. Como, actualmente estão comercialmente disponíveis muitos tipos de sistemas de protecção, depende de uma análise económica a complexidade da aparelhagem de protecção a adoptar.

Essencialmente um motor de indução trifásico pode ter as seguintes protecções:

Tipo de Defeito	Protecção	[RSIUEE]
Curto-circuito	relé magnético; fusíveis	§ 569.3; 580; 591
Sobrecarga	relé térmico	§ 569.2; 570; 577; 589; 590
Sobreintensidade	relé de máximo de corrente (temporizado)	§ 569.1; 573; 576
Falta de fase	relé	
Assimetria do sistema trifásico	relé	
Inversão de fases	relé	
Blocagem do rotor	relé	
Defeito à terra	relé	

[RSIUEE; §589.2 e §591.2] — o disposto no número anterior (protecção individual contra sobrecargas e contra curto-circuitos) poderá não ser aplicável aos motores de potência nominal igual ou inferior a 0,75 kW.

Na protecção eléctrica do motor de indução trifásico atende-se a que:

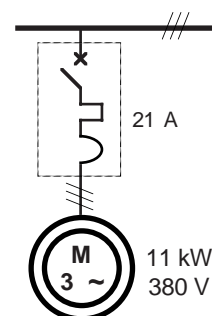
os fusíveis não asseguram a protecção do motor; apenas protegem o circuito contra os curto-circuitos.

obtém-se uma boa protecção contra as sobrecargas com a aplicação de relés térmicos; a corrente de regulação dos elementos térmicos é igual à corrente absorvida no regime normal do motor, quando este está alimentado à tensão e à frequência nominal.

Exemplo\_2.3 — Na actualidade existem disponíveis aparelhos — *disjuntor* — que asseguram, simultaneamente, as quatro funções: *seccionamento* do circuito de alimentação do motor (poder de corte); protecção contra *sobrecarga* (relé térmico); protecção contra curto-circuito (relé magnético); comando do motor (ligar–desligar).

Para uma carga mecânica ( $P_U = 8,25 \text{ kW}$  ;  $T = 82,93 \text{ Nm}$  ;  $n = 950 \text{ rot/min}$ ) accionada por um motor de indução trifásico [EFA–c ; BF5 160 L66], verifica-se que quando o motor está a funcionar absorve uma corrente eléctrica dada por  $I = P_U / (\eta \cdot \sqrt{3} \cdot U_C \cdot \cos \varphi)$ , e como o motor está a funcionar a (8,25/11) ou (3/4) da carga,  $I = 8500 / (0,88 \cdot \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,71) = 20,1 \text{ A}$ .

Adoptando um disjuntor com um calibre de 25 A, regulam-se os relés térmicos para a corrente eléctrica absorvida em regime permanente normal,  $I = 20,1 \approx 21 \text{ A}$ , e não para a corrente nominal do motor  $I = 25 \text{ A}$ , que não é atingida.



Para além das protecções da instalação eléctrica, existem protecções capazes de assegurar que o motor não interfira, desagradavelmente, com o meio ambiente circundante.

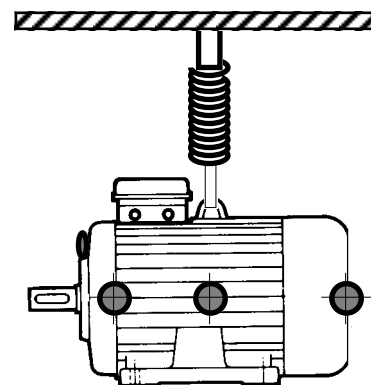
Para que a relação entre o motor de indução trifásico e o meio ambiente seja “amigável” utilizam-se carcaças que evitam a penetração de corpos estranhos no interior do motor, e que impedem a propagação ao exterior de uma avaria ocorrida no interior do motor.

Ⓒ No catálogo do fabricante é feita referência às protecções mecânicas que são habitualmente adoptadas na construção do motor, e oferece-se a possibilidade de serem escolhidas outras.

A protecção mecânica dos motores, que está normalizada, é designada por um código; por exemplo: *IP54* — “máquina fechada protegida contra as poeiras e protegida contra projecções de água”; *IP55* — “máquina fechada protegida contra as poeiras e protegida contra jactos de água”.

Na actualidade, em que se dá grande importância ao ambiente de trabalho, não interessa que o motor eléctrico de accionamento de uma máquina seja a causa de ruído ou de vibrações. Por isso, no projecto moderno de máquinas eléctricas dá-se grande importância às fontes electromecânicas de ruído sonoro e às fontes electromecânicas de vibração.

Exemplo\_2.4 — O nível limite das vibrações de um motor de indução trifásico está definido. Assim, para um motor com um altura de eixo compreendida entre 80 e 132 mm, com um velocidade nominal entre 600 e 3 600 rot/min a classe de vibração é normal (N) se o valor da velocidade efectiva de vibração ( $v_{ef}$ ) em (mm/s) for inferior ao valor 1,8; é reduzido (R) se a velocidade for de 600 a 1800 rot/min e o valor for inferior a  $v_{ef} < 0,71$ , ou se a velocidade for de 1800 a 3 600 rot/min e o valor for inferior a  $v_{ef} < 1,12$ .



motor em suspensão livre

Existem normas para a definição dos valores do nível de ruído de um motor de indução trifásico, e faz parte integrante dos ensaios

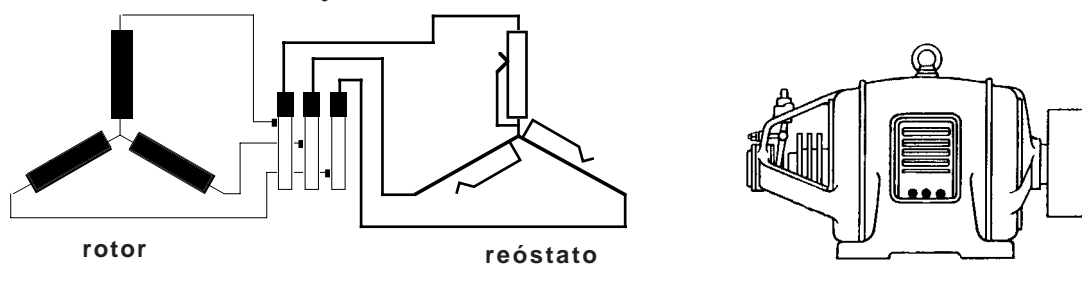
de saída de um motor de indução trifásico um ensaio de equilíbrio dinâmico do rotor. Devido ao grau de exigência, cada vez mais elevado, quanto ao nível de ruído e de vibração possíveis, têm sido feitos profundos estudos para resolver estes problemas, que são fundamentalmente, problemas *electromecânicos*, causados por fenómenos electromagnéticos.

## 2.6 Caracterização do Motor de Indução Trifásico

Para além do motor de indução trifásico blindado com o rotor em curto-circuito existem outros tipos de motores de indução trifásicos, que devido às suas características construtivas (normalmente acoplados a outras máquinas) ou às suas características de funcionamento, têm uma aplicação específica.

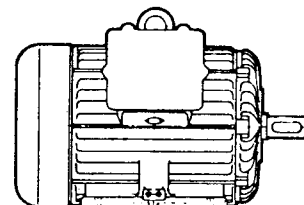
**motor de indução trifásico com rotor em curto-circuito** — é o motor de indução com maior utilização devido á sua simplicidade e robustez. O circuito eléctrico rotórico é formado por uma gaiola de material condutor (alumínio ou cobre). Apresenta várias formas construtivas (B3; B5; B14, V1; V8, ...).

**motor de indução trifásico com rotor bobinado** — neste tipo de motor de indução circuito eléctrico rotórico é formado por um enrolamento trifásico construído com condutores (de cobre) isolados e dispostos nas ranhuras. Os condutores do enrolamento rotórico estão dispostos em bobinas que formam um enrolamento trifásico ligado em estrela. Os terminais livres do enrolamento encontram-se ligados a um colectador de anéis que contacta com a parte estatórica através de um conjunto escovas de carvão gráfico. Com este tipo de circuito eléctrico rotórico é possível alterar o valor da resistência eléctrica do circuito, mediante a introdução de uma resistência eléctrica variável no circuito rotórico.



**motor de indução trifásico antideflagrante** — estes motores de indução são construídos para funcionarem em locais onde o ar forma misturas inflamáveis com outros produtos gasosos (minas, indústria química, ...).

Na construção destes motores utiliza-se um conjunto de medidas especiais afim de evitar que eles provoquem a inflamação da atmosfera envolvente. A carcaça antideflagrante é capaz de suportar uma explosão interna da mistura inflamável sem sofrer avarias ou deformações permanentes e sem transmitir a combustão à atmosfera envolvente por juntas ou aberturas. Tal é conseguido com uma carcaça muito robusta e com juntas longas e sinuosas estabelecendo o caminho entre o ambiente interior e o ambiente exterior.



Os fabricantes possuem um catálogo próprio para os motores antideflagrantes.



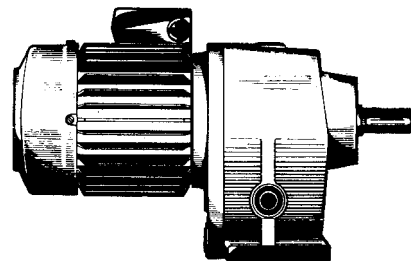
**motor de indução trifásico com duas velocidades** — nestes motores a regulação por escalões da velocidade resulta da alteração do número de pólos magnéticos ( $2p$ ) do enrolamento  $n = f/p$ , por comutação de ligações internas e externas. Constroem-se motores com dois enrolamentos estatóricos (2 velocidades), para a mesma tensão nominal, correspondentes a 4/6 pólos (1 500/1 000 rot/min) ou 6/8 pólos (1 000/750 rot/min). Constroem-se, também, motores com um único enrolamento estatórico (bobinagem Dahlander) para duas (ou mais) velocidades com uma razão de 1/2; razão de 2/4 pólos (3 000/1 500 rot/min) e 4/8 pólos (1 500/750 rot/min). Com este tipo de bobinagem o binário motor é, praticamente, constante nas duas velocidades.



Os fabricantes possuem um catálogo próprio para os motores com duas velocidades.

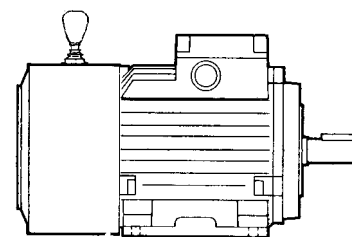
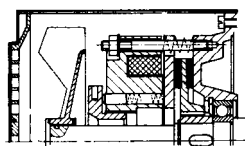
Existem outros tipos de motores de indução que resultam do acoplamento de um motor de indução trifásico a uma outra máquina, formando um conjunto compacto.

**moto-redutores** — são motores de indução trifásicos de rotor em curto-circuito directamente ligados a um redutor de velocidade de engrenagens cilíndricas de dentes rectos e helicoidais com um ou dois andares de engrenagens numa construção compacta. Normalmente o escalonamento de velocidades obedece a uma série (série de Renard de razão 20) com uma gama de velocidades de 18 a 630 rot/min. Possuem atravancamentos próprios. Os moto-redutores apresentam um rendimento global de 96% a 98%.



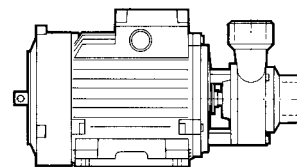
Os fabricantes possuem um catálogo próprio para os moto-redutores.

**motor freio** — é um motor de indução trifásico com um freio mecânico (disco de frenagem) acoplado. A actuação do freio é comandada por um electroímã de corrente contínua. Existe a possibilidade de desbloquear o freio manualmente.



Os fabricantes possuem um catálogo próprio para os motores freio, no qual é fornecido o valor do binário de frenagem (ou da relação  $T_f/T_n$ ), do momento de inércia e da potência eléctrica necessária para actuar o freio.

**electrobomba** — é um motor de indução trifásico ligado permanentemente a uma bomba hidráulica (horizontal, centrífuga, mono ou multicelular), formando um monobloco. A aspiração da bomba hidráulica é axial, enquanto que a descarga é radial. No caso das electrobombas para agricultura o caudal pode ter um valor até 70 m<sup>3</sup>/h, enquanto que a altura manométrica pode ter um valor até 50 m.



Os fabricantes possuem um catálogo próprio para as electrobombas com indicação do caudal e da altura manométrica em valor numérico ou como curvas características.

Estes diferentes tipos de motor de indução trifásico podem ser caracterizados de diferentes formas, correspondendo cada uma a um conjunto diferente de necessidades de conhecimento do projectista, ou do utilizador. Para um conhecimento dos valores assumidos pelas principais grandezas do motor é possível consultar:

**catálogo** — numa fase de projecto e de estudo os valores que interessam na selecção e aplicação de um motor de indução trifásico encontram-se no catálogo apresentado pelo fabricante da máquina. Embora o catálogo possa ter uma informação pormenorizada, ou ser meramente propagandístico, é habitual possuir informações sobre o valor das grandezas eléctricas (tensão nominal, intensidade de corrente nominal, factor de potência nominal e a relação entre a intensidade da corrente de arranque e a intensidade da corrente nominal), o valor das grandezas mecânicas (potência útil, velocidade de sincronismo e à plena carga, valor do binário máximo, da relação entre o binário de arranque e o binário nominal, valor da massa e do momento de inércia), e o valor das dimensões geométricas do motor (atravancamentos).



Os fabricantes ou os representantes da marca, através dos seus serviços comerciais, fornecem graciosamente, mas a pedido, um exemplar do catálogo.

**chapa de características** — fixada à carcaça do motor existe uma chapa de características onde estão indicadas em caracteres legíveis e indeléveis as principais características de funcionamento e de montagem da máquina, [NP-399].

TIPO	_____ M #4		
ISOL.	380 V	9,2 A	4 kW
CL. B			
rot/min	1430	50 Hz	COS φ 0,81
ROTOR	~~~~ V	~~~~ A	

Os dados mais importantes contidos na chapa de características são: nome do fabricante, tipo de máquina, natureza da corrente, forma de funcionamento, número da máquina, potência útil, tensão, intensidade de corrente, factor de potência, frequência e velocidade nominais; nos motores de rotor bobinado também é fornecido o valor da tensão rotórica em circuito aberto e da intensidade da

corrente rotórica nominal.

**boletim de ensaio** — durante o processo de desenvolvimento de um tipo de motor de indução trifásico existe uma fase em que um protótipo é submetido a um conjunto de ensaios tipo para verificação da concordância dos valores das suas características de funcionamento com os valores do projecto. Desse conjunto de ensaios resulta um relatório que contém um conjunto vasto de informação sobre o motor de indução submetido a ensaio. Os dados desse relatório podem servir como valores típicos de todos os motores daquele tipo posteriormente fabricados (!...). Por isso, mediante pedido justificado e tendo em consideração o cliente, o fabricante pode fornecer cópia dos dados contidos no *relatório de ensaio*.

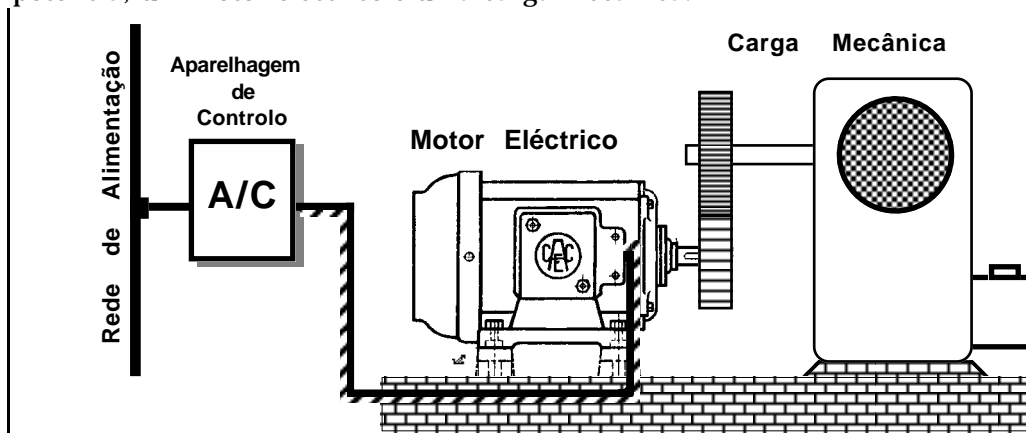
Entre esses dados estão os valores da resistência do enrolamento estatórico, ensaio em vazio, ensaio com o rotor travado e em curto-circuito, ensaio a tensão reduzida, ensaio em carga (5 valores) ensaio de aquecimento, determinação analítica das características de funcionamento (a partir dos valores de ensaio), ...



Os fabricantes ou os representantes da marca, através dos seus serviços técnicos, fornecem, em condições excepcionais, dados contidos no *relatório de ensaio* tipo.

### 3. *Sistemas de Accionamento com o Motor de Indução Trifásico*

O motor de indução trifásico tem grande aplicação num tipo de sistema electromecânico capaz de efectuar um processo controlado de conversão de energia eléctrica em energia mecânica — um *Sistema de Accionamento Electromecânico*. Este tipo de sistema tem como elementos constituintes, ou subsistemas: uma rede eléctrica de alimentação, um sistema de controlo de potência, um motor eléctrico e uma carga mecânica.



Os elementos do sistema de accionamento electromecânico, ou os subsistemas, podem ser constituídos por uma só unidade ou podem formar conjuntos complexos. Assim, a aparelhagem de controlo pode ser constituída por um conjunto de máquinas eléctricas, ou por um sistema de controlo de potência formado por um conversor electrónico e por um sistema digital de controlo ou de regulação; a carga mecânica pode ser uma unidade, por exemplo um ventilador, mas também pode ser um conjunto complexo de diferentes partes em movimento e integradas num processo produtivo complexo.

Na actualidade procura-se que um Sistema de Accionamento Electromecânico tenha as seguintes

características:

*precisão na actuação; baixo tempo de resposta; rendimento elevado; tamanho compacto; elevada fiabilidade em serviço; manutenção simples; instalação e exploração económicas.*

Como os diferentes elementos do sistema são interdependentes, e contribuem para as características globais de funcionamento do sistema, torna-se importante o seu comportamento dinâmico nos diversos tipos de regime de funcionamento que podem ser considerados para um Sistema de Accionamento Electromecânico com um motor de indução trifásico.

### 3.1 Dinâmica do Sistema

Quando o sistema electromecânico de conversão de energia está a funcionar com um motor de indução trifásico é-lhe fornecida energia eléctrica, a partir de uma fonte de alimentação. Uma parte (pequena) dessa energia eléctrica alimenta as perdas eléctricas e magnéticas no motor e outra parte é integralmente convertida em energia mecânica. Dessa energia mecânica uma parte (pequena) alimenta as perdas mecânicas do motor, outra parte (pequena) fica armazenada nas massas em movimento, e a parte restante (potência útil) fica disponível no veio da máquina.

A fonte de alimentação desempenha um papel importante no funcionamento do sistema electromecânico de conversão de energia. Para além de garantir a qualidade das características das grandezas eléctricas de alimentação (deverá assegurar um valor adequado da tensão de alimentação, da frequência da rede, e ter capacidade para fornecer a intensidade da corrente eléctrica solicitada pela máquina), hoje, através da alteração das características das grandezas eléctricas de alimentação do sistema electromecânico de conversão de energia, isto é, funcionando como *conversor electrónico de potência*, a fonte de alimentação pode promover o controlo de velocidade ou o controlo de posição do veio do motor.

A fonte de alimentação fornece ao motor eléctrico uma potência eléctrica total, que depois de alimentar as perdas eléctricas e magnéticas é integralmente convertida numa potência mecânica,  $P_{tr} = T_{el} \cdot \omega_r$ .

A potência transformada, depois de alimentar as perdas mecânicas, e de se acumular nas massas em movimento do sistema, apresenta-se no veio da máquina sob a forma de potência útil:  $P_u = T_m \cdot \omega_r = T_{res} \cdot \omega_r$ ; que será sempre igual à potência resistente solicitada pelo receptor mecânico (carga mecânica).

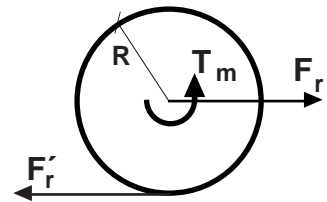
No processo de conversão de energia surgirá um binário motor que tenderá a vencer o binário solicitado pela carga: o *binário electromagnético*,  $T_{el}$ .

Desta forma a equação mecânica de equilíbrio, para um sistema electromecânico de conversão de energia funcionando com um motor de indução trifásico, a equação de movimento, desprezando a flexibilidade da ligação entre o motor e a carga, é:

$$T_{el} = \left( J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + D \cdot \omega_r \right) + T_m = \left( J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + D \cdot \omega_r \right) + T_{res}$$

Nestes sistemas electromecânicos de conversão de energia é frequente desprezar-se a influência do atrito e da flexibilidade da ligação face ao valor da influência da inércia.

Considerando um sistema mecânico (muito simples) formado por uma roda, que tem aplicada ao nível do eixo uma força  $F_r$ , o esforço resistente, para que o sistema se desloque terá de se desenvolver, ao nível do ponto de contacto com o solo, uma força tangente  $F_r' = F_r$ . Em movimento o sistema electromecânico de conversão de energia que actua sobre a roda deverá desenvolver um binário  $T_m = T_r = F_r \cdot R$ , em que  $R$  é o raio da roda.



Conforme o valor relativo do binário motor e do binário resistente, ou o valor da diferença dos dois  $T_d = T_m - T_r$  o binário dinâmico, assim a carga accionada tem o seguinte comportamento:

$T_m > T_r = F_r \cdot R$  — a carga mecânica acelera;

$T_m < T_r = F_r \cdot R$  — a carga mecânica desacelera;

$T_m = T_r = F_r \cdot R$  — a carga mecânica mantém uma velocidade constante.

Durante o accionamento da carga mecânica o motor de indução trifásico, se estiver a funcionar na parte estável da sua característica mecânica  $T(s)$ , irá acompanhar as mudanças de velocidade e de binário da carga  $T_{res}$ . Esta situação pode ser melhorada por uma judiciosa escolha do motor eléctrico, mas na actualidade, devido ás possibilidades do controlo numérico do conversor electrónico de potência dentro de uma estratégia de controlo adequada, é possível que um motor de indução trifásico controlado desempenhe essa função.

### 3.2 Funcionamento do Sistema de Accionamento Electromecânico

Em cada momento do tempo de funcionamento do sistema de accionamento electromecânico com motor de indução trifásico verifica-se que:  $T_m = T_{res}$ . Fica, assim, definido um ponto de funcionamento do sistema.

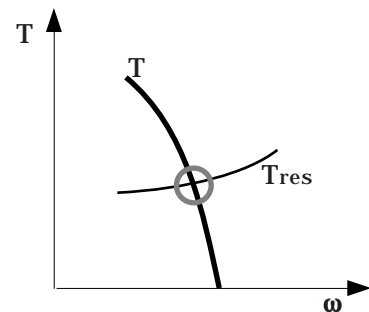
O ponto de funcionamento é caracterizado pelos valores  $T_m$ ,  $T_{res}$ ,  $\omega_r$ .

A equação do movimento (simplificada) para o sistema,

$$T = T_{res} + J \cdot (d\omega/dt)$$

fica reduzida à sua expressão em regime permanente,  $T = T_{res}$

(durante o qual não há armazenamentos nem libertações de energia nos elementos do sistema).



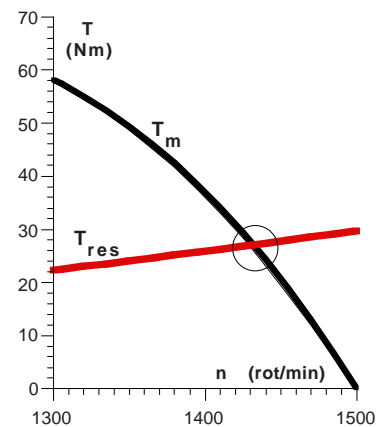
Exemplo\_3.1 — Uma carga mecânica tem uma característica  $T_{res}(n)$  dada pela expressão

$T_{res} = (1,316 \times 10^{-5}) \cdot n^2$  [Nm ; rot/min], onde está representada a acção de uma resistência aerodinâmica ao movimento da carga.

O motor eléctrico tem uma característica mecânica que na região de funcionamento estável pode ser aproximada por  $T_m = -1036,4 + 1,823 \cdot n - 0,000755 \cdot n^2$  [Nm ; rot/min].

O ponto de funcionamento, em regime permanente, é dado pela situação  $T_m = T_{res}$ , ou pelos valores

$$n = 1430 \text{ rot/min} \quad \text{e} \quad T_m = T_{res} = 27,1 \text{ Nm}$$

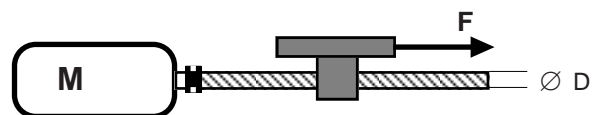


É aconselhável a aproximação da característica mecânica do motor  $T(n)$  por uma expressão analítica, dentro de um critério de aproximação matemática válido. Desta forma consegue-se uma maior facilidade no tratamento dos dados, quando os valores necessários não coincidem com os valores obtidos em ensaio.

Perante a equação diferencial de movimento do sistema de accionamento electromecânico existem duas atitudes de estudo: a primeira consiste em considerar a sua forma diferencial e promover a sua integração recorrendo aos métodos matemáticos mais aconselhados para a obtenção dos resultados pretendidos (métodos de transformação matemática, métodos de integração numérica); a segunda atitude, que é uma forma de estudo aproximada e sujeita a erros, consiste em considerar que o funcionamento do sistema é uma justaposição de estados em regime permanente (!..), desprezando-se os fenómenos que ocorrem na passagem de um ponto de funcionamento para outro...

Face aos modernos métodos de estudo e à disponibilidade de sistemas de computação poderosos, o estudo dinâmico de um sistema de accionamento electromecânico deve ser feito pelos métodos matemáticos apropriados. Qualquer estudo aproximado deve ser acompanhado de uma validação e de uma análise crítica profunda.

No comportamento dos sistemas de accionamento electromecânico só serão considerados sistemas de accionamento com movimento de rotação porque, apesar da



existência de motores de indução lineares, ou de actuadores electromagnéticos lineares, no sistemas de accionamento é normal o movimento linear ser obtido a partir de um motor eléctrico rotativo, por intermédio de um *parafuso-sem-fim*. A relação entre a força que se exerce na mesa e o binário solicitado ao motor é:  $F = (2\pi \cdot \text{eff})/L \cdot T$ , [N ; m , Nm]; em que *eff* é um parâmetro (= 0,9 ou = 0,3), *L* é o passo do parafuso em metros por revolução.

Normalmente, os sistemas de accionamento electromecânico animados de movimento de rotação têm uma estrutura complexa, o que faz com que diferentes partes do sistema estejam a rodar com velocidades diferentes e torna necessário utilizar caixas de engrenagens, ou outros sistemas mecânicos de variação da velocidade. Como, sob o ponto de vista electrotécnico todo o sistema de accionamento electromecânico está subordinado ao motor eléctrico, há que reduzir as diferentes grandezas mecânicas ao eixo do motor. Nessa redução utiliza-se o *Princípio da Conservação da Energia*.

Os binários podem ser referidos de um eixo a outro atendendo à conservação da energia no sistema. Pode-se considerar as perdas mecânicas do sistema de conversão de movimento, considerando o respectivo rendimento:  $(T_1 \cdot \omega_1) \eta_c = T_2 \cdot \omega_2$ , ou  $T_1 = T_2 \cdot (\omega_2 / \omega_1 \cdot \eta_c)$ . Considerando que  $r = (\omega_1 / \omega_2)$  é a *razão de redução*, então  $T_1 = (1/r \cdot \eta_c) \cdot T_2$ .

Quando existem vários (n) andares de redução, a expressão generaliza-se para:

$$T_1 = \left( \frac{1}{r_1 \cdot r_2 \cdot \dots \cdot r_n} \right) \cdot \left( \frac{1}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n} \right) \cdot T_n$$

O momento de inércia  $J_2$ , de uma massa animada de movimento de rotação, relativamente a um eixo também pode ser reduzido a um outro eixo, considerando que se conserva a energia cinética armazenada nas massas móveis,  $(1/2) \cdot J_1 \cdot \omega_1^2 = (1/2) \cdot J_2 \cdot \omega_2^2$ , ou generalizando a n massas móveis, o momento de inércia equivalente  $J$  reduzido ao eixo do motor é:

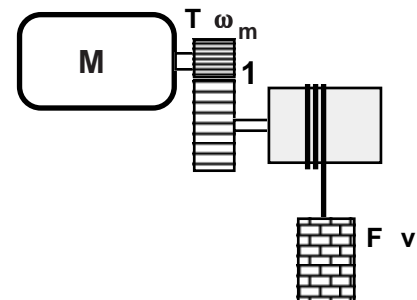
$$J = J_1 + \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \cdot J_2 + \dots + \left( \frac{\omega_n}{\omega_1} \right)^2 \cdot J_n = J_1 + \sum_i r_i^2 \cdot J_i$$

No sistema mecânico podem existir peças com um movimento de rotação associado ao movimento de translação do corpo.

No caso representado, uma carga animada da velocidade linear  $v$  é movimentada por uma máquina ligada a um motor eléctrico que roda com uma velocidade angular  $\omega_m$  através de um redutor de velocidade com o rendimento  $\eta_r$ . Nesta situação, a conservação da energia no sistema permite escrever a equação:  $F \cdot v = \eta_r \cdot (T \cdot \omega_m)$ . O binário de carga referido ao eixo do motor é:  $T = F \cdot v / (\eta_r \cdot \omega_m)$ . A força do sistema reduzida ao ponto de aplicação da carga é:  $F = \eta_r \cdot (T \cdot \omega_m) / v$ .

Quando existem peças em movimento de rotação, associado ao movimento de translação de um corpo, o *momento de inércia equivalente*  $J$  é obtido por:

$$J = J_1 + \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \cdot J_2 + \dots + \left( \frac{\omega_n}{\omega_1} \right)^2 \cdot J_n + M \cdot \left( \frac{v}{\omega_1} \right)^2$$



Exemplo\_3.2 — Com um sistema mecânico como o da figura pretende-se elevar uma carga com um peso de 9,81 kN com uma velocidade linear de  $v = 1$  m/s; a velocidade do motor deverá ser de  $n_m = 960$  rot/min e o rendimento do sistema  $\eta_1 = 85\%$ .

O binário de carga no veio do motor será dado, atendendo ao Princípio da Conservação da Energia:

$$T_m \cdot \omega_m = (T_{carg} \cdot \omega_m) \cdot \eta_1 = F \cdot v$$

substituindo,  $T_{carg} = (F \cdot v \cdot 60) / (2\pi \cdot n_m \cdot \eta_1)$ , ou  $T = (9810 \times 1 \times 60) / (2\pi \times 960 \times 0,85) = 114,82$  Nm

O motor de indução trifásico deverá ser capaz de accionar uma carga com uma velocidade de 960 rot/min e fornecendo um binário de 114,28 Nm. O motor deverá ter uma potência nominal de  $P = T \cdot \omega$ , ou  $P = 114,28 \times 2\pi \times 960 / 60 = 11,54$  kW. Uma consulta do catálogo permitia ver que não há um motor com essas características precisas ( $P ; n_m$ ), pelo que seria aconselhável rever o projecto: diminuir a velocidade do motor (alterando a engrenagem)  $n'_m = 955$  rot/min, e como a potência mecânica necessária continuava a ser a mesma  $P = 11,54$  kW, escolhia-se um motor com uma potência nominal de 11 kW [EFA-c ; BF5 160 L66], admitindo-se que nos (breves !) momentos em que o motor elevasse a carga, estaria a funcionar em *sobrecarga* ( $11,54/11 \approx 1,05$ ).

**Este exemplo permite alertar para um facto relevante na aplicação do motor de indução trifásico em particular, ou das máquinas eléctricas em geral: os valores nominais não são valores**

**limites absolutos**, que ultrapassados colocariam imediatamente em perigo a existência da máquina eléctrica.

Mas na selecção e aplicação do motor de indução trifásico existem, ainda, outros aspectos do funcionamento do sistema de accionamento electromecânico que são importantes. Trata-se de situações de funcionamento transitório — *arranque*, *frenagem* — em que são, naturalmente, criadas fortes restrições ao dimensionamento dos elementos constituintes do sistema.

Durante o *arranque* o motor de indução trifásico tem de vencer o atrito e algumas perdas de energia (ventilação) para levar o motor com a carga mecânica ligada à velocidade de regime  $n_r$ . É, por isso, necessário que o motor forneça um binário de arranque compatível (superior) ao binário resistente apresentado pela carga mecânica na fase de arranque. Como, o binário desenvolvido pelo motor condiciona a intensidade de corrente eléctrica absorvida, torna-se necessário que esta situação de arranque não seja causa de problemas eléctricos na instalação eléctrica de alimentação do motor (quedas de tensão exageradas).

Ⓒ No catálogo de motores de indução trifásicos são dadas informações sobre a situação de arranque, tanto *mecânicas* — como a relação entre o binário de arranque e o binário nominal ( $T_a/T_n = B_a/B_n$ ), como *eléctricas* — relação entre a corrente de arranque e a corrente nominal ( $I_a/I_n$ ), quer no arranque directo quer no arranque estrela-triângulo. Por exemplo:

[EFA-c ; BF3 315 MA82] arranque directo  $\rightarrow T_a/T_n = B_a/B_n = 2,3$  e  $I_a/I_n = 8$

[EFA-c ; BF3 315 MA82] arranque estrela-triângulo  $\rightarrow T_a/T_n = B_a/B_n = 0,66$  e  $I_a/I_n = 2,2$

Mas para a aplicação do motor de indução trifásico também pode ser importante uma análise expedita do comportamento dinâmico do motor, principalmente a determinação do tempo de duração de determinadas situações de funcionamento: arranque, frenagem...

Nestas situações simples o problema tem, também, um tratamento simples. Assim, definida a situação da carga mecânica e reduzidos os seus parâmetros — momento de inércia  $J$  e coeficiente de atrito  $D$  — ao veio do motor, resta apenas efectuar operações simples para o cálculo do tempo de duração de algumas situações.

Numa situação em que se possa desprezar o valor do binário de atrito da carga face ao valor do binário de inércia e ao valor do binário resistente, a equação de movimento do sistema é dada por:

$$T_{el} = T_{res} + J \cdot (d\omega_r/dt) = T_{res} + (2\pi/60) \cdot J \cdot (dn_r/dt)$$

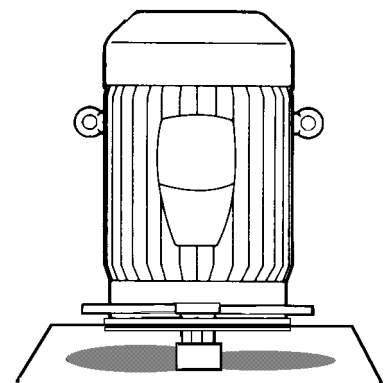
nessa situação,

$$t = J \cdot \int_{n_1}^{n_2} \left( \frac{k \cdot dn}{T_{el} - T_{res}} \right) \quad \text{com } k = (\pi/30)$$

Esta expressão só pode ser integrada quando a lei de variação do binário com a velocidade é conhecida sob uma forma analítica.

Quando apenas são conhecidos valores da relação entre o binário e a velocidade, pode-se construir um gráfico de variação e promover a *integração gráfica* daquela equação (foi um método com grande utilização no passado!). No entanto, desde que sejam conhecidos valores numéricos da função de variação do binário com a velocidade é possível utilizar métodos de integração numérica na obtenção do tempo necessário para a velocidade passar do valor  $n_1$  ao valor  $n_2$ .

Procurando-se um *valor aproximado* para o tempo de arranque (**Método Expedito**), o que





pode ser necessário conhecer para graduar as protecções da máquina eléctrica, recorre-se a uma expressão aproximada resultante da anterior,

$$\Delta t = J \cdot \left( \frac{k \cdot n_a}{T_{am} - T_{res}} \right) \text{ {s}}$$

em que  $T_{am}$  é o *binário médio de arranque* do motor que nos motores de indução trifásicos tem o valor  $T_{am} = (T_{max} + T_a) / 2$  (em que  $T_a$  é o binário de arranque).

Quando no arranque o motor não acciona uma carga, será:  $\Delta t = J \cdot \left( \frac{k \cdot n_a}{T_{am}} \right) \text{ {s}}$ .

Note-se que no momento de inércia  $J$  está contido o momento de inércia (reduzida) da carga mecânica.



No catálogo do motor de indução trifásico é fornecida informação sobre o valor do momento de inércia  $J$  {kg·m<sup>2</sup>} do motor.

[EFA-c ; BF3 315 MA82] momento de inércia  $\rightarrow J = 2,2 \text{ kgm}^2$  e massa  $\rightarrow M = 1160 \text{ kg}$

Exemplo\_3.3 — Um motor de indução trifásico tem as seguintes características de catálogo [EFA-c]: BF5 160 M66:  $P_n = 7,5 \text{ kW}$ ;  $n_n = 960 \text{ rot/min}$ ;  $T_a/T_n = 2,2$ ;  $T_{max}/T_n = 2,3$ . O motor é acelerado sem carga até à velocidade nominal, com um binário resistente constante  $T_{res} = 17,7 \text{ Nm}$  e um momento de inércia de  $J = (0,07 + 3,355) \text{ kgm}^2$ , e uma massa de 75 kg.

O binário nominal do motor é  $T_n = P_n / ((2\pi/60) \cdot n_n)$  ou  $T_n = 7500 / (0,105 \times 960) = 74,6 \text{ Nm}$

O binário inicial de arranque é:  $T_a = 2,2 \times 74,6 = 164,1 \text{ Nm}$

O binário máximo é:  $T_{max} = 2,3 \times 74,6 = 171,6 \text{ Nm}$

O *binário médio de arranque* é dado por:  $T_{am} = (171,6 + 164,1) / 2 = 167,8 \text{ Nm}$

O tempo de arranque será:  $\Delta t = 3,425 \times \left( \frac{(2\pi/60) \times 960}{167,8 - 17,7} \right) = 2,3 \text{ s}$

Também o processo de *frenagem*, quando se desliga o motor da alimentação e o motor desacelera devido ao binário de frenagem do equipamento, pode ser estudado de uma forma expedita.

Quando o motor está a rodar com a velocidade  $n_r$ , com um binário de carga  $T_{carga}$ , e é desligado da alimentação — a energia armazenada nos diversos campos será libertada — e o tempo de frenagem (tempo que demora o motor a parar) é:  $\Delta t = J \cdot \left( \frac{k \cdot n_r}{T_{carga}} \right) \text{ {s}}$ .

Se na frenagem for utilizado um qualquer meio auxiliar (freio mecânico de calços) que provoque um binário de frenagem  $T_f$ , então o tempo de frenagem é:

$$\Delta t = J \cdot \left( \frac{k \cdot n_a}{T_{carga} + T_f} \right) \text{ {s}}.$$

Convém ter presente que durante o arranque em que a intensidade de corrente eléctrica é superior ao valor nominal, as perdas de energia no motor são elevadas, e por isso é grande a quantidade de calor libertada e que é necessário retirar do motor, por arrefecimento. Também durante a frenagem, a energia cinética armazenada no sistema é convertida em calor, por atrito nos calços, sendo necessário prever a existência de sistemas de arrefecimento do freio.

Esta situação de aquecimento condiciona a *frequência* com que as manobras de arranque, ou de frenagem, se podem repetir.

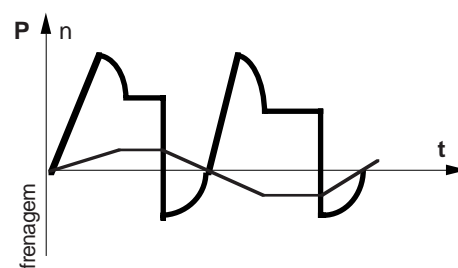
### 3.3 Tipos de Serviço

Na selecção e aplicação de um motor de indução trifásico é importante o conhecimento do trabalho que o motor vai executar. Com esse conhecimento é possível escolher um motor com características nominais que permitem uma exploração económica do sistema de accionamento electromecânico.

Para caracterizar o trabalho que um motor tem de executar utiliza-se o conceito de *serviço* — uma estipulação do regime de funcionamento, compreendendo os períodos de funcionamento e de repouso, a sua duração e a sua ordem de sucessão no tempo.

A indicação do serviço de um motor de indução trifásico pode ser dada numericamente ou por um diagrama — *Diagrama de Cargas*. Para o motor de indução trifásico o diagrama de cargas pode ser um curva representativa da variação da potência absorvida da rede com o tempo  $P = P(t)$ , ou da variação do binário com o tempo  $T = T(t)$ .

Exemplo\_3.4 — Um motor que acciona uma máquina de apertar parafusos apresenta o seguinte diagrama de cargas: rotação no sentido directo:  $t_d = 30$  s,  $P_d = 4,5$  kW; no sentido inverso:  $t_i = 35$  s,  $P_i = 3,5$  kW; o motor inverte o sentido de rotação duas vezes em cada ciclo.



Existem classificações de serviço normalizadas. No caso de CEI-34.1, são caracterizados oito tipos de serviço (S1 a S8), [CEI-34.1].

**Serviço contínuo (S1)** — serviço que consiste num funcionamento em regime constante com uma duração suficiente para que o equilíbrio térmico seja atingido.

...

**Serviço intermitente periódico com arranque (S4)** — serviço composto de uma série de ciclos idênticos compreendendo cada um, um tempo apreciável de arranque, um tempo de funcionamento em regime constante e um tempo de repouso.

Outras normas internacionais servem-se de outros critérios para definir o serviço. De uma forma geral, mas simples, pode-se classificar o serviço em: *serviço contínuo*, *serviço breve*, e *serviço intermitente periódico*.

Para cada tipo de serviço o motor seleccionado deve corresponder ao diagrama de cargas do serviço e deve trabalhar sem um aquecimento exagerado.

Devido às perdas de energia associadas ao funcionamento do motor de indução trifásico (perdas de energia eléctrica e magnética e perdas de energia mecânica) que se traduzem por uma degradação de energia em calor, durante o funcionamento do motor há um aumento da sua temperatura. Este aumento é caracterizado através do aquecimento do motor.

#### *Aquecimento do Motor Eléctrico*

O estudo do aquecimento do motor de indução trifásico para efeitos de selecção e aplicação de um motor já construído é feito de uma forma *aproximada*: considera-se que o motor é um bloco de material homogéneo.

Considerando:  $Q$  — a quantidade de calor desenvolvido no motor (devido às perdas de energia) na unidade de tempo {joule/s};  $C$  — a capacidade térmica do “material” do motor, é a quantidade de calor necessário para aumentar a temperatura do motor de  $1$  °C, {joule/°C};  $A$  — coeficiente de transmissão térmica do motor {joule/s°C};  $\Delta T$  — aquecimento, aumento da temperatura acima da temperatura

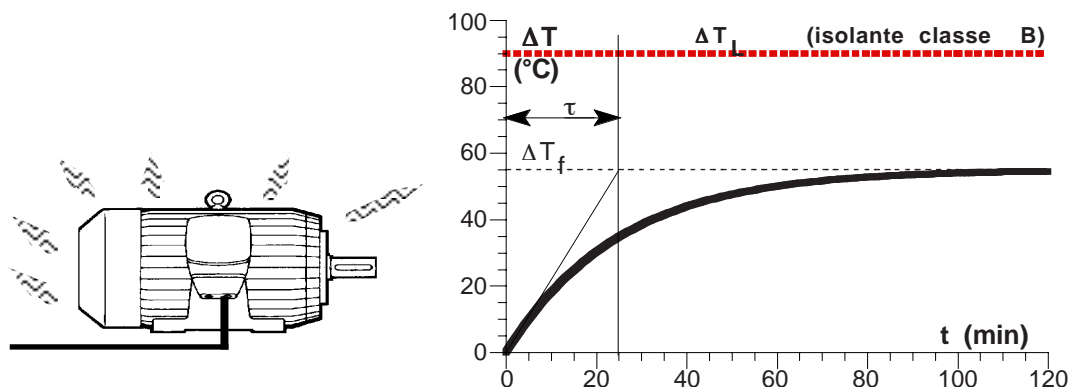
ambiente  $\Delta T = T_m - T_{amb}$ , {°C}.

A equação de equilíbrio térmico é:  $Q \cdot dt = A \cdot \Delta T \cdot dt + C \cdot d\Delta T$

O aquecimento do motor pode ser caracterizado pelo aumento de temperatura acima da temperatura ambiente em função do tempo  $\Delta T = \Delta T(t)$ . Integrando a equação de equilíbrio térmico, com condições iniciais  $t = 0 \rightarrow \Delta T = \Delta T_0$ , e definindo  $\Delta T_f$  como o aquecimento final  $\Delta T_f = Q/A$  (depende das perdas de energia), e  $\tau$  como constante térmica de tempo do motor  $\tau = C/A$ , resulta:

$$\Delta T = \Delta T_f - ((\Delta T_f - \Delta T_0) \cdot \exp(-t/\tau))$$

que no caso do motor estar em repouso e à temperatura ambiente no instante inicial,  $t = 0 \rightarrow \Delta T = \Delta T_0 = 0$ , toma a forma:  $\Delta T = \Delta T_f(1 - \exp(-t/\tau))$ .



A curva característica do *arrefecimento* do motor resulta da expressão geral, considerando que  $\Delta T_f = 0$  °C e que  $\Delta T_0 = \Delta T_f$ :  $\Delta T = \Delta T_f \cdot \exp(-t/\tau)$ .

Qualquer aumento da carga do motor de indução trifásico traduz-se por um aumento das perdas de energia, e portanto da quantidade de calor libertada, o que aumenta o valor do aquecimento final  $\Delta T_f = Q/A$ , e um decréscimo da carga reduz as perdas de energia e provoca o arrefecimento do motor.

Num serviço com carga variável a temperatura do motor varia (mas não de um modo instantâneo) com as variações da carga.

O estudo do aquecimento do motor, suposto constituído por um material homogéneo, permite verificar que aumentando a carga do motor a sua temperatura aumenta. Todos os materiais do motor vão estar submetidos à nova temperatura de equilíbrio atingida pelo motor, e alguns, materiais, como os materiais sintéticos dos isolantes, são submetidos a um forte tensão térmica. Essa tensão provoca o envelhecimento dos isolantes, e a diminuição do tempo de vida útil do motor, mas se o aquecimento for exagerado (superior à temperatura máxima que os isolantes podem suportar  $T_L$ ) provoca a rotura do isolamento e a consequente avaria do motor.

Para dar uma informação sobre o aquecimento ( $\Delta T = T_{isol} - T_{amb}$ ) que podem suportar, as matérias isolantes estão agrupadas em *classes de isolamento*, que são designadas por letras maiúsculas do alfabeto latino, [CEI-85].

Classificação das Matérias Isolantes

classe	matéria isolante	matérias de impregnação que podem ser utilizadas no tratamento do conjunto isolado	temperatura limite $T_L$
A	algodão, seda, papel, madeira, borracha	verniz à base de resina natural, goma laca, e outras resinas naturais	105 °C
E	esmaltes ou resinas para fios	verniz à base de asfalto e resinas sintéticas	120 °C
B	tecidos de vidro, amianto, mica	asfalto e resinas sintéticas com óleo, resinas epoxy	130 °C

F	tecidos de vidro, amianto impregnado, mica aglomerada	resinas com estabilidade térmica elevada	155 °C
H	fibra de vidro, amianto, mica aglomerada	resinas selicones seleccionadas	180 °C
C	vidro, quartzo, porcelana	ligantes inorgânicos como vidro e cimento	> 180 °C

Ⓒ O catálogo do fabricante de motores de indução trifásicos informa que a classe de isolamento é **F**; antes utilizavam-se materiais da classe de isolamento **B**.

Do estudo do aquecimento verifica-se que um motor de indução trifásico é construído para trabalhar de uma forma, ou com uma carga, que não coloca em risco os isolantes do motor devido ao aquecimento provocado pelas perdas de energia quando o motor acciona a dita carga. São, dessa forma definidos os valores nominais.

Mas o motor pode funcionar em sobrecarga, uma carga que provoca perdas de energia que provocam um aquecimento maior e que provocará a subida da temperatura do motor. Mas, durante o tempo em que a temperatura é inferior à temperatura limite dos isolantes  $T_L$ , o motor pode funcionar.

Um motor de indução trifásico pode funcionar em sobrecarga durante intervalos de tempo limitados, e com uma duração que depende da amplitude da sobrecarga e dos materiais utilizados na sua construção.

Justifica-se, desta forma, uma anterior declaração de que os valores nominais das grandezas características não são valores limites absolutos; isto é, que não podem ser ultrapassados.

Pela importância que o aquecimento tem na esperança de vida de um motor de indução trifásico justifica-se a consideração dos problemas de aquecimento na selecção e na aplicação do motor. Na maioria dos casos, os motores são seleccionados com base no seu aquecimento, e a selecção é confirmada pela sua capacidade de sobrecarga.

### 3.4 Consumo de Energia e Análise Económica

O motor de indução trifásico como unidade conversora de energia consome energia eléctrica que tem um custo. A energia eléctrica consumida pelo motor, tanto em energia útil como em energia de perdas, tem de ser contabilizada quando se pretende efectuar uma análise económica da aplicação do motor.

Como o motor de indução trifásico é uma máquina eléctrica de corrente alternada com um só circuito alimentado, necessita de energia reactiva para criar e manter o campo magnético necessário ao seu funcionamento. Tal energia também é contabilizada, e de uma forma própria [EDP-t.94], é-lhe atribuído um custo.

Considerando que um motor de indução trifásico desempenha um serviço com um determinado diagrama de cargas  $P_u(t)$ , é possível determinar a energia consumida pelo motor para efectuar esse serviço,

$$W_u = \int_0^T P_u(t) dt$$

Como essa energia tem um custo  $C_w\$$ , que depende muito das condições em que é fornecida

(escalão de tensão, hora do dia, condições contratuais, [EDP-t.94]), é possível determinar o encargo com a energia utilizada no accionamento da carga:  $E_w = W_u \cdot Cw\$$ .

Mas para o motor de indução trifásico têm de existir perdas de energia que se traduzem por uma energia de perdas, que inclui as perdas de energia constante  $p_0$  (independentes do regime de carga) e as perdas de energia variáveis (com uma potência proporcional ao quadrado da intensidade de corrente eléctrica absorvida)  $kI^2$ ,

$$W_p = (p_0 + kI^2) \cdot T$$

Também esta potência de perdas têm um custo:  $E_{wp} = [(p_0 + kI^2) \cdot T] \cdot Cw\$$ .

A utilização do motor de indução trifásico traduz-se por um encargo de energia activa,  $E_{wa} = E_w + E_{wp}$ , a que em muitos casos é necessário acrescentar um encargo de energia reactiva  $E_q$ , cujo valor depende do preço da energia reactiva  $Cq\$$  e das condições de aplicação da respectiva tarifa. Surge, assim, um encargo com a energia:  $E_e = E_w + E_{wp} \pm E_q$ .

Na análise económica de uma aplicação do motor de indução trifásico é necessário conhecer o encargo com a respectiva aquisição. Se o motor tiver um custo  $CS$ , e o encargo com esse capital for devido a um juro  $j$  e a uma taxa de amortização  $a$ , então o encargo de aquisição do motor é:  $E_{cap} = CS + (j + a) \cdot CS$ .

O encargo total, no período  $T$ , com o motor será dado por:  $E = E_{cap} + E_e$ .

Exemplo\_3.5 — (1994) No accionamento de uma máquina ferramenta adoptou-se um motor de indução trifásico de baixa tensão,  $P_n = 4 \text{ kW}$ ,  $n_n = 1410 \text{ rot/min}$ , [EFA-c ; BF5 112 M44]. A máquina tem o seguinte diagrama de cargas:

- 20 min a 3/4 da carga
- 10 min à plena carga
- 20 min a meia carga
- 10 min a 5/4 de carga (sobrecarga de 25%)

A energia útil consumida pelo motor numa hora é,  $E_w = P_n \cdot (\sum_j f_c \cdot T_j)$ :

$$W_u = P_n \cdot ((3/4) \times 20 + (4/4) \times 10 + (2/4) \times 20 + (5/4) \times 10) \times (1/60) = 3,167 \text{ kWh}$$

A energia de perdas consumida pelo motor numa hora á dada por:

$$W_p = P_n \cdot (\sum_j (1 - \eta_j / \eta_j) \cdot T_j)$$

$$W_p = (P_n \cdot ((1 - 0,82/0,82) \times (20+10) + (1 - 0,81/0,81) \times (20+10))) \times (1/60) = 0,909 \text{ kWh}$$

Na determinação da potência de perdas para a situação de 5/4 da carga, de que não há informação no catálogo, *estimou-se* o valor do rendimento do motor  $\eta_{5/4} = 81\%$ .

O motor funciona durante 176 horas por mês,  $8 \times (30 - 8)$  horas.

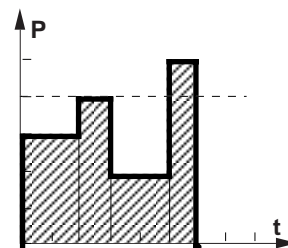
A energia activa consumida mensalmente pelo motor é:

$$W_e = (W_u + W_p) \times 176, \text{ ou } W_e = (3,167 + 0,909) \times 176 = 717,376 \text{ kWh}$$

Considerando (apenas) o preço da energia eléctrica (activa) em baixa tensão ( $> 19,8 \text{ kVA}$ )  $Cw\$ = 18\$47$ , o encargo com a energia activa é:

$$E_e = 717,399 \times 18\$47 = 13249\$90$$

A determinação do encargo com energia reactiva necessitava de conhecimentos sobre a instalação eléctrica em que se inseria o motor de indução trifásico e dos respectivos consumos. Se, por exemplo, o fornecimento da energia fosse em Média Tensão, com uma potência contratada de 315 kW, em que no mês



em análise o consumo de potência activa foi de 70198 kW, e o consumo de energia reactiva foi de 42524 kvar, como a  $\text{tg } \varphi = 42524/70198 = 0,606$ , há uma parte da energia reactiva que excede o valor correspondente a  $\text{tg } \varphi = 0,4$ ; ou  $(42524 - 28079,2)$  kvar que teriam de ser pagos ao preço de  $Cq\$ = 3\$00$ . Tinha de se analisar, atendendo à instalação de utilização de energia eléctrica, qual a parte da energia reactiva efectivamente paga que correspondia ao motor de indução trifásico.

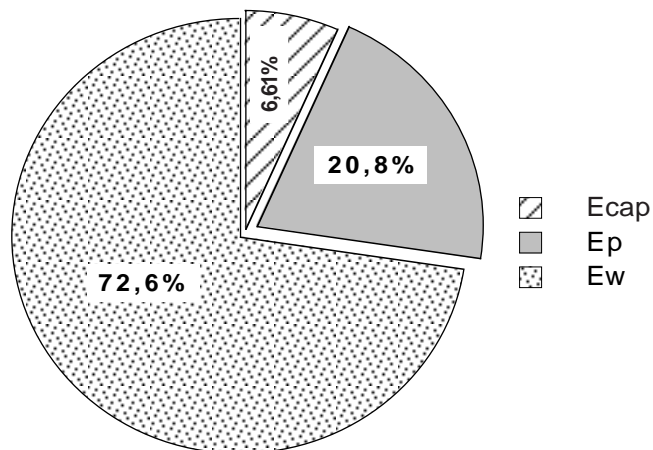
Para determinar o encargo com capital devido à aquisição do motor de indução trifásico, tinha-se de atender a que o seu custo é de  $C\$ = 45000\$00$ , o juro cobrado pelo banco que emprestou esse capital é de  $j\% = 15\%$ , e presume-se que a máquina ferramenta terá uma duração de 10 anos, ou que a taxa de amortização é de 10%. Assim o encargo anual com o capital do motor é de  $(0,15+0,1) \times 45 \text{ k\$} = 11250\$00$ , e o encargo mensal

$$E_{cap} = 11250\$00/12 = 937\$50.$$

O encargo total mensal com o motor de indução trifásico é superior a:

$$E = E_{cap} + E_e$$

$$\text{ou } E = 13002\$90 + 937\$50 = 13940\$40$$



Estes estudos de análise económica, aqui apenas apresentados, têm grande importância, na justificação do resultado da escolha entre dois motores com características construtivas (perdas de energia) diferentes e oferecidos em condições de comercialização diferentes.

### 3.5 Manutenção

Uma das vantagens da aplicação do motor de indução trifásico é o seu carácter robusto, que exige uma pequena manutenção, mesmo com condições ambientais adversas.

Os motores para potências mais elevadas, o que o fabricante caracteriza pela altura de eixo H, têm necessidade de ser lubrificados, mas os outros motores não têm prevista qualquer operação de lubrificação dos rolamentos.

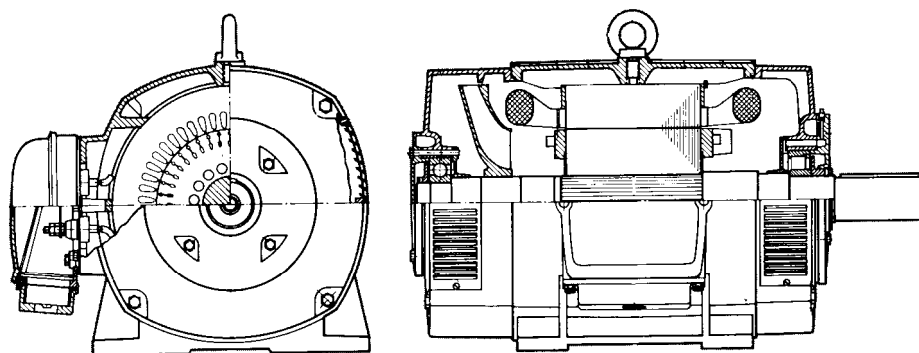
Aspectos de Manutenção do Motor de Indução Trifásico

Aspectos de Manutenção do Motor de Indução Trifásico	
<b>Circuito Eléctrico</b>	
estator	rebobinar, verificação da resistência de isolamento, verificação do posicionamento, das amarrações, e da forma das bobinas; efeito coroa
rotor	problemas iniciais de fabrico (muito robusto); verificação da forma axial do enrolamento
rotor bobinado	desgaste no contacto anéis-escovas: verificação dos anéis de curto-circuito
<b>Circuito Magnético</b>	

estator e rotor	mecanicamente robusto: problemas causados por avarias eléctricas: verificação dos isolamentos entre chapas, dos empacotamentos e das sustentações mecânicas; controlo das vibrações
<b>Orgãos Mecânicos</b>	
diferentes peças	são substituíveis
mancais rolamento	sem lubrificação na gama baixa
mancais de escorregamento	problemas de desgaste nos mancais
ventilação	verificação e desobstrução dos canais de ventilação

Em situação de avaria é possível substituir as diferentes peças componentes do motor de indução trifásico, assim como promover a sua rebobinagem.

Assim, para além dos devidos cuidados na instalação do motor e de revisões periódicas durante o funcionamento, integradas nas operações globais de manutenção preventiva, não são necessários cuidados maiores com um motor de indução trifásico bem aplicado e explorado nas condições de segurança regulamentares.



Motor de Indução Trifásico (AEG)

## 4. Selecção e Aplicação do Motor de Indução Trifásico

No accionamento de uma carga mecânica é utilizado o motor de indução trifásico porque apresenta um elevado rendimento na conversão de energia eléctrica em energia mecânica, e porque, actualmente, tem excelentes possibilidades de se adaptar às características requeridas pelo accionamento.

Para que o motor adoptado corresponda às necessidades do accionamento com o menor custo, torna-se necessário uma *selecção* cuidada do motor e uma conveniente *aplicação* na perspectiva global do sistema de accionamento electromecânico.

Todo o processo de selecção e aplicação do motor de indução trifásico é um processo de *projecto de um sistema electromecânico* que envolve a utilização de princípios científicos, de critérios de análise e de síntese, de capacidades criativas e de técnicas de decisão, conjuntamente com a utilização de factores humanos, de desenvolvimento, tecnológicos e de mercado, na definição de um produto (sistema de accionamento electromecânico) capaz de desempenhar a sua função com o máximo rendimento e com elevada economia.

### 4.1 Selecção e Aplicação

Na selecção de um motor de indução trifásico cada caso deve ser estudado individualmente, com a utilização cuidada e crítica de diversos *factores de selecção*.

análise da carga mecânica

Uma análise global da *carga mecânica* a accionar deve permitir a definição do número de motores que serão utilizados no accionamento global da carga. Evita-se o accionamento centralizado por um só motor, que apresentando economias no investimento inicial com a instalação, apresenta maiores dificuldades no controlo do accionamento e das suas diferentes partes activas. A localização de cada motor perto da carga mecânica accionada permitirá uma maior segurança e permitirá uma melhor exploração do sistema.

•

*a consulta de um diagrama completo da máquina accionada permite definir o número e a localização dos motores eléctricos.*

A definição da *potência mecânica* necessária é feita a partir do binário máximo de carga e da velocidade de accionamento:  $P = T \cdot \omega$ .

•

*o valor do binário máximo requerido pela carga deverá ser calculado através da análise cinemática global dos órgãos da máquina mediante a consulta dos manuais respectivos.*

•

*o valor da velocidade de accionamento resulta da determinação do valor mais conveniente de accionamento da carga, dum conhecimento das velocidades nominais do motor de indução trifásico (C), e da possível utilização de um redutor.*

•

*a forma de variação da velocidade de accionamento (gama estreita ou gama larga) p*



*ode obrigar à adopção dos modernos sistemas de controlo de potência (alimentação com variação de frequência) capazes de controlarem a velocidade do motor dentro de uma estratégia de controlo complexa.*

É importante determinar o binário de arranque necessário para pôr a carga mecânica em movimento, e que terá de ser fornecido pelo motor de indução trifásico:  $T_a$ .



*é necessário uma análise do comportamento da carga mecânica no arranque, e confrontar o projecto com a análise do comportamento de outras máquinas já em serviço.*

A forma de apoio dos veios e a sua posição no espaço, assim como a forma de transmissão do movimento condicionam a existência de esforços mecânicos radiais nos mancais e condicionam o tipo de rolamento a utilizar.



*torna-se necessário conhecer todos os esforços na zona dos mancais para uma correcta selecção do motor.*

A caracterização do tipo de serviço resulta de uma análise do processo produtivo que a máquina accionada executa. É importante definir o diagrama de cargas, dimensionar-se o tempo de aceleração, o tempo de desaceleração, a variação do binário em função da velocidade, o funcionamento em sobrecarga, o tipo de alteração da velocidade (rápido ou lento), etc...



*é necessário verificar se a carga mecânica é aplicada continuamente ou de uma forma intermitente; com uma carga intermitente há que dimensionar correctamente o diagrama de cargas; há que definir o coeficiente de sobrecarga; há que definir o comportamento da velocidade durante o processo (constante ou variável).*

Depois desta análise, existe informação sobre a potência mecânica da carga, o binário máximo, o binário de arranque e a variação do binário no tempo, sobre a velocidade e o seu comportamento, e sobre a dinâmica global da carga mecânica.

#### definição da instalação de alimentação

As características da instalação de utilização de energia eléctrica — tipo de corrente, tensão, frequência, potência de curto-circuito, factor de potência global — são importantes na selecção do motor, no método de arranque e na aparelhagem auxiliar, porque o tipo de motor já se encontra definido (motor de indução trifásico).



*o tipo de corrente da instalação de utilização de energia eléctrica encontra-se definido pela utilização do motor de indução — corrente alternada trifásica (☺), embora se seja possível admitir a utilização de conversores electrónicos de potência corrente alterna da-corrente alternada (AC/AC) ou corrente contínua-corrente alternada (DC/AC) em casos especiais.*



*o valor do escalão da tensão de alimentação (baixa tensão, alta tensão) depende da situação de arranque do motor e dos seus efeitos sobre a instalação eléctrica.*



*se a potência de curto-circuito da instalação não for suficiente, pode ocorrer uma queda de tensão elevada, que deteriore o funcionamento de outros aparelhos eléctricos.*



*o valor do factor de potência global da instalação pode ser prejudicado pela utilização do motor de indução trifásico, que no seu funcionamento contribui para a deterioração do seu valor. Poderá existir a necessidade de instalar um sistema de correcção do factor de potência (banco de condensadores, ...).*

Depois desta análise ficam definidas as características da rede eléctrica de alimentação do motor e a influência do funcionamento do motor sobre essa rede eléctrica. Esta definição permite um dimensionamento correcto das secções dos condutores da instalação de alimentação, assim como da aparelhagem de protecção, e da aparelhagem de medida.

#### definição do ambiente físico

A definição do *ambiente físico* permitirá estabelecer as condições ambientais de funcionamento do motor.

As condições ambientais englobam o conjunto de parâmetros físicos que condicionam as características de funcionamento ou os aspectos construtivos do motor de indução trifásico: temperatura ambiental ( $\leq 40^\circ\text{C}$ ), altitude ( $< 1000$  m acima do mar), humidade (respingos, nevoeiro, jacto de água), atmosfera (neutra, corrosiva, inflamável, explosiva...), ruído ambiental, ...

- ⊕ *a definição do ambiente físico permite seleccionar o tipo construtivo do motor (C\*) e verificar a alteração da suas características de funcionamento nominais (C) como resultado da desclassificação imposta pelas normas de projecto dos motores eléctricos.*

Depois desta análise ficam definidos os aspectos construtivos que o motor deverá possuir para poder trabalhar cabalmente nas condições ambientais existentes.

#### escolha do motor

Depois de definidos um conjunto de parâmetros que permitem caracterizar as condições de funcionamento que o motor terá de satisfazer, alguns dos quais não são quantificáveis mas meramente qualitativos, há que definir o catálogo de material a consultar (C) devido à tendência dos fabricantes para apresentarem catálogos específicos de cada tipo de motor.



*a consulta do catálogo (C) consistirá na procura do motor tipo com características que satisfazem as exigências do accionamento da carga mecânica, na verificação das condicionantes do serviço da carga mecânica e das condicionantes de serviço do motor, e na detecção de condições especiais de funcionamento impostas pelo fabricante do motor e que poderão ter influência no funcionamento ou na instalação do sistema de accionamento electromecânico.*



*a consulta do catálogo (C) permite verificar a pouca influência adversa do motor de indução trifásico sobre o ambiente em que se integra (ruído, vibrações, ...).*

Depois de escolhido um motor tipo, caracterizado por uma qualquer sigla própria do fabricante,

há que *reverificar* os factores de selecção adoptados, devido à quase impossibilidade de coincidência das características do motor de fabrico estandardizado com as necessidades da carga mecânica e as condições ambientais.

#### aplicação do motor

Caracterizado, através dos dados do catálogo ou de outros dados, o motor tipo escolhido é necessário definir e analisar as condições de aplicação do motor: posição do veio, ligação à carga mecânica, acessórios especiais, montagem do conjunto motor-carga mecânica; necessidades de manutenção, formas de condução da máquina, ...



*a aplicação do motor exige o projecto da instalação do motor (maciços, fixação, carris tensores), a definição da forma de instalação do motor (posição do veio, ligação à carga), a enumeração dos acessórios especiais (tambores, correias, união, redutores, travão, arrancador, ...), as diversas ligações da instalação eléctrica, incluindo a terra de protecção, e o estabelecimento das regras a seguir pelo pessoal especializado na condução do motor (dentro dos critérios de segurança), e na sua manutenção (dentro dos mais modernos conceitos).*



*a aplicação do motor impõe uma análise económica da situação real de exploração numa reverificação dos critérios de projecto do sistema: “máximo rendimento e elevada economia”.*

## 4.2 Selecção e Serviço

O tipo de serviço de um motor de indução trifásico condiciona a sua selecção. Apesar das diferentes características dos diversos tipos de serviços existentes é possível estabelecer alguns métodos de definição da potência nominal do motor a seleccionar.

Na maioria dos casos, os motores são seleccionados com base no seu aquecimento, e a selecção é confirmada pela sua capacidade de sobrecarga.

A confirmação da capacidade de sobrecarga do motor de indução trifásico consiste em verificar se o binário nominal do motor satisfaz a condição,

$$\text{coeficiente de sobrecarga} \quad (T_{\max}/T_n) \geq (T_{\max\text{carga}}/T_n)$$

em que  $T_{\max\text{carga}}$  é o binário máximo de carga do respectivo diagrama de cargas,  $T_n$  é o binário nominal e  $T_{\max}$  é o binário máximo do motor. Compara-se o valor do coeficiente de sobrecarga do serviço ( $T_{\max\text{carga}}/T_n$ ) com o coeficiente de sobrecarga do motor ( $T_{\max}/T_n$ ), que é fornecido no catálogo, confirmando-se a capacidade de sobrecarga do motor de indução trifásico.



Na catálogo do fabricante é fornecida a indicação  $T_{\max}/T_n$ , (1,7 a 3), que pode ser comparada com o coeficiente de sobrecarga para um dado serviço e que é determinado a partir do respectivo diagrama de cargas.

[EFA-c ; BF3 315 MA82] coeficiente de sobrecarga:  $T_{\max}/T_n = B_{\max}/B_n = 2,8$

Exemplo\_4.1 — O diagrama de cargas de uma máquina ferramenta apresenta uma repetição periódica do seguinte ciclo de trabalho: 3 min em vazio, 2 min com  $T_c = 5$  Nm, 4 min com  $T_c = 3$  Nm, 1 min com  $T_c = 7$  Nm.

Verifica-se que o binário máximo de carga é  $T_{\max\text{carga}} = 7$  Nm. Para um motor de 0,55 kW, 675 rot/min,

(BF5 90 L68), verifica-se que o respectivo coeficiente de sobrecarga (apresentado no catálogo)  $T_{\max}/T_n = B_{\max}/B_n = 2,5$  é maior do que o coeficiente de sobrecarga da carga  $T_{\max\text{carga}}/T_n = 7/5,4 = 1,3$ . O motor tem uma capacidade de sobrecarga suficiente para esta aplicação.

### Serviço Contínuo (S1)

Um motor de indução trifásico funcionando em serviço contínuo pode ter uma carga com valor constante em todo o tempo de funcionamento. Nesta situação a potência nominal do motor deve corresponder á potência mecânica da carga accionada. Como na ligação do motor à carga pode ser feita com um redutor de velocidade, ou por uma outro meio mecânico, há que considerar o rendimento do redutor.

$$P_{\text{nmotor}} = P_{\text{mec}}/\eta_r$$

Exemplo\_4.2 — Um motor utilizado para accionar uma bomba hidráulica para abastecimento de água deverá ter uma potência nominal dada por:

$$P = Q \cdot H / (101,9 \cdot \eta_b) \quad [\text{kW}; \text{l/s}, \text{m}]$$

em que Q é o caudal {l/s}, H é a altura manométrica {m},  $\eta_b$  é o rendimento da bomba.

Também um motor utilizado para accionar um ventilador deverá ter uma potência nominal dada por:

$$P = 10^{-3} \cdot V \cdot h / \eta_v \quad [\text{kW}; \text{m}^3/\text{s}, \text{N/m}^2]$$

em que Q é o caudal {m<sup>3</sup>/s}, h é a pressão {N/m<sup>2</sup>},  $\eta_v$  é o rendimento do ventilador.

Mas existem situações em que carga mecânica tem um serviço contínuo com a carga a variar. Isto significa que o motor está submetido a um ciclo de carga variável, que, no entanto, permite que a sua temperatura estabilise.

Nesta situação tem de se encontrar, por um método rigoroso, um valor de potência constante equivalente (sob o ponto de vista mecânico, térmico, e eléctrico) à potência variável da carga.

### Método das Perdas de Energia Médias

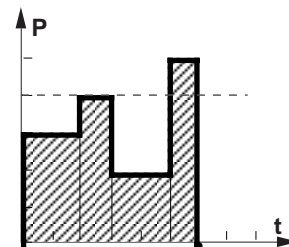
São as perdas de energia que contribuem para o aquecimento do motor, e determinam o valor do aquecimento máximo atingido numa dada situação de carga  $\Delta T_f$ . As perdas em regime nominal permitem que o motor aqueça sem perigo para a sua conservação. Se um motor for seleccionado de forma a que as perdas médias do diagrama de cargas sejam aproximadamente iguais às perdas de energia nominais

$$P_{\text{med}} \leq P_n$$

o motor não aquecerá demasiado em serviço. Como o rendimento do motor varia com a carga, há que calcular as perdas de energia para cada situação do diagrama de cargas,  $p_j = ((1/\eta_j) - 1) \cdot P_j$ , e depois determinar um valor médio pesado para as perdas de energia:  $p_{\text{med}} = (1/\sum_j t_j) \cdot (\sum_j p_j \cdot t_j)$ .

Exemplo\_4.3 — No accionamento de uma máquina ferramenta adoptou-se um motor de indução trifásico de baixa tensão,  $P_n = 4 \text{ kW}$ ,  $n_n = 1410 \text{ rot/min}$ , [EFA-c ; BF5 112 M44]. A máquina tem o seguinte diagrama de cargas:

- 20 min a 3/4 da carga ( $\eta_{3/4} = 0,82$ )
- 10 min à plena carga ( $\eta_n = 0,82$ )
- 20 min a meia carga ( $\eta_{2/4} = 0,81$ )
- 10 min a 5/4 de carga (sobrecarga de 25%) ( $\eta_{5/4} = 0,81$ )



as perdas de energia respectivas são dadas por:  $p = ((1/\eta)-1) \cdot P_u$ , ou

$$p_{5/4} = 1,173 \text{ kW}; \quad p_n = 0,88 \text{ kW}, \quad p_{3/4} = 0,704 \text{ kW}, \quad p_{2/4} = 0,44 \text{ kW}$$

o valor médio é dado por  $P_{med} = (1/60) \times (1,173 \times 20 + 0,88 \times 10 + 0,704 \times 20 + 0,44 \times 10) = 0,846 \text{ kW}$ .

Verifica-se que a potência de perdas média é inferior à potência de perdas nominal do motor  $P_{med} \leq P_n$ , o que satisfaz o critério do Método das Perdas de Energia Médias para a selecção de um motor.

O Método das Perdas de Energia Médias é um método bom, mas apresenta a dificuldade de necessitar de muitos cálculos no caso de um diagrama de cargas mais complexo.

**Método da Intensidade de Corrente Equivalente  
ou do Binário Equivalente  
ou da Potência Equivalente**

Este método para selecção de um motor de indução trifásico sujeito a um serviço contínuo mas com carga variável, análogo ao das perdas de energia médias, baseia-se na noção de valor eficaz de corrente, e em algumas aproximações: considerando que as perdas de energia têm uma parte constante ( $p_0$ ) e uma parte dependente da intensidade da corrente eléctrica ( $k \cdot I^2$ ). assim, determinando as perdas médias,  $p_{med} = (1/\sum_j t_j) \cdot (\sum_j (p_j \cdot t_j))$ , verifica-se que:

$$P_{med} = \frac{1}{\sum_j t_j} \cdot \sum_j (p_0 + k \cdot I_j^2) \cdot t_j = p_0 + k \cdot \frac{\sum_j (I_j^2) \cdot t_j}{\sum_j t_j} = p_0 + k \cdot I_{eq}^2$$

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_j (I_j^2) \cdot t_j}{\sum_j t_j}} \quad \Leftrightarrow \quad I_{eq} = \sqrt{\int_0^T \left(\frac{1}{T}\right) \cdot I^2(t) dt}$$

surge a expressão da corrente equivalente  $I_{eq} = \sqrt{(1/\sum_j t_j) \cdot (\sum_j (I_j^2) \cdot t_j)}$ , forma discretizada da definição de valor eficaz de uma grandeza variável, [MVG-1].

A extensão do método ao binário baseia-se numa proporcionalidade do binário à intensidade de corrente eléctrica  $T = k_4 \cdot I$ ,

$$T_{eq} = \sqrt{(1/\sum_j t_j) \cdot (\sum_j (T_j^2) \cdot t_j)}$$

e a extensão à potência baseia-se na proporcionalidade da potência ao binário,  $P = k_5 \cdot T$ ,

$$P_{eq} = \sqrt{(1/\sum_j t_j) \cdot (\sum_j (P_j^2) \cdot t_j)}$$

No caso do motor de indução trifásico a aplicação deste método é muito discutível. Em regime de carga (fortemente) variável as perdas mecânicas variam também, e as perdas variáveis não são proporcionais ao quadrado da corrente eléctrica devido à existência no regime de sobrecarga ou no regime de baixa velocidade de fenómenos electromagnéticos complexos. As extensões do método, no caso do motor de indução trifásico, tornam-se meras aproximações forçadas !...

*Serviço Intermitente Periódico ou Serviço Breve*

Quando um motor de indução trifásico tem de ser aplicado num serviço intermitente periódico ou

num serviço breve é necessário definir rigorosamente o respectivo diagrama de cargas: *ciclo de carga*. Depois pode-se utilizar os métodos apresentados para o caso do serviço contínuo — Método das Perdas de Energia Médias, Método do Binário Equivalente — mas, considerando que o método é apenas aproximado.

No entanto, para selecção de um motor de indução trifásico trabalhando em regime intermitente periódico (S3), ainda se definem alguns novos parâmetros que permitem determinar o aumento admissível da potência útil  $P$  relativamente à potência nominal do motor  $P_n$  devido ao motor não trabalhar num regime contínuo, a partir de fórmulas desenvolvidas pelo fabricante, desde que conhecidos alguns parâmetros construtivos, como o valor da constante térmica de tempo da máquina  $\tau$ .

Entre esses parâmetros está o *factor de marcha*, que é dado pela razão entre o tempo de funcionamento  $t_n$  (em minutos) e o tempo total de um ciclo de carga  $T$  (em minutos),  $DF = T_n/T$

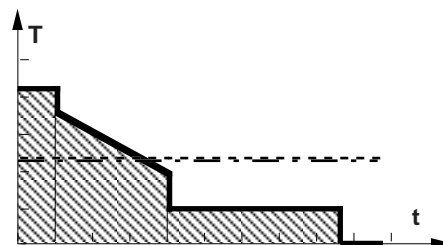
No caso de se pretender um dimensionamento da potência do motor mais rigoroso, então há que fazer o estudo do aquecimento do motor durante o ciclo de carga. Para isso é necessário aceder a dados que apenas o fabricante do motor dispõe, e que obteve durante os ensaios tipo do protótipo do motor.



Por razões de segurança industrial e de defesa do produto (motor de indução trifásico) e da marca, nos casos complicados os fabricantes preferem trabalhar em regime de *encomenda-consulta*: recolhem os dados do ciclo de carga das características e das necessidades de accionamento, efectuam os estudos de aplicação do motor dentro da sua gama e métodos de fabrico, e fornecem o motor que consideram adequado ao serviço do cliente.

Exemplo\_4.4 — Embora seja difícil a determinação da potência nominal para um motor submetido a um serviço intermitente, é mais fácil verificar se a selecção de um determinado motor para um dado regime de carga está correcta.

Selecionou-se um motor de indução trifásico de  $P_n = 4$  kW,  $n_n = 1410$  rot/min, [EFA-c ; BF5 112 M44] para aplicar numa máquina que tem o seguinte diagrama de cargas, à velocidade nominal constante: nos primeiros 10 s o binário é constante e igual 41 Nm, nos 30 s seguintes o binário decai linearmente de 38 Nm para 17 Nm, nos seguintes 46 s do ciclo o binário é constante e igual a 8 Nm, e nos últimos 10 s o motor está em vazio.



É possível determinar alguns valores que ajudam a criticar a selecção do motor feita.

O factor de sobrecarga da carga mecânica é de  $(41/27,1) = 1,5$ , o factor de sobrecarga do motor é de 2,3; logo o motor está bem seleccionado.

O factor de marcha é de  $86/96 = 0,896 \dots$

Só numa parte do ciclo (10+22 s em 96 s) o motor está em sobrecarga, durante um intervalo de tempo muito curto face à constante térmica de tempo da máquina ( $\tau = 20$  min). Por isso, a temperatura da máquina levaria muito tempo a estabilizar...

Para determinar o binário equivalente torna-se necessário determinar a fórmula para o binário equivalente numa situação de variação em rampa;  $T = T_1 + \alpha \cdot t$ , com  $\alpha = (T_2 - T_1)/\Delta t$ ;

$$T_{eq}^2 = (1/\Delta t) \cdot \int_0^{\Delta t} T^2 dt \quad \text{ou} \quad T_{eq} = \sqrt{\frac{P_1^2 + P_1 \cdot P_2 + P_2^2}{3}}$$

Para o diagrama (total) apresentado,  $T_{eq} = \sqrt{\frac{41^2 \times 10 + (38^2 + 38 \times 17 + 17^2) \cdot (30/3) + 8^2 \times 46}{86}} = 22,5 \text{ Nm}$

verifica-se que o binário equivalente é inferior ao binário nominal, pelo que o motor serve para accionar esta carga.

A relação entre o binário de arranque e o binário nominal (no arranque directo) é de  $(T_a/T_n) = 2,3$ , pelo que o binário de arranque é de  $T_a = 2,3 \times 22,6 = 51,9 \text{ Nm}$ , que é superior ao binário de carga no início do ciclo, (= 41 Nm); logo, no arranque, existe um binário acelerador de  $(51,9 - 41) \text{ Nm}$ .

Supondo que o momento de inércia da carga era de  $0,5 \text{ kgm}^2$ , o tempo de arranque seria de:

$$\Delta t_a = (0,5 + 0,0072) \cdot (\pi \cdot 1410/30) / (51,9 - 41) = 6,8 \text{ s, ou } (6,8/10), \text{ ou } 68\% \text{ do tempo do}$$

primeiro patamar de carga; o que pode ser muito!...

O tempo de frenagem seria de  $\Delta t_f = (0,5 + 0,0072) \cdot (\pi \cdot 1410/30) / (8) = 9,3 \text{ s, ou } (9,3/10), \text{ ou } 93\% \text{ do tempo de}$  paragem!...

Do estudo feito conclui-se que o motor estava bem seleccionado; ficam dúvidas se o accionamento teria um funcionamento suave e preciso...

**Nas situações em que o tipo de serviço do motor é complexo, a selecção de um motor de indução trifásico tem de ser feita conjuntamente com o fabricante.**

**(NB)**

a selecção e a aplicação de um motor de indução trifásico fora da gama de fabrico estandardizada, e apresentada no catálogo do fabricante, significa uma grande demora (duas semanas a três meses) na entrega do motor e o aumento do seu custo.

### 4.3 Elementos de Classificação

As grandezas físicas a considerar na selecção e na classificação da máquina eléctrica, para uma definição precisa do motor de indução trifásico capaz de accionar a carga mecânica da forma pretendida, são:

#### CARACTERÍSTICAS NOMINAIS

**potência útil {kW}** — representa a máxima potência que a máquina pode fornecer á carga:  $P_u = T_n \cdot \omega_n$ . Esta potência está relacionada com a potência eléctrica, recebida da instalação eléctrica, através do rendimento ( $\eta$ ) do gerador:  $P_{el} = \eta \cdot P_{mec}$  ou  $P_t = \eta \cdot P_u$ . Quando o motor de indução trifásico funciona nas condições de classificação, expressas na chapa de características, não é atingido o sobreaquecimento limite definido pela classe dos isolantes empregues na máquina.

**velocidade de rotação {rot/min}** — velocidade imposta pelo equilíbrio dinâmico do binário fornecido pelo motor e do binário necessário ao accionamento da carga mecânica; é ligeiramente inferior à velocidade de sincronismo ( $n_s = f/p$ ). É, normalmente, de 1500 rot/min ou 1000 rot/min, menos frequentemente de 750 rot/min ou 3000 rot/min.

**frequência {Hz}** — é a frequência da rede eléctrica de alimentação: 50 Hz.

**tensão {V}** — o valor da tensão adoptado, normalmente na gama da baixa tensão (220/380 V) ou da média tensão (5,5 kV ou 6 kV). É normal um fabricante ter no seu catálogo de produção estandardizada máquinas para as tensões normalizadas na

gama dos 400 V a 15 kV.

**factor de potência** — é o valor do factor de potência na situação nominal, com a máquina alimentada por um sistema trifásico sinusoidal ( $\lambda = \cos \varphi$ ). Quando o motor de indução trifásico está pouco carregado, o factor de potência é baixo.

**outras características** — referência ao isolamento e ao aquecimento permitido para a máquina. Os materiais isolantes pertencem, normalmente, à classe F. Referência à altitude de funcionamento (que condiciona o valor da potência nominal e uma eventual desclassificação da máquina). O rendimento à plena carga.

#### CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

**protecção mecânica** — é, normalmente, do tipo IP 54 ou IP 55 para máquinas aplicadas em locais de que se não conhecem muito bem as características ambientais.

**forma de construção** — pode ser do tipo B3 (carcaça com patas para funcionamento com o eixo horizontal) ou V1 (carcaça com flange para funcionamento vertical com ponta do veio inferior livre).

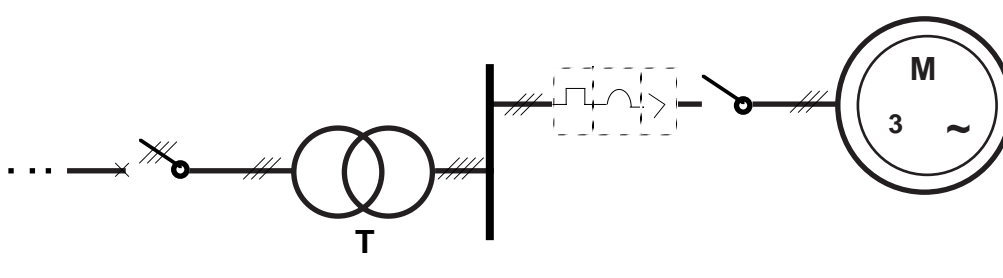
**velocidade de embalamento** — embora não seja uma grandeza importante, nos motores de potência elevada é considerada. É definida por um valor (2 ou 2,5 vezes a velocidade nominal) com o tempo de duração do funcionamento em sobrevelocidade.

**tipo de ligação** — normalmente uma união directa elástica.

**existência de multiplicador de velocidade** — devido aos valores escalonados da velocidade de sincronismo do motor de indução trifásico pode tornar-se necessário utilizar um redutor. Eventualmente pode estar montado com motor formando um monobloco (moto-redutor), ou pode ser construído para uma aplicação específica.

**outras características** — tipo de construção utilizada no motor de indução trifásico: tipo e material da carcaça; tipo de mancais; normalização seguida e tolerâncias. Adaptações específicas da máquina.

#### CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ELÉCTRICO



**distorção harmónica** — a presença de um sistema de controlo de potência com elementos semicondutores em comutação pode dar origem à distorção das grandezas eléctricas da instalação de utilização de energia.

**factor de potência global** — o consumo de energia reactiva pelo motor de indução trifásico pode agravar o valor do factor de potência da instalação, obrigando à aplicação de uma instalação de correcção desse factor.

**ligação do motor** — a situação de arranque do motor não deve provocar alteração do



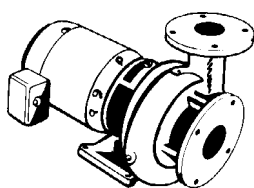
nível da qualidade de serviço de distribuição de energia eléctrica que existe na instalação.

## 5. Exemplo de Aplicação

A selecção e aplicação de um motor de indução trifásico consiste na resolução de um problema de engenharia, em que, por isso, as considerações económicas são um factor determinante. Portanto, não existe uma solução única para um problema de selecção e aplicação de um motor eléctrico, e qualquer exemplo apresentado é sempre discutível e susceptível de outras soluções, certamente, fundamentadas noutras considerações.

Procurando realçar a metodologia empregue, apresenta-se como exemplo de selecção e de aplicação de um motor de indução trifásico no accionamento de uma bomba centrífuga.

### 5.1 Accionamento de uma Bomba Centrífuga



Para elevar um líquido a uma determinada altura são utilizadas bombas centrífugas. Embora, actualmente, existam electrobombas em que a bomba e o motor formam um grupo em execução monobloco, existe sempre o problema de selecção e aplicação de um motor de indução trifásico.

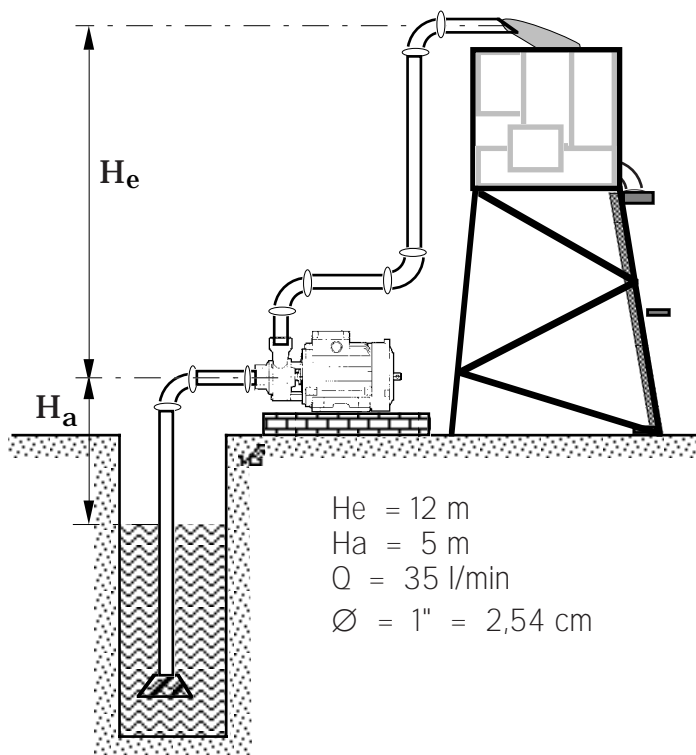
#### Caracterização da Carga Mecânica

Nesta aplicação do motor de indução trifásico a carga mecânica é uma bomba centrífuga, cujas características de funcionamento são determinadas recorrendo-se a alguns conceitos da hidráulica. Na selecção e aplicação do motor não é importante a forma como o binário motor da bomba centrífuga varia com a velocidade (aproximadamente de uma forma quadrática  $T \propto n^2$ ) mas é importante definir a potência máxima requerida pela bomba e a sua velocidade de funcionamento.

Para se conhecerem esses valores são feitos alguns cálculos baseados na situação real de funcionamento.

A bomba promove um deslocamento de líquido, com um *caudal*  $Q$  dado pelo volume de líquido bombeado na unidade de tempo  $\{l/min ; m^3/h\}$ .

O líquido bombeado pela bomba centrífuga terá de ser recolhido de um depósito (poço), e para entrar na bomba, por acção da pressão atmosférica, terá de a *altura de aspiração*  $H_a$  — distância vertical entre o nível do líquido no depósito de sucção e a linha média do veio da bomba — ser inferior a um determinado valor (cerca de 6 m). A altura de aspiração depende da temperatura do líquido e da altitude do local de instalação.



Por acção da bomba centrífuga o fluido será elevado a uma *altura de elevação*  $H_e$  — distância

vertical entre a linha média do veio da bomba e a linha média do cano de saída do líquido (ver a figura).

A soma da altura de aspiração e da altura de elevação constitui a *altura geométrica*  $H_g$ .

No entanto no cálculo da potência necessária ao accionamento de uma bomba centrífuga não é o valor da altura geométrica que é considerado, mas sim o valor da *altura manométrica*  $H_m$ , que é um valor que resulta de accionar à altura geométrica um valor de altura correspondente às perdas por atrito ao longo das canalizações. Considerando que a potência de perdas é proporcional ao caudal  $Q$  e à altura  $h$ ,  $P \propto Q \cdot h$ , e considerando-se o valor do caudal constante para uma dada situação, a potência de perdas é proporcional à altura  $h$ ; esse é o valor que terá de ser aumentado à altura geométrica, para que o caudal  $Q$  possa ser efectivamente bombeado naquela altura  $H_g$ .

Existem tabelas que dão o valor das perdas por atrito ao longo de uma canalização de determinado diâmetro interior ( $\varnothing$ ) em função do caudal, e existem outras tabelas que dão o valor das perdas —expressos em altura— para o caso das diferentes peças que permitem efectuar as curvas na canalização (curva redonda a  $90^\circ$  equivalente ao comprimento de um tubo com o mesmo diâmetro;  $\varnothing = 1'' = 2,54$  cm corresponde a 2 metros de tubo rectilíneo na bombagem de água).

No exemplo representado na figura a determinação da altura manométrica é feita atendendo à constituição do circuito hidráulico. A altura geométrica resulta da soma da altura de aspiração e da altura de elevação,

$$H_g = H_a + H_e \quad \text{ou} \quad H_g = 5 + 12 = 17 \text{ m}$$

A correcção da altura devida às perdas é feita atendendo a que existem 4 curvas redondas, o que equivale a uma altura de  $4 \times 2 = 8$  m (consultando uma tabela); atendendo ao comprimento do tubo a altura equivalente às perdas por atrito é de 2 m (consultando uma tabela). A altura manométrica vale  $H_m = 17 + 8 + 2 = 27$  m.

Conhecido o valor do caudal  $Q$  e da altura manométrica a que deve ser bombeado o fluido pode-se determinar o valor da potência de accionamento da bomba centrífuga. A fórmula a aplicar é:

$$P = \frac{\rho \cdot Q \cdot H_m}{101,9 \cdot \eta} \quad [\text{kW} ; \text{kg/dm}^3, \text{l/s}, \text{m}]$$

em que  $Q$  é o caudal {l/s},  $H_m$  é a altura manométrica {m},  $\rho$  é o peso específico {kg/dm<sup>3</sup>}, e  $\eta$  é o rendimento da bomba centrífuga [50% <  $\eta$  < 80%].

Para o caso figurado a determinação da potência de accionamento, atendendo a que o caudal era de  $Q = 35$  l/min = 0,583 l/s, e que o rendimento resultava da consulta de uma tabela  $\eta = 59\%$

Q [l/min]	8,33	13,9	22,2	30,5	44,5
$\eta$ [%]	45	65	79	79	55

$$P = \frac{\rho \cdot Q \cdot H_m}{101,9 \cdot \eta} \quad \text{ou} \quad P = \frac{1 \times 0,583 \times 27}{101,9 \times 0,59} = 0,262 \approx 0,3 \text{ kW}$$

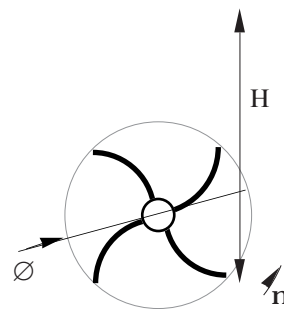
#### Seleccção do Motor

A consulta do catálogo de um fabricante permitiria começar a selecção de um motor.



O catálogo do fabricante [EFA-c] não apresenta um motor com a potência nominal de 0,3 kW, mas apresenta motores com a potência nominal de 0,37 kW (valor imediatamente superior), para as velocidades de sincronismo de 3 000, 1 500, 1 000, e 750 rot/min.

Na determinação da velocidade de funcionamento da bomba centrífuga atende-se a que uma partícula de água para ser elevada de uma altura  $H$ , terá de estar animada de uma velocidade linear igual àquela que adquiriria se caísse livremente dessa mesma altura:  $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$ , [m/s ; 9,8 m/s<sup>2</sup>, m]. Conhecida a velocidade linear na periferia do impulsor da bomba centrífuga, resta conhecer o diâmetro  $D$  desse impulsor para determinar a correspondente velocidade de rotação:  $n = \omega_r / (2 \cdot \pi) = (2 \cdot v / D) / (2 \cdot \pi) = v / (D \cdot \pi)$ ;  $n = (v / (D \cdot \pi)) \cdot 60$  [rot/min ; m/s, m].



No exemplo em estudo a altura de elevação da água é de 12 m, e considera-se uma bomba centrífuga com o diâmetro  $D = 112$  mm. Neste caso,  $v = \sqrt{2 \times 9,8 \times 12} = 15,3$  m/s = 920 m/min. A velocidade de rotação  $n$  deverá ser de  $n = 920 / (\pi \times 0,112) = 920 / 0,352 = 2\,615$  rot/min. A velocidade de sincronismo do motor terá de ser superior,  $n_s > 2\,615$  rot/min  $\Rightarrow n_s = 3\,000$  rot/min.

### Grandezas Eléctricas

Existe agora a necessidade de caracterizar, com mais pormenor, a situação de funcionamento do motor: localização (altitude), rede eléctrica de alimentação. O conhecimento da altitude é importante porque poderia obrigar à selecção de um motor com uma potência nominal superior ao valor determinado, para compensar a desclassificação provocada pelo valor elevado da altitude. O conhecimento das características da rede eléctrica de alimentação também é importante na selecção, por catálogo, de um motor eléctrico.

Ⓒ O catálogo do fabricante [EFA-c] mostra que a velocidade de sincronismo do motor superior a 2615 rot/min é de 3000 rot/min; o que levaria à selecção de um motor do tipo BF5 71 M42;  $P_n = 0,37$  kW,  $n_n = 2810$  rot/min, supondo que a tensão da rede de alimentação será na gama da baixa tensão (220/380 V) e que a sua frequência é de 50 Hz.

Neste momento é já possível conhecer o valor de algumas grandezas eléctricas que são importantes no projecto da instalação eléctrica de alimentação do motor e na calibragem das suas protecções .

Conhecida a potência útil do motor (potência mecânica) e seleccionado um motor é possível conhecer a respectiva potência eléctrica nominal. No caso em estudo sabe-se que [EFA-c],

$$\text{BF5 71 M42} \quad P_u = 0,37 \text{ kW} \quad U_c = 380 \text{ V} \quad \eta_n = 70\% \quad \cos \varphi_n = 0,82$$

A potência eléctrica é de  $P = 0,37 / 0,7 = 0,529$  kW, o que permite determinar o valor da intensidade da corrente eléctrica nominal  $I_n = 0,529 / (\sqrt{3} \times 380 \times 0,82) = 0,98$  A.

A intensidade da corrente eléctrica de arranque directo é dada por  $I_a / I_n = 5,3$ , logo  $I_a = 5,3 \times 0,98 = 5,2$  A.

O valor da intensidade da corrente eléctrica nominal, e da corrente de arranque directo, é inferior ao valor da intensidade de corrente eléctrica admissível nos condutores eléctricos com uma secção igual ao valor mínimo obrigatório [RSIUEE; § 426.a] ( $S = 2,5 \text{ mm}^2 \Leftrightarrow I = 28\text{A}$ ).

### Verificação da Selecção

Ⓒ O motor BF5 71 M42 tem as seguintes características:

$$T_n = 1,3 \text{ Nm} \quad T_a / T_n = 2,1 \quad T_{\max} / T_n = 2 \quad n_n = 2810 \text{ rot/min} \quad J = 0,00042 \text{ kgm}^2$$

Com os dados fornecidos pelo fabricante no catálogo é já possível efectuar algumas determinações que permitem controlar a validade da selecção feita. Poder-se-á verificar se o tempo de arranque é aceitável;  $t_a = (J \cdot n \cdot \pi) / (30 \cdot (T_{am} - T_{res}))$ .

No caso do motor seleccionado conhecida a relação  $T_a/T_n = 2,1$  e que  $T_n = 1,3$  Nm,  $n = 2\,615$  rot/min,  $J = 0,00042$  kgm<sup>2</sup>, seria possível determinar o tempo de arranque se se conhecesse o valor do momento de inércia da bomba centrífuga. Depois verificava-se se o tempo de arranque era conveniente.

Para esta aplicação — accionamento de uma bomba centrífuga — pode-se verificar a selecção do motor através do valor típico da relação entre o binário de arranque e o binário nominal  $T_a/T_n$ , dada por qualquer “Manual de Bombas”.

$\frac{T_a}{T_n} = 0,65$ a $0,75$	→ arranque com válvula fechada
$\frac{T_a}{T_n} = 1,3$ a $1,5$	→ arranque com válvula aberta
$\frac{T_a}{T_n} = 1,7$ a $2,5$	→ arranque difícil (massas acopladas)

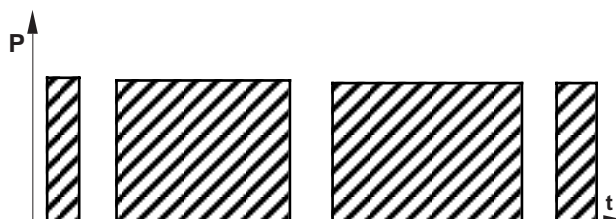
No caso do motor seleccionado, que verifica a relação  $T_a/T_n = 2,1$ , em circunstâncias de funcionamento normal — arranque com válvula aberta — o motor desenvolve um binário de arranque suficiente: *o motor serve*.

### Regime de Funcionamento

Eventualmente, pode ser conhecido a situação em que a bomba centrífuga vai trabalhar o que permite efectuar outras determinações. Considerando o regime de funcionamento definido no quadro junto, poder-se-ia efectuar um estudo sobre o aquecimento do motor eléctrico. Para isso era necessário conhecer as suas características térmicas, o que obrigava a perguntar ao fabricante alguns valores característicos do comportamento térmico do motor, obtidos durante o ensaio tipo de aquecimento.

Tarefa		Volume (l)	Duração (min)
casa com 4 pessoas	4 x 100 l	400	11,5
lavagem do gado 35 animais	35 x 100 l	3500	100
rega		4200	120
lavagem de veículos 2	2 x 300 l	600	17

Verifica-se que, ao longo de um dia, o diagrama de cargas do motor eléctrico, tinha um aspecto como o esboçado na figura, em que, intermitentemente, está a trabalhar próximo do regime nominal.



Atendendo ao tipo de regime de funcionamento pode-se reverificar a selecção do motor para esta aplicação.

Como no catálogo [EFA-c] está definido que para este motor a relação  $T_{carga}/T_n = 2$ , e como nesta aplicação se verifica que é sempre  $T_{carga} < 2 \cdot T_n$ , verifica-se que *o motor serve*.

### Consumo de Energia

Como é conhecido o diagrama de cargas do motor eléctrico, é possível estimar o consumo de energia e efectuar a análise económica da exploração deste accionamento electromecânico,

[MVG-7]. Conhecida a potência eléctrica consumida pelo motor durante o período de funcionamento, é possível determinar o consumo diário de energia eléctrica.

 O motor BF5 71 M42 tem as seguintes características:

$$P_n = 0,37 \text{ kW}; \quad (\eta = 70\% \Leftrightarrow 4/4) \quad (\eta = 71\% \Leftrightarrow 3/4) \quad (\eta = 68\% \Leftrightarrow 2/4)$$

Como o motor vai estar a funcionar intermitentemente, mas fornecendo a potência constante de 0,3 kW em cada período de serviço, o que corresponde a  $0,3/0,37 = 0,811$  da potência nominal, "estima-se" que para esta fracção da carga o motor tem um rendimento de 70,2%, assim:

$$P_{el} = P_u/\eta \quad \text{ou} \quad P_{el} = 0,3/0,7 = 0,429 \text{ kW.}$$

Ao longo de um dia, o consumo é de 1,854 kWh, conforme está determinado no quadro junto.

Determinação	$W_{el}$ (kWh)
$0,429 \times (11,5/60)$	0,082
$0,429 \times (100/60)$	0,714
$0,429 \times (120/60)$	0,857
$0,429 \times (17/60)$	0,201
<i>total</i>	1,854

Conhecido o custo da unidade de energia eléctrica em baixa tensão  $Cw\$$ , e sabendo-se que o motor trabalha igualmente todos os dias do mês (30 dias), tornava-se possível determinar o consumo de energia com o accionamento eléctrico da bomba centrífuga.


$$\text{Em 1994, } Cw\$ = 18\$20 \text{ (tarifa simples de baixa tensão } < 19,8 \text{ kVA), logo } 30 \times 1,854 \times 18\$20 = 9\,012\$50$$

### Instalação Eléctrica

Podem agora atender-se aos diferentes aspectos necessários ao projecto da instalação eléctrica.


**Condutores** — como já foi determinado a intensidade da corrente nominal do motor e a intensidade corrente de arranque directo são inferiores ao valor da corrente eléctrica máxima admissível na secção dos condutores a utilizar:  $S = 2,5 \text{ mm}^2$ . Nesta situação o condutor de protecção (terra de protecção) deverá, também, ter uma secção de  $2,5 \text{ mm}^2$  [RSRDEEBT]. Utilizar-se-ia um cabo, com características próprias para o local da instalação, e com  $4 \times 2,5 \text{ mm}^2$ .

**Montagem** — nesta situação o arranque do motor pode ser directo.

 O motor BF5 71 M42 no arranque directo absorve uma intensidade de corrente eléctrica de:  
 $I_a = 5,3 \cdot I_n$

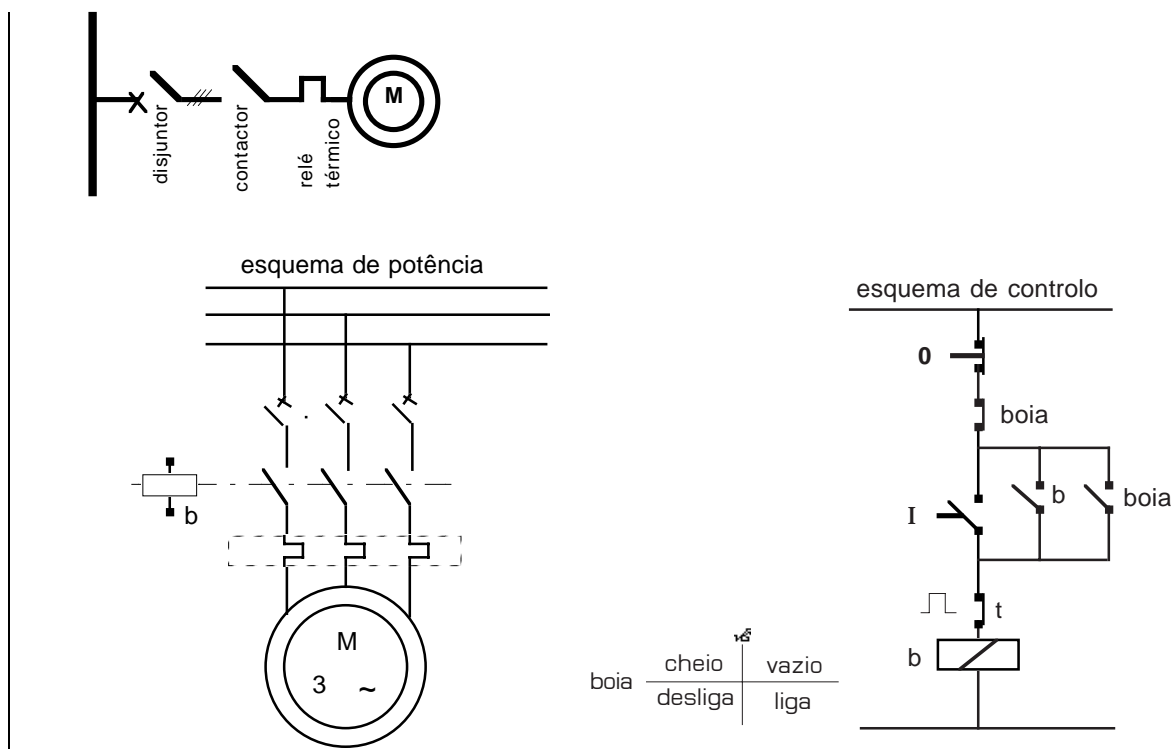
A intensidade de corrente de arranque directo é  $I_a = 5,3 \times 0,98 = 5,2 \text{ A}$ , que é um valor inferior à intensidade de corrente admissível permanentemente nos condutores,  $S = 2,5 \text{ mm}^2 \Leftrightarrow I_p = 28 \text{ A}$ .

**Protecções** — o motor poderá ser protegido contra sobrecargas e contra curto-circuitos, mas como se trata de uma instalação de pequena potência e se pretende que seja simples, utiliza-se um disjuntor — unidade comercial dotada das devidas protecções e que pode promover a abertura do circuito do motor.

 Nesta situação em que a intensidade de corrente eléctrica durante o funcionamento do motor é inferior a 1 A, utilizava-se um disjuntor de calibre 1 A, que permite uma regulação da corrente eléctrica de 0,6 A a 1 A, e atendia-se apenas ao valor da intensidade de corrente eléctrica absorvida pelo motor em carga, porque as situações de arranque não são muito frequentes. A intensidade da corrente para efeitos de regulação deverá ser  $I = 0,8 \text{ A}$ .

Outras — atendendo ao regime de funcionamento e ao tipo de instalação poder-se-ia dotar o motor de um sistema automático simples que controlasse o enchimento do depósito. Tal sistema pode consistir num flutuador de enchimento e num contactor (ou contactos auxiliares) montados segundo o esquema de controlo (muito simples) apresentado.

### Esquemas



MVG.94

### Bibliografia

- [ALG-1] P. L. Alger; "Induction Machines — their behavior and uses", Gordon & Breach, 1970
- [AND-1] J. C. Andreas; "Energy-efficient Electric Motors", Marcel Dekker, 1982
- [BEE-1] D. Beeman, editor; "Industrial Power Systems Handbook", McGraw-Hill, 1955
- [CCC-1] Carlos Castro Carvalho; "Transformadores", AEFEP, 1983
- [CCC-2] Carlos Castro Carvalho; "Apontamentos para a Disciplina de Máquinas Eléctricas II", AEFEP, 1983
- [CCC-3] Carlos Castro Carvalho; "Apontamentos para Força Motriz 1975/76", AEFEP 1975
- [CEI-h] CEI-Handbook; "Letter Symbols and Conventions", Comissão Electrotécnica Internacional, 1983
- [CEI-34-1] Comissão Electrotécnica Internacional; "Machines Électriques Tournantes — valeurs nominales et caractéristiques de fonctionnement", 1969
- [CEI-85] Comissão Electrotécnica Internacional; "Recommendations relatives à la classification des matières destinées à l'isolement des machines et appareils électriques en fonction de leur stabilité thermique en service", 1957
- [COC-1] P. L. Cochran; "Polyphase Induction Motors — analysis, design, and application", Marcel Dekker, 1989
- [DEW-1] S. B. Dewan A Straughen; "Power Semiconductor Circuits", John Wiley, 1975
- [EDP-t.94] Electricidade de Portugal — tarifário 1994
- [EFA-c] Catálogo 122.11; EFACEC Motores Eléctricos SA, 1993
- [AJC-1] A. J. Cardoso E. S. Saraiva; "Aplicação da Transformada Complexa Espacial na Detecção de Avarias Eléctricas em Motores de Indução Trifásicos", 2ª RILIME, Coimbra 1989
- [IEEE-112] ANSI/IEEE-112; "IEEE Standard Test Procedures for Polyphase Induction Motors and Generators", ANSI/IEEE Standard 112, 1984

- [JEC-37] Japanese Electrotechnical Commission; "Induction Machines", Standard JEC, 1979
- [KRA-1] P. C. Krause O Wasynczuk; "Electromechanical Motion Devices", McGraw-Hill 1989
- [KUP-1] K. Küpfmüller; "Électricité Théorique et Appliquée", Dunod 1959
- [LAN-1] A. Langsdorf; "Theory of Alternating-Current Machinery", McGraw-Hill, 1937
- [LEV-1] E. Levi; "Polyphase Motors", J Wiley & Sons, 1984
- [MCB-1] Manuel Corrêa de Barros; "Método Simbólico para Estudo das Máquinas de Corrente Alternada", Porto 1947
- [MG-1] National Electrical Manufacturers Association; "Motors and Generators", NEMA Standard Publication MG1, 1978
- [MVG-1] Manuel Vaz Guedes; "Corrente Alternada — Sistemas Polifásicos", NEME-FEUP, 1991, 1993
- [MVG-2] Manuel Vaz Guedes; "Grandezas Periódicas Não Sinusoidais", NEME-FEUP, 1992
- [MVG-3] Manuel Vaz Guedes; "Sistemas Electromecânicos de Conversão de Energia", NEME-FEUP, 1993
- [MVG-4] Manuel Vaz Guedes; "O Motor de Indução Trifásico Alimentado por um Sistema de Tensões Desequilibrado", Coimbra 1991
- [MVG-5] Manuel Vaz Guedes; "A Frenagem dos Veículos com Motores de Indução Trifásicos", Seminário Tracção Eléctrica - 91, FEUP, 1991
- [MVG-6] Manuel Vaz Guedes; "Laboratório de Máquinas Eléctricas; Sistemas Trifásicos — medida de potência", NEME-FEUP, 1994
- [MVG-7] Manuel Vaz Guedes; "Sistemas de Accionamento Electromecânico: 0 – constituição; 1 – utilização racional de energia; 2 – análise económica", FEUP, 1994
- [NP-399] Norma Portuguesa 399: Máquinas Eléctricas Rotativas — chapa de características.
- [PUN-1] F. Punga O. Raydt; "Modern Polyphase Induction Motors", Pitman, 1933
- [RSEE] Regulamento de Segurança de Elevadores Eléctricos, D 513 de 30 de Outubro de 1970 + Decreto regulamentar nº 13 de 16 de Maio de 1980
- [RSIUEE] Regulamento de Segurança de Instalações de Utilização de Energia Eléctrica, D-L nº 740/74 de 26 de Dezembro de 1994
- [RSRDEEBT] Regulamento de Segurança de Redes de Distribuição de Energia Eléctrica em Baixa Tensão, DR nº 90/84
- [RSSPTS] Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e de Seccionamento; D nº 42895 de 31 de Março de 1960 e D-R nº 14/77 de 18 de Março de 1977.
- [SAY-1] M. G. Say; "Alternating Current Machines", Pitman 1976
- [VEI-1] Cyril G. Veinott J. E. Martin; "Fractional and Subfractional Horsepower Electric Motors", 4ª Ed, McGraw-Hill, 1987

## APÊNDICE A

### Símbolos para Grandezas e Unidades

GRANDEZA		UNIDADE	
comprimento	$l$	metro	m
massa	m	quilograma	kg
tempo	t	segundo	s
ângulo (plano)	$\alpha, \beta, \gamma$	radiano	rad
ângulo de rotação	$\theta$	radiano	rad
velocidade angular	$\omega, \Omega$	radiano por segundo	rad/s
força	F	newton	N
binário	T	newton metro	N·m
momento de inércia	J	quilograma metro quadrado	kg·m <sup>2</sup>
coeficiente de atrito	D	newton metro segundo por radiano newton por metro por segundo	N·m·s/rad N/m/s
energia	E, W	joule	J
potência	P	watt	W
campo eléctrico	E	volt por metro	V/m
potencial (eléctrico)	V	volt	V
tensão	u, U	volt	V
força electromotriz	e, E	volt	V
capacidade	C	farad	F
intensidade da corrente eléctrica	$i, I$	ampere	A
campo magnético	H	ampere por metro	A/m
força magnetomotriz	F, F <sub>m</sub>	ampere	A
indução magnética	B	tesla	T
fluxo magnético	$\psi, \phi; \Psi, \Phi$	weber	Wb
potencial vector magnético	A	weber por metro	Wb/m
coef. auto-indução	L	henry	H
coef. indução mútua	M	henry	H
resistência	R	ohm	$\Omega$
relutância	R, R <sub>m</sub>	1 por henry	H <sup>-1</sup>
potência aparente	S	volt-ampere	VA
potência activa	P	watt	W
potência reactiva	Q	volt-ampere reactivo	var
factor de potência	$\lambda$	-	-
frequência	f	hertz	Hz
pulsação	$\omega$	radianos por segundo	rad/s
diferença de fase	$\varphi, \phi$	radiano	rad
deslizamento	s	-	-
número de espiras	N	-	-
número de fases	m	-	-
número de pares de pólos	$p$	-	-
número de rotações por unidade de tempo	n	rotações por segundo	rot/s
temperatura absoluta	T	kelvin	K
temperatura Celsius	t	grau Celsius	° C

- MVG. 94 -



## APÊNDICE B

### Ficheiro de Dados

#### B.A Escalões de Tensão [EDP-t.94] (valor eficaz da tensão composta do sistema trifásico)

Baixa Tensão — igual ou inferior a 1 kV

Média Tensão — superior a 1 kV e igual ou inferior a 45 kV

Alta Tensão — superior a 45 kV e igual ou inferior a 110 kV

#### B.B Tipo de Horas (Inverno — hora legal de Inverno) (Verão — hora legal de Verão)

*horas de ponta* total de 4 horas por dia

{Inverno — 9,5 h ÷ 11,5 h} , {Verão — 10,5 h ÷ 12,5 h}

{Inverno — 19 h ÷ 21 h} , {Verão — 20 h ÷ 22 h}

*horas de vazio* total de 10 horas por dia {Inverno — 22 h ÷ 8h} , {Verão — 23 h ÷ 9h}


*horas cheias* as restantes horas do dia


#### B.C Intensidade de Corrente Admissível em Cabos Instalado no Ar VV, VAV, VRV,... (serviço permanente) [RSRDEEBT]

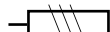
Secção mm <sup>2</sup>	Intensidade máxima (A)			Condutor de protecção mm <sup>2</sup>
	1 condutor	2 condutores	3 e 4 condutores	
1,5	27	22	20	1,5
2,5	36	30	28	2,5
4	48	40	36	4
6	60	50	48	6
10	85	70	65	10
16	110	95	90	10
25	145	125	110	16
35	180	150	130	16
50	210	180	150	25
70	275	225	195	35
95	330	270	235	50
120	390	305	270	70
150	440	350	310	70
185	505	390	355	95

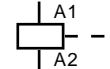
#### B.D Simbologia

 interruptor

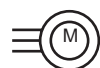
 disjuntor


 seccionador  
fusível


 base fusível

 comando  
electromecânico

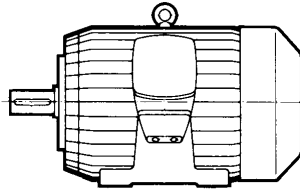
 contactor

 motor de indução trifásico  
rotor em curto-circuito

 motor de indução trifásico  
rotor bobinado

 transformador

## & Selecção & Aplicação



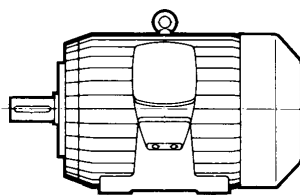
## AutoTeste-1

- 1 A que é devida a grande utilização do motor de indução trifásico?
- 2 Descreva, correctamente, o princípio de funcionamento do motor de indução trifásico.
- 3 No momento do arranque, um motor de indução trifásico provoca problemas na instalação eléctrica.  
Quais são esses problemas?  
Como são corrigidos?  
Que estabelece, sobre estes problemas, o "Regulamento de Segurança"?  
Porquê o valor de 2,5 mm<sup>2</sup> para a secção mínima dos condutores numa instalação de força motriz?
- 4 Caracterizar os diferentes tipos de motor de indução trifásico.
- 5 Caracterizar as diferentes parcelas do encargo com a energia do motor de indução trifásico.
- 6 Justificar a frase: "Um motor de indução trifásico sobredimensionado é prejudicial ao factor de potência da instalação eléctrica global".
- 7 Expor, de uma forma sistemática, os problemas de manutenção do motor de indução trifásico.
- 8 Quais os dados da carga mecânica que servem para seleccionar um motor de indução trifásico?
- 9 Que parâmetros eléctricos são utilizados na selecção de um motor de indução trifásico?
- 10 Qual a influência da altitude na selecção de um motor de indução trifásico?
- 11 Descrever os cuidados a ter na montagem de um motor de indução trifásico num maciço.
- 12 Porque é fornecido no catálogo o valor da relação  $T_{\text{carga}}/T_n$ ?
- 13 Como é determinado o tempo de arranque de um motor de indução trifásico accionando uma carga com elevado momento de inércia?

– AT.1 –



## Selecção & Aplicação



## AutoTeste-2

- 1 No catálogo de um fabricante de motores eléctricos aparece a seguinte indicação para a tensão de trabalho dos motores de indução trifásicos com potências inferiores a 3 kW:  $\Delta$  220 V a 250 V e  $Y$  380 V a 440 V. Justifique a adopção desses valores.
- 2 Apresente as vantagens de utilização do motor de indução trifásico no accionamento de um ventilador.  
A que problemas (mecânicos e eléctricos) se atende na instalação de um motor de indução trifásico.  
Quais os principais parâmetros que afectam a selecção de um motor de indução trifásico para o accionamento de uma bomba hidráulica.
- 3 Um motor de indução trifásico (150 kVA, 30 kV, 50 a 120 Hz) alimentado por um sistema de controlo de potência está aplicado num accionamento.  
Porque se considera a temperatura ambiente na selecção de um motor de indução trifásico?  
Atendendo ao tipo de serviço do motor de indução trifásico que está representado na figura, como seleccionava o motor?  
Porque é fornecida a indicação  $I_{max}/I_N$  no catálogo do fabricante do motor de indução? Justifique
- 4 Numa máquina ferramenta a alteração da velocidade da carga mecânica (30 kW) do motor de indução trifásico pode ser efectuada pela utilização de um moto-reductor, ou de um motor de dupla velocidade (Dahlander), ou de um sistema de controlo de potência com variação da frequência. Qual desses sistemas adoptava? Justifique.
- 5 Apresentar um pequeno apontamento (tópicos) com o enunciado das justificações a dar ao dono da obra de renovação de um sistema de rega (potência instalada = 1 MW) devido à adopção de um sistema de filtragem à entrada da instalação devido à adopção de bombas hidráulicas com controlo electrónico de velocidade do motor de indução trifásico.
- 6 Justificar a frase: *“O coeficiente de inércia  $J$  de um motor de indução trifásico é um parâmetro importante; por isso o seu valor é apresentado no catálogo”*.
- 7 Apresentar o “Método das Perdas de Energia Médias” para a selecção de um motor de indução trifásico em serviço contínuo.
- 8 Descrever a forma de realizar a protecção de um motor de indução trifásico contra contactos indirectos.

– AT.2 –