

# 6

## Motores elétricos

### 6.1 Introdução

O motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica de utilização.

Os motores elétricos são divididos em dois grandes grupos, tomada a forma da tensão como base: corrente contínua e alternada. Para melhor visualizar os diferentes tipos de motores elétricos, analisar a [Figura 6.1](#). A seguir serão descritos resumidamente os principais tipos apresentados na figura mencionada.

### 6.2 Características gerais dos motores elétricos

As principais características dos motores elétricos, em geral, são:

#### 6.2.1 Motores de corrente contínua

São aqueles acionados a partir de uma fonte de corrente contínua. São muito utilizados nas indústrias quando se faz necessário manter o controle fino da velocidade em um processo qualquer de fabricação. Como exemplo, pode-se

citar a indústria de papel. São fabricados em três diferentes características.

#### **a) Motores série**

São aqueles em que a corrente de carga é utilizada também como corrente de excitação, isto é, as bobinas de campo são ligadas em série com as bobinas do induzido. Estes motores não podem operar em vazio, pois sua velocidade tenderia a aumentar indefinidamente, danificando a máquina.

#### **b) Motores em derivação**

São aqueles em que o campo está diretamente ligado à fonte de alimentação e em paralelo com o induzido. Sob tensão constante, estes motores desenvolvem uma velocidade constante e um conjugado variável de acordo com a carga.

#### **c) Motores compostos**

São aqueles em que o campo é constituído de duas bobinas, sendo uma ligada em série e a outra em paralelo com o induzido. Estes motores acumulam as vantagens do motor série e do de derivação, isto é, possuem um elevado conjugado de partida e velocidade aproximadamente constante no acionamento de cargas variáveis.

### **6.2.2 Motores de corrente alternada**

São aqueles acionados a partir de uma fonte de corrente alternada. São utilizados na maioria das aplicações industriais.

Há vários tipos de motores elétricos empregados em instalações industriais. No entanto, por sua maior aplicação nesta área, devido à simplicidade de construção, vida útil longa, custo reduzido de compra e manutenção, este livro irá tratar mais especificamente dos motores elétricos assíncronos de indução. A [Figura 6.2](#) mostra uma ilustração da sequência de

montagem dos diferentes elementos de um motor elétrico, detalhando suas partes principais.

### 6.2.2.1 Motores trifásicos

São aqueles alimentados por um sistema trifásico a três fios, em que as tensões estão defasadas de  $120^\circ$  elétricos. Representam a grande maioria dos motores empregados nas instalações industriais. A [Figura 6.3](#) mostra seus principais componentes. Podem ser do tipo indução ou síncrono.

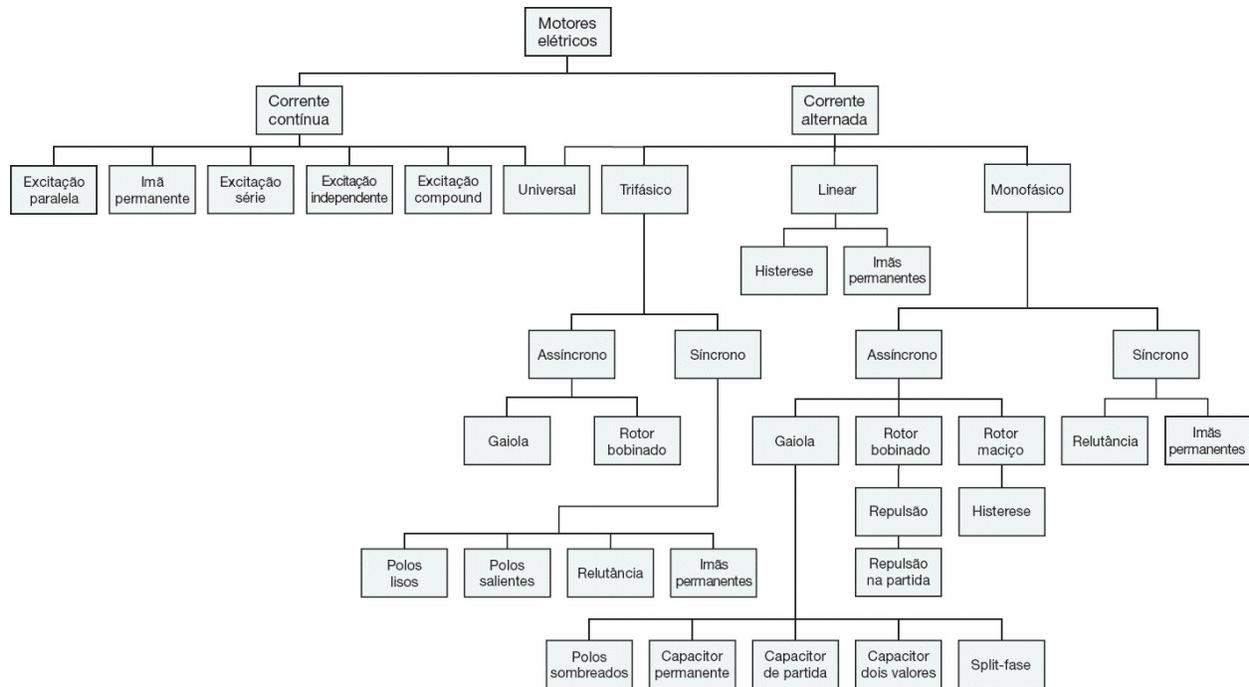
#### a) Motores de indução

São constituídos de duas partes básicas: estator e rotor.

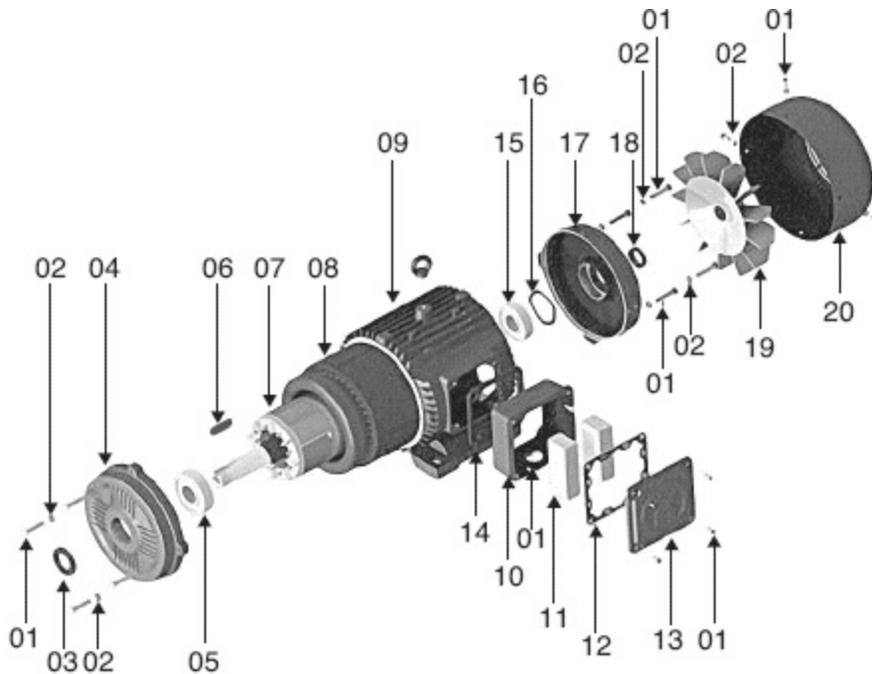
Estator

Formado por três elementos:

- Carcaça: constituída de uma estrutura de construção robusta, fabricada em ferro fundido, aço ou alumínio injetado resistente à corrosão e com superfície aletada e que tem como principal função suportar todas as partes fixas e móveis do motor.
- Núcleo de chapas: constituído de chapas magnéticas adequadamente fixadas ao estator.
- Enrolamentos: dimensionados em material condutor isolado, dispostos sobre o núcleo e ligados à rede de energia elétrica de alimentação.



**Figura 6.1** Classificação dos motores elétricos.



01- parafuso; 02 - arruela de pressão; 03 - retentor; 04 - tampa dianteira; 05 - rolamento dianteiro; 06 - chaveta; 07 - rotor completo; 08 - estator bobinado; 09 - carcaça; 10 - caixa de ligação; 11 - espuma autoextinguível; 12 - vedação da tampa da caixa de ligação; 13 - tampa da caixa de ligação; 14 - vedação da caixa de ligação; 15 - rolamento traseiro; 16 - arruela ondulada; 17 - tampa traseira; 18 - v'ring; 19 - ventilador; 20 - tampa defletora.

**Figura 6.2** Ilustração de um motor em montagem.

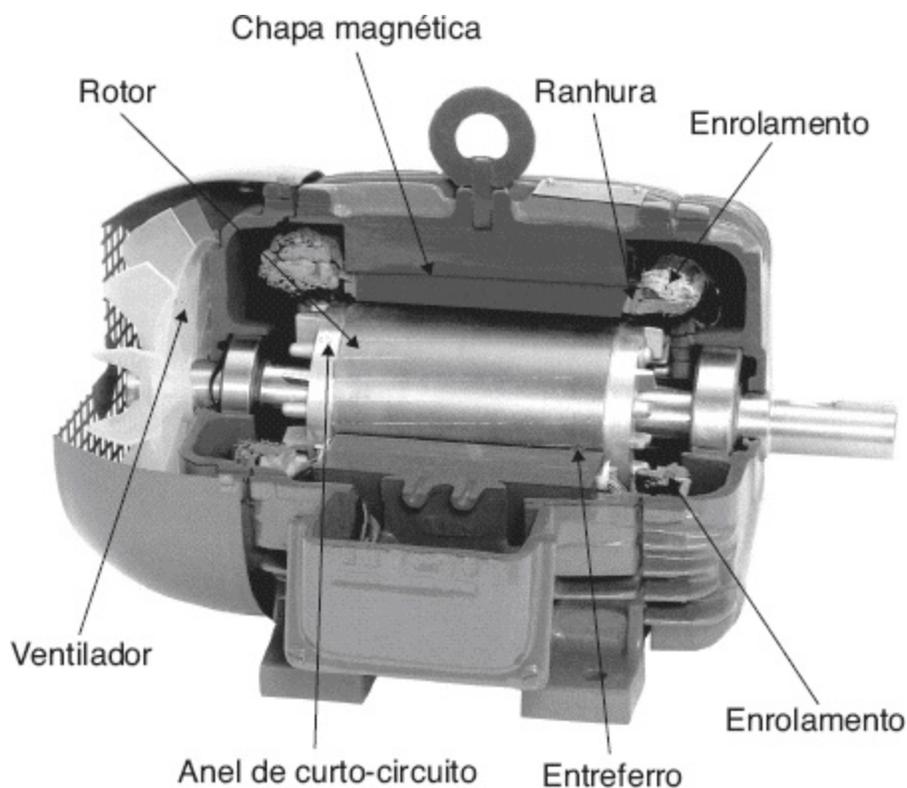
- Rotor

Também constituído de quatro elementos básicos.

- Eixo: responsável pela transmissão da potência mecânica gerada pelo motor.
- Núcleo de chapas: constituído de chapas magnéticas adequadamente fixadas sobre o eixo.
- Barras e anéis de curto-circuito (motor de gaiola): constituído de alumínio injetado sobre pressão.
- Enrolamentos (motor com rotor bobinado): constituídos de material condutor e dispostos sobre o núcleo.

Os demais componentes são:

- Ventilador: responsável pela remoção do calor acumulado na carcaça.
- Tampa defletora: componente mecânico provido de aberturas instaladas na parte traseira do motor sobre o ventilador.
- Terminais: conectores metálicos que recebem os condutores de alimentação do motor.
- Rolamentos: componentes mecânicos sobre os quais está fixado o eixo.
- Tampa: componente metálico de fechamento lateral.
- Caixa de ligação: local onde estão fixados os terminais de ligação do motor.



**Figura 6.3** Motor de indução trifásico.

As correntes rotóricas são geradas eletromagneticamente pelo estator,

único elemento do motor ligado à linha de alimentação.

O comportamento de um motor elétrico de indução, no que se refere ao rotor, é comparado ao secundário de um transformador.

O rotor pode ser constituído de duas maneiras: rotor bobinado e rotor em gaiola.

- Rotor bobinado

Constituído de bobinas, cujos terminais são ligados a anéis coletores fixados ao eixo do motor e isolados deste.

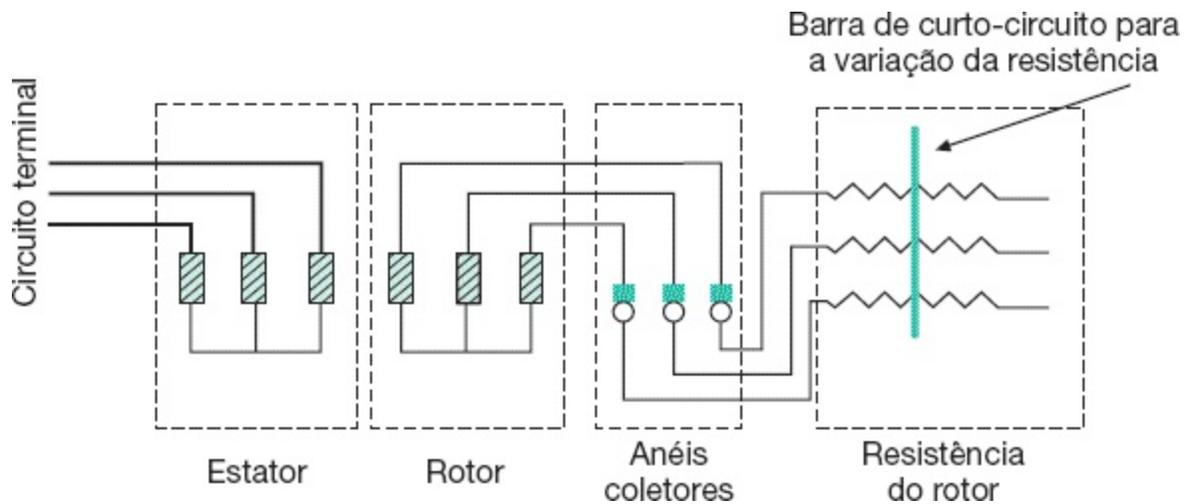
São de emprego frequente nos projetos industriais, principalmente quando se necessita de controle adequado à movimentação de carga, ou se deseja acionar determinada carga por meio do reostato de partida.

Estes motores são construídos com o rotor envolvido por um conjunto de bobinas, normalmente interligadas, em configuração estrela, com os terminais conectados a três anéis, presos mecanicamente ao eixo do motor, porém isolados eletricamente, e ligados por meio de escovas condutoras a uma resistência trifásica, provida de cursor rotativo. Assim, as resistências são colocadas em série com o circuito do enrolamento do rotor, e a quantidade utilizada depende do número de estágios de partida adotado, que, por sua vez, é dimensionado em função exclusivamente do valor da máxima corrente admissível para o acionamento da carga.

A [Figura 6.4](#) apresenta, esquematicamente, a ligação dos anéis acoplados ao reostato de partida, com a barra de curto-circuito medianamente inserida. Já a [Figura 6.5](#) mostra, também, a ligação de um motor com reostato de partida ajustado para acionamento em três tempos.

Na [Figura 6.5](#), pode-se observar que, quando é acionado o contactor geral C1, ligado aos terminais 1-2-3, o motor parte sob o efeito das duas resistências inseridas em cada bobina rotórica. Após certo período de tempo, previamente ajustado, o contactor C3 curto-circuita o primeiro grupo de resistência do reostato, o que equivale ao segundo estágio. Decorrido outro

determinado período de tempo, o contactor C2 opera mantendo em curto-circuito o último grupo de resistências do reostato, o que equivale ao terceiro estágio. Nesta condição, o motor entra em regime normal de funcionamento.



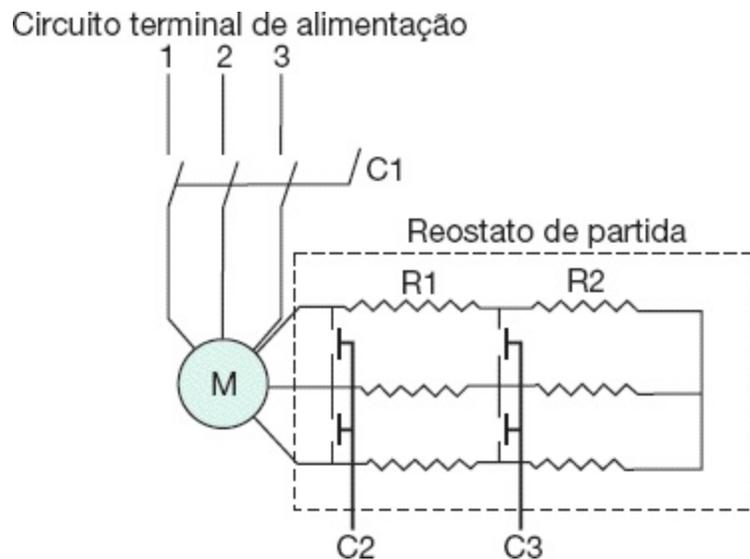
**Figura 6.4** Motor de rotor bobinado.

Os motores de anéis são particularmente empregados na frenagem elétrica, controlando adequadamente a movimentação de cargas verticais, em baixas velocidades. Para isso, usa um sistema combinado de frenagem sobressíncrona ou subssíncrona com inversão das fases de alimentação. Na etapa de levantamento, o motor é acionado com a ligação normal, sendo que tanto a força necessária para vencer a carga resistente como a velocidade de levantamento são ajustadas pela inserção ou retiradas dos resistores do circuito do rotor. Para o abaixamento da carga, basta inverter duas fases de alimentação, e o motor comporta-se como gerador, em regime sobressíncrono, fornecendo energia à rede de alimentação, girando, portanto, no sentido contrário ao funcionamento anterior.

São empregados no acionamento de guindastes e correias transportadoras, compressores a pistão etc.

- Rotor em gaiola

Constituído de um conjunto de barras não isoladas e interligadas por anéis condutores curto-circuitados. Por sua maior aplicação industrial, será o objeto maior deste capítulo.



**Figura 6.5** Reostato de partida.

O motor de indução opera, normalmente, a uma velocidade constante, variando ligeiramente com a aplicação da carga mecânica no eixo.

O funcionamento de um motor de indução baseia-se no princípio da formação de campo magnético rotativo produzido no estator pela passagem da corrente alternada em suas bobinas, cujo fluxo, por efeito de sua variação, se desloca em volta do rotor, gerando correntes induzidas que tendem a se opor ao campo rotativo, sendo, no entanto, arrastado por este.

O rotor em nenhuma hipótese atinge a velocidade do campo rotativo, pois, do contrário, não haveria geração de correntes induzidas, eliminando-se o fenômeno magnético rotórico responsável pelo trabalho mecânico do rotor.

Quando o motor está girando sem a presença de carga mecânica no eixo, comumente chamado *motor a vazio*, o rotor desenvolve uma velocidade angular de valor praticamente igual à velocidade síncrona do campo girante do estator. Adicionando-se carga mecânica ao eixo, o rotor diminui sua

velocidade. A diferença existente entre as velocidades síncrona e a do rotor é denominada *escorregamento*, que representa a fração de rotação que perde o rotor a cada rotação do campo rotórico. O escorregamento, em termos percentuais, é dado pela Equação (6.1).

$$S = \frac{W_s - W}{W_s} \times 100 (\%) \quad (6.1)$$

$W_s$  - velocidade síncrona;

$W$  - velocidade angular do rotor.

### 6.2.2.2 Motores síncronos

Os motores síncronos, comparativamente aos motores de indução e de rotor bobinado, são de pequena utilização em instalações industriais.

Os motores síncronos funcionam a partir da aplicação de uma tensão alternada nos terminais do estator, excitando o campo rotórico por meio de uma fonte de corrente contínua que pode ser diretamente obtida de uma rede de CC, de um conjunto retificador, de uma excitatriz, diretamente acoplada no eixo do motor, comumente chamada dínamo, ou de um grupo motor-gerador. A excitação do campo é feita, geralmente, por anéis coletores acoplados ao eixo do motor.

A corrente absorvida pelo circuito estatório é função da corrente de excitação para determinada carga acionada pelo motor. Quando o motor está girando a vazio, a corrente do estator é praticamente igual à corrente de magnetização. Se for acoplada ao motor uma carga mecânica, a corrente absorvida pelo estator aumentará, estabelecendo um conjugado motor, suficiente para vencer o conjugado resistente.

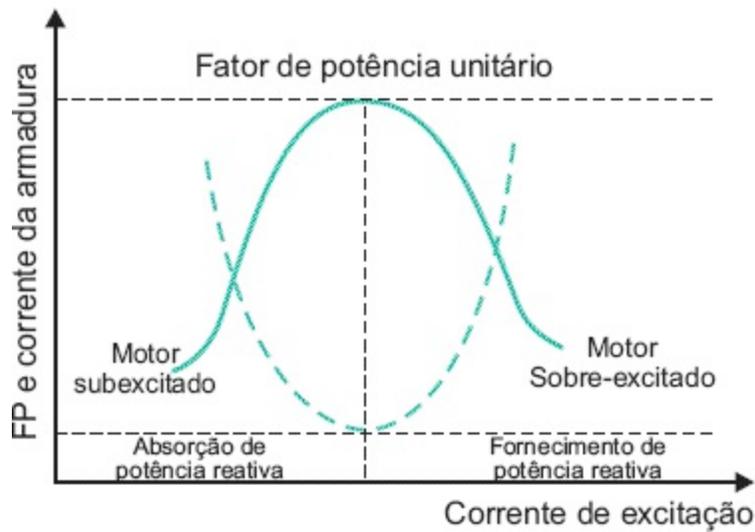
Quando a corrente de excitação é de valor reduzido, isto é, o motor está subexcitado, a força eletromotriz induzida no circuito estatórico é pequena, fazendo com que o estator absorva da rede de alimentação determinada

potência reativa necessária à formação de seu campo magnético e cuja corrente está atrasada em relação à tensão da rede. Se a corrente de excitação for aumentada gradativamente, mantendo-se a grandeza da carga, conseqüentemente elevando-se o valor da força eletromotriz no estator, deve-se chegar em determinado instante em que a corrente estatórica, até então atrasada, deve ficar em fase com a tensão da rede significando um fator de potência unitário. Se este procedimento continuar, isto é, se a corrente de excitação for aumentada ainda mais, a corrente estatórica se adiantará em relação à tensão, caracterizando a “sobre-excitação” do motor síncrono, fazendo com que este passe a fornecer potência reativa à rede, trabalhando com um fator de potência capacitivo.

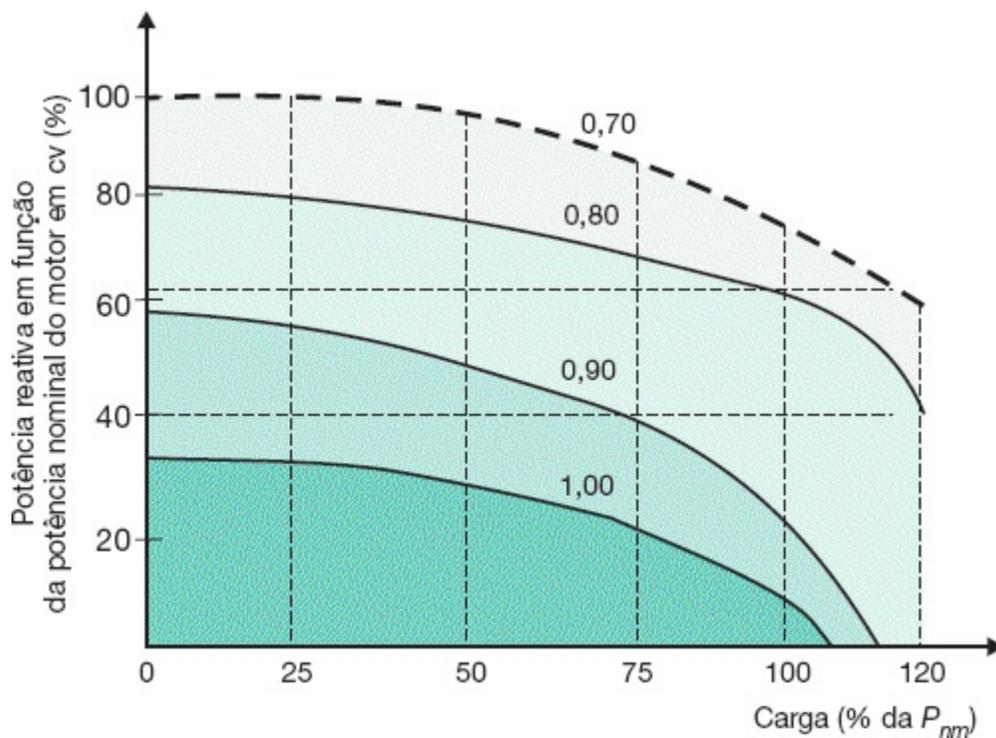
Esse é o princípio básico da correção do fator de potência de uma instalação, utilizando o motor síncrono em alternativa a banco de capacitores.

A [Figura 6.6](#) mostra a variação da corrente estatórica e do fator de potência, relativamente à corrente de excitação. A [Figura 6.7](#) relaciona percentualmente a potência capacitiva fornecida por um motor síncrono em relação à sua potência nominal, em função da variação de carga, para um dado fator de potência capacitivo.

Por meio das curvas da [Figura 6.7](#) conclui-se que um motor síncrono com fator de potência 0,80 pode fornecer, quando a vazio, 81 % de sua potência em cv em potência reativa capacitiva. Se for acoplada ao seu eixo uma carga mecânica de valor igual à nominal, ainda pode fornecer 62 % de sua capacidade em potência capacitiva. Cabe ressaltar que, neste caso, relativamente à [Figura 6.7](#), o motor síncrono está operando “sobre-excitado”.



**Figura 6.6** Fator de potência × corrente de excitação.



**Figura 6.7** Capacidade do motor síncrono no fornecimento de potência reativa.

A utilização de motores síncronos acionando determinados tipos de carga mecânica, para correção do fator de potência de uma instalação industrial, requer cuidados adicionais com respeito às flutuações no torque,

devido à natureza da própria carga. Além disso, motores síncronos de potência inferior a 50 cv não são adequados à correção do fator de potência, em virtude da sensibilidade de perda de sincronismo, quando da ocorrência de flutuações de tensão na rede de alimentação.

Os motores síncronos apresentam dificuldades operacionais práticas, pois necessitam de fonte de excitação, requerendo manutenção constante e muitas vezes dispendiosa.

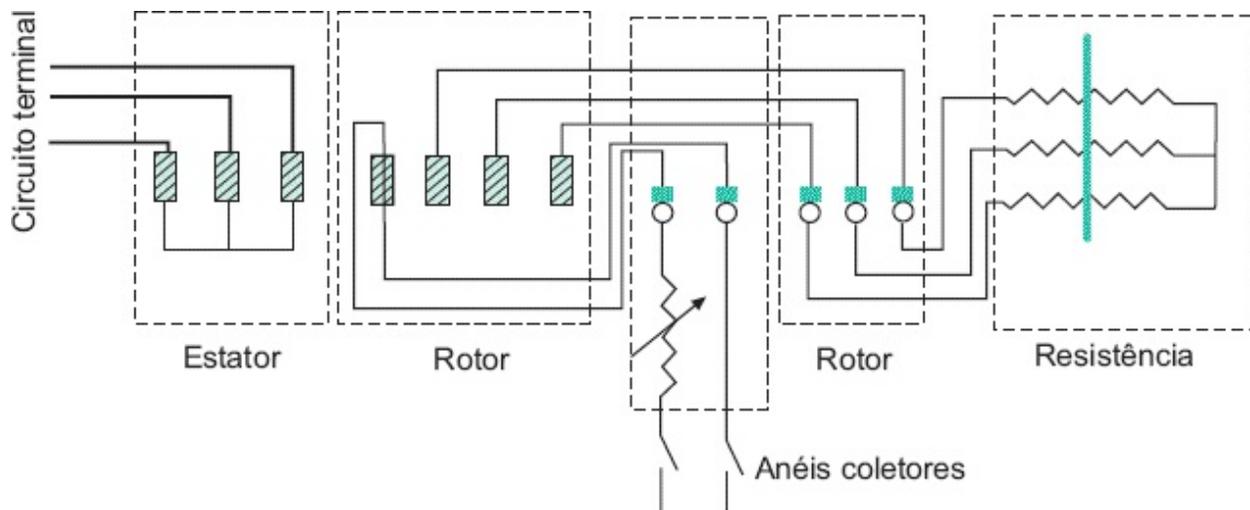
Uma das desvantagens de sua utilização está na partida, pois é necessário que se leve o motor síncrono a uma velocidade suficientemente próxima à velocidade síncrona, a fim de que ele possa entrar em sincronismo com o campo girante.

São empregados vários recursos para tal finalidade, dos quais são citados dois:

- Utilização de um motor de corrente contínua acoplado ao eixo do motor síncrono.
- Utilização de enrolamento de compensação.

Pela aplicação deste último método, o comportamento do motor síncrono, durante a partida, é semelhante ao do motor de indução.

Durante a partida do motor síncrono, dotado de enrolamentos de compensação, também conhecidos como enrolamentos amortecedores, o enrolamento de campo de corrente contínua deve ser curto-circuitado, enquanto se aplica a tensão da rede nos terminais do estator, até levar o motor, a vazio, à condição de sincronismo, semelhantemente a um motor de indução. A seguir, desfaz-se a ligação de curto-circuito do enrolamento de campo e aplica-se nele uma corrente contínua, ajustando-se adequadamente à finalidade de utilização a que se propõe.



**Figura 6.8** Motor síncrono.

Construtivamente, os enrolamentos amortecedores podem ser do tipo gaiola de esquilo ou do tipo rotor bobinado. Neste último caso, o motor síncrono utiliza cinco anéis coletores, conforme esquema da [Figura 6.8](#), sendo que, em três destes, se acoplam as resistências externas do reostato de partida, enquanto os outros dois são utilizados para a excitação do campo rotórico.

À semelhança do motor de indução, à medida que se reduz a resistência do circuito de amortecimento, o motor se aproxima da velocidade síncrona, até que se aplica, no enrolamento de campo, uma tensão em corrente contínua, fazendo o motor entrar em sincronismo com o campo girante.

### 6.2.2.3 Motores monofásicos de indução

Os motores monofásicos são, relativamente aos motores trifásicos, de pequeno uso em instalações industriais. São construídos, normalmente, para pequenas potências (até 15 cv, em geral).

Os motores monofásicos são providos de um segundo enrolamento colocado no estator e defasado de  $90^\circ$  elétricos do enrolamento principal, e que tem a finalidade de tornar rotativo o campo estatórico monofásico. Isto é

o que permite a partida do motor monofásico.

O torque de partida é produzido pelo defasamento de  $90^\circ$  entre as correntes do circuito principal e as do circuito de partida. Para se obter esta defasagem, liga-se ao circuito de partida um condensador, de acordo com esquema da [Figura 6.9\(a\)](#).

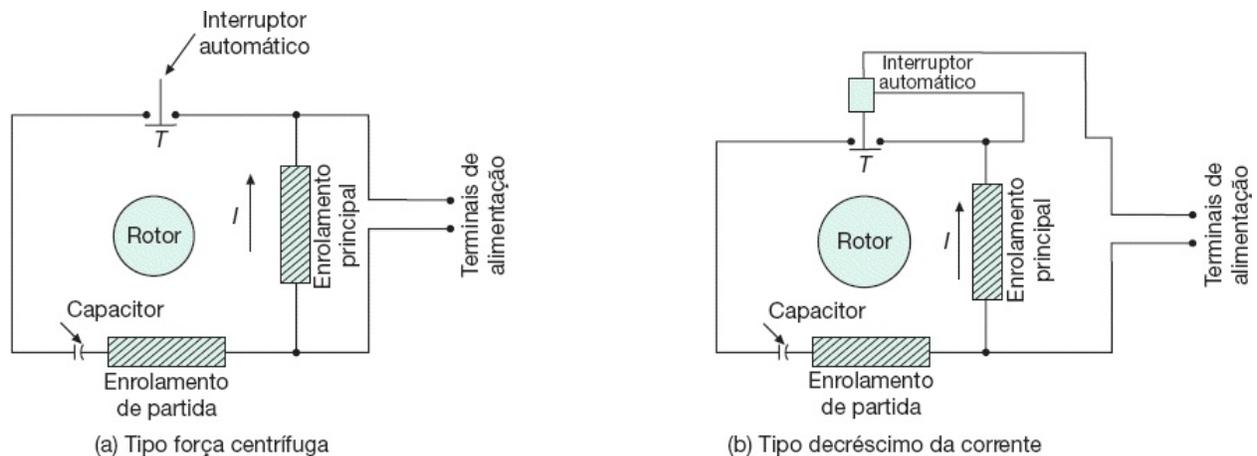
O campo rotativo assim produzido orienta o sentido de rotação do motor. A fim de que o circuito de partida não fique ligado desnecessariamente após o acionamento do motor, um dispositivo automático desliga o enrolamento de partida, passando o motor a funcionar normalmente em regime monofásico. Este dispositivo pode ser acionado por um sistema de força centrífuga, conforme a [Figura 6.9\(a\)](#).

A bobina que liga o circuito de partida é desenergizada pelo decréscimo do valor da corrente no circuito principal, após o motor entrar em regime normal de funcionamento. A [Figura 6.9\(b\)](#) fornece o detalhe de ligação desse dispositivo automático.

O condensador de partida é do tipo eletrolítico que tem a característica de funcionar somente quando é solicitado por tensões com polaridade estabelecida. É montado, normalmente, sobre a carcaça do estator, por meio de um suporte que também tem a finalidade de protegê-lo mecanicamente.

A [Tabela 6.1](#) fornece as características básicas dos motores monofásicos.

Os motores monofásicos podem ser do tipo indução ou síncrono, cujas características básicas são idênticas às que foram estabelecidas para os motores trifásicos correspondentes.



**Figura 6.9** Interruptor automático.

### 6.2.2.4 Motores tipo universal

São aqueles capazes de operar tanto em corrente contínua como em corrente alternada. São amplamente utilizados em eletrodomésticos, como enceradeiras, liquidificadores, batedeiras etc. São constituídos de uma bobina de campo, em série com a bobina da armadura, e de uma bobina de compensação que pode estar ligada em série ou em paralelo com a bobina de campo, cuja compensação é denominada, respectivamente, condutiva ou indutiva.

## 6.3 Motores assíncronos trifásicos com rotor em gaiola

Os motores de indução trifásicos com rotor em gaiola são usados na maioria das instalações industriais, principalmente em máquinas não suscetíveis a pequenas variações de velocidade.

O princípio de funcionamento dos motores assíncronos trifásicos que constituem a maioria dos motores em operação nas indústrias está baseado em três enrolamentos instalados no estator, que estão diretamente ligados na fonte de tensão, deslocados fisicamente de  $120^\circ$ . Por sua vez, a fonte de

alimentação do sistema elétrico é composta por três tensões, também defasadas no tempo de  $120^\circ$ , formando um campo magnético girante, na velocidade angular definida pela frequência do sistema de alimentação que atravessa o entreferro atingindo a massa rotórica e induzindo nas barras rotóricas forças eletromotrizes. Como essas barras estão em curto-circuito nas suas extremidades, por meio de dois anéis, há um fluxo de corrente circulando que, interagindo com o campo girante estático, produz um conjugado eletromecânico que arrasta o rotor no sentido desse campo. Para que haja conjugado, a velocidade angular do rotor deve ser ligeiramente inferior à velocidade angular do campo girante estático. Na suposição de que a velocidade angular rotórica seja igual à velocidade do campo girante estático, o conjugado ficaria nulo.

Para obtenção de velocidade constante, devem-se usar motores síncronos, normalmente, construídos para potências elevadas, devido a seu alto custo relativo, quando fabricados em potências menores.

A seguir, serão estudadas as principais características dos motores de indução trifásicos com rotor em gaiola.

### 6.3.1 Potência nominal

É a potência que o motor pode fornecer no eixo, em regime contínuo, sem que os limites de temperatura dos enrolamentos sejam excedidos aos valores máximos permitidos por norma, dentro de sua classe de isolamento. Sempre que são aplicadas aos motores cargas de valor muito superior ao da potência para a qual foram projetados, seus enrolamentos sofrem um aquecimento anormal, diminuindo a vida útil da máquina, podendo, inclusive, danificar o isolamento até se estabelecer um curto-circuito interno que caracteriza sua queima.

A potência desenvolvida por um motor representa a rapidez com que a energia é aplicada para mover a carga. Por definição, potência é a relação

entre a energia gasta para realizar determinado trabalho e o tempo em que o mesmo foi executado. Isto pode ser facilmente entendido se se considera a potência necessária para levantar um objeto pesando 50 kgf, do fundo de um poço de 40 m de profundidade, durante um período de tempo de 27 s. A energia gasta foi de  $50 \text{ kgf} \times 40 \text{ m} = 2.000 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ . Como o tempo para realizar este trabalho foi de 27 s, a potência exigida pelo motor foi de  $P_{m1} = 2.000/27 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} = 74 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$ . Se o mesmo trabalho tivesse que ser realizado em 17 s, a potência do motor teria que ser incrementada para  $P_{m2} = 2.000/17 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} = 117 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$ . Considerando que 1 cv é o equivalente a  $75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$ , então as potências dos motores seriam:

$$P_{m1} = \frac{74}{75} = 0,98 \approx 1 \text{ cv}$$

$$P_{m2} = \frac{117}{75} = 1,56 \approx 1 \frac{1}{2} \text{ cv}$$

Em geral, a potência nominal é fornecida em cv, sendo 1 cv equivalente a 0,736 kW.

A potência nominal de um motor depende da elevação de temperatura dos enrolamentos durante o ciclo de carga. Assim, um motor pode acionar uma carga com potência superior à sua potência nominal até atingir um conjugado um pouco inferior a seu conjugado máximo. Essa sobrecarga, no entanto, não pode resultar em temperatura dos enrolamentos superior à sua classe de temperatura. Do contrário, a vida útil do motor será sensivelmente afetada.

Quando o motor opera com cargas de regimes intermitentes, a potência nominal do motor deve ser calculada levando em consideração o tipo de regime. Esse assunto será tratado no Capítulo 7.

Como informação adicional, a seguir são dadas as expressões que permitem determinar a potência de um motor para as atividades de maior uso industrial:

a) **Bombas**

$$P_b = \frac{9,8 \times Q \times \gamma \times H}{\eta} \quad (6.2)$$

$P_b$  - potência requerida pela bomba, em kW;

$Q$  - quantidade do líquido, em m<sup>3</sup>/s;

$\gamma$  - peso específico do líquido, em kg/dm<sup>3</sup>:

$$\gamma = 1 \text{ kg/dm}^3, \text{ para a água}$$

$H$  - altura de elevação mais altura de recalque, em m;

$\eta$  - eficiência da bomba:

$$0,87 \leq \eta \leq 0,90, \text{ para bombas a pistão;}$$

$$0,40 \leq \eta \leq 0,70, \text{ para bombas centrífugas.}$$

**Tabela 6.1** Características dos motores elétricos monofásicos

Potência nominal	Corrente (220 V)	Velocidade	Fator de potência	Relação	Relação	Conjugado		Rendimento
						Nominal	Cm/Cn	
cv	kW	A	rpm	%	Inp/In	Cp/Cn	m · kgf	%
<b>II polos</b>								
1,5	1,1	7,5	3.535	75	7,8	2,9	0,31	2,3
2	1,5	9,5	3.530	76	7,2	2,9	0,61	2,3
3	2,2	13,0	3.460	77	7,6	3,0	0,81	2,2
4	3,0	18,0	3.515	79	8,7	2,8	0,61	2,6

5	3,7	23,0	3.515	81	7,9	2,8	1,00	2,6
7,5	5,5	34,0	3.495	78	6,2	2,1	1,50	2,1
10	7,5	42,0	3.495	82	7	2,1	2,00	2,6

#### IV polos

1	0,75	5,8	1.760	71	8,2	3,0	0,41	2,5
1,5	1,1	7,5	1.760	75	8,7	2,8	0,61	2,9
2	1,5	9,5	1.750	77	8,7	3,0	0,81	2,8
3	2,2	14,0	1.755	79	8,5	3,0	1,20	2,8
4	3,0	19,0	1.745	80	7,1	2,9	1,60	2,6
5	3,7	25,0	1.750	81	7,5	3,0	2,00	2,6
7,5	5,5	34,0	1.745	84	7,4	3,0	3,10	2,6
10	7,5	46,0	1.745	85	7,6	3,0	4,10	2,5

#### Exemplo de aplicação (6.1)

Calcular a potência nominal de um motor que será acoplado a uma bomba centrífuga, cuja vazão é de 0,50 m<sup>3</sup>/s. A altura de recalque mais a de elevação é de 15 m e a bomba é destinada à captação de água potável, e sua eficiência é de 0,70.

$$P_g = \frac{9,8 \times 0,5 \times 1 \times 15}{0,70} = 105,0 \text{ kW} \rightarrow P_m = 150 \text{ cv (Tabela 6.4)}$$

## b) Elevadores de carga

$$P_e = \frac{C \times V}{102 \times \eta} \text{ (kW)} \quad (6.3)$$

$P_e$  - potência requerida pelo motor do guindaste, kW;

$\eta \approx 0,70$ ;

$C$  - carga a ser levantada, em kg;

$V$  - velocidade, em m/s:

$0,50 \leq V \leq 1,50$  m/s, para elevadores de pessoa;

$0,40 \leq V \leq 0,60$  m/s, para elevadores de carga.

### Exemplo de aplicação (6.2)

Determinar a potência nominal de um motor de um elevador de carga destinado a levantar uma carga máxima de 400 kg.

$$P_e = \frac{400 \times 0,6}{102 \times 0,7} = 3,36 \text{ kW} \quad \rightarrow \quad P_m = 5 \text{ cv (Tabela 6.4)}$$

## c) Ventiladores

$$P_v = \frac{Q \times P}{1.000 \times \eta} \quad (6.4)$$

$P_v$  - potência requerida pelo ventilador, em kW;

$Q$  - vazão, em m<sup>3</sup>/s;

$P$  - pressão, em N/m<sup>2</sup>;

$\eta$  - rendimento:

$0,50 \leq \eta \leq 0,80$ , para ventiladores com  $P > 400$  mmHg;

$0,35 \leq \eta \leq 0,50$ , para ventiladores com  $100 \leq P \leq 400$  mmHg;

$0,20 \leq \eta \leq 0,35$ , para ventiladores com  $P < 100$  mmHg.

Obs.:  $1 \text{ mmHg} = 9,81 \text{ N/m}^2$ ;

$1 \text{ N/m}^2 = 1,02 \times 10^{-3} \text{ kgf/m}^2$

#### d) Compressores

$$P_c = \frac{2 \times \pi \times W_c \times C_{nc}}{1.000 \times \eta_{ac}} \quad (6.5)$$

$P_c$  - potência requerida pelo compressor, em kW;

$W_c$  - velocidade nominal do compressor, em rps;

$C_{nc}$  - conjugado nominal do compressor, em mN;

$\eta_{ac}$  - rendimento de acoplamento:

$$\eta_{ac} \approx 0,95$$

#### Exemplo de aplicação (6.3)

Determinar a potência de um compressor, sabendo-se que a redução do acoplamento é 0,66, a velocidade do compressor é de 1.150 rpm e o conjugado nominal de 40 mN.

Velocidade nominal do motor

$$W_n = \frac{W_c}{R_{ac}} = \frac{1.150}{0,66} = 1.742 \text{ rpm}$$

Velocidade nominal do compressor

$$W_c = \frac{1.150}{60} = 19,16 \text{ rps}$$

Potência nominal do motor

$$P_c = \frac{2 \times \pi \times 19,16 \times 40}{1.000 \times 0,95} = 5 \text{ kW} \rightarrow P_m = 7,5 \text{ cv (Tabela 6.4).}$$

Existe uma condição operacional de motores muito utilizada em processos industriais, notadamente em esteiras rolantes, quando dois ou mais motores funcionam mecanicamente em paralelo.

Se dois ou mais motores idênticos são acoplados por um mecanismo qualquer e trabalham mecanicamente em paralelo, dividem a carga igualmente. Para isto, é necessário que os motores tenham o mesmo escorregamento, o mesmo número de polos e a mesma potência nominal no eixo.

Se dois ou mais motores têm o mesmo número de polos, mas diferentes potências nominais no eixo, normalmente dividem a carga na mesma proporção de suas potências de saída.

### 6.3.2 Tensão nominal

As tensões de maior utilização nas instalações elétricas industriais são de 220, 380 e 440 V. A ligação do motor em determinado circuito depende das tensões nominais múltiplas para as quais foi projetado, o que será objeto de estudo posterior.

Os motores devem trabalhar dentro de limites de desempenho satisfatório para uma variação de tensão de  $\pm 10\%$  de sua tensão nominal, desde que a frequência não varie. No Capítulo 10 serão mostrados os efeitos

das variações de tensão e frequência sobre os motores, indicando-se os dispositivos de proteção adequados.

Quando o motor trifásico está conectado em um sistema elétrico com as tensões desequilibradas, além do conjugado positivo acionando o motor no sentido normal de rotação, aparecerá um conjugado negativo no sentido contrário de rotação. O conjugado positivo é resultado dos componentes de sequência positiva (tensão, corrente e impedância). Já o conjugado negativo, tentando arrastar o rotor no sentido contrário, é decorrente dos componentes de sequência negativa. Como resultado, há um crescimento da corrente de carga e conseqüente aumento da temperatura do motor de acordo com a [Tabela 6.2](#).

**Tabela 6.2** Efeitos do desequilíbrio de tensão para os motores elétricos

Desequilíbrio de tensão entre fases (%)	Elevação da corrente de carga (%)	Elevação da temperatura (%)
2,5	21,0	12,5
2,0	16,7	8,0
1,5	12,5	4,5
1,0	8,0	2,0
0,5	3,8	0,5

### 6.3.3 Corrente nominal

É aquela solicitada da rede de alimentação pelo motor, trabalhando à potência nominal, com frequência e tensões nominais. O valor da corrente é dado pela Equação (6.6).

$$I_{nm} = \frac{736 \times P_{nm}}{\sqrt{3} \times V \times \eta \times \cos \psi} \quad (\text{A}) \quad (6.6)$$

$P_{nm}$  - potência nominal do motor, em cv;

$V$  - tensão nominal trifásica, em volts;

$\eta$  - rendimento do motor;

$\cos \psi$  - fator de potência sob carga nominal.

### 6.3.4 Frequência nominal

É aquela fornecida pelo circuito de alimentação e para a qual o motor foi dimensionado.

O motor deve trabalhar satisfatoriamente se a frequência variar dentro de limites de  $\pm 5\%$  da frequência nominal, desde que seja mantida a tensão nominal constante.

Os motores trifásicos com rotor bobinado quando ligados em uma rede de energia elétrica cuja frequência é diferente da frequência nominal apresentam as seguintes particularidades:

#### a) Motor de 50 Hz ligado em 60 Hz

- A potência mecânica não varia.
- A corrente de partida diminui em 17 %.
- A corrente nominal não varia.
- A velocidade nominal aumenta em 20 %, isto é, na mesma proporção do aumento da frequência.
- A relação entre o conjugado máximo e o conjugado nominal diminui em 17 %.
- A relação entre o conjugado de partida e o conjugado nominal diminui em 17 %.

#### b) Motor de 60 Hz ligado em 50 Hz

- A potência aumenta em 20 % para motores de IV, VI e VIII polos.
- A corrente de carga não varia.
- A velocidade nominal diminui na mesma proporção da redução da frequência.
- A relação entre o conjugado máximo e o conjugado nominal aumenta.
- A relação entre o conjugado de partida e o conjugado nominal aumenta.

Deve-se alertar que não é aconselhável utilizar motores com rotor bobinado, frequência nominal de 60 Hz, em redes de tensão nominal de 50 Hz, a não ser que a tensão aplicada aos seus terminais seja reduzida de aproximadamente 9 %. Nessas condições, há uma perda de 17 % na potência nominal, mantendo-se inalteradas a corrente nominal, o conjugado de partida e o conjugado máximo.

### 6.3.5 Fator de potência

Deve-se consultar o Capítulo 4.

### 6.3.6 Fator de serviço

É um número que pode ser multiplicado pela potência nominal do motor, a fim de se obter a carga permissível que o mesmo pode acionar, em regime contínuo, dentro de condições estabelecidas por norma.

O fator de serviço não está ligado à capacidade de sobrecarga própria dos motores, valor, em geral, situado entre 100 e 125 % da carga nominal durante períodos curtos. Na realidade, o fator de serviço representa uma potência adicional contínua, porém com o aumento das perdas elétricas.

### 6.3.7 Perdas ôhmicas

O motor absorve do circuito de alimentação determinada potência que deverá ser transmitida ao eixo para o acionamento da carga. Porém, devido a perdas internas, em forma de calor gerado pelo aquecimento das bobinas dos enrolamentos e outras, a potência mecânica de saída no eixo é sempre menor do que a potência de alimentação. Deste fenômeno nasce o conceito de rendimento, cujo valor é sempre menor que a unidade.

As perdas verificadas em um motor elétrico são:

- Perdas Joule nas bobinas estatóricas: perdas no cobre ( $P_{cu}$ ).
- Perdas Joule nas bobinas rotóricas: perdas no cobre ( $P_{cu}$ ).
- Perdas magnéticas estatóricas: perdas no ferro ( $P_{fe}$ ).
- Perdas magnéticas rotóricas: perdas no ferro ( $P_{fe}$ ).
- Perdas por ventilação: ( $P_v$ ).
- Perdas por atrito dos mancais: perdas mecânicas ( $P_m$ ).

A [Figura 6.10](#) ilustra o balanço das potências e perdas elétricas envolvidas em um motor elétrico.

Todo o calor formado no interior do motor deve ser dissipado para o meio exterior por meio da superfície externa da carcaça, auxiliada, para determinados tipos de motores, por ventiladores acoplados ao eixo.

Não se deve julgar o aquecimento interno do motor simplesmente medindo-se a temperatura da carcaça, pois isto pode fornecer resultados falsos.

Os motores trifásicos ligados a fontes trifásicas desequilibradas sofrem o efeito do componente de sequência negativa em forma de aquecimento, provocando o aumento das perdas, principalmente as perdas no cobre, e reduzindo, assim, a potência de saída disponível dos mesmos.

Portanto, deve-se procurar manter o mais equilibrado possível a tensão entre fases de alimentação dos motores elétricos.

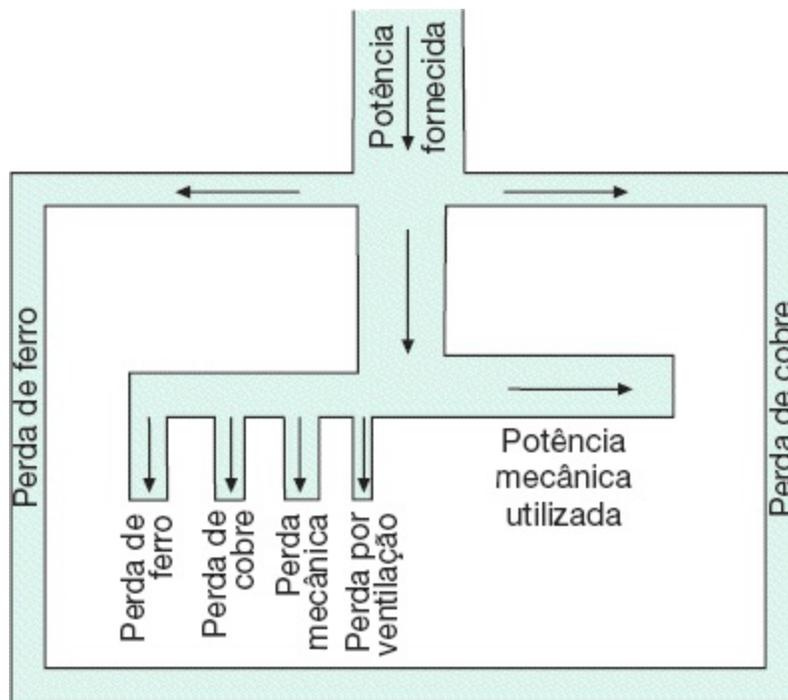
### 6.3.8 Expectativa de vida útil

A vida útil de um motor está intimamente ligada ao aquecimento das bobinas dos enrolamentos fora dos limites previstos na fabricação da máquina, o que acarreta temperaturas superiores aos limites da isolação. Assim, uma elevação de temperatura de 10 °C na temperatura de isolação de um motor reduz sua vida útil pela metade.

A vida útil é também afetada pelas condições desfavoráveis de instalação, como umidade, ambiente com vapores corrosivos, vibrações etc.

O aquecimento, fator principal da redução da vida útil de um motor, provoca o envelhecimento gradual e generalizado do isolamento, até o limite de tensão a que está submetido, quando então o motor ficará sujeito a um curto-circuito interno, de consequência desastrosa.

Existem algumas teorias que justificam a perda de vida útil das isolações. De acordo com uma delas, a chamada teoria disruptiva, as ligações moleculares dos materiais isolantes sólidos são rompidas, provocando a ruptura dos mesmos.



**Figura 6.10** Perdas elétricas em um motor.

A vida útil de uma isolação pode ser avaliada pelo tempo decorrido após 10 % das amostras do material em análise apresentarem falha. A [Figura 6.11](#) permite determinar a vida útil das isolações para as classes A e B.

### 6.3.9 Classes de isolamento

A norma agrupa os materiais isolantes e os sistemas de isolamento, no que se denomina classe de isolamento, e estes são limitados pela temperatura que cada material isolante pode suportar em regime contínuo sem que seja afetada sua vida útil.

São as seguintes as classes de isolamento empregadas em máquinas elétricas:

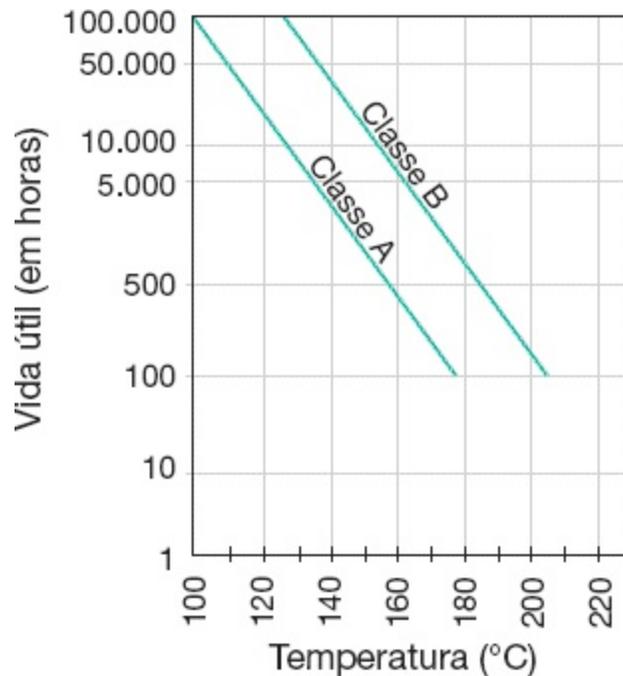
- Classe A – limite: 105 °C: seda, algodão, papel e similares impregnados em líquidos isolantes: por exemplo: esmalte de fios;
- Classe E – limite: 120 °C: fibras orgânicas sintéticas.
- Classe B – limite: 130 °C: asbesto, mica e materiais a base de poliéster.
- Classe F – limite: 155 °C: fibra de vidro, amianto associado a materiais sintéticos (silicones).
- Classe H – limite: 180 °C: fibra de vidro, mica, asbesto, associado a silicones de alta estabilidade térmica.

As classes de isolamento mais comumente empregadas são: A, E e B, sendo a H de moderada utilização. Como já foi visto na Seção 6.3.8, a temperatura do enrolamento é fundamental para a vida útil do motor.

### 6.3.10 Elevação de temperatura

A temperatura de serviço dos motores elétricos não é uniforme em todas as suas partes componentes. Para fazer sua medição, são usados detetores térmicos inseridos nos enrolamentos, o que permite a determinação da

temperatura do chamado ponto mais quente.



**Figura 6.11** Vida útil das isolações.

No entanto, quando não se dispõe desses detetores, pode-se determinar a temperatura dos enrolamentos pela Equação (6.7).

$$T = \frac{R_q}{R_f} \times (235 + T_f) - 235 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (6.7)$$

$T$  - temperatura média do enrolamento, em  $^\circ\text{C}$ ;

$T_f$  - temperatura do enrolamento com o motor frio, à mesma temperatura ambiente, em  $^\circ\text{C}$ ;

$R_f$  - resistência ôhmica da bobina com o motor frio, à mesma temperatura ambiente, em  $\Omega$ ;

$R_q$  - resistência ôhmica do enrolamento do motor, medida quando este atingir o aquecimento de regime, em  $\Omega$ .

Para se determinar a elevação de temperatura do enrolamento, deve-se

aplicar a expressão:

$$\Delta T = \frac{R_q - R_f}{R_f} \times (235 + T_f) + (T_f - T_a) \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (6.8)$$

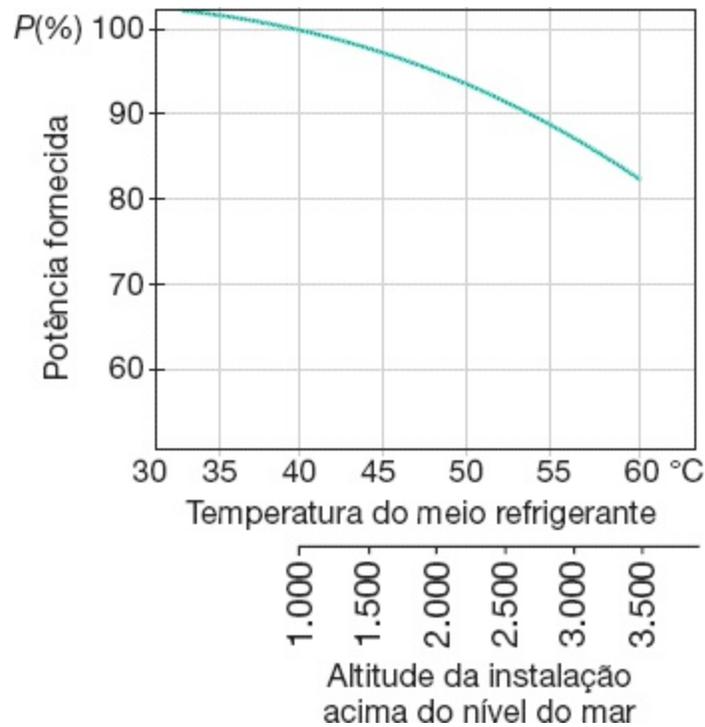
$T_a$  - temperatura do meio refrigerante no fim do ensaio, em  $^\circ\text{C}$ .

O valor de  $T$  obtido da Equação (6.7) representa a temperatura média do enrolamento, dado que a resistência ôhmica média é referente a todo o enrolamento e não somente ao ponto mais quente, o que seria o correto. Porém, na prática, observa-se que esta diferença de temperatura não varia significativamente.

O processo de medida, como se pode notar, é baseado na variação da resistência ôhmica do condutor do enrolamento em função da variação de temperatura.

O tempo de resfriamento de um motor, desde sua temperatura de regime até a temperatura ambiente, é variável com as dimensões do motor. Em média, para motores pequenos, pode-se tomá-lo como de três horas, e para motores de potência elevada (acima de 60 cv), de cinco horas.

Por dificuldades de ventilação em determinadas altitudes, motivadas por rarefação do ar ambiente, os motores são dimensionados, normalmente, para trabalhar, no máximo, a 1.000 m acima do nível do mar. A [Figura 6.12](#) mostra o decréscimo percentual da potência do motor em função da altitude de sua instalação, bem como a influência da temperatura do meio refrigerante.



**Figura 6.12** Potência de um motor  $\times$  altitude.

Como o valor da temperatura é tomado pela média, a elevação de temperatura do motor é admitida inferior em 5 °C para motores das classes A e E, em 10 °C para a classe B e em 15 °C para as classes F e H. O gráfico da [Figura 6.13](#) ilustra esse procedimento.

Neste ponto, é conveniente fazer uma análise das circunstâncias em que um motor de indução é conduzido a temperaturas elevadas em função das condições a que são submetidos. Para isso, pode-se representar um motor de indução como uma fonte de calor resultante dos efeitos térmicos das bobinas e do ferro do estator, bem como das barras de curto-circuito e do ferro do rotor. Por outro lado, o mesmo motor pode ser representado como um dissipador de calor, pela ação do meio refrigerante, de forma natural ou forçada. Se o fluxo de calor gerado está sendo retirado na forma do projeto da máquina pelo sistema de dissipação térmica, a temperatura nas diferentes partes do motor atinge um valor que permite classificar o seu funcionamento como de *regime permanente*.

Serão analisadas as seguintes condições operativas.

### a) Sobrecargas de curta e de longa duração

Ao se analisar um motor sob o aspecto de sobrecarga, há duas considerações a serem feitas. A primeira diz respeito às sobrecargas de curta duração, caracterizadas pelas partidas diretas do motor, onde a corrente se eleva a valores entre seis e oito vezes a corrente nominal, em um curto espaço de tempo, da ordem de 0,5 a 5 s, de forma que impossibilite a troca do calor gerado pelo estator e rotor para o meio ambiente. Devido à corrente elevada e ao calor produzido, medido pela energia dissipada igual a  $E = RI^2 \times t$ , a temperatura nas barras do rotor do motor se eleva a valores de 300 a 350 °C, podendo ser danificadas por deformação permanente.

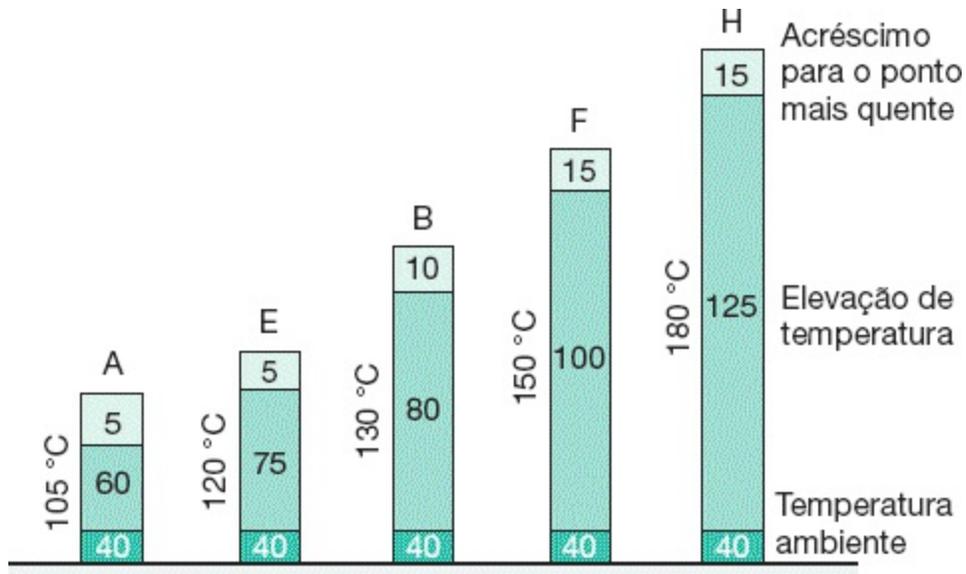


Figura 6.13 Temperaturas dos motores elétricos.

Como não há troca de calor com o exterior, os condutores dos enrolamentos se aquecem e, conseqüentemente, sua isolação, cujo processo é chamado de *aquecimento adiabático*.

A segunda análise diz respeito às sobrecargas de longa duração caracterizadas por sobressolicitação mecânica no eixo do motor, onde a

corrente de sobrecarga atinge valores modestos comparados com a situação anterior, porém com um tempo excessivamente longo, de forma que os enrolamentos acumulam uma quantidade de calor exagerada e elevam sua temperatura acima da classe de isolamento.

O funcionamento dos motores de indução pode ser classificado em três períodos distintos.

- Em repouso

Caracteriza-se pelo instante da partida, em que a velocidade rotórica é nula. Também pode ocorrer o travamento do rotor quando, por exemplo, o conjugado de carga supera o conjugado motor.

Nestas circunstâncias, como o campo girante corta o rotor na velocidade síncrona, elevando o valor da reatância rotórica ( $X = 2 \cdot FL$ ) e, conseqüentemente, as perdas Joule correspondentes, o rotor é o responsável pela limitação da operação do motor, já que alcança seu limite térmico primeiro que o estator.

- Durante o período de aceleração

Caracteriza-se pelo período durante o qual o rotor adquire sua velocidade inicial até atingir o regime de funcionamento normal, próximo à velocidade síncrona. O aquecimento do motor neste período depende da curva de conjugado resistente que define o tempo de aceleração.

Nesta circunstância, como a tensão induzida no motor é elevada, porém decrescente, o rotor alcança seu limite térmico antes do estator e, portanto, é a parte limitante da operação do motor.

Cabe observar que durante o período de aceleração o rotor pode travar se a curva de conjugado resistente se igualar ou superar a curva de conjugado motor, sendo, neste caso, o motor limitado termicamente pelo rotor.

- Durante o período de regime de funcionamento normal

Se durante este período o motor for submetido à sobrecarga, o estator desenvolve uma quantidade de calor tal que alcança o limite térmico em um tempo inferior ao do rotor e o motor é, portanto, limitado pelo estator.

### b) Ausência de fase

Quando da ausência de uma fase, a potência desenvolvida pelo motor basicamente não se altera, apesar de seu funcionamento passar da condição de suprimento trifásico para bifásico, ou seja.

$$P_{\text{tf}} = P_{\text{bi}} \rightarrow \sqrt{3} \times V_{\text{tf}} \times I_n = V_{\text{tf}} \times I_1 \rightarrow \sqrt{3} \times I_n = I_1$$

Nestas condições, a corrente que circula pelo relé na operação bifásica é 57,7 % superior à corrente nominal do motor que, em operação trifásica, circula pelo mesmo relé. Assim, um motor de 100 cv tem uma corrente nominal de 135,4 A, e quando em operação bifásica, a corrente que circulará pelo relé é de 234,5 A, isto é, a corrente que sensibilizará o relé é 57,7 % superior à corrente nominal do motor:

$$I_{\text{re}} = \frac{I_n}{\sqrt{3}} \times 100 = 57,76 \% \times I_n,$$

ou

$$\Delta I = \frac{I_n}{I_1} \times 100 = \frac{135,4}{\sqrt{3} \times 135,4} \times 100 = 57,7 \%$$

Se um relé térmico for ajustado para o valor da corrente nominal, como é aconselhável, a atuação do relé se dará aproximadamente em três minutos para o relé a frio, isto é, no seu início de funcionamento, ou em 45 s com o relé a quente, isto é, após decorrido tempo suficiente para se alcançar a estabilidade térmica. Se o motor estiver funcionando com uma carga equivalente a até 57,7 % do seu valor nominal, o relé térmico não seria sensibilizado. Aparentemente não haveria danos no motor já que a corrente

absorvida pelo mesmo seria igual à corrente nominal. Porém, nestas circunstâncias há um grande desequilíbrio de corrente circulando no estator da máquina e, conseqüentemente, aparecerá um forte componente de seqüência negativa, afetando termicamente o rotor.

### c) Desequilíbrio de corrente

Quando as correntes absorvidas pelos motores de indução estão desequilibradas, surge um conjugado de frenagem que se opõe ao conjugado motor. Porém, o motor continua girando no sentido normal, sofrendo uma ligeira queda de velocidade angular. A potência no eixo do motor praticamente permanece inalterada.

O campo de seqüência negativa que gira ao contrário do campo normal ou de seqüência positiva induz nas barras do rotor uma corrente na frequência duas vezes superior à frequência industrial. Motivado pelo efeito *skin*, em que as correntes indesejadas de alta frequência tendem a circular pela superfície dos condutores dos enrolamentos, o rotor fica submetido de imediato aos efeitos térmicos resultantes do processo, enquanto o estator praticamente não é alterado termicamente nem absorve nenhuma corrente adicional, já que a potência no eixo permanece constante.

Se o motor estiver operando na sua potência nominal, o rotor sofrerá um aquecimento acima do seu limite térmico e as proteções instaladas nos condutores de alimentação não serão sensibilizadas.

Para que o motor seja protegido contra elevações de temperatura são utilizados protetores térmicos instalados no interior de seus enrolamentos estatóricos, dimensionados em função da isolação empregada e das características de projeto do motor. Assim, são utilizados, em geral, os seguintes elementos protetores:

### a) Termostatos

São componentes bimetálicos construídos de duas lâminas com coeficientes

de dilatação térmica diferentes, dotadas de contatos de prata em suas extremidades que se fecham quando ocorre uma elevação de temperatura definida para aquele tipo de projeto.

Para dar maior grau de segurança ao motor, podem ser utilizados dois termostatos por fase. O primeiro termostato ao ser sensibilizado para o valor da elevação de temperatura do motor faz atuar um alarme sonoro e/ou visual, enquanto o segundo termostato ao ser sensibilizado para o valor da temperatura máxima do material isolante faz operar o sistema de proteção, desligando o motor.

### **b) Termorresistores**

São componentes cujo funcionamento é baseado na variação da resistência elétrica em função da temperatura a que estão submetidos. Apenas alguns materiais seguem essas características, como o cobre, a platina e o níquel. São fabricados de forma a se obter uma resistência definida para cada aplicação e que varia linearmente de acordo com a temperatura. Essa característica permite que se acompanhe a evolução do aquecimento do enrolamento do motor durante sua operação.

São aplicados em motores que operam máquinas com funções vitais para o processo e trabalham em regime intermitente de forma muito irregular. Podem ser utilizados para alarme e desligamento, conforme o uso dos termostatos.

A esses componentes podem ser conectados monitores de controle de um sistema industrial automatizado, permitindo o conhecimento do comportamento térmico do motor.

### **c) Termistores**

São componentes térmicos constituídos de materiais semicondutores, que variam sua resistência elétrica de forma brusca, quando a temperatura do meio em que está inserido atinge o valor da temperatura de atuação do

termistor. Esses componentes podem ser construídos de duas diferentes formas, quanto ao coeficiente de temperatura:

- Tipo PTC

São elementos cujo coeficiente de temperatura é positivo, isto é, sua resistência aumenta de forma brusca quando a temperatura do meio atinge o valor da temperatura de calibração do termistor. A elevação brusca da resistência elétrica do termistor faz interromper a circulação de corrente que mantém abertos os contatos de um contactor auxiliar, responsável pelo acionamento do disjuntor ou de um contactor de comando do motor.

Para dar maior grau de segurança ao motor, podem ser utilizados dois termistores por fase. O primeiro termistor ao ser sensibilizado para o valor da temperatura do motor faz atuar um alarme sonoro e/ou visual, enquanto o segundo termistor ao ser sensibilizado para o valor da temperatura máxima do material isolante faz operar o sistema de proteção, desligando o motor.

- Tipo NTC

São elementos cujo coeficiente de temperatura é negativo, isto é, sua resistência diminui de forma brusca quando a temperatura do meio atinge o valor da temperatura de calibração do termistor. A redução brusca da resistência elétrica do termistor faz circular a corrente na bobina de um contactor auxiliar, responsável pelo acionamento do disjuntor ou de um contactor de comando do motor.

Para dar maior grau de segurança ao motor, podem ser utilizados dois termistores por fase.

Para a proteção dos motores elétricos, são utilizados os termistores do tipo PTC, devido ao fato de os circuitos eletrônicos disponíveis operarem com característica PTC.

A [Figura 6.14](#) mostra os enrolamentos rotóricos de um motor dotado de termistor instalado na cabeça da bobina.

### Exemplo de aplicação (6.4)

Determinar a temperatura média do enrolamento e a elevação de temperatura correspondente de um motor, cuja resistência do enrolamento medida a frio (temperatura ambiente: 40 °C) foi de 0,240 Ω. O motor foi ligado em carga nominal e após três horas mediu-se a resistência de seus enrolamentos, obtendo-se 0,301 Ω. A temperatura do meio refrigerante no momento da tomada das medidas era igual a 40 °C.

De acordo com a Equação (6.7), tem-se:

$$T = \frac{R_q}{R_f} \times (235 + T_f) - 235$$

$$T = \frac{0,301}{0,240} \times (235 + 40) - 235 = 109,8 \text{ °C}$$

$$\Delta T = \frac{0,301 - 0,240}{0,240} \times (235 + 40) + (40 - 40) = 69,89 \text{ °C}$$

## 6.3.11 Ventilação

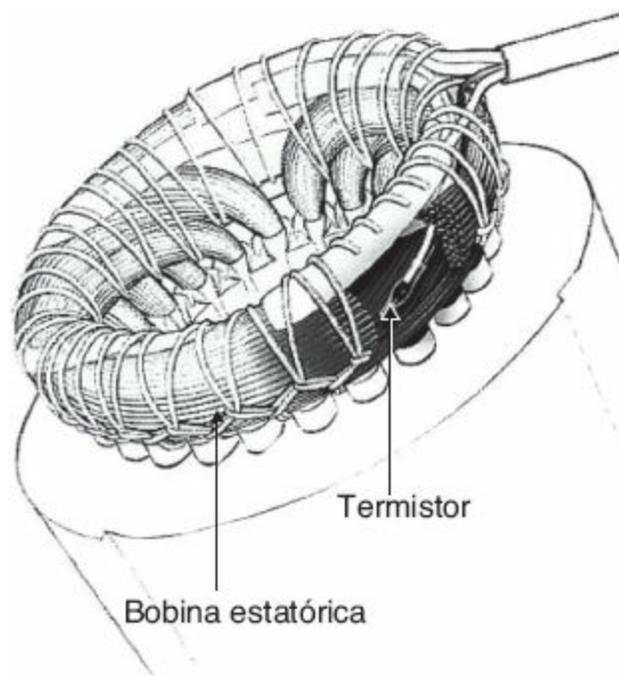
O processo pelo qual é realizada a troca de calor entre o interior do motor e o meio ambiente define seu sistema de ventilação. Os sistemas de ventilação mais usados são:

### 6.3.11.1 Motor aberto

É aquele em que o ar ambiente circula livremente no interior da máquina, retirando calor das partes aquecidas. O grau de proteção característico desses motores é o IP23. A [Figura 6.15](#) ilustra esse tipo de motor.

### 6.3.11.2 Motor totalmente fechado

É aquele em que não há troca entre o meio refrigerante interno ao motor e o exterior. O motor, no entanto, não pode ser considerado estanque, pois as folgas existentes nas gaxetas permitem a saída do meio refrigerante interno quando este entra em operação, aquecendo-se, conseqüentemente, e também permitem a penetração do meio refrigerante externo quando é desligado e inicia seu processo de resfriamento. A troca de calor desses motores é feita a partir da transferência de calor pela carcaça. Os motores totalmente fechados podem ser fabricados nos seguintes tipos:



**Figura 6.14** Bobina estática protegida por um termistor.



**Figura 6.15** Motor aberto.

**a) Motor totalmente fechado com ventilação externa**

São motores providos de um ventilador externo montado em seu eixo que acelera a dissipação do calor por meio da carcaça. A [Figura 6.16](#) mostra este tipo de motor.

**b) Motor totalmente fechado com trocador de calor ar-ar**

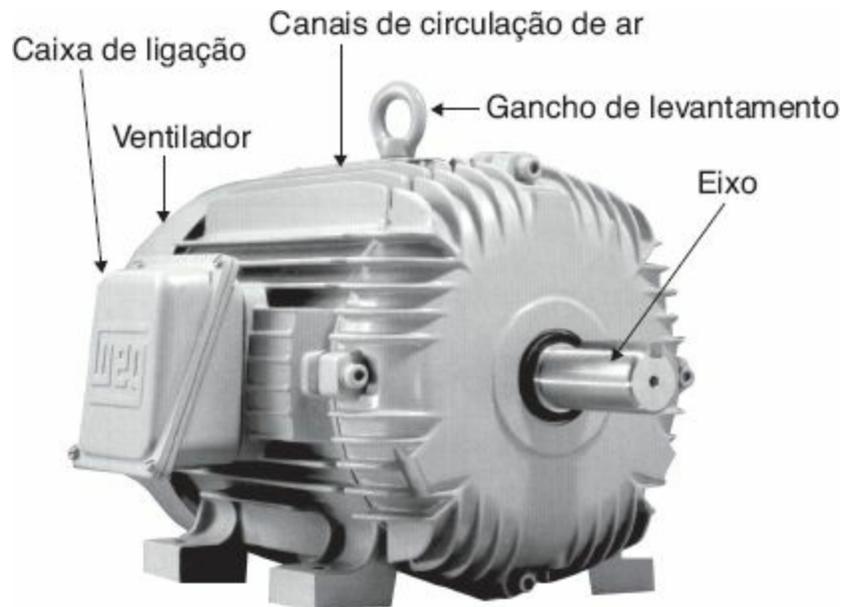
São motores providos de um ventilador interno e um trocador de calor montado na sua parte superior, conforme se observa na [Figura 6.17](#).

**c) Motor totalmente fechado com trocador ar-água**

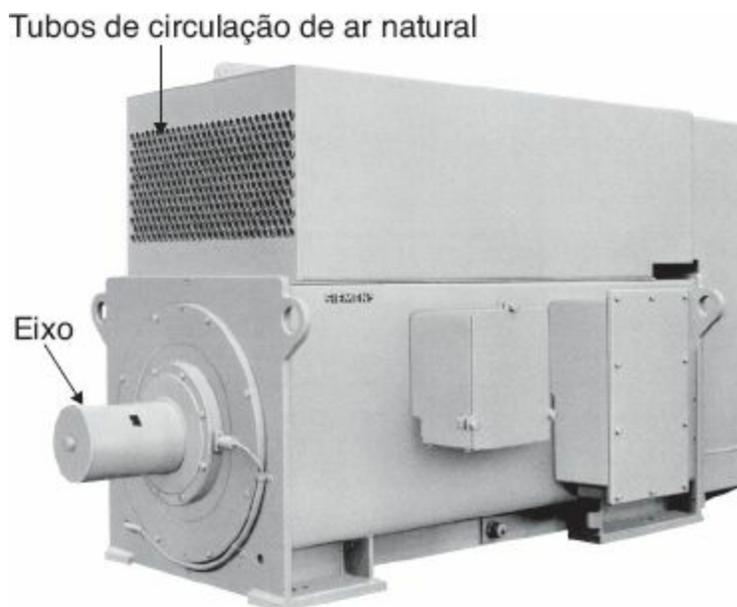
São motores providos de um ventilador externo e um trocador de calor ar-água. O calor gerado no interior do motor é transferido para a água que circula no interior dos dutos que formam o trocador de calor, conforme é demonstrado na [Figura 6.18](#).

**6.3.11.3 Motor com ventilação forçada**

É aquele cuja refrigeração é efetuada por um sistema adequado, em que um pequeno motor acionado independentemente força a entrada do meio refrigerante no interior do motor em questão. Os motores com ventilação forçada podem ser fabricados com diferentes tipos, destacando-se:



**Figura 6.16** Motor totalmente fechado.



**Figura 6.17** Trocador de calor ar-ar.

#### a) Motores com ventilação forçada sem filtro

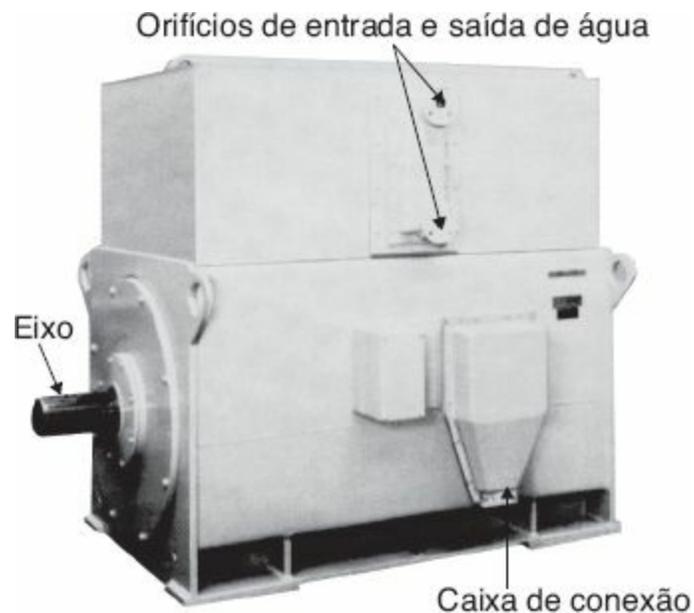
Neste caso, um motor acoplado na extremidade de um duto de ar força a entrada do meio refrigerante de um ambiente de ar não poluído para o interior do motor, que o devolve, em seguida, ao meio ambiente, conforme demonstra a [Figura 6.19\(a\)](#).

#### b) Motor com ventilação forçada com filtro

Neste caso, o motor é provido de um ventilador que aspira o ar refrigerante do meio ambiente e o força, após sua passagem pelo filtro, a penetrar no interior do motor, sendo, em seguida, jogado no meio ambiente, conforme demonstra a [Figura 6.19\(b\)](#).

### 6.3.11.4 Motor à prova de intempéries

É conhecido comumente como motor de uso naval. Possui um elevado grau de proteção IP(W)55, que lhe credencia para operar em ambientes com poeira, água em todas as direções e elevada salinidade.



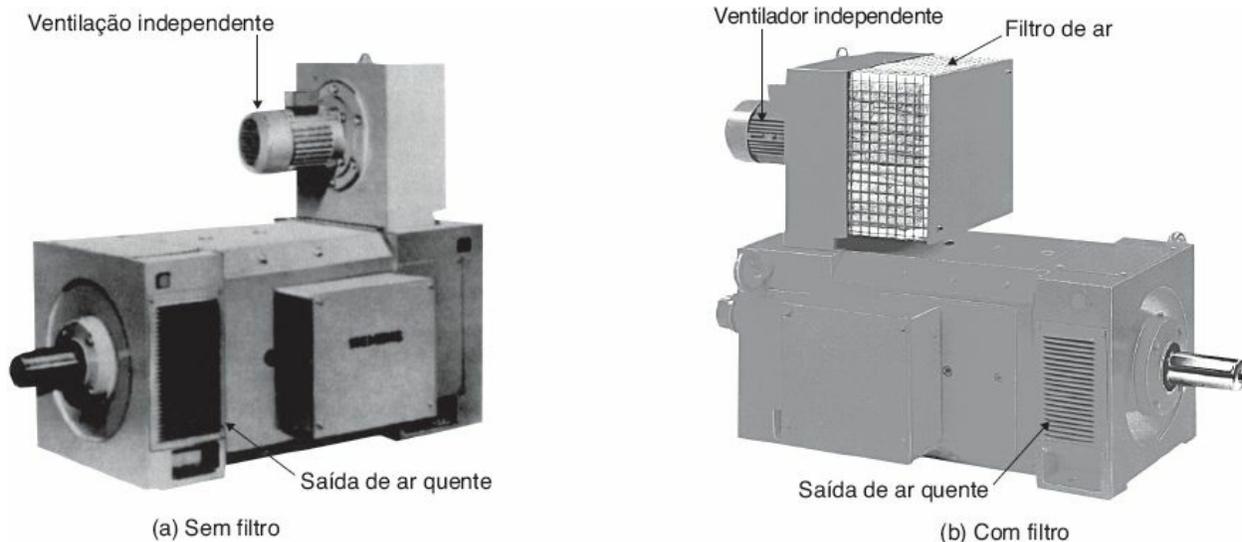
**Figura 6.18** Trocador de calor ar-água.

### 6.3.11.5 Motor à prova de explosão

Em certas indústrias que trabalham com materiais inflamáveis de grande risco, como petroquímicas, indústrias têxteis e semelhantes, há necessidade de serem empregados motores que suportem os esforços mecânicos internos, quando, por danos da isolação dos enrolamentos, em contato com o meio refrigerante contendo material combustível podem provocar acidentes de proporções desastrosas. Esses motores são dimensionados com carcaça e estrutura robustas, além de parafusos, juntas, tampas etc. de dimensões compatíveis com a solicitação dos esforços. Podem ser vistos na [Figura 16.20](#).

### 6.3.12 Graus de proteção

Refletem a proteção do motor quanto à entrada de corpos estranhos e penetração de água pelos orifícios destinados à entrada e saída do ar refrigerante. Os graus de proteção foram definidos no Capítulo 1. No caso dos motores elétricos, a indústria estabelece alguns graus de proteção que satisfaçam a uma faixa de condições previstas pela norma padronizando sua produção. Assim, tem-se:



**Figura 6.19** Motor com ventilação independente.

### **a) Motores abertos**

As classes de proteção mais comumente fabricadas são: IP21 – IP22 – IP23.

### **b) Motores fechados**

As classes de proteção mais comumente fabricadas são: IP44 – IP54 – IP55 – IP(W)55 (motores de uso naval).

## **6.3.13 Regime de funcionamento**

O regime de funcionamento de um motor elétrico indica o grau de regularidade na absorção de potência elétrica da rede de alimentação devido às variações do conjugado de carga. Os motores, em geral, são projetados para trabalharem regularmente com carga constante, por tempo indeterminado, desenvolvendo sua potência nominal, o que é denominado regime contínuo.

### **6.3.13.1 Tipos de regime de funcionamento**

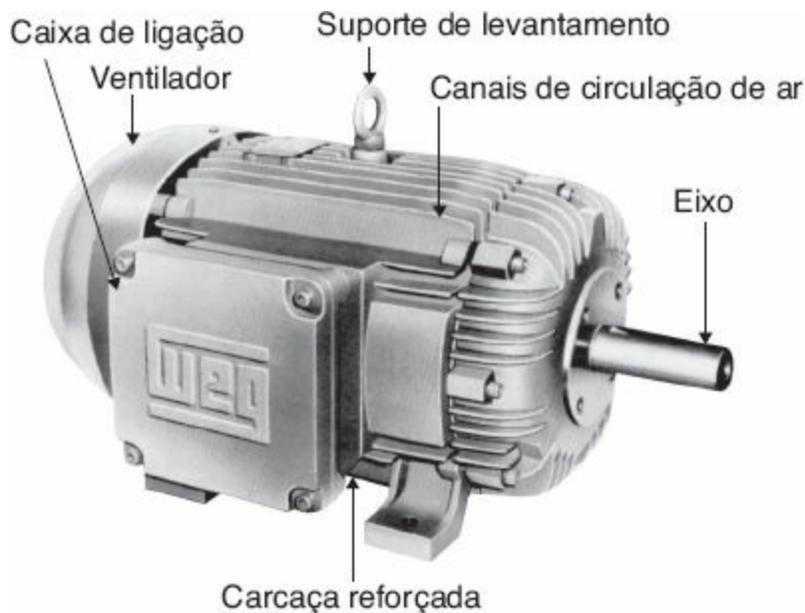
Seguindo a norma NBR 7094, os motores são fabricados de acordo com a forma como eles funcionam, o que se denomina regime de funcionamento.

#### **a) S1: Regime de funcionamento contínuo**

É aquele em que o motor trabalha continuamente por um tempo significativamente maior do que sua constante térmica de tempo. Neste tipo de regime, quando o motor é desligado, só retoma a operação quando todas suas partes componentes estão em equilíbrio com o meio exterior. A [Figura 6.21](#) ilustra essa característica.

#### **b) S2: Regime de funcionamento de tempo limitado**

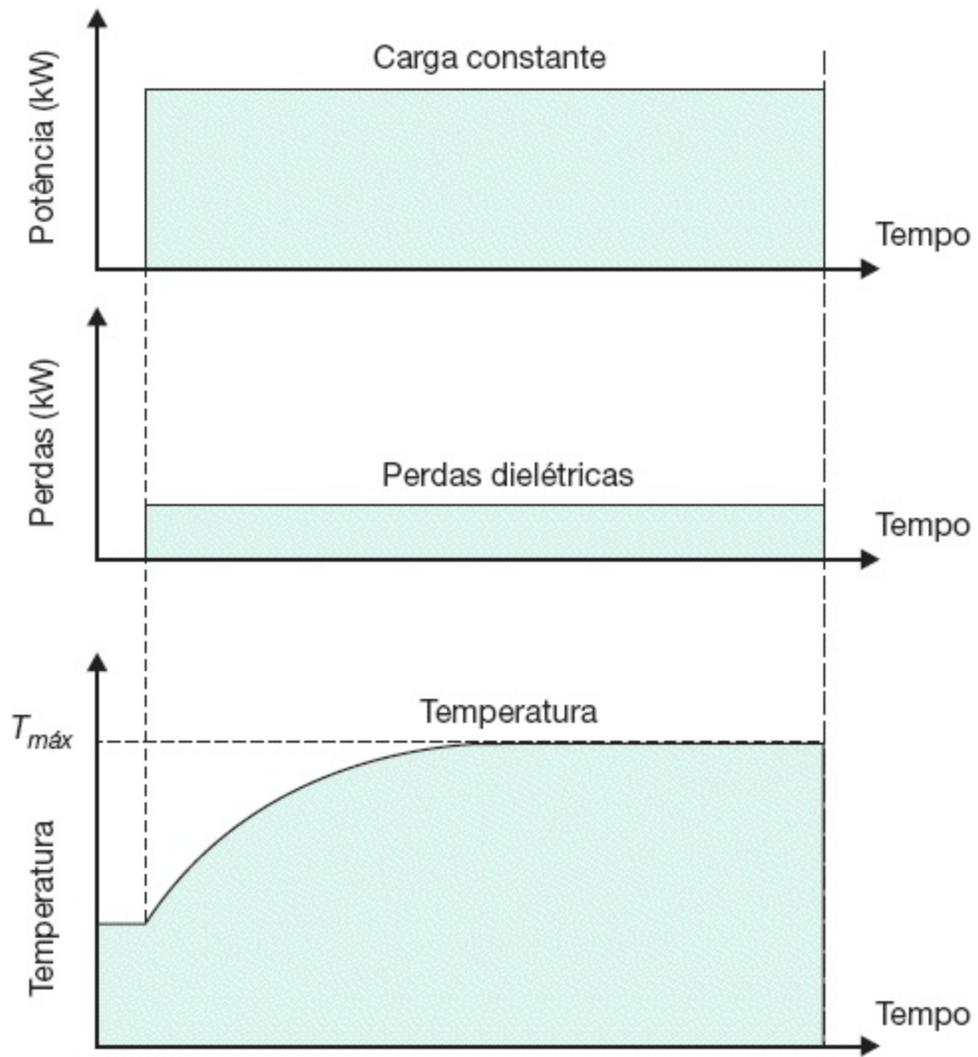
É aquele em que o motor é acionado à carga constante por um dado intervalo de tempo, inferior ao necessário para alcançar o equilíbrio térmico, seguindo-se um período de tempo em repouso o suficiente para permitir ao motor atingir a temperatura do meio refrigerante. A [Figura 6.22](#) ilustra essa característica.



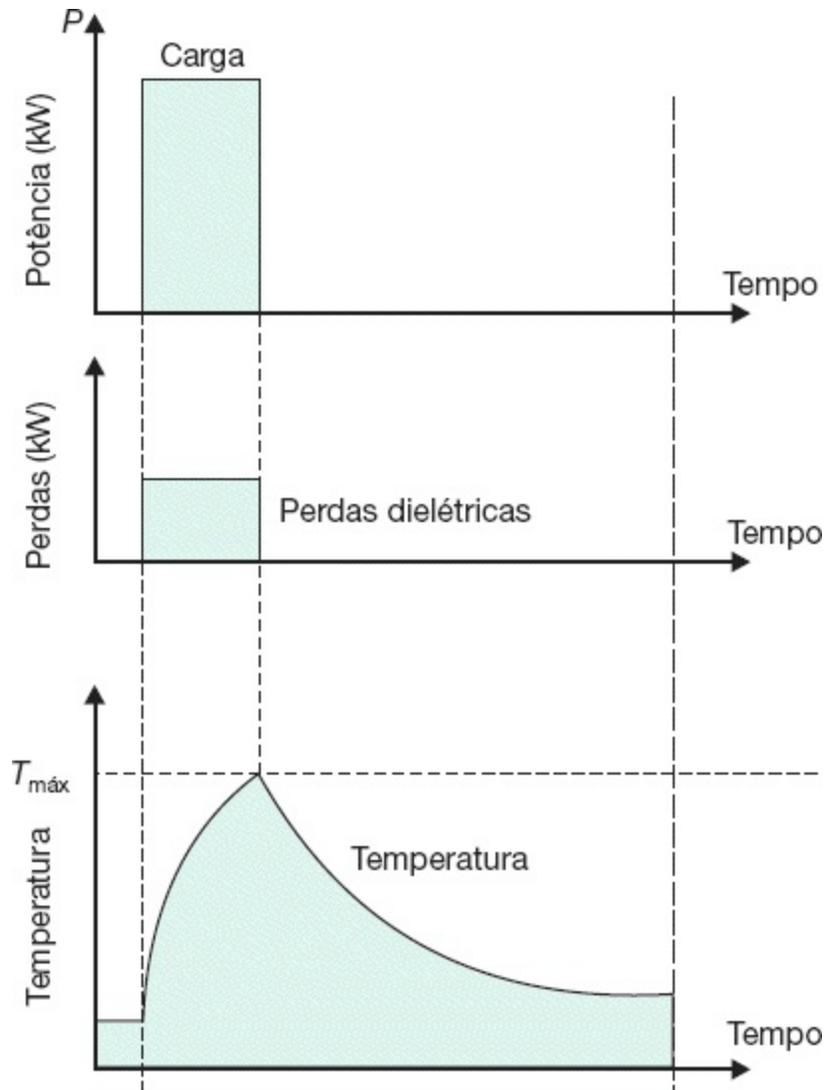
**Figura 6.20** Motor à prova de explosão.

### c) **S3: Regime de funcionamento intermitente periódico**

É aquele em que o motor funciona à carga constante por um período de tempo definido e repousa durante outro intervalo de tempo também definido, sendo tais intervalos de tempo muito curtos para permitir ao motor atingir o equilíbrio térmico durante o ciclo, não sendo afetado de modo significativo pela corrente de partida. Cada um desses regimes de funcionamento é caracterizado pelo chamado fator de duração do ciclo, que é a relação entre o tempo de funcionamento da máquina e o tempo total do ciclo. A característica de funcionamento é apresentada na [Figura 6.23](#). O fator de duração do ciclo é dado pela Equação (6.9).



**Figura 6.21** Regime de funcionamento S1.



**Figura 6.22** Regime de funcionamento S2.

$$F_{\text{dc}} = \frac{T_c}{T_c + T_r} \quad (6.9)$$

$T_c$  - tempo de operação da máquina em regime constante;  $T_r$  - tempo de repouso.

**d) S4: Regime de funcionamento intermitente periódico com partidas**

É caracterizado por uma sequência de ciclos semelhantes, em que cada ciclo consiste em um intervalo de partida bastante longo, capaz de elevar

significativamente a temperatura do motor, em um período de ciclo à carga constante e em um período de repouso o suficiente para que o motor atinja seu equilíbrio térmico. A [Figura 6.24](#) representa esta característica de funcionamento, sendo o fator de ciclo dado pela Equação (6.10).

$$F_{dc} = \frac{T_p + T_c}{T_p + T_c + T_r} \quad (6.10)$$

$T_p$  - tempo de partida do motor.

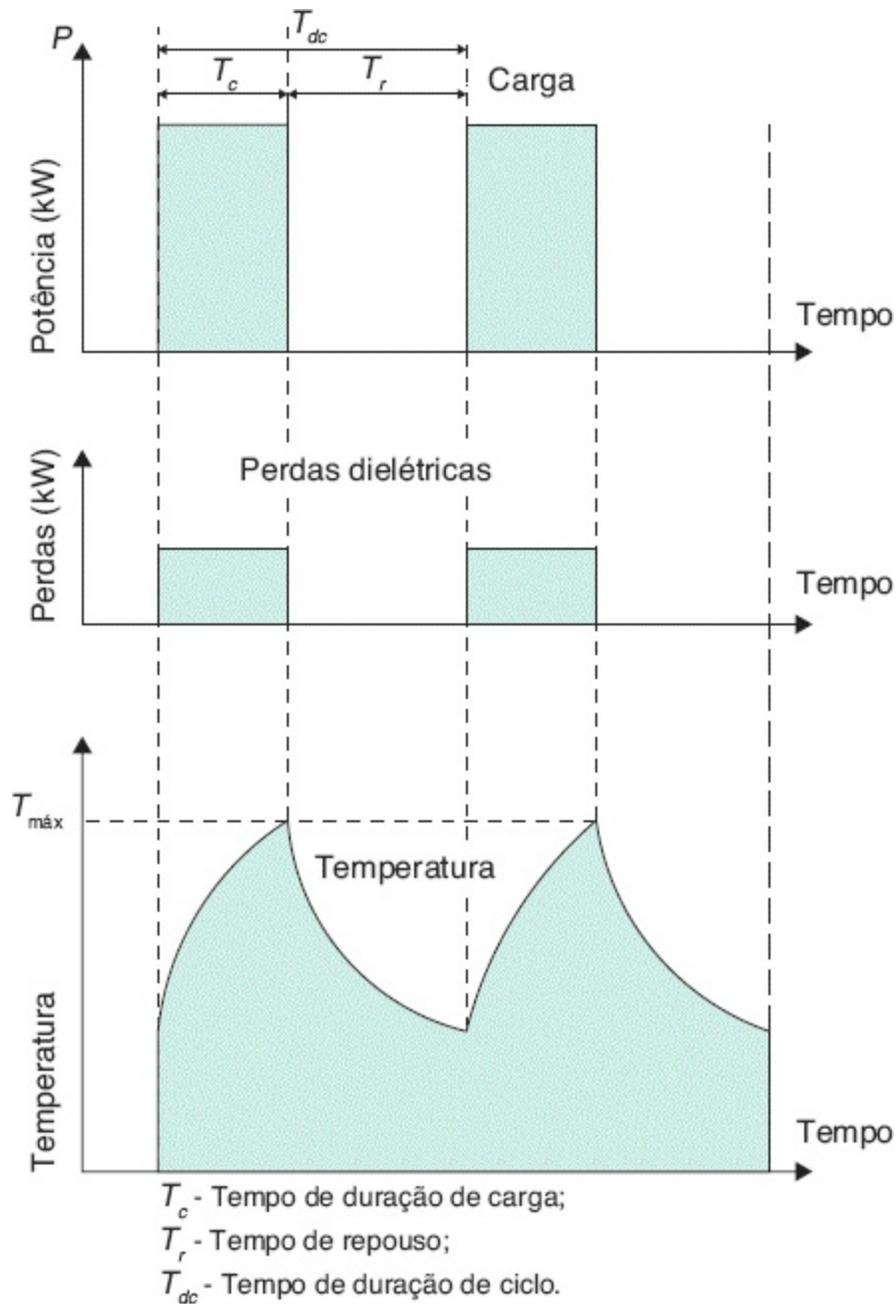


Figura 6.23 Regime de funcionamento S3.

**e) S5: Regime de funcionamento intermitente com frenagem elétrica**

É caracterizado por uma sequência de ciclos semelhantes, em que cada ciclo consiste em um intervalo de partida bastante longo, capaz de elevar significativamente a temperatura do motor, em um período de ciclo à carga

constante seguido de um período de frenagem elétrica e, finalmente, em um período de repouso o suficiente para que o motor atinja seu equilíbrio térmico. A [Figura 6.25](#) representa esta característica de funcionamento, sendo que o fator de ciclo é dado pela Equação (6.11).

$$F_{dc} = \frac{T_p + T_c + T_f}{T_p + T_c + T_r + T_f} \quad (6.11)$$

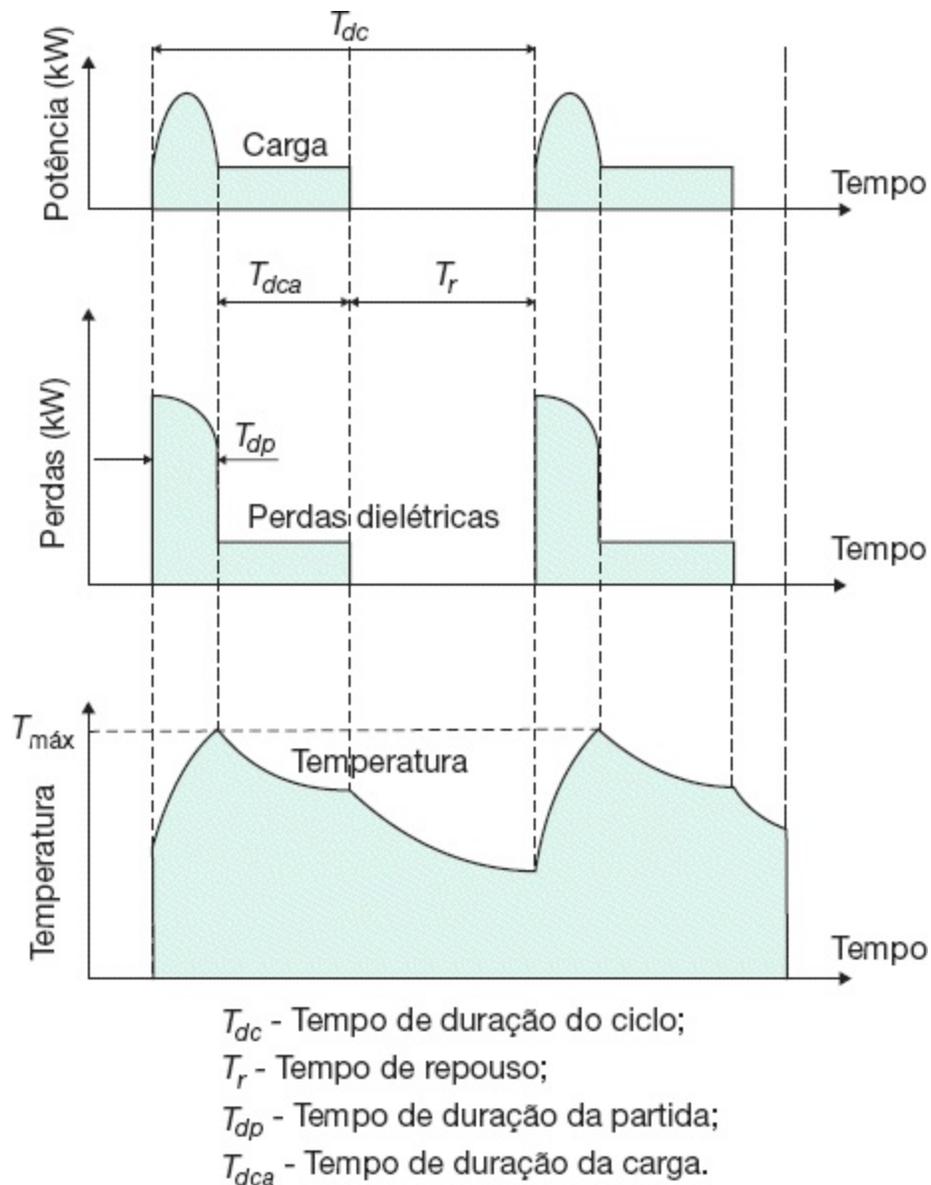
$T_f$  - tempo de frenagem ou contracorrente.

#### **f) S6: Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente**

É caracterizado por uma sequência de ciclos semelhantes, em que cada ciclo consiste em duas partes, sendo uma à carga constante e outra em funcionamento a vazio. Nesse caso, não há funcionamento a vazio. A [Figura 6.26](#) representa esta característica de funcionamento, sendo que o fator de duração do ciclo é dado pela Equação (6.12).

$$F_{dc} = \frac{T_c}{T_c + T_v} \quad (6.12)$$

$T_v$  - tempo de funcionamento a vazio.



**Figura 6.24** Regime de funcionamento S4.

Este é um dos tipos de regime mais frequentes na prática, também denominado regime intermitente com carga contínua.

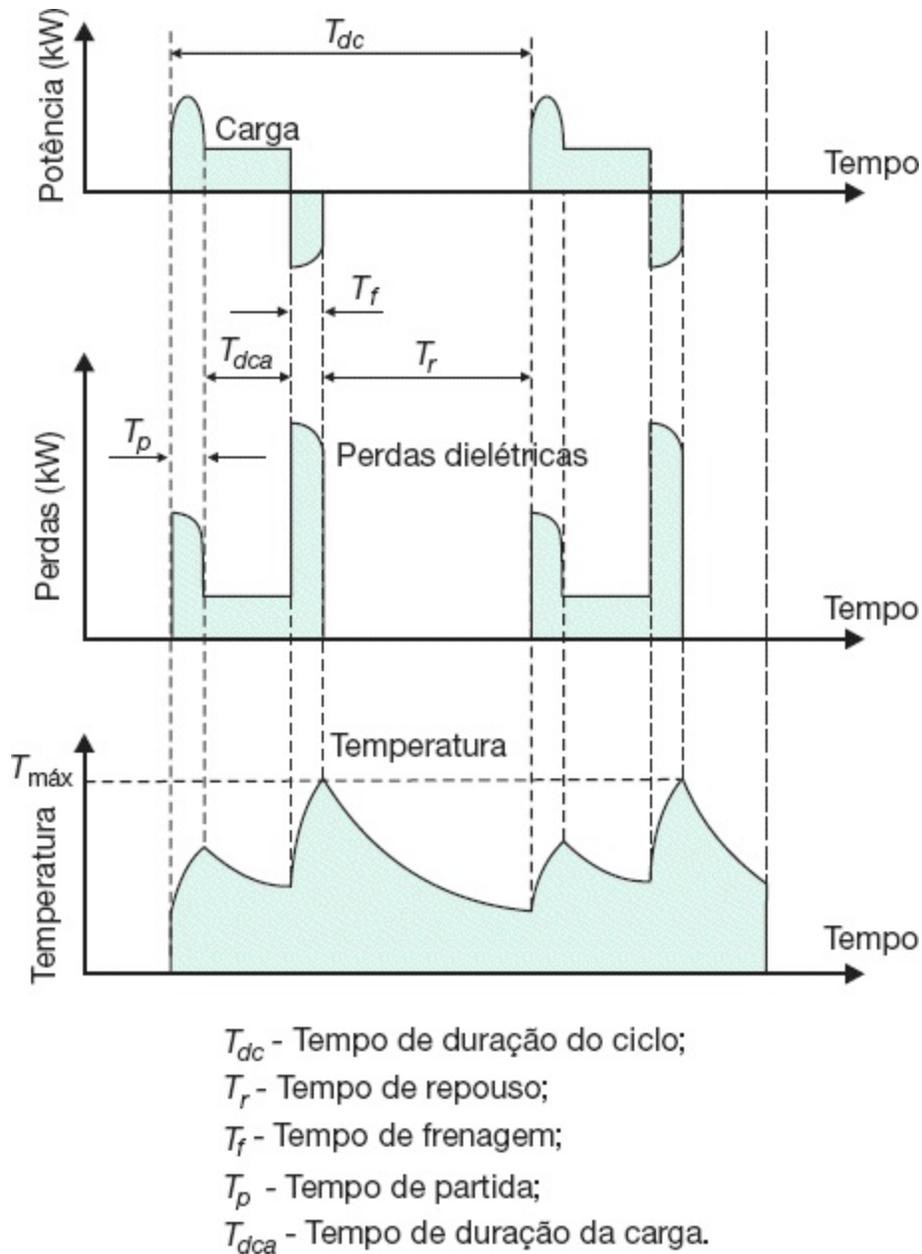
**g) S7: Regime de funcionamento contínuo com frenagem elétrica**

É caracterizado pelo regime de funcionamento em que a operação do motor é constituída de uma sequência de ciclos idênticos formados por um período de funcionamento de partida, um período de funcionamento a carga constante e

um período de frenagem elétrica. Não há período de funcionamento a vazio nem repouso. A [Figura 6.27](#) ilustra esse tipo de funcionamento.

**h) S8: Regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga/velocidade de rotação**

É o regime caracterizado por uma sequência de ciclos de operação idênticos, sendo que cada um deles é composto por um período de funcionamento na partida e um período de funcionamento à carga constante, a uma velocidade definida, seguindo-se de um ou mais períodos de funcionamento a outras cargas constantes a diferentes velocidades. Não há período de funcionamento a vazio nem repouso, conforme ilustrado na [Figura 6.28](#).



**Figura 6.25** Regime de funcionamento S5.

**i) S9: Regime de funcionamento com variação não periódica de carga e velocidade**

É caracterizado pelo regime de funcionamento em que a carga e a velocidade apresentam variações aperiódicas no intervalo de funcionamento admissível, onde se inclui normalmente períodos de sobrecargas que podem ser muito

superiores à carga nominal, conforme ilustrado na [Figura 6.29](#).

#### **j) S10: Regime de funcionamento com cargas constantes distintas**

É caracterizado pelo funcionamento com cargas constantes distintas, admitindo-se, no máximo, quatro valores diferentes de cargas ou cargas equivalentes, sendo que cada valor deve ser mantido por um intervalo de tempo suficientemente grande para que o equilíbrio térmico seja alcançado. Admite-se como carga mínima o funcionamento a vazio (sem carga). O regime de funcionamento S10 está representado na [Figura 6.30](#).

#### **6.3.13.2 Caracterização do tipo de regime de funcionamento**

Cabe ao comprador do motor a responsabilidade de indicar para o fabricante do motor o regime de funcionamento do mesmo. Isso normalmente é feito através de gráficos elaborados pelo comprador ou por meio da indicação do código dos regimes normalizados. Para evitar dúvidas na encomenda do motor é sempre conveniente complementar as informações para o fabricante como se segue.

- Regimes S1 e S9: é suficiente indicar os respectivos símbolos, isto é, S1 ou S9.

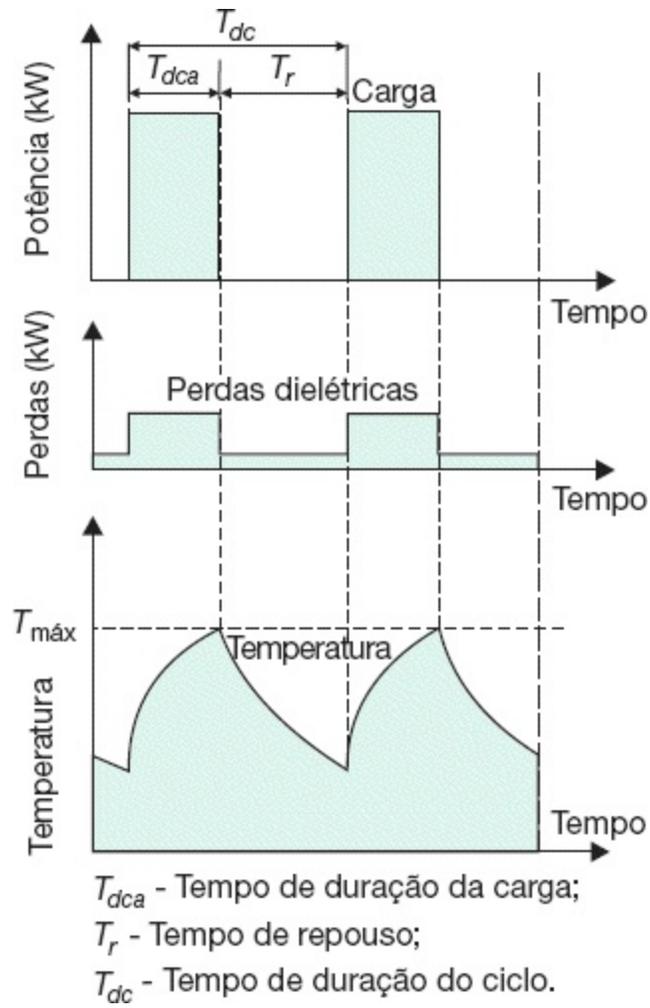
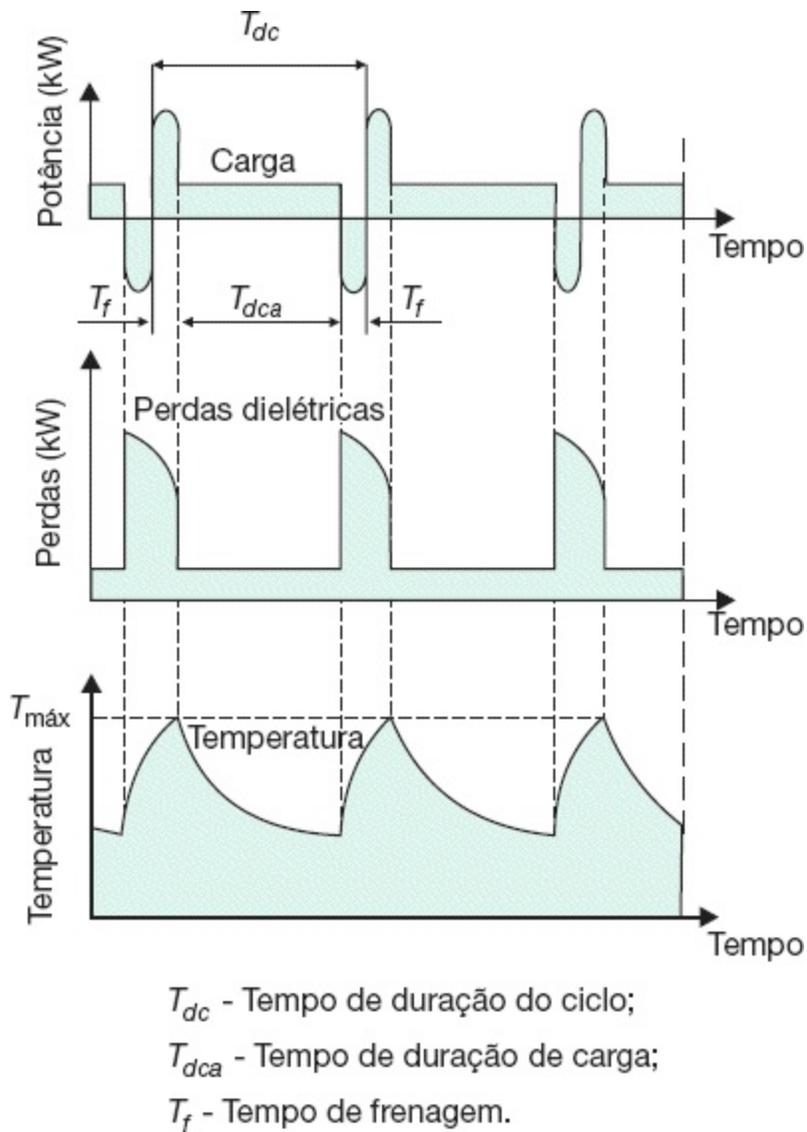


Figura 6.26 Regime de funcionamento S6.

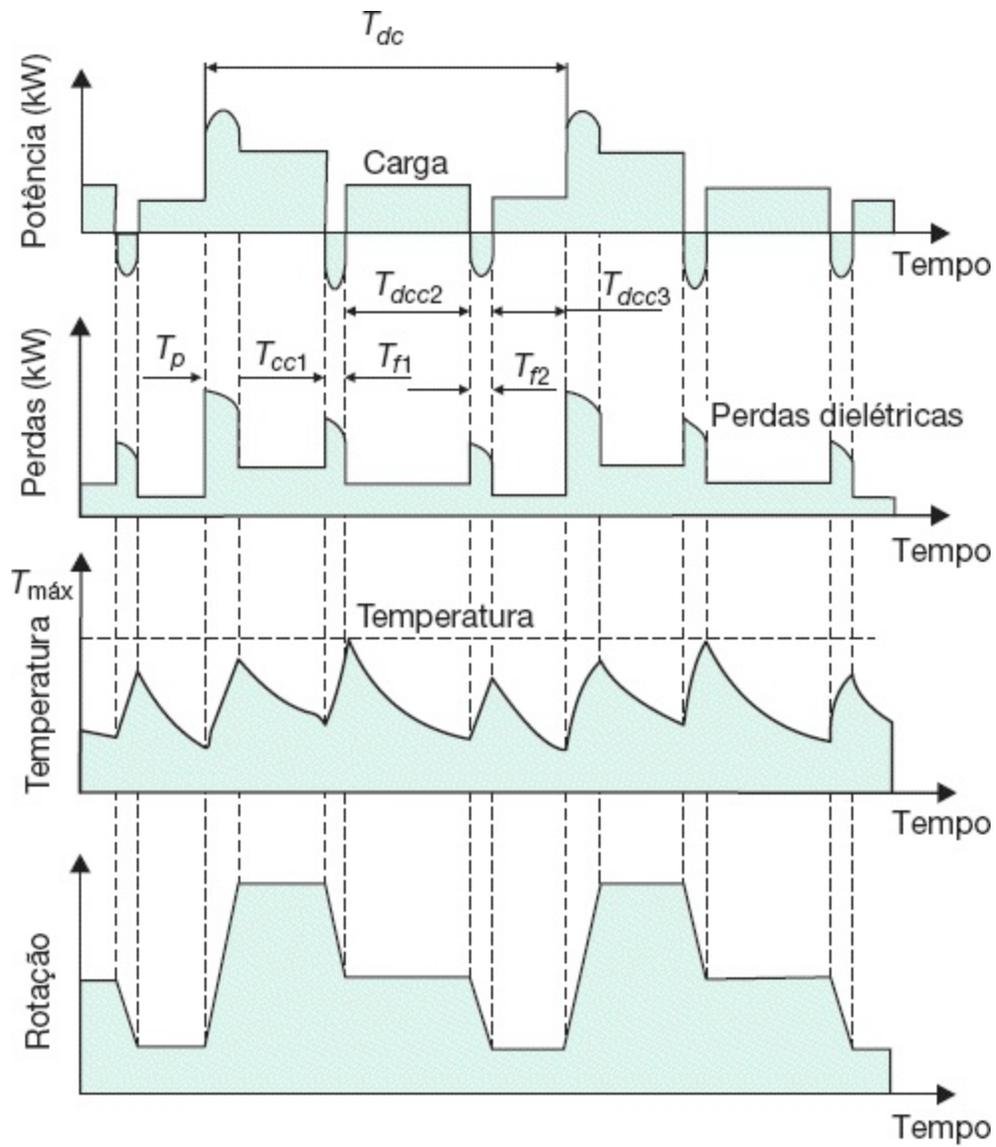


**Figura 6.27** Regime de funcionamento S7.

- Regime S2: indicar os tempos de funcionamento com carga constante; preferencialmente selecionar os tempos em 10, 30, 60 e 90 minutos; se for possível, enquadrar o funcionamento da carga nessas condições (por exemplo: S2-30 minutos).
- Regime de funcionamento S3/S6: indicar o fator de duração do ciclo (por exemplo: S5-30 %).
- Regime de funcionamento S4/S5: deve-se indicar: (i) o fator de duração do ciclo de carga, (ii) o momento de inércia do motor e (iii)

o momento de inércia da carga, todos referidos ao eixo do motor (por exemplo: S5-30 % /  $J_{\text{motor}} = 0,20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  /  $J_{\text{carga}} = 0,10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ).

- Regime de funcionamento S7: deve-se indicar: (i) o momento de inércia do motor e (ii) o momento de inércia da carga, todos referidos ao eixo do motor (por exemplo:  $J_{\text{motor}} = 0,20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  /  $J_{\text{carga}} = 0,10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ).
- Regime de funcionamento S8: deve-se indicar: (i) o fator de duração do ciclo de carga para cada velocidade angular, (ii) a velocidade angular, (iii) o momento de inércia do motor e (iv) o momento de inércia da carga, todos referidos ao eixo do motor (por exemplo: S8 /  $J_{\text{motor}} = 0,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  /  $J_{\text{carga}} = 4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  / 20 kW–900 rpm–30 % / 50 kW–1.760 rpm).
- Regime de funcionamento S10: devem-se indicar os valores de: (i)  $\Delta T$  em *pu* para cada carga associada ao seu tempo de duração e (ii) os períodos de repouso (se houver) representados pela letra “r”.

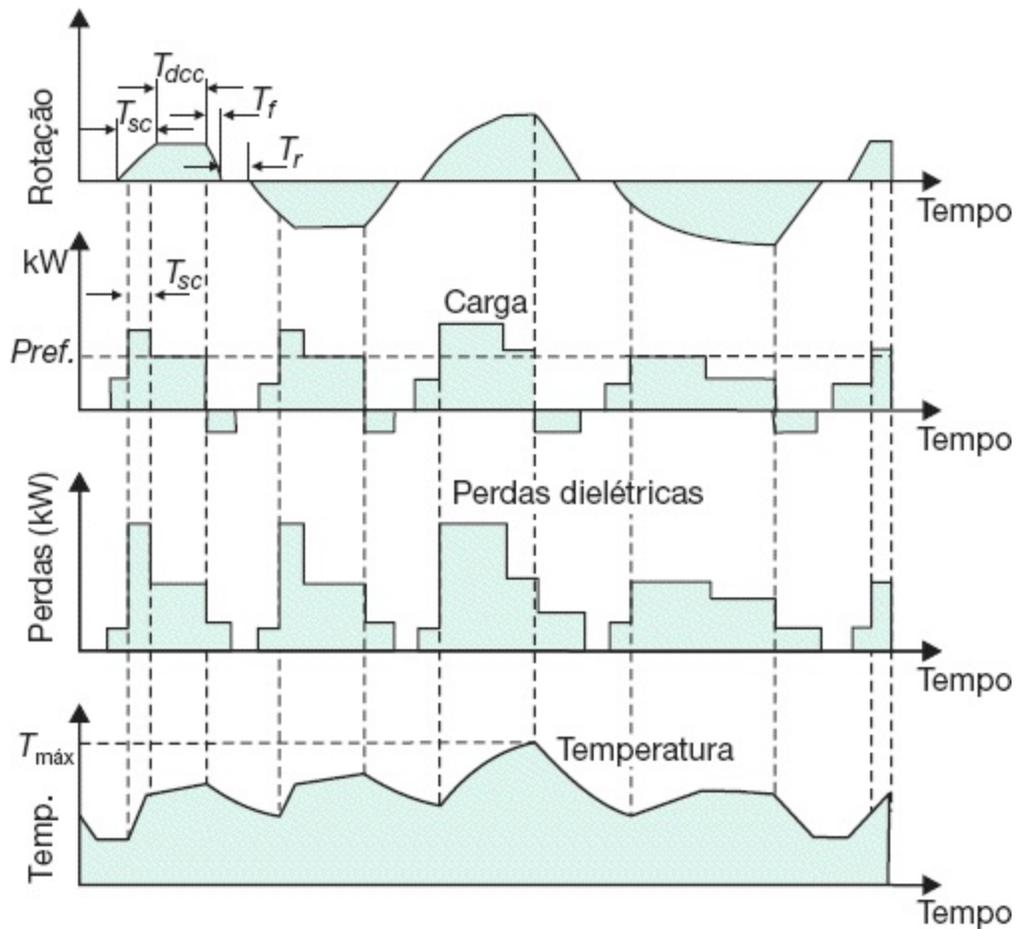


$T_{dcc}$  - Tempo de duração da carga constante;

$T_{dc}$  - Tempo de duração do ciclo;

$T_f$  - Tempo de frenagem.

Figura 6.28 Regime de funcionamento S8.



- $T_r$  - Tempo de repouso;
- $T_{dcc}$  - Tempo de duração em carga constante;
- $T_f$  - Tempo de frenagem;
- $T_{sc}$  - Tempo de duração da sobrecarga.

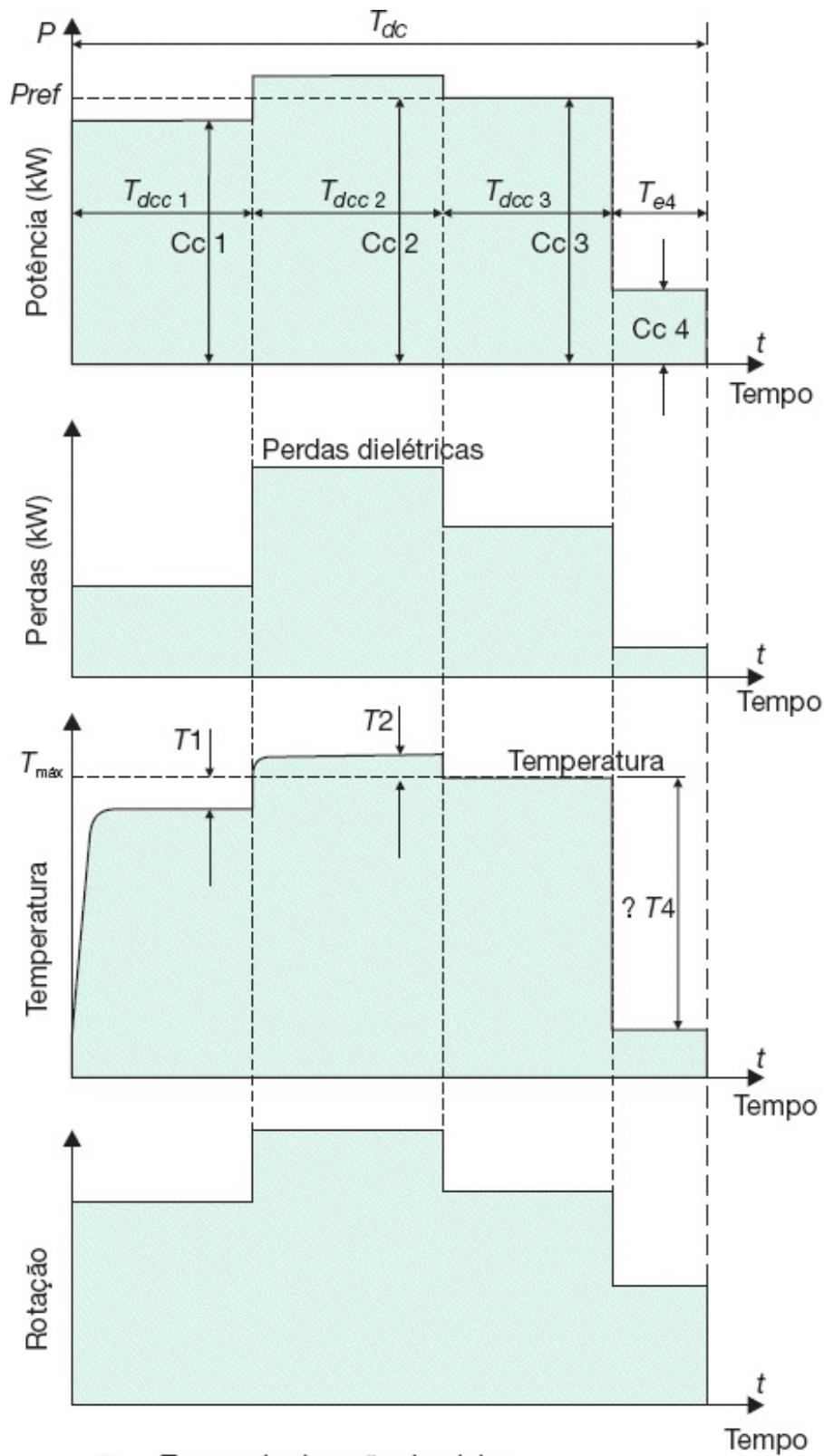
Figura 6.29 Regime de funcionamento S9.

### Exemplo de aplicação (6.5)

Considerar um motor que trabalha durante três horas seguidas e depois para durante uma hora (regime S3). Calcular o fator de duração do ciclo.

$$F_{dc} = \frac{3}{3+1} = 0,75 \rightarrow F_{dc} = 75 \%$$





$T_{dc}$  - Tempo de duração do ciclo;  
 $T_{dcc}$  - Tempo de duração da carga constante;  
 $C_c$  - Carga constante.

**Figura 6.30** Regime de funcionamento S10.

### 6.3.14 Conjugado mecânico

Mede o esforço necessário que deve ter o motor para girar o seu eixo. É também conhecido como torque.

Existe uma estreita relação entre o conjugado mecânico e a potência desenvolvida pelo motor. Assim, se determinada quantidade de energia mecânica for utilizada para movimentar uma carga em torno do seu eixo, a potência desenvolvida depende do conjugado oferecido e da velocidade com que se movimenta essa carga.

O conjugado mecânico pode ser definido em diferentes fases do acionamento do motor:

#### 6.3.14.1 Conjugado nominal

É aquele que o motor desenvolve, à potência nominal, quando submetido à tensão e frequência nominais.

Em tensões trifásicas desequilibradas, o componente de sequência negativa da corrente provoca um torque negativo, situado, geralmente, em torno de 0,5 % do torque nominal, quando o desequilíbrio de tensão no ponto de alimentação é da ordem de 10 %. Isto é, na prática, pode ser desprezado, porém a influência significativa de tal fenômeno se dá nas perdas ôhmicas do motor.

#### 6.3.14.2 Conjugado de partida

Também conhecido como conjugado com rotor bloqueado ou conjugado de arranque, é aquele desenvolvido pelo motor sob condições de tensão e frequência nominais durante a partida e é normalmente expresso em  $m \cdot \text{kgf}$  ou em porcentagem do conjugado nominal.

O conjugado de partida deve ser de valor elevado, a fim de o motor ter condições de acionar a carga, desde a posição de inércia até a velocidade de regime em tempo reduzido.

No Capítulo 7 este assunto será abordado com mais detalhes.

### 6.3.14.3 *Conjugado base*

É aquele determinado de acordo com a potência nominal e velocidade síncrona ( $W_s$ ) do motor e é, normalmente, obtido pela Equação (6.13).

$$C_b = \frac{716 \times P_{nm}}{W_s} \text{ (mkgf)} \quad (6.13)$$

$P_{nm}$  - potência nominal do motor, em cv;

$W_s$  - velocidade angular, em rpm.

### 6.3.14.4 *Conjugado máximo*

É o maior conjugado produzido pelo motor, quando submetido às condições de tensão e frequência nominais, sem, no entanto, ficar sujeito a variações bruscas de velocidade.

O conjugado máximo deve ter valor elevado, capaz de superar, satisfatoriamente, os picos de carga eventuais, além de poder manter razoavelmente a velocidade angular, quando da ocorrência de quedas de tensão momentâneas no circuito de suprimento.

### 6.3.14.5 *Conjugado mínimo*

É o menor conjugado na faixa de velocidade compreendida entre o valor zero e o conjugado nominal, perante tensão e frequência nominais.

### 6.3.14.6 *Conjugado de aceleração*

É o conjugado desenvolvido na partida do motor, desde o estado de repouso até a velocidade de regime. Observando as curvas da [Figura 6.31](#), pode-se concluir que, durante a fase de aceleração, a curva do conjugado motor ( $C_m$ ) é sempre superior à curva representativa do conjugado de carga ( $C_c$ ). A diferença entre as curvas  $C_m$  e  $C_c$  fornece o conjugado de aceleração.

Os pontos que caracterizam os diferentes tipos de conjugado, anteriormente definidos, podem ser determinados na curva de conjugado  $\times$  velocidade, normalmente fornecida pelos fabricantes de motores.

### 6.3.15 Categoria

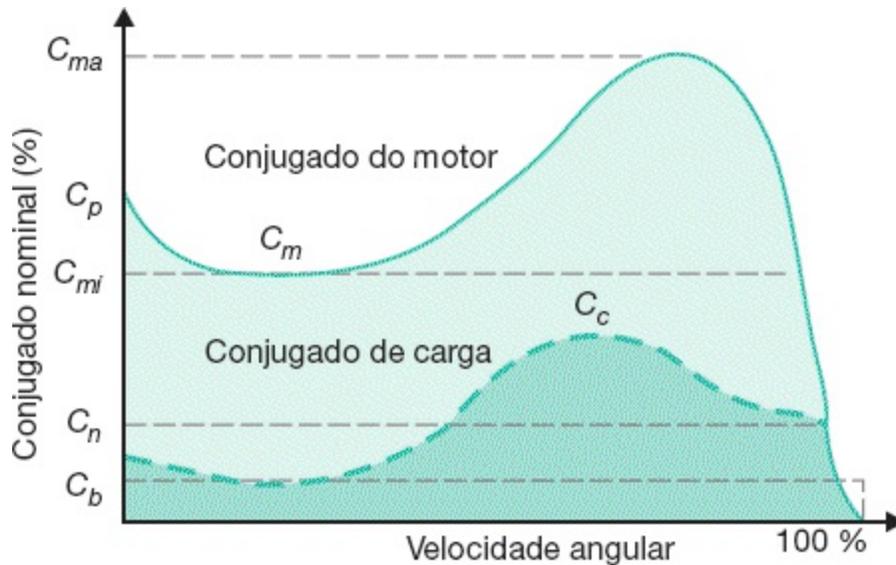
Indica as limitações do conjugado máximo e de partida e é designada por letras devidamente normalizadas.

Este assunto será tratado com mais detalhes no Capítulo 7.

### 6.3.16 Tipos de ligação

Dependendo da maneira como são conectados os terminais das bobinas dos enrolamentos estatóricos, o motor pode ser ligado às redes de alimentação com diferentes valores de tensão. A maioria dos motores é fabricada para operar em circuitos trifásicos supridos por tensões de 220 V e 380 V, ou ainda 220 V e 440 V.

A identificação dos terminais de início e fim de uma bobina é feita somando-se 3 ao número que marca o início desta, obtendo-se o outro terminal correspondente. Isso pode ser observado nas [Figuras 6.32 a 6.34](#), ou seja, ao terminal 1 soma-se 3 e obtém-se o terminal 4. Sempre os terminais 1-2-3 são utilizados para ligação à rede de suprimento.



**Figura 6.31** Conjugado  $\times$  velocidade.

Quando o motor é especificado para operar em tensões múltiplas, por exemplo, 220/380/440 V, a menor tensão, no caso 220 V, caracteriza a tensão nominal de fase do motor e que não pode ser ultrapassada em qualquer tipo de ligação, sob pena de danificar as bobinas.

As ligações normalmente efetuadas são:

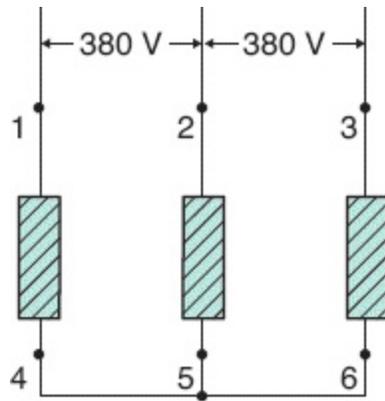
### 6.3.16.1 *Ligação em uma única tensão*

#### a) **Ligação em estrela**

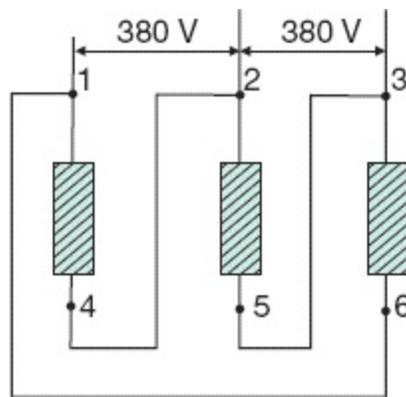
Cada enrolamento tem uma extremidade acessível (três terminais) e o motor é ligado na configuração estrela, conforme [Figura 6.32](#), na qual os terminais 4-5-6 não são acessíveis.

#### b) **Ligação em triângulo**

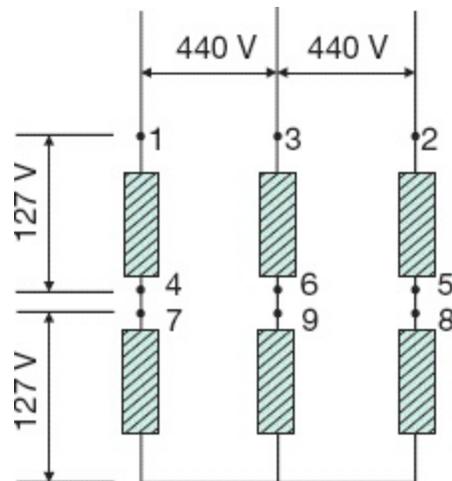
Cada enrolamento tem uma extremidade acessível (três terminais) e o motor é ligado na configuração triângulo, conforme [Figura 6.33](#), na qual os terminais 4-5-6 não são acessíveis.



**Figura 6.32** Ligação em estrela.



**Figura 6.33** Ligação em triângulo.



**Figura 6.34** Ligação estrela-série.

### 6.3.16.2 *Ligação em dupla tensão*

#### a) *Ligação em estrela*

As extremidades de cada enrolamento são acessíveis (seis terminais), permitindo que se façam ligações em estrela a fim de adequar a tensão das bobinas à tensão da rede, conforme [Figura 6.32](#).

#### b) *Ligação em triângulo*

As extremidades de cada enrolamento são acessíveis (seis terminais), permitindo que se façam ligações em triângulo a fim de adequar a tensão das bobinas à tensão da rede, conforme [Figura 6.33](#).

Os motores que podem ser ligados em estrela ou triângulo (Figuras 6.32 e 6.33) dispõem de seis terminais acessíveis. Quando a ligação é feita em estrela, cada bobina fica submetida a uma tensão vezes menor que a tensão da alimentação, tendo a corrente circulante valor igual à corrente de linha. Quando a ligação é feita em triângulo, cada bobina fica submetida à tensão da rede, tendo a corrente circulante valor de vezes menor do que a corrente de linha:

- Ligação estrela:

$$V_f = V_l / \sqrt{3}$$

$$I_f = I_l$$

- Ligação triângulo:

$$V_f = V_l$$

$$I_f = I_l / \sqrt{3}$$

É importante observar que nem todo o motor de dupla ligação, estrela-

triângulo, pode ser acionado pela chave estrela-triângulo; isto depende da tensão nominal do sistema. Para citar um exemplo, um motor em cuja placa está indicada a ligação 220/380 V só pode ser conectado à rede de suprimento, partindo por meio de uma chave estrela-triângulo, se a tensão nominal do circuito for de 220 V. Para uma rede cuja tensão nominal seja 380 V, o mesmo motor só pode ser conectado na ligação estrela. Para melhor identificar, basta caracterizar a menor tensão (no caso, 220 V) como tensão de suprimento do motor, quando este está ligado em triângulo; a tensão superior (no caso, 380 V) deve ser a tensão da rede para o motor ligado em estrela.

### **c) Ligação estrela-série**

O enrolamento de cada fase é dividido em duas partes (nove terminais). Ao se ligar duas dessas partes em série e depois conectá-las em estrela, cada bobina ficará submetida à tensão nominal de fase do motor, conforme [Figura 6.34](#). Neste caso, nove terminais do motor são acessíveis.

### **d) Ligação dupla estrela-paralelo**

Da mesma forma anterior, o enrolamento de cada fase é dividido em duas partes (nove terminais). Ao se conectar dois conjuntos de três bobinas em estrela e os dois conjuntos ligados em formação de dupla estrela, cada bobina ficará submetida à tensão nominal de fase do motor, conforme [Figura 6.35](#). Neste caso, nove terminais do motor são acessíveis.

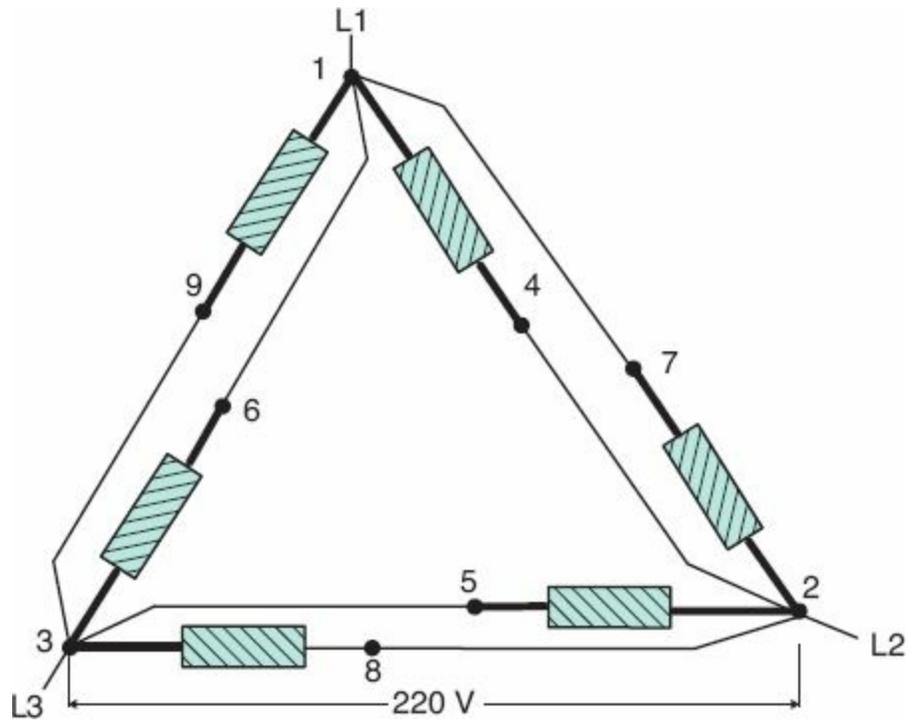
### **e) Ligação triângulo-série**

Ligação conforme a [Figura 6.36](#). Nove terminais são acessíveis. A tensão nominal das bobinas deve ser de 220 V.

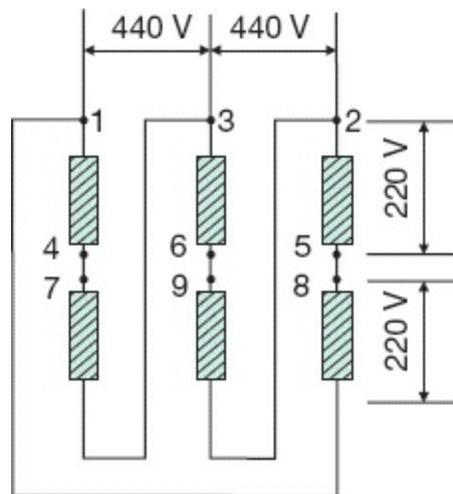
### **f) Ligação triângulo-paralelo**

Ligação conforme a [Figura 6.37](#). Nove terminais são acessíveis. A tensão

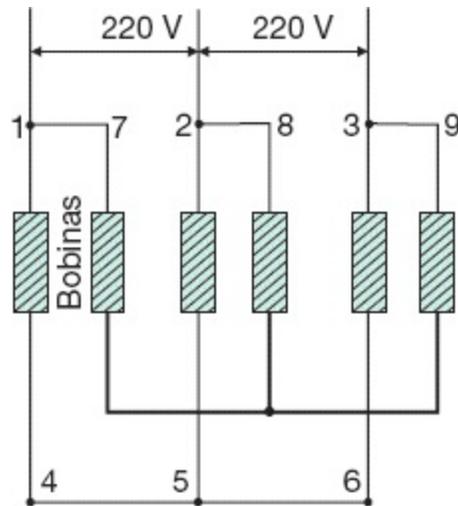
nominal das bobinas deve ser em 220 V.



**Figura 6.35** Dupla estrela-paralelo.



**Figura 6.36** Triângulo-série.



**Figura 6.37** Triângulo-paralelo.

### 6.3.16.3 *Ligação em tripla tensão nominal*

O enrolamento de cada fase é dividido em duas partes, podendo ser ligadas em série-paralelo. Todos os terminais das bobinas, em um total de doze, são acessíveis, permitindo ligar o motor em várias tensões de rede, como, por exemplo, 220/380/440/760 V.

#### a) **Ligação em triângulo-paralelo**

Conforme a [Figura 6.38](#).

#### b) **Ligação estrela-paralelo**

Conforme a [Figura 6.39](#).

#### c) **Ligação triângulo-série**

Conforme a [Figura 6.40](#).

#### d) **Ligação estrela-série**

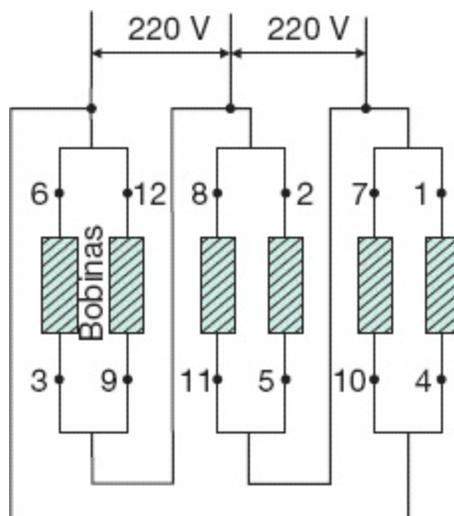
Conforme a [Figura 6.41](#).

Relativamente à rede de suprimento, as tensões de placa do motor

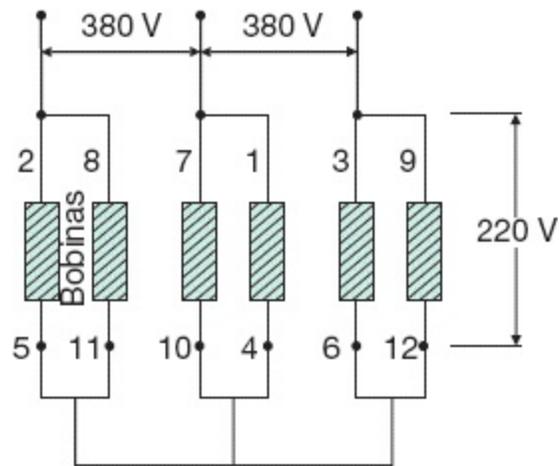
devem ser assim definidas:

- A primeira tensão corresponde à ligação em triângulo-paralelo: [Figura 6.38](#) (220 V);
- A segunda tensão corresponde à ligação estrela-paralelo: [Figura 6.39](#) (380 V);
- A terceira tensão corresponde à ligação em triângulo-série: [Figura 6.40](#) (440 V);
- A quarta tensão corresponde à ligação em estrela-série: [Figura 6.41](#) (760 V).

As tensões colocadas entre parênteses referem-se à tensão da rede a que será ligado um motor cujas tensões nominais de placa são: 220/380/440/760 V. Observe que a tensão de 760 V, por norma, está fora do limite da classe 600 V; portanto, apenas indica a possibilidade de ligação do motor em estrela-triângulo. Esses motores, normalmente, têm custos mais elevados.



**Figura 6.38** Triângulo-paralelo.



**Figura 6.39** Estrela-paralelo.

A [Tabela 6.3](#) orienta a ligação de motores trifásicos, relacionando as tensões nominais de placa com a correspondente tensão nominal da rede de alimentação, indicando a possibilidade de acionamento dos mesmos pela chave estrela-triângulo. Cabe observar que esses motores podem partir diretamente da rede ou por meio de chaves compensadoras.

A [Tabela 6.4](#) fornece as principais características dos motores de indução de rotor em curto-circuito. Vale ressaltar que estes são valores médios e podem variar, em faixas estreitas, para cada fabricante, dependendo de sua tecnologia e projeto construtivo.

## 6.3.17 Formas construtivas

### 6.3.17.1 Aspectos dimensionais

As dimensões dos motores no Brasil seguem a norma NBR 5432, que está de acordo com a normalização da International Electrotechnical Commission (IEC-72).

Essas normas tomam como base as dimensões de montagem de máquinas elétricas e atribuem letras designando determinadas distâncias mostradas na [Figura 6.42](#), conforme especificado.

- H – é a altura do plano da base ao centro da ponta do eixo.

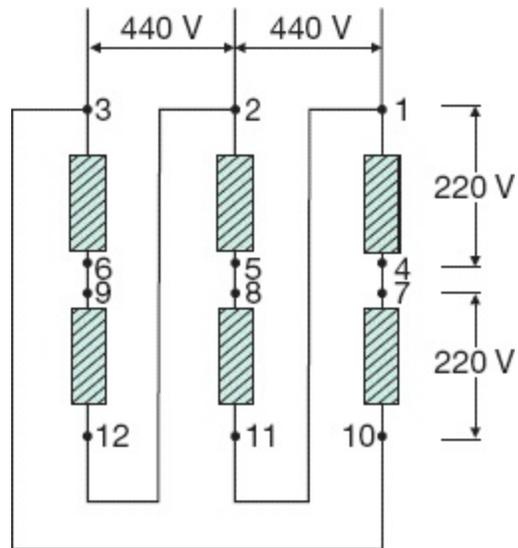


Figura 6.40 Triângulo-série.

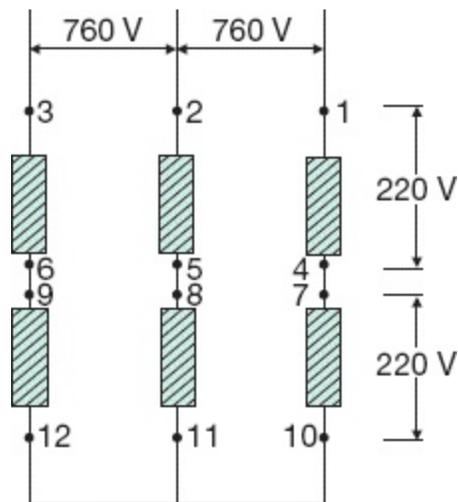


Figura 6.41 Estrela-série.

Tabela 6.3 Possibilidade de ligação de motores de indução por meio de chave estrela-triângulo

Tensão da rede (V)	Ligação dos enrolamentos (V)	Número de terminais de ligação	Tensão de alimentação (V)	Ligação das bobinas	Partida com chave estrela-triângulo
--------------------	------------------------------	--------------------------------	---------------------------	---------------------	-------------------------------------

	220/380	6	220	$\Delta$	Sim
220	220/440	9	220	YY	Não
	220/440	12	220	$\Delta$	Sim
	220/380/440/760	12	380	$\Delta\Delta$	Sim
	380/660	6	380	Y	Não
380	220/380/440/760	6	380	$\Delta$	Sim
	220/380/440/760	12	380	YY	Não
	220/440	9	440	Y	Não
440	220/440	12	440	$\Delta$	Sim
	220/380/440/760	12	440	$\Delta$	Sim

- C – é a distância do centro do furo dos pés do lado da ponta do eixo ao plano do encosto da ponta do eixo. Esta dimensão está associada ao valor H.
- B – é a dimensão axial da distância entre os centros dos furos dos pés. A cada dimensão de H podem ser associadas várias dimensões B, o que permite se reconhecer motores mais *longos* e mais *curtos*.
- A – é a dimensão entre os centros dos furos dos pés, no sentido frontal.
- D – diâmetro do eixo do motor.
- E – dimensão externa do eixo do motor.

As normas padronizam as dimensões dos motores usando a simbologia dada pelas letras vistas anteriormente. Assim, utilizando-se uma tabela

dimensional de motores (não mostrada neste livro), pode-se identificar que o motor designado por 160 M (ABNT) tem  $H = 160$  mm;  $A = 254$  mm;  $B = 210$  mm;  $C = 108$  mm;  $K = 15$  mm;  $\phi D = 42$  mm e  $E = 110$  mm.

### 6.3.17.2 Formas construtivas normalizadas

A norma NBR 5031 padroniza as diversas formas construtivas dos motores, tomando como base o arranjo de suas partes, em relação à fixação, à ponta do eixo e à disposição dos mancais.

De acordo com a NBR 5432, a caixa de ligação de um motor deve ser instalada de forma que sua linha de centro passe por um setor compreendido entre a parte superior do motor e  $10^\circ$  abaixo da linha de centro horizontal do lado direito, quando o motor for visto pelo lado do acionamento. A [Figura 6.43](#) mostra algumas das diversas formas construtivas normalizadas tanto para montagem horizontal como para montagem vertical.

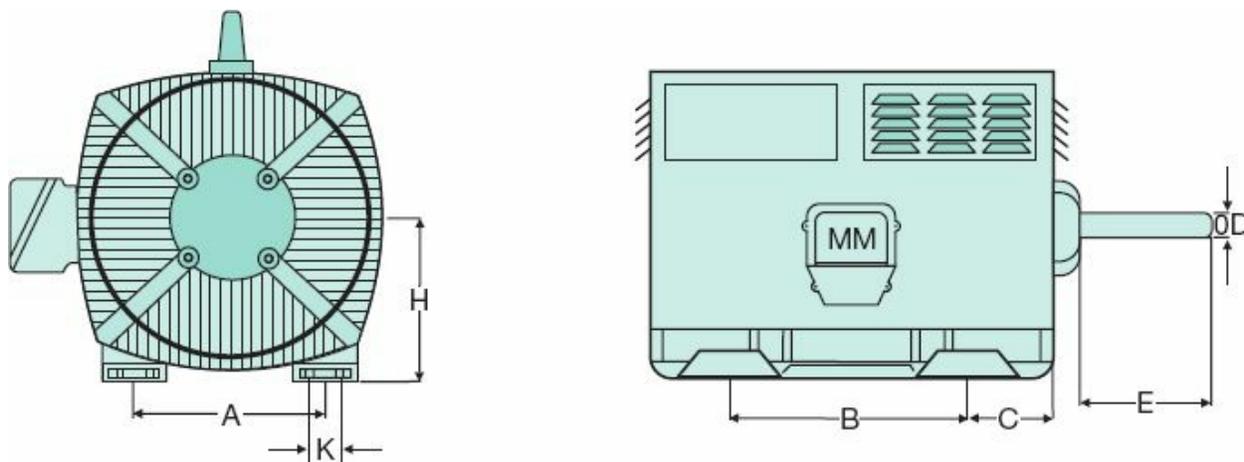
### 6.3.18 Placa de identificação

A placa de identificação dos motores é o elemento mais rápido para se obter as informações principais necessárias à sua operação adequada. A [Figura 6.44](#) mostra a placa de identificação de um motor WEG.

Com exceção do MOD, os demais dados são características técnicas de fácil identificação. Para decifrar o conteúdo do campo MOD, deve-se conhecer seu significado. Tomando como exemplo a placa de identificação mostrada na [Figura 6.44](#), tem-se:

- 1ª letra: linha de fabricação do motor, variando de K a F
- 2ª letra: tipo do motor
  - A: motor em anéis.
  - B: motor de gaiola.
- 3ª letra: sistema de refrigeração

- A: aberto.
- F: trocador de calor ar-ar.
- W: trocador de calor ar-água.



**zFigura 6.42** Aspectos dimensionais dos motores.

**Tabela 6.4** Motores assíncronos trifásicos com rotor em curto-circuito

Potência nominal	Potência ativa	Corrente nominal		Velocidade rpm	Fator de potência	Relação $I_{np}/I_n$	Relação $C_p/C_n$	Conjugado nominal
cv	kW	220 V	380 V				%	mkg
<b>II polos</b>								
1	0,7	3,3	1,9	3.440	0,76	6,2	180,0	0,208
3	2,2	9,2	5,3	3.490	0,76	8,3	180,0	0,619
5	4	13,7	7,9	3.490	0,83	9,0	180,0	1,020
7,5	5,5	19,2	11,5	3.480	0,83	7,4	180,0	1,540
10	7,5	28,6	16,2	3.475	0,85	6,7	180,0	2,050

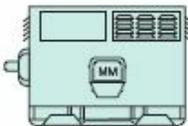
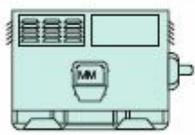
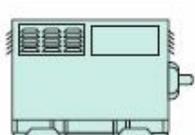
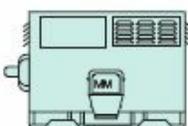
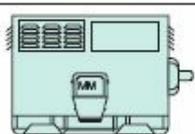
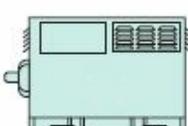
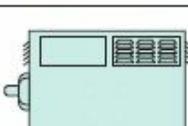
15	11	40,7	23,5	3.500	0,82	7,0	180,0	3,070
20	15	64,0	35,5	3.540	0,73	6,8	250,0	3,970
25	18,5	69,0	38,3	3.540	0,82	6,8	300,0	4,960
30	22	73,0	40,5	3.535	0,88	6,3	170,0	5,960
40	30	98,0	54,4	3.525	0,89	6,8	220,0	7,970
50	37	120,0	66,6	3.540	0,89	6,8	190,0	9,920
60	45	146,0	81,0	3.545	0,89	6,5	160,0	11,88
75	55	178,0	98,8	3.550	0,89	6,9	170,0	14,84
100	75	240,0	133,2	3.560	0,90	6,8	140,0	19,72
125	90	284,0	158,7	3.570	0,90	6,5	150,0	24,59
150	110	344,0	190,9	3.575	0,90	6,8	160,0	29,46

#### IV polos

1	0,7	3,8	2,2	1.715	0,65	5,7	200,0	0,420
3	2,2	9,5	5,5	1.720	0,73	6,6	200,0	1,230
5	4	13,7	7,9	1.720	0,83	7,0	200,0	2,070
7,5	5,5	20,6	11,9	1.735	0,81	7,0	200,0	3,100
10	7,5	26,6	15,4	1.740	0,85	6,6	190,0	4,110

15	11	45,0	26,0	1.760	0,75	7,8	195,0	6,120
20	15	52,0	28,8	1.760	0,86	6,8	220,0	7,980
25	18,5	64,0	35,5	1.760	0,84	6,7	230,0	9,970
30	22	78,0	43,3	1.760	0,83	6,8	235,0	11,970
40	30	102,0	56,6	1.760	0,85	6,7	215,0	15,960
50	37	124,0	68,8	1.760	0,86	6,4	300,0	19,950
60	45	150,0	83,3	1.765	0,86	6,7	195,0	23,870
75	55	182,0	101,1	1.770	0,86	6,8	200,0	29,750
100	75	244,0	135,4	1.770	0,87	6,7	200,0	39,670
125	90	290,0	160,9	1.780	0,87	6,5	250,0	49,310
150	110	350,0	194,2	1.780	0,87	6,8	270,0	59,170
180	132	420,0	233,1	1.785	0,87	6,5	230,0	70,810
200	150	470,0	271,2	1.785	0,87	6,9	230,0	80,000
220	160	510,0	283,0	1.785	0,87	6,5	250,0	86,550
250	185	590,0	327,4	1.785	0,87	6,8	240,0	95,350
300	220	694,0	385,2	1.785	0,88	6,8	210,0	118,000
380	280	864,0	479,5	1.785	0,89	6,9	210,0	149,000
475	355	1100,0	610,5	1.788	0,89	7,6	220,0	186,500

600	450	1384,0	768,1	1.790	0,89	7,8	220,0	265,37
-----	-----	--------	-------	-------	------	-----	-------	--------

Figura	Símbolo correspondente a			
	ABTN NBR-5031	DIN 42950	Carcaça	Fixação ou montagem
	B3E	B3	Com pés	Montada sobre estruturas
	B3D			
	B5E	B5	Sem pés	Fixada no flange
	B5D			
	B35E	B3/B5	Com pés	Montada sobre subestrutura pelos pés, com fixação suplementar pelo flange
	B35D			
	B14E	B14	Sem pés	Fixado pelo flange
	B14E			

**Figura 6.43** Algumas formas construtivas normalizadas.

- I: ventilação forçada independente com trocador de calor ar-ar.

- D: autoventilado por dutos.
- T: ventilação forçada independente por dutos.
- L: ventilação forçada independente com trocador de calor ar-água.
- V: ventilação forçada independente aberto.
- Número: representa a carcaça (355, 400 etc.).
- 4ª letra: furação dos pés (L, A, B, C, D, E).

## 6.4 Motofreio trifásico

É constituído por um motor trifásico de indução acoplado a um freio monodisco. O motor, em geral, é fabricado totalmente fechado, provido de ventilação externa, enquanto o freio, constituído por duas pastilhas e com o mínimo de partes móveis, desenvolve baixo aquecimento devido ao atrito, sendo resfriado pelo sistema de ventilação do motor. O conjunto motor e freio forma uma unidade compacta.

O freio é acionado por um eletroímã, cuja bobina opera normalmente dentro de uma faixa de tensão de  $\pm 10\%$ , sendo alimentada por uma fonte externa de corrente contínua constituída por uma ponte retificadora, suprida pela rede elétrica local.

A alimentação do eletroímã é controlada pela chave de comando do motor. Toda vez que o motor é desligado, a alimentação do eletroímã é interrompida, provocando o deslocamento das molas de pressão contra a armadura do eletroímã, que pressiona as pastilhas de metal sinterizado alojadas no disco de frenagem, solidamente presas ao eixo do motor. Dessa forma, as pastilhas são comprimidas pelas duas superfícies de atrito, sendo uma formada pela tampa e a outra pela própria armadura do eletroímã, conforme pode ser observado pela [Figura 6.45](#).

<b>DRM</b>		DRM Motores S.A	
		Rua Monsenhor Salazar, 1344 Fortaleza - Ceará CGCMF 65879141/0001-00 Indústria Brasileira	
Motor de Indução Trifásico			
kW 450	HZ 60		FS 1,15
cv 600	Primário		COS 0,91
MOD KBF55C	V 380	A 768,1	LIG Y
RPM 1778	V	A	
CAT	V	A	
ISOL F	Secundário		
REG S1	A	A	LIG Y
NR			
ABTN NBR - 7094			

**Figura 6.44** Placa de identificação de um motor.

Para que a armadura se desloque pela ação da mola, é necessário que a força eletromagnética seja inferior à força exercida pela mola, o que ocorre quando o motor é desligado da rede. Quando o motor é acionado, o eletroímã é energizado atraindo sua armadura na direção oposta à força da mola, permitindo o disco de frenagem girar livre sem atrito.

O motofreio é comumente utilizado nas mais diferentes atividades industriais, onde haja necessidade de paradas rápidas para requisitos de segurança, além de precisão no posicionamento das máquinas. Podem-se citar alguns tipos de aplicação de motofreio em atividades de produção como guindastes, elevador, pontes-rolantes, transportadores, bobinadeiras, teares etc.

Deve-se evitar a aplicação de motofreio em atividades que possam provocar a penetração de partículas abrasivas, como água, óleo e outros derivados congêneres, de forma a reduzir a eficiência do sistema de frenagem ou mesmo danificá-lo. Podem ser utilizados em qualquer posição.

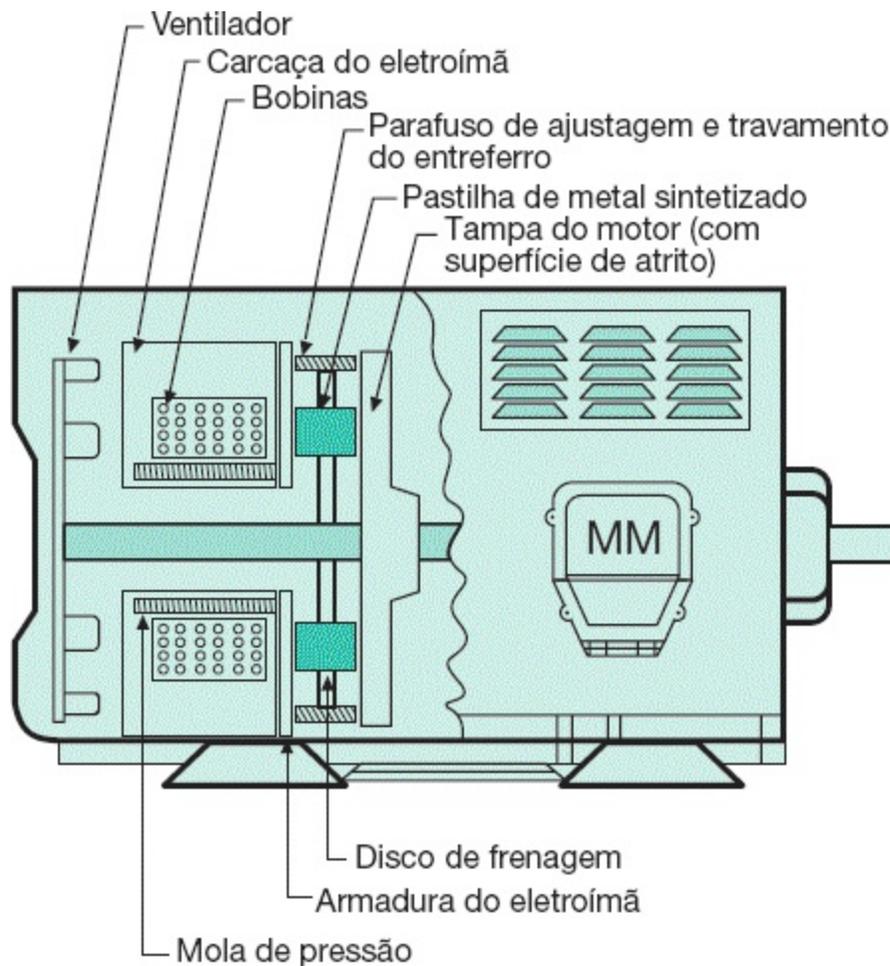
A fim de manter a unidade de frenagem dentro de suas características nominais, é necessário determinar a potência desenvolvida pela mesma

durante determinado ciclo de operação e comparar com os valores de placa. Todo o calor gerado pelo o atrito durante a operação de frenagem deve ser retirado pelo sistema de ventilação do motor.

A potência dissipada resultante do atrito do sistema de frenagem pode ser dada pela Equação (6.14).

$$P_a = \frac{J_{mc} \times N_{rpm}^2 \times N_{oph}}{657 \times 10^3 \times T_f} \quad (\text{W}) \quad (6.14)$$

$J_{mc}$  - momento de inércia do motor com a carga referida ao eixo do motor, em  $\text{kgm}^2$ ;



**Figura 6.45** Motofreio trifásico.

$N_{rpm}$  - rotação do motor, em rpm;

$N_{oph}$  - número de operações por hora;

$T_f$  - fração de tempo do motor, em funcionamento, em horas.

A [Tabela 6.5](#) fornece as características dos freios de fabricação WEG.

Os motofreios podem ser ligados, em geral, de três diferentes modos.

### a) **Ligação para condição de frenagem lenta**

A ponte retificadora é alimentada diretamente dos terminais do motor, em conformidade com a [Figura 6.46](#), sendo esta a forma de ligação padronizada de fábrica.

#### **Exemplo de aplicação (6.6)**

Determinar a potência dissipada por atrito desenvolvida por um motofreio constituído por um motor de 25 cv/IV polos/380 V, escorregamento de 1,1 % sabendo-se que o freio é acionado 30 vezes por hora, perfazendo, neste período, um total de uso de 10 minutos de duração.

$$T_f = 1 \text{ h} - \frac{10}{60} \text{ h} = 1 - 0,166 = 0,834 \text{ h}$$

$$J_{mc} = 0,1010 + 0,9802 = 1,0812 \text{ kgm}^2 \text{ (valores conhecidos pelo usuário)}$$

$$N_{rpm} = 1.800 - \frac{1,1 \times 1.800}{100} = 1.780 \text{ rpm}$$

$$P_a = \frac{1,0812 \times 1.780^2 \times 30}{657 \times 10^3 \times 0,834} = 187,5 \text{ W}$$

Conclui-se que é necessário usar uma carcaça 160 M/L - VIII polos, em conformidade com a [Tabela 6.5](#).

**Tabela 6.5** Características técnicas dos freios WEG

Carcaça ABNT	Polos	Tempo de atuação (ms) <sup>1</sup>			Conjugado de frenagem (N·m)	Potência máxima de frenagem P(W)	Consumo de potência pelo freio (W)
		Frenagem lenta	Frenagem média	Frenagem rápida			
71	II	350	200	80	15	55	30
	IV	250				40	
	VI	200				30	
	VIII	150				25	
80	II	450	250	120	20	70	35
	IV	350				45	
	VI	250				40	
	VIII	200				30	
90 S/L	II	650	300	170	25	100	40
	IV	500				75	
	VI	400				55	
	VIII	280				45	
	II	700				150	

100 L	IV	550	350	220	40	100	50
	VI	450				85	
	VIII	300				60	
112 M	II	800	450	250	70	250	60
	IV	600				150	
	VI	450				120	
	VIII	350				100	
132 S/M	II	1.000	600	300	80	400	100
	IV	800				250	
	VI	600				170	
	VIII	400				150	
160 M/L	II	1.200	800	370	160	550	120
	IV	1.000				300	
	VI	850				230	
	VIII	600				200	

(1) Tempo decorrido entre o instante da interrupção da corrente e o início da frenagem.

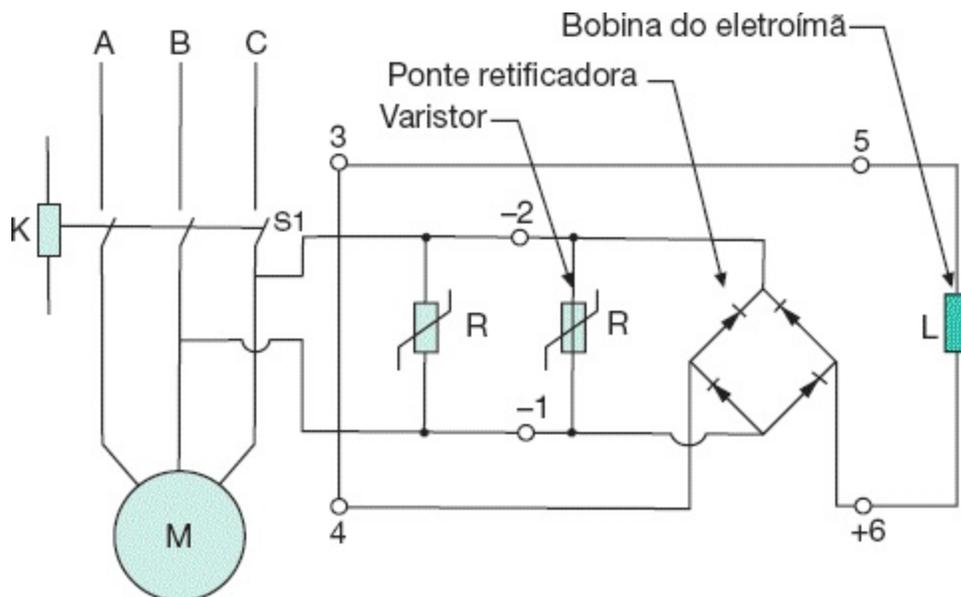
**b) Ligação para a condição de frenagem média**

A ponte retificadora é alimentada a partir da rede local, de corrente alternada, sendo que este circuito é conectado a um contato auxiliar do contactor de comando do motor, garantindo-se que o freio seja ligado ou desligado conjuntamente com o motor, de acordo com a [Figura 6.47](#).

### c) Ligação para a condição de frenagem rápida

A ponte retificadora é alimentada a partir da rede local de corrente alternada, porém, o circuito de alimentação de corrente contínua da referida ponte é conectado a um contato auxiliar NA do contactor de comando do motor, de acordo com a [Figura 6.48](#).

Para se obter uma parada do motofreio mais suave, pode-se diminuir o conjugado de frenagem, retirando-se parte da quantidade das molas do freio. Dessa forma, o conjugado de frenagem nominal pode ser induzido na proporção da quantidade de molas retiradas e do mínimo de molas originais do freio, sendo que as referidas molas devem ser retiradas de forma simétrica a partir de suas posições em torno do eixo do freio.



**Figura 6.46** Condição de frenagem lenta.

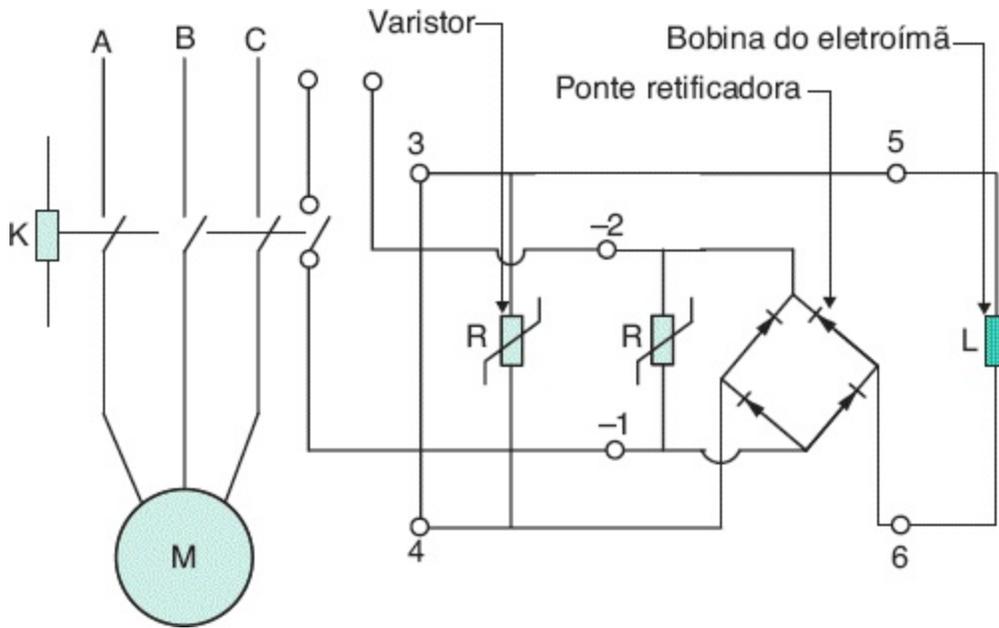


Figura 6.47 Condição de frenagem média.

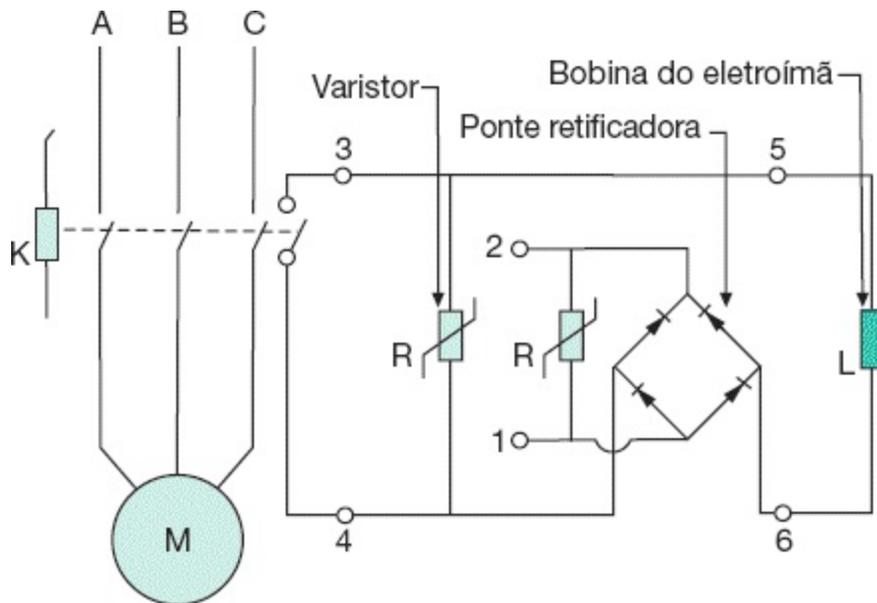


Figura 6.48 Condição de frenagem rápida.

## 6.5 Motores de alto rendimento

Os fabricantes de motores elétricos têm buscado nos últimos anos aumentar o

rendimento dos motores elétricos. Esses motores utilizam materiais de melhor qualidade e, para a mesma potência no eixo, consomem menos energia durante um mesmo ciclo de operação.

Os motores de alto rendimento são dotados das seguintes características:

- Uso de chapas magnéticas de aço silício de qualidade superior, que proporcionam a redução da corrente de magnetização e, conseqüentemente, aumentam o rendimento do motor.
- Uso de maior quantidade de cobre nos enrolamentos que permite reduzir as perdas Joule.
- Alto fator de enchimento das ranhuras, proporcionando uma melhor dissipação do calor gerado pelas perdas internas.
- Tratamento térmico do rotor, reduzindo as perdas suplementares.
- Dimensionamento adequado das ranhuras do rotor e anéis de curto-circuito, que permite reduzir as perdas Joule.

Com base nessas considerações, os motores de alto rendimento operam com temperaturas inferiores às dos motores convencionais, permitindo maior capacidade de sobrecarga, resultando um fator de serviço normalmente superior a 1,10.

Quando se processa uma auditoria energética em uma indústria, normalmente se estuda a conveniência econômica de substituição de alguns motores de construção convencional por motores de alto rendimento. Esses estudos recaem principalmente sobre os motores que operam continuamente.

Teoricamente, o rendimento dos motores pode crescer e atingir um número muito próximo à unidade, porém a um custo comercialmente insuportável para o comprador.