

# Motores de indução

---

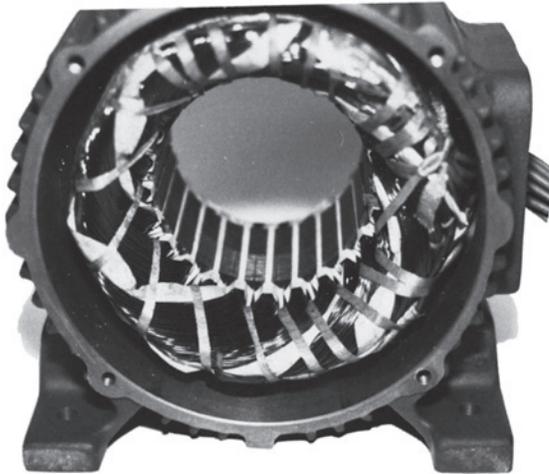
## OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

---

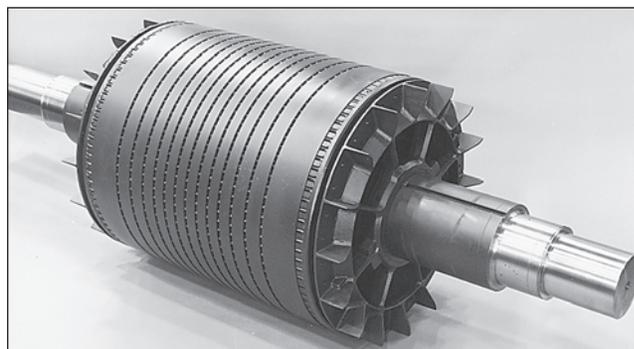
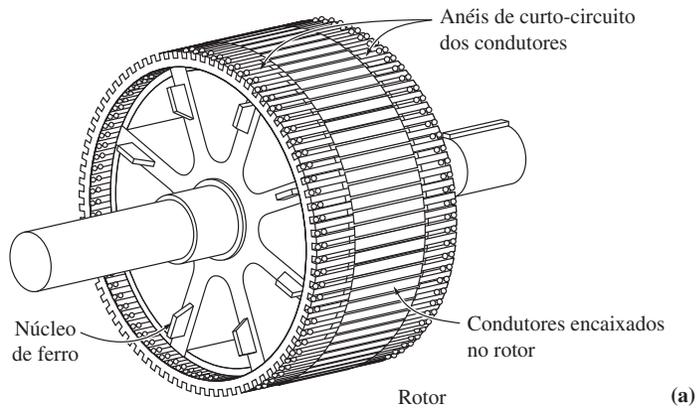
- Compreender as diferenças fundamentais entre um motor síncrono e um motor de indução.
  - Compreender o conceito de escorregamento de rotor e sua relação com a frequência do rotor.
  - Compreender e saber usar o circuito equivalente de um motor de indução.
  - Compreender os fluxos de potência e o diagrama de fluxo de potência de um motor de indução.
  - Ser capaz de usar a equação da curva característica de conjugado *versus* velocidade.
  - Compreender como a curva característica de conjugado *versus* velocidade varia com as diversas classes de rotor.
  - Compreender as técnicas usadas para a partida dos motores de indução.
  - Compreender como a velocidade dos motores de indução pode ser controlada.
  - Compreender como medir os parâmetros do modelo de circuito do motor de indução.
  - Compreender como a máquina de indução é usada como gerador.
  - Compreender as especificações nominais do motor de indução.
- 

No Capítulo 5, vimos como os enrolamentos amortecedores de um motor síncrono podiam desenvolver um conjugado de partida sem necessidade de lhes fornecer externamente uma corrente de campo. De fato, os enrolamentos amortecedores funcionam tão bem que um motor poderia ser construído sem nenhuma necessidade do circuito de campo CC principal do motor síncrono. Uma máquina com apenas um conjunto contínuo de enrolamentos amortecedores é denominada *máquina de indução*. Essas máquinas são denominadas máquinas de indução porque a tensão do rotor (que produz a corrente do rotor e o campo magnético do rotor) é *induzida* nos enrolamentos do rotor em vez de ser fornecida por meio de uma conexão física de fios. A característica que diferencia um motor de indução dos demais é que *não há necessidade de uma corrente de campo CC* para fazer a máquina funcionar.

Embora seja possível usar uma máquina de indução como motor ou como gerador, ela apresenta muitas desvantagens como gerador e, por isso, ela é usada como gerador somente em aplicações especiais. Por essa razão, as máquinas de indução são usualmente referidas como motores de indução.



**FIGURA 6-1**  
O estator de um motor de indução típico, mostrando os enrolamentos de estator. (Cortesia de MagneTek, Inc.)

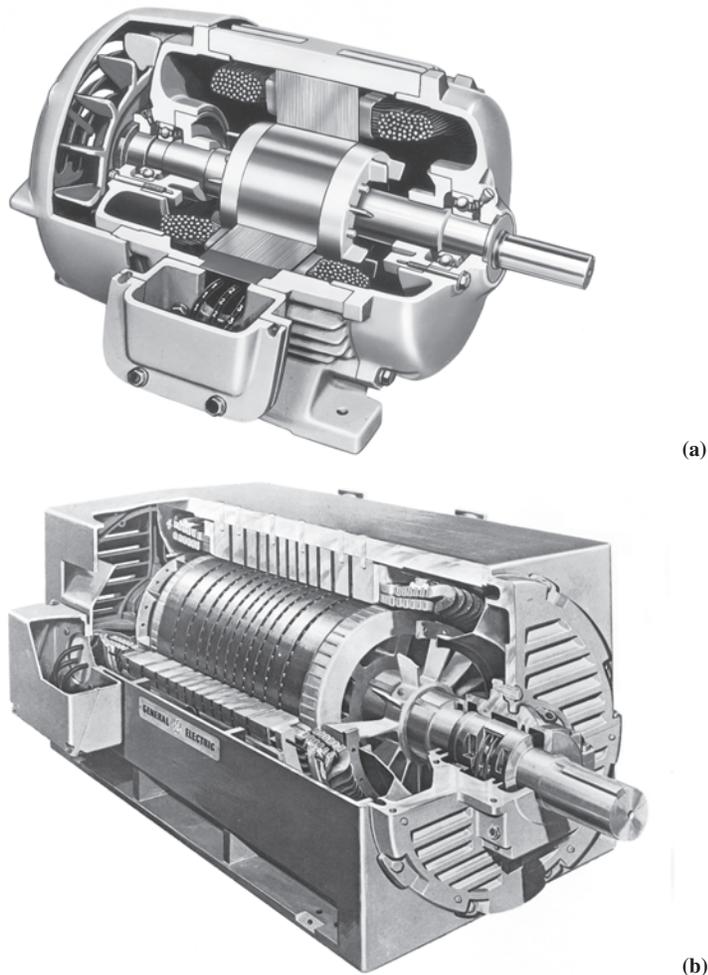


**FIGURA 6-2**  
(a) Desenho esquemático de um rotor gaiola de esquilo. (b) Um rotor gaiola de esquilo típico. (Cortesia de General Electric Company.)

## 6.1 CONSTRUÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO

Um motor de indução tem fisicamente o mesmo estator que uma máquina síncrona, com uma construção de rotor diferente. Um estator típico de dois polos está mostrado na Figura 6-1. Ele parece ser (e é) o mesmo que um estator de máquina síncrona. Há dois tipos diferentes de rotores de motor de indução, que podem ser colocados no interior do estator. Um deles é denominado *rotor gaiola de esquilo* e o outro é denominado *rotor bobinado*.

As Figuras 6-2 e 6-3 mostram rotores de motor de indução do tipo gaiola de esquilo. Esse rotor consiste em uma série de barras condutoras que estão encaixadas dentro de ranhuras na superfície do rotor e postas em curto-circuito em ambas as extremidades



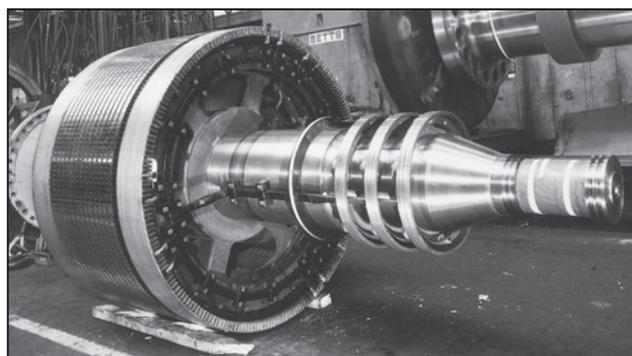
**FIGURA 6-3**

(a) Diagrama em corte de um pequeno motor de indução típico com rotor gaiola de esquilo. (Cortesia de MagneTek, Inc.) (b) Diagrama em corte de um motor de indução típico de grande porte com rotor gaiola de esquilo. (Cortesia de General Electric Company.)

por grandes *anéis de curto-circuito*. Essa forma construtiva é conhecida como rotor de gaiola de esquilo porque, se os condutores fossem examinados isoladamente, seriam semelhantes àsquelas rodas nas quais os esquilos ou os *hamsters* correm fazendo exercício.

O outro tipo de rotor é o rotor bobinado. Um *rotor bobinado* tem um conjunto completo de enrolamentos trifásicos que são similares aos enrolamentos do estator. As três fases dos enrolamentos do rotor são usualmente ligadas em Y e suas três terminações são conectas aos anéis deslizantes no eixo do rotor. Os enrolamentos do rotor são colocados em curto-circuito por meio de escovas que se apóiam nos anéis deslizantes. Portanto, nos motores de indução de rotor bobinado, as correntes no rotor podem ser acessadas por meio de escovas, nas quais as correntes podem ser examinadas e resistências extras podem ser inseridas no circuito do rotor. É possível tirar proveito desses atributos para modificar a característica de conjugado *versus* velocidade do motor. Dois rotores bobinados estão mostrados na Figura 6-4 e um motor de indução completo com rotor bobinado está mostrado na Figura 6-5.

Os motores de indução de rotor bobinado são de custo maior que o dos motores de indução de gaiola de esquilo. Eles exigem muito mais manutenção devido ao desgaste associado a suas escovas e anéis deslizantes. Como resultado, os motores de indução de enrolamento bobinado raramente são usados.



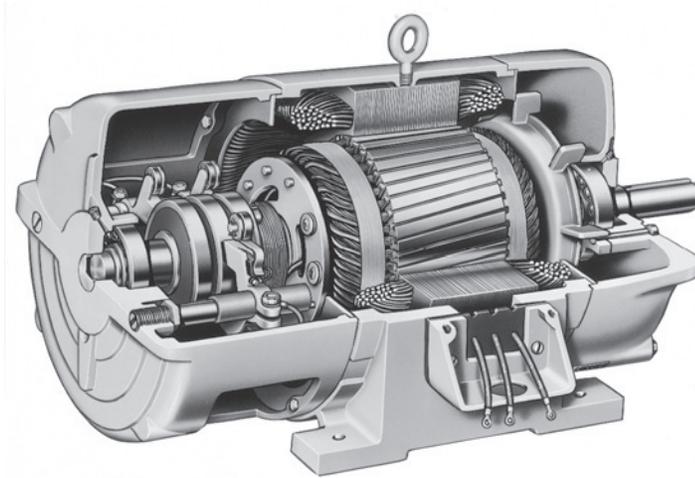
(a)



(b)

**FIGURA 6-4**

Rotores bobinados típicos de motores de indução. Observe os anéis deslizantes e as barras de conexão dos enrolamentos do rotor com os anéis deslizantes. (*Cortesia de General Electric Company.*)



**FIGURA 6-5**

Vista em corte de um motor de indução de rotor bobinado. Observe as escovas e os anéis deslizantes. Observe também que os enrolamentos do rotor são inclinados ou oblíquos\* para eliminar as harmônicas de ranhura. (*Cortesia de MagneTek, Inc.*)

## 6.2 CONCEITOS BÁSICOS DO MOTOR DE INDUÇÃO

O funcionamento dos motores de indução é basicamente o mesmo do dos enrolamentos amortecedores dos motores síncronos. Agora, faremos uma revisão de seu funcionamento básico e definiremos alguns termos importantes relativos ao motor de indução.

### A obtenção de conjugado induzido em um motor de indução

A Figura 6-6 mostra um motor de indução de rotor do tipo gaiola de esquilo. Um conjunto trifásico de tensões foi aplicado ao estator resultando em um conjunto trifásico de correntes circulando no estator. Essas correntes produzem um campo magnético  $\mathbf{B}_s$ , que está girando em sentido anti-horário. A velocidade de rotação do campo magnético é dada por

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120 f_{se}}{P} \quad (6-1)$$

em que  $f_{se}$  é a frequência do sistema aplicada ao estator em hertz, e  $P$  é o número de polos da máquina. Esse campo magnético girante  $\mathbf{B}_s$  passa pelas barras do rotor e induz uma tensão nelas.

A tensão induzida em uma dada barra do rotor é dada pela equação

$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (1-45)$$

\* N. de T.: *Skewed*, em inglês.

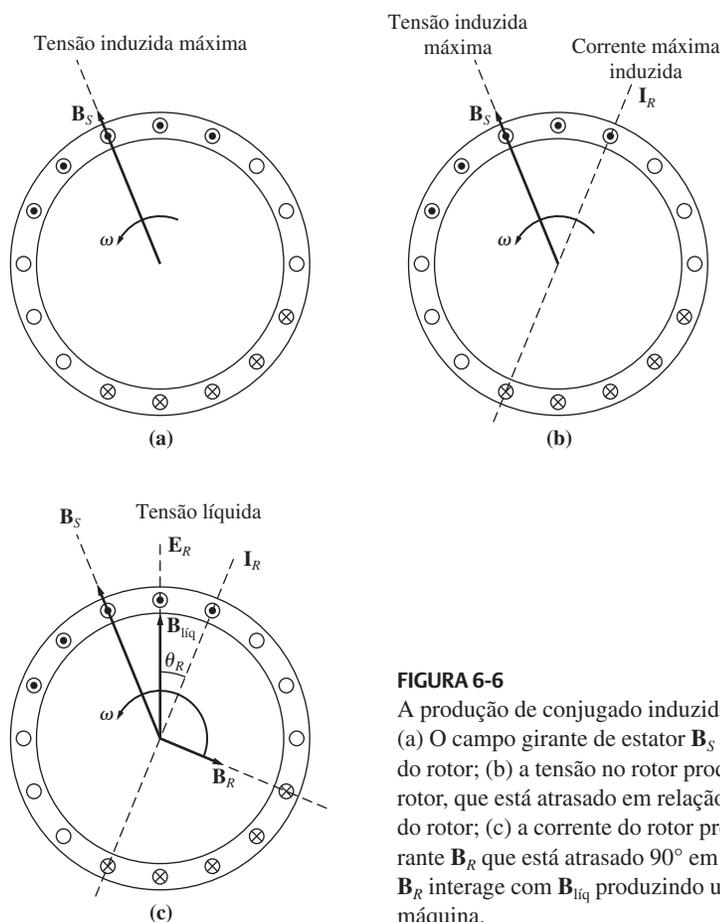


FIGURA 6-6

A produção de conjugado induzido em um motor de indução. (a) O campo girante de estator  $B_S$  induz uma tensão nas barras do rotor; (b) a tensão no rotor produz um fluxo de corrente no rotor, que está atrasado em relação à tensão devido à indutância do rotor; (c) a corrente do rotor produz um campo magnético girante  $B_R$  que está atrasado  $90^\circ$  em relação a ela própria. O campo  $B_R$  interage com  $B_{liq}$  produzindo um conjugado anti-horário na máquina.

em que  $v$  = velocidade da barra *em relação ao campo magnético*

$B$  = vetor densidade de fluxo magnético

$l$  = comprimento do condutor dentro do campo magnético

É o movimento *relativo* do rotor em relação ao campo magnético do estator que produz uma tensão induzida em uma barra do rotor. A velocidade das barras superiores do rotor em relação ao campo magnético é para a direita, desse modo, a tensão induzida nas barras superiores é para fora da página, ao passo que a tensão induzida nas barras inferiores é para dentro da página. Isso resulta em um fluxo de corrente para fora das barras superiores e para dentro das barras inferiores. Entretanto, como a estrutura do rotor é indutiva, a corrente de pico do rotor está atrasada em relação à tensão de pico do rotor (veja a Figura 6-6b). O fluxo de corrente do rotor produz um campo magnético de rotor  $B_R$ .

Finalmente, como o conjugado induzido na máquina é dado por

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_S \quad (3-50)$$

o conjugado resultante é anti-horário. Como o conjugado induzido do rotor é anti-horário, o rotor acelera nesse sentido.

Entretanto, há um limite superior finito para a velocidade do motor. Se o rotor do motor de indução estivesse girando na *velocidade síncrona*, as barras do rotor estariam estacionárias *em relação ao campo magnético* e não haveria tensão induzida. Se  $e_{ind}$  fosse igual a 0, então não haveria corrente nem campo magnético no rotor. Sem campo magnético no rotor, o conjugado induzido seria zero e o rotor perderia velocidade como resultado das perdas por atrito. Portanto, um motor de indução pode ganhar velocidade até próximo da velocidade síncrona, sem nunca alcançá-la exatamente.

Observe que, em funcionamento normal, *ambos os campos magnéticos do rotor e do estator  $\mathbf{B}_R$  e  $\mathbf{B}_S$  giram juntos na velocidade síncrona  $n_{sinc}$ , ao passo que o próprio rotor gira a uma velocidade menor.*

### O conceito de escorregamento do rotor

A tensão induzida nas barras do rotor de um motor de indução depende da velocidade do rotor *em relação aos campos magnéticos*. Como o comportamento de um motor de indução depende da tensão e da corrente do rotor, muitas vezes é mais lógico falar em velocidade relativa. Dois termos são comumente utilizados para definir o movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos. Um deles é a *velocidade de escorregamento*, definida como a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor:

$$n_{esc} = n_{sinc} - n_m \tag{6-2}$$

em que  $n_{esc}$  = velocidade de escorregamento da máquina

$n_{sinc}$  = velocidade dos campos magnéticos

$n_m$  = velocidade mecânica do eixo do motor

O outro termo usado para descrever o movimento relativo é o *escorregamento*, que é a velocidade relativa expressa em uma base por unidade ou porcentagem. Isto é, o escorregamento é definido como

$$s = \frac{n_{esc}}{n_{sinc}} (\times 100\%) \tag{6-3}$$

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (\times 100\%) \tag{6-4}$$

Essa equação também pode ser expressa em termos da velocidade angular  $\omega$  (radianos por segundo) como

$$s = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} (\times 100\%) \tag{6-5}$$

Observe que, se o rotor estiver girando na velocidade síncrona, então  $s = 0$ , ao passo que, se o rotor estiver estacionário, então  $s = 1$ . Todas as velocidades normais de um motor recaem em algum lugar entre esses dois limites.

É possível expressar a velocidade mecânica do eixo do rotor em termos de velocidade síncrona e de escorregamento. Resolvendo as Equações (6-4) e (6-5) em relação à velocidade mecânica, obtemos

$$n_m = (1 - s)n_{\text{sinc}} \quad (6-6)$$

ou

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{\text{sinc}} \quad (6-7)$$

Essas equações são úteis na dedução das relações de conjugado e potência do motor de indução.

### A frequência elétrica no rotor

Um motor de indução trabalha induzindo tensões e correntes no rotor da máquina e, por essa razão, ele também foi denominado algumas vezes *transformador rotativo*. Como tal, o primário (estator) induz uma tensão no secundário (rotor). Entretanto, *diferentemente* de um transformador, a frequência do secundário não é necessariamente a mesma que a frequência do primário.

Se o rotor de um motor for bloqueado ou travado de modo que ele não possa se mover, o rotor terá a mesma frequência do estator. Por outro lado, se o rotor girar na velocidade síncrona, então a frequência do rotor será zero. Qual será a frequência do rotor para uma velocidade qualquer de rotação do rotor?

Para  $n_m = 0$  rpm, a frequência do rotor é  $f_{re} = f_{se}$  e o escorregamento é  $s = 1$ . Para  $n_m = n_{\text{sinc}}$ , a frequência do rotor é  $f_{re} = 0$  Hz e o escorregamento é  $s = 0$ . Para qualquer velocidade intermediária, a frequência do rotor é diretamente proporcional à *diferença* entre a velocidade do campo magnético  $n_{\text{sinc}}$  e a velocidade do rotor  $n_m$ . Uma vez que o escorregamento do rotor é definido como

$$s = \frac{n_{\text{sinc}} - n_m}{n_{\text{sinc}}} \quad (6-4)$$

então a frequência do rotor pode ser expressa como

$$f_{re} = sf_{se} \quad (6-8)$$

Há diversas formas alternativas dessa expressão que algumas vezes são úteis. Uma das expressões mais comuns é obtida substituindo a Equação (6-4) do escorregamento na Equação (6-8) e, em seguida, fazendo uma substituição em  $n_{\text{sinc}}$  no denominador da expressão:

$$f_{re} = \frac{n_{\text{sinc}} - n_m}{n_{\text{sinc}}} f_{se}$$

Como  $n_{\text{sinc}} = 120 f_{se} / P$  [da Equação (6-1)], temos

$$f_{re} = (n_{\text{sinc}} - n_m) \frac{P}{120 f_{se}} f_{se}$$

Portanto,

$$f_{re} = \frac{P}{120} (n_{\text{sinc}} - n_m) \quad (6-9)$$

**EXEMPLO 6-1** Um motor de indução de 208 V, 10 HP, quatro polos, 60 Hz e ligado em Y, tem um escorregamento de plena carga de 5%.

- (a) Qual é a velocidade síncrona desse motor?
- (b) Qual é a velocidade do rotor desse motor com carga nominal?
- (c) Qual é a frequência do rotor do motor com carga nominal?
- (d) Qual é o conjugado no eixo do motor com carga plena?

**Solução**

(a) A velocidade síncrona do motor é

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120 f_{se}}{P} \tag{6-1}$$

$$= \frac{120(60 \text{ Hz})}{4 \text{ polos}} = 1800 \text{ rpm}$$

(b) A velocidade do rotor do motor é dada por

$$n_m = (1 - s)n_{\text{sinc}} \tag{6-6}$$

$$= (1 - 0,05)(1800 \text{ rpm}) = 1710 \text{ rpm}$$

(c) A frequência do rotor desse motor é dada por

$$f_{re} = s f_{se} = (0,05)(60 \text{ Hz}) = 3 \text{ Hz} \tag{6-8}$$

Alternativamente, a frequência pode ser encontrada a partir da Equação (6-9):

$$f_{re} = \frac{P}{120} (n_{\text{sinc}} - n_m) \tag{6-9}$$

$$= \frac{4}{120} (1800 \text{ rpm}) - 1710 \text{ rpm} = 3 \text{ Hz}$$

(d) O conjugado de carga no eixo desse motor é dado por

$$\tau_{\text{carga}} = \frac{P_{\text{saída}}}{\omega_m}$$

$$= \frac{(10 \text{ HP})(746 \text{ W/HP})}{(1710 \text{ rotações/min})(2\pi \text{ rad/rotação})(1 \text{ min}/60 \text{ s})} = 41,7 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Em unidades inglesas, o conjugado de carga no eixo é dado pela Equação (1-17):

$$\tau_{\text{carga}} = \frac{5252P}{n}$$

na qual  $\tau$  é em libras-pés, a potência  $P$  é em HP e  $n_m$  é em rotações por minuto. Portanto,

$$\tau_{\text{carga}} = \frac{5252(10 \text{ HP})}{1710 \text{ rpm}} = 30,7 \text{ libras} \cdot \text{pés}$$

### 6.3 O CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO

Para funcionar, um motor de indução baseia-se na indução efetuada pelo circuito do estator de tensões e correntes no circuito do rotor (ação de transformador). Como as tensões e correntes no circuito do rotor de um motor de indução são basicamente o resultado de uma ação de transformador, o circuito equivalente de um motor de indu-

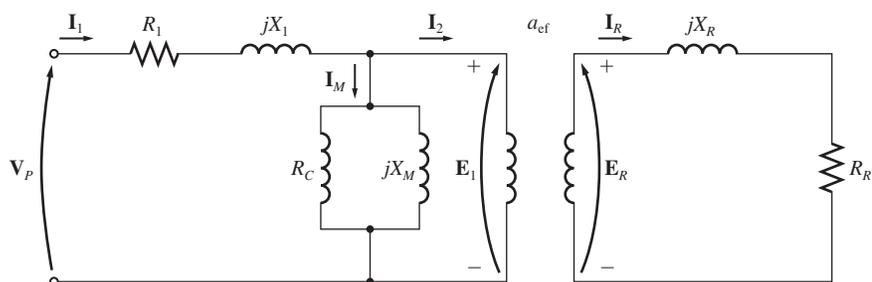


FIGURA 6-7

O modelo de transformador para um motor de indução, com rotor e estator conectados por meio de um transformador ideal com relação de espiras  $a_{ef}$ .

ção será muito semelhante ao circuito equivalente de um transformador. Um motor de indução é denominado *máquina de excitação simples* (em oposição a uma máquina síncrona que é de *excitação dupla*), porque a potência é fornecida somente ao circuito de estator do motor. Como um motor de indução não tem um circuito de campo independente, seu modelo não contém uma fonte de tensão interna, como no caso da tensão gerada interna  $E_A$  de uma máquina síncrona.

Poderemos obter o circuito equivalente de um motor de indução se usarmos o que sabemos sobre os transformadores e o que já sabemos sobre a variação de frequência no rotor dos motores de indução em função da velocidade. Começaremos a desenvolver um modelo para o motor de indução usando o modelo de transformador do Capítulo 2. A seguir, deveremos analisar um modo de também incluir a frequência variável do rotor e outros efeitos similares apresentados pelo motor de indução.

### O modelo de transformador de um motor de indução

O circuito equivalente por fase de um transformador, representando o funcionamento de um motor de indução, está mostrado na Figura 6-7. Como em qualquer transformador, há certa resistência e autoindutância nos enrolamentos do primário (estator), que devem ser representadas no circuito equivalente da máquina. A resistência do estator será denominada  $R_1$  e a reatância de dispersão do estator será denominada  $X_1$ . Essas duas componentes aparecem logo na entrada do modelo da máquina.

Também, como em qualquer transformador com núcleo de ferro, o fluxo na máquina está relacionado com a integral da tensão aplicada  $E_1$ . Na Figura 6-8, a curva de força magnetomotriz *versus* fluxo (curva de magnetização) dessa máquina é comparada com a curva similar de um transformador de potência. Observe que a inclinação da curva de força magnetomotriz *versus* fluxo do motor de indução é muito menos inclinada do que a curva de um bom transformador. Isso ocorre porque é necessário haver um entreferro de ar no motor de indução, aumentando assim grandemente a relutância do caminho de fluxo e reduzindo, portanto, o acoplamento entre os enrolamentos primário e secundário. A relutância maior devido ao entreferro de ar significa que uma corrente de magnetização maior é necessária para obter um dado nível de fluxo. Portanto, a reatância de magnetização  $X_M$  no circuito equivalente terá um valor muito menor (ou a susceptância  $B_M$  terá um valor muito maior) do que em um transformador comum.

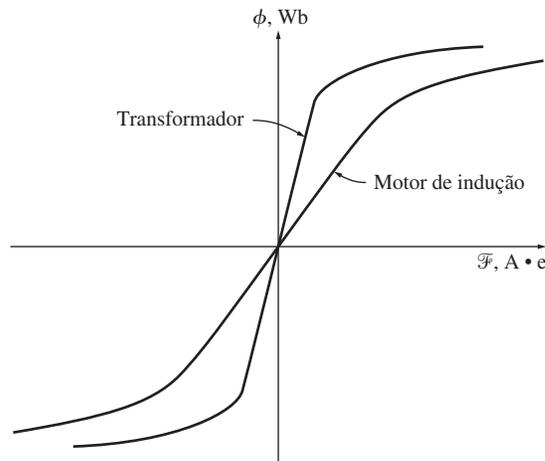


FIGURA 6-8

A curva de magnetização de um motor de indução comparada com a de um transformador.

A tensão interna primária  $\mathbf{E}_1$  do estator está acoplada à tensão do secundário  $\mathbf{E}_R$  por meio de um transformador ideal com uma relação de espiras efetiva  $a_{ef}$ . É muito fácil determinar essa relação  $a_{ef}$  no caso de um motor de rotor bobinado – é basicamente a razão entre os condutores por fase do estator e os condutores por fase do rotor, modificada por quaisquer diferenças devido a fatores de passo e distribuição. No caso de um motor com rotor de gaiola de esquilo, é bem difícil ver claramente  $a_{ef}$ , porque não há enrolamentos visíveis na gaiola de esquilo do rotor. Em ambos os casos, há uma relação efetiva de espiras para o motor.

Por sua vez, a tensão  $\mathbf{E}_R$  induzida no rotor da máquina produz um fluxo de corrente no circuito em curto desse rotor (secundário).

As impedâncias do primário e a corrente de magnetização do motor de indução são muito semelhantes aos respectivos componentes no circuito equivalente de um transformador. O circuito equivalente de um motor de indução difere do circuito equivalente de um transformador basicamente no que se relaciona com os efeitos que a variação de frequência produz na tensão de rotor  $\mathbf{E}_R$  e nas impedâncias de rotor  $R_R$  e  $jX_R$ .

### Modelo de circuito do rotor

Em um motor de indução, quando a tensão é aplicada aos enrolamentos de estator, uma tensão é induzida nos enrolamentos do rotor da máquina. Em geral, *quanto maior o movimento relativo entre os campos magnéticos do rotor e do estator, maiores serão a tensão e a frequência do rotor*. O movimento relativo máximo ocorre quando o rotor está parado. Essa condição é denominada *rotor bloqueado* ou *travado*, de modo que a maior tensão e a maior frequência do rotor são induzidas com o rotor nessa condição. A menor tensão (0 V) e a menor frequência (0 Hz) ocorrem quando o rotor está se movendo com a mesma velocidade que o campo magnético do estator, resultando um movimento relativo nulo. O valor e a frequência da tensão induzida no rotor para qualquer velocidade entre esses extremos é *diretamente proporcional ao escorregamento do rotor*. Portanto, se o valor da tensão induzida no rotor, estando

este bloqueado, for denominado  $E_{R0}$ , então o valor da tensão induzida, para qualquer escorregamento será dada pela equação

$$E_R = sE_{R0} \quad (6-10)$$

e a frequência da tensão induzida para qualquer escorregamento será dada pela equação

$$f_{re} = sf_{se} \quad (6-8)$$

Essa tensão é induzida em um rotor que apresenta resistência e também reatância. A resistência do rotor  $R_R$  é uma constante (exceto em relação ao efeito pelicular), independentemente do escorregamento, ao passo que a reatância do rotor é afetada de modo mais complicado pelo escorregamento.

A reatância do rotor de um motor de indução depende da indutância do rotor e da frequência da tensão e da corrente do rotor. Com uma indutância de rotor  $L_R$ , a reatância do rotor é dada por

$$X_R = \omega_{re} L_R = 2\pi f_{re} L_R$$

Pela Equação (6-8), temos  $f_{re} = sf_{se}$ , de modo que

$$\begin{aligned} X_R &= 2\pi sf_{se} L_R \\ &= s(2\pi f_{se} L_R) \\ &= sX_{R0} \end{aligned} \quad (6-11)$$

em que  $X_{R0}$  é a reatância do rotor, estando este bloqueado.

O circuito equivalente resultante do rotor está mostrado na Figura 6-9. A corrente do rotor pode ser encontrada por

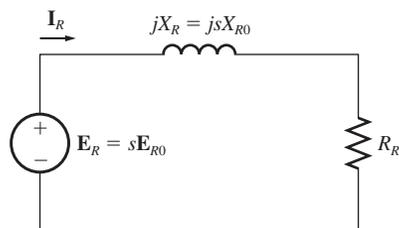
$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{E}_R}{R_R + jX_R}$$

$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{E}_R}{R_R + jsX_{R0}} \quad (6-12)$$

ou

$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{E}_{R0}}{R_R/s + jX_{R0}} \quad (6-13)$$

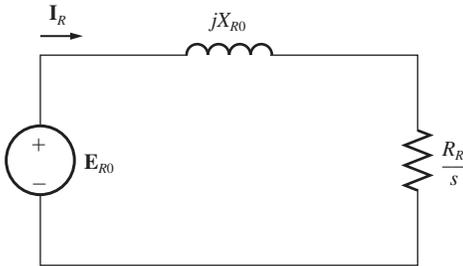
Observe, na Equação (6-13), que é possível tratar todos os efeitos, que ocorrem no rotor devidos a uma velocidade variável, como causados por uma *impedância variável* alimentada com energia elétrica a partir de uma fonte de tensão constante  $\mathbf{E}_{R0}$ . Desse ponto de vista, a impedância equivalente do rotor é



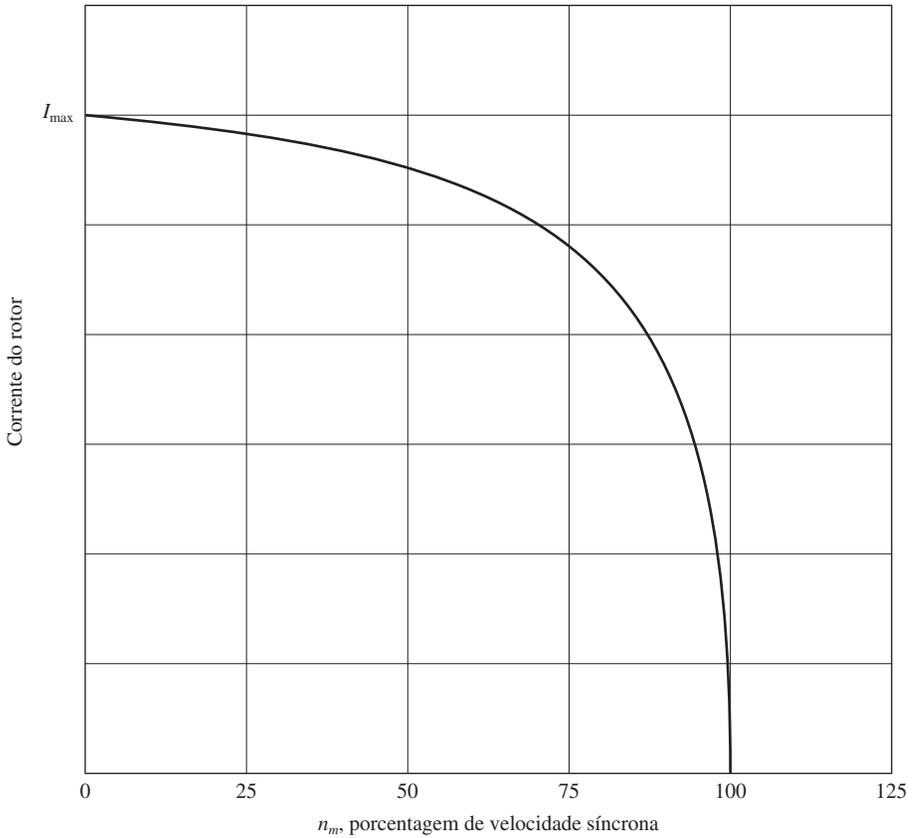
**FIGURA 6-9**  
O modelo de circuito do rotor de um motor de indução.

$$Z_{R,eq} = R_R / s + jX_{R0} \tag{6-14}$$

Usando essa convenção, o circuito equivalente do rotor está mostrado na Figura 6-10. Nesse circuito equivalente, a tensão do rotor é um valor constante de  $E_{R0}$  volts e a impedância do rotor  $Z_{R,eq}$  inclui todos os efeitos devido a um escorregamento variável do rotor. Um gráfico do fluxo de corrente no rotor, como foi obtido nas Equações (6-12) e (6-13), está mostrado na Figura 6-11.



**FIGURA 6-10**  
O modelo de circuito do rotor com todos os efeitos devidos à frequência (escorregamento) concentrados na resistência  $R_R$ .



**FIGURA 6-11**  
Corrente do rotor em função da velocidade do rotor.

Para escorregamento muito baixo, observe que o termo resistivo vale a expressão  $R_R/s \gg X_{R0}$ , de modo que a resistência do rotor predomina e a corrente do rotor varia *linearmente* com o escorregamento. Com escorregamento elevado,  $X_{R0}$  é muito maior do que  $R_R/s$  e a corrente do rotor *aproxima-se de um valor de regime permanente* à medida que o escorregamento torna-se muito elevado.

### O circuito equivalente final

Para obter o circuito equivalente final por fase de um motor de indução, é necessário que a parte do rotor no modelo seja referida ao lado do estator. O modelo do circuito do rotor que será referido para o lado do estator é o modelo mostrado na Figura 6-10, que tem todos os efeitos de variação de velocidade concentrados no termo de impedância.

Em um transformador comum, podemos referir tensões, correntes e impedâncias do lado secundário do dispositivo para o lado primário, por meio da relação de espiras do transformador:

$$\mathbf{V}_p = \mathbf{V}'_s = a\mathbf{V}_s \quad (6-15)$$

$$\mathbf{I}_p = \mathbf{I}'_s = \frac{\mathbf{I}_s}{a} \quad (6-16)$$

e

$$\mathbf{Z}'_s = a^2\mathbf{Z}_s \quad (6-17)$$

em que os sinais de linha (') indicam os valores referidos de tensão, corrente e impedância.

Exatamente o mesmo tipo de transformação pode ser feito com o circuito do rotor do motor de indução. Se a relação de espiras efetiva de um motor de indução for  $a_{ef}$ , a tensão de rotor transformada torna-se

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}'_R = a_{ef}\mathbf{E}_{R0} \quad (6-18)$$

e a corrente do rotor torna-se

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{I}_R}{a_{ef}} \quad (6-19)$$

e, ainda, temos que a impedância do rotor torna-se

$$\mathbf{Z}_2 = a_{ef}^2 \left( \frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (6-20)$$

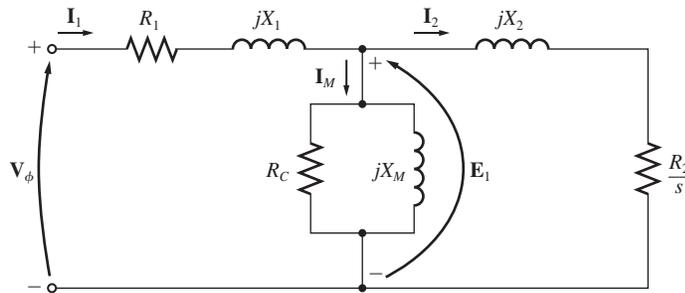
Agora, se adotarmos as seguintes definições

$$R_2 = a_{ef}^2 R_R \quad (6-21)$$

$$X_2 = a_{ef}^2 X_{R0} \quad (6-22)$$

então o circuito equivalente final por fase do motor de indução será como está mostrado na Figura 6-12.

A resistência do rotor  $R_R$  e reatância do rotor  $X_{R0}$ , com o rotor bloqueado, são de determinação muito difícil ou impossível em rotores de gaiola de esquilo. A relação



**FIGURA 6-12**  
O circuito equivalente por fase de um motor de indução.

de espiras efetiva  $a_{ef}$  também é de difícil obtenção no caso de rotores de gaiola de esquilo. Felizmente, contudo, é possível realizar medidas que darão diretamente a resistência e a reatância referidas  $R_2$  e  $X_2$ , mesmo que  $R_R$ ,  $X_{R0}$  e  $a_{ef}$  não sejam conhecidas separadamente. A medição dos parâmetros do motor de indução será discutida na Seção 6.7.

## 6.4 POTÊNCIA E CONJUGADO EM MOTORES DE INDUÇÃO

Como os motores de indução são máquinas de excitação simples, suas relações de potência e conjugado são consideravelmente diferentes das relações estudadas anteriormente com as máquinas síncronas. Esta seção faz uma revisão das relações de potência e conjugado nos motores de indução.

### Perdas e diagrama de fluxo de potência

Um motor de indução pode ser descrito basicamente como um transformador rotativo. Sua entrada é um sistema trifásico de tensões e correntes. Em um transformador comum, a saída é uma potência elétrica presente nos enrolamentos do secundário. Em um motor de indução comum, os enrolamentos do secundário (rotor) estão em curto-circuito, de modo que não há saída elétrica. Em vez disso, a saída é mecânica. A relação entre a potência elétrica de entreferro e a potência mecânica de saída desse motor está mostrada no diagrama de fluxo de potência da Figura 6-13.

A potência de entrada de um motor de indução  $P_{entrada}$  é na forma de tensões e correntes trifásicas. As primeiras perdas encontradas na máquina são perdas  $I^2R$  nos enrolamentos do estator (as perdas no cobre do estator  $P_{PCE}$ ). Então, certa quantidade de potência é perdida como histerese e corrente parasita no estator ( $P_{núcleo}$ ). A potência restante nesse ponto é transferida ao rotor da máquina através do entreferro entre o estator e o rotor. Essa potência é denominada *potência de entreferro* ( $P_{EF}$ ) da máquina. Após a potência ser transferida ao rotor, uma parte dela é perdida como perdas  $I^2R$  (as perdas no cobre do rotor  $P_{PCR}$ ) e o restante é convertido da forma elétrica para a forma mecânica ( $P_{conv}$ ). Finalmente, as perdas por atrito e ventilação  $P_{AeV}$  e as perdas suplementares  $P_{suplem.}$  são subtraídas. A potência restante é a saída do motor  $P_{saída}$ .

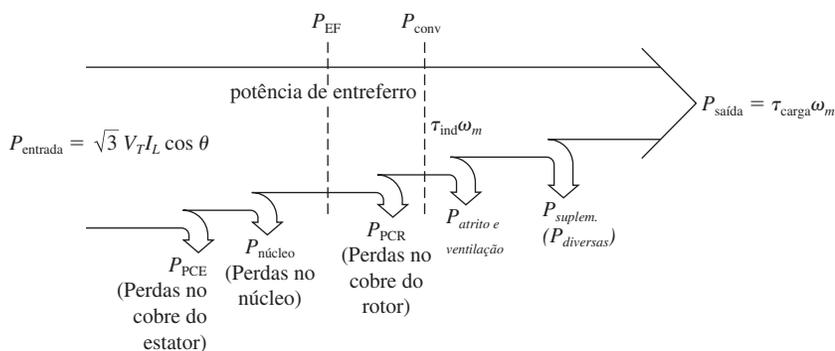


FIGURA 6-13

O diagrama do fluxo de potência de um motor de indução.

As *perdas no núcleo* nem sempre aparecem no diagrama de fluxo de potência no ponto mostrado na Figura 6-13. Devido à natureza das perdas no núcleo, é um tanto arbitrário definir o lugar onde elas ocorrem na máquina. As perdas no núcleo de um motor de indução vêm parcialmente do circuito do estator e parcialmente do circuito do rotor. Como um motor de indução opera normalmente com uma velocidade próxima da velocidade síncrona, o movimento relativo dos campos magnéticos sobre a superfície do rotor é muito lento e as perdas no núcleo do rotor são muito pequenas em comparação com as do estator. Como a maior fração das perdas no núcleo vem do circuito do estator, todas as perdas no núcleo são concentradas nesse ponto do diagrama. Essas perdas são representadas no circuito equivalente do motor de indução pelo resistor  $R_C$  (ou condutância  $G_C$ ). Se as perdas no núcleo forem dadas simplesmente por um número ( $X$  watts), em vez de serem dadas por um elemento de circuito, então frequentemente elas serão combinadas com as perdas mecânicas e as subtraídas, no ponto do diagrama onde as perdas mecânicas estão localizadas.

Quanta *maior* a velocidade de um motor de indução, *maiores* serão as perdas por atrito, ventilação e suplementares. Por outro lado, quanto *maior* for a velocidade do motor (até  $n_{\text{sinc}}$ ), *menores* serão suas perdas no núcleo. Portanto, essas três categorias de perdas são algumas vezes combinadas e denominadas *perdas rotacionais*. As perdas rotacionais totais de um motor são frequentemente consideradas constantes com a velocidade variável, porque as diversas perdas variam em sentidos opostos com mudança de velocidade.

**EXEMPLO 6-2** Um motor de indução trifásico de 480 V, 60 Hz e 50 HP, está usando 60 A com FP 0,85 atrasado. As perdas no cobre do estator são 2 kW e as perdas no cobre do rotor são 700 W. As perdas por atrito e ventilação são 600 W, as perdas no núcleo são 1800 W e as perdas suplementares são desprezíveis. Encontre as seguintes grandezas:

- A potência de entreferro  $P_{\text{EF}}$
- A potência convertida  $P_{\text{conv}}$
- A potência de saída  $P_{\text{saída}}$
- A eficiência do motor

**Solução**

Para responder a essas perguntas, consulte o diagrama de fluxo de potência de um motor de indução (Figura 6-13).

- (a) A potência de entreferro é simplesmente a potência de entrada menos as perdas  $P_R$  no estator e as no núcleo. A potência de entrada é dada por

$$P_{\text{entrada}} = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta$$

$$= \sqrt{3}(480 \text{ V})(60 \text{ A})(0,85) = 42,4 \text{ kW}$$

Do diagrama de fluxo de potência, a potência de entreferro é dada por

$$P_{\text{EF}} = P_{\text{entrada}} - P_{\text{PCE}} - P_{\text{núcleo}}$$

$$= 42,4 \text{ kW} - 2 \text{ kW} - 1,8 \text{ kW} = 38,6 \text{ kW}$$

- (b) Do diagrama de fluxo de potência, a potência convertida da forma elétrica para a mecânica é

$$P_{\text{conv}} = P_{\text{EF}} - P_{\text{PCR}}$$

$$= 38,6 \text{ kW} - 700 \text{ W} = 37,9 \text{ kW}$$

- (c) Do diagrama de fluxo de potência, a potência de saída é dada por

$$P_{\text{saída}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{AeV}} - P_{\text{suplem.}}$$

$$= 37,9 \text{ kW} - 600 \text{ W} - 0 \text{ W} = 37,3 \text{ kW}$$

ou, em HP,

$$P_{\text{saída}} = (37,3 \text{ kW}) \frac{1 \text{ HP}}{0,746 \text{ kW}} = 50 \text{ HP}$$

- (d) Portanto, a eficiência do motor de indução é a

$$\eta = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100\%$$

$$= \frac{37,3 \text{ kW}}{42,4 \text{ kW}} \times 100\% = 88\%$$

**Potência e conjugado em um motor de indução**

A Figura 6-12 mostra o circuito equivalente por fase de um motor de indução. Se o circuito equivalente for examinado com atenção, poderemos usá-lo para deduzir as equações de potência e conjugado que governam o funcionamento do motor.

A corrente de entrada de uma fase do motor pode ser obtida dividindo a tensão de entrada pela impedância equivalente total:

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{\text{eq}}} \tag{6-23}$$

em que

$$Z_{\text{eq}} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_C - jB_M + \frac{1}{V_2/s + jX_2}} \tag{6-24}$$

Portanto, as perdas no cobre do estator, as perdas no núcleo e as perdas no cobre do rotor podem ser obtidas. As perdas no cobre do estator nas três fases são dadas por

$$P_{\text{PCE}} = 3I_1^2 R_1 \quad (6-25)$$

As perdas no núcleo são dadas por

$$P_{\text{núcleo}} = 3E_1^2 G_C \quad (6-26)$$

de modo que a potência de entreferro pode ser encontrada como

$$P_{\text{EF}} = P_{\text{entrada}} - P_{\text{PCE}} - P_{\text{núcleo}} \quad (6-27)$$

Examine com atenção o circuito equivalente do rotor. O *único* elemento do circuito equivalente em que a potência de entreferro pode ser consumida é no resistor  $R_2/s$ . Portanto, a *potência de entreferro* também pode ser dada por

$$P_{\text{EF}} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (6-28)$$

As perdas resistivas reais do circuito do rotor são dadas pela equação

$$P_{\text{PCR}} = 3I_R^2 R_R \quad (6-29)$$

Como a potência não se altera quando é referida de um lado para outro em um transformador ideal, as perdas no cobre do rotor também podem ser expressas como

$$P_{\text{PCR}} = 3I_R^2 R_2 \quad (6-30)$$

Depois que as perdas no cobre do estator, no núcleo e no cobre do rotor são subtraídas da potência de entrada do motor, a potência restante é convertida da forma elétrica para a mecânica. Essa potência convertida, algumas vezes denominada *potência mecânica desenvolvida*, é dada por

$$\begin{aligned} P_{\text{conv}} &= P_{\text{EF}} - P_{\text{PCR}} \\ &= 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \\ &= 3I_2^2 R_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right) \end{aligned}$$

$$P_{\text{conv}} = 3I_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad (6-31)$$

Observe, com base nas Equações (6-28) e (6-30), que as perdas no cobre do estator são iguais à potência de entreferro vezes o escorregamento:

$$P_{\text{PCR}} = sP_{\text{EF}} \quad (6-32)$$

Portanto, quanto menor o escorregamento do motor, menores serão as perdas no rotor da máquina. Observe também que, se o rotor não estiver girando, o escorregamento será  $s = 1$  e a potência de entreferro será consumida inteiramente no rotor. Isso é lógico, porque, se o motor não estiver girando, a potência de saída  $P_{saída} (= \tau_{carga} \omega_m)$  deve ser zero. Como  $P_{conv} = P_{EF} - P_{PCR}$ , isso também fornece outra relação entre a potência de entreferro e a potência convertida da forma elétrica em mecânica:

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{EF} - P_{PCR} \\ &= P_{EF} - sP_{EF} \end{aligned}$$

$$P_{conv} = (1 - s)P_{AG} \tag{6-33}$$

Finalmente, se as perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares forem conhecidas, a potência de saída poderá ser obtida por

$$P_{saída} = P_{conv} - P_{AeV} - P_{suplem.} \tag{6-34}$$

O *conjugado induzido*  $\tau_{ind}$  de uma máquina foi definido como o conjugado gerado pela conversão interna de potência elétrica em mecânica. Esse conjugado difere do conjugado realmente disponível nos terminais do motor em um valor igual aos conjugados de atrito e ventilação da máquina. O conjugado induzido é dado pela equação

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \tag{6-35}$$

Esse conjugado é também denominado *conjugado desenvolvido* da máquina.

O conjugado induzido de um motor de indução também pode ser expresso de forma diferente. A Equação (6-7) fornece a velocidade real em termos de velocidade síncrona e escorregamento, ao passo que a Equação (6-33) expressa  $P_{conv}$  em termos de  $P_{EF}$  e escorregamento. Substituindo as duas equações na Equação (6-35), temos

$$\tau_{ind} = \frac{(1 - s)P_{EF}}{(1 - s)\omega_{sinc}}$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{sinc}} \tag{6-36}$$

A última equação é especialmente útil porque expressa o conjugado induzido diretamente em termos de potência de entreferro e *velocidade síncrona*, que não varia. Portanto, o conhecimento de  $P_{EF}$  fornece diretamente  $\tau_{ind}$ .

### Separação entre as perdas no cobre do rotor e a potência convertida, no circuito equivalente do motor de indução

Parte da potência que flui no entreferro de um motor de indução é consumida como perdas no cobre do rotor e outra parte é convertida em potência mecânica para acionar o eixo do motor. É possível separar essas duas partes da potência de entreferro e expressá-las separadamente no circuito equivalente do motor.

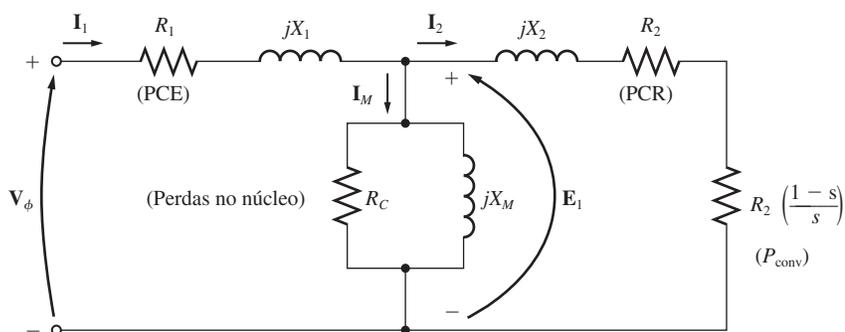


FIGURA 6-14

O circuito equivalente por fase, com as perdas do rotor e a  $P_{\text{núcleo}}$  separadas.

A Equação (6-28) fornece uma expressão da potência total de entreferro para um motor de indução, ao passo que a Equação (6-30) dá as perdas reais no rotor do motor. A potência de entreferro é a potência que seria consumida em um resistor de valor  $R_2/s$ , ao passo que as perdas no cobre do rotor são expressas pela potência que seria consumida em um resistor de valor  $R_2$ . A diferença entre elas é  $P_{\text{conv}}$ , que, portanto, deve ser a potência que seria consumida em um resistor de valor

$$R_{\text{conv}} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right)$$

$$\boxed{R_{\text{conv}} = R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right)} \quad (6-37)$$

A Figura 6-14 mostra o circuito equivalente por fase onde se pode ver, na forma de elementos distintos de circuito, as perdas no cobre do rotor e a potência convertida para a forma mecânica.

**EXEMPLO 6-3** Um motor de indução de 460 V, 25 HP, 60 Hz, quatro polos e ligado em Y, tem as seguintes impedâncias em ohms por fase, referidas ao circuito de estator:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,641 \, \Omega & R_2 &= 0,332 \, \Omega \\ X_1 &= 1,106 \, \Omega & X_2 &= 0,464 \, \Omega & X_M &= 26,3 \, \Omega \end{aligned}$$

As perdas rotacionais totais são 1100 W e assume-se que são constantes. As perdas no núcleo estão combinadas com as perdas rotacionais. Para um escorregamento do rotor de 2,2 por cento, com tensão e frequência nominais, encontre os valores das seguintes grandezas do motor

- (a) Velocidade
- (b) Corrente de estator
- (c) Fator de potência
- (d)  $P_{\text{conv}}$  e  $P_{\text{saída}}$
- (e)  $\tau_{\text{ind}}$  e  $\tau_{\text{carga}}$
- (f) Eficiência

### Solução

O circuito equivalente por fase deste motor está mostrado na Figura 6-12 e o diagrama de fluxo de potência está mostrado na Figura 6-13. Como as perdas no núcleo estão combinadas com as perdas por atrito e ventilação juntamente com as perdas suplementares, elas serão tratadas do mesmo modo que as perdas mecânicas e serão subtraídas após  $P_{\text{conv}}$  no diagrama de fluxo de potência.

(a) A velocidade síncrona é

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120 f_{se}}{P} = \frac{120(60 \text{ Hz})}{4 \text{ polos}} = 1800 \text{ rpm}$$

$$\text{ou } \omega_{\text{sinc}} = (1800 \text{ rpm}) \left( \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rotação}} \right) \left( \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = 188,5 \text{ rad/s}$$

A velocidade mecânica do eixo do rotor é

$$\begin{aligned} n_m &= (1 - s)n_{\text{sinc}} \\ &= (1 - 0,022)(1800 \text{ rpm}) = 1760 \text{ rpm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ou } \omega_m &= (1 - s)\omega_{\text{sinc}} \\ &= (1 - 0,022)(188,5 \text{ rad/s}) = 184,4 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

(b) Para encontrar a corrente de estator, obtenha a impedância equivalente do circuito. O primeiro passo é combinar em paralelo a impedância referida do rotor com o ramo de magnetização e, em seguida, adicionar em série a impedância do estator a essa combinação. A impedância referida do rotor é

$$\begin{aligned} Z_2 &= \frac{R_2}{s} + jX_2 \\ &= \frac{0,332}{0,022} + j0,464 \\ &= 15,09 + j0,464 \Omega = 15,10 \angle 1,76^\circ \Omega \end{aligned}$$

A impedância combinada de magnetização mais a do rotor é dada por

$$\begin{aligned} Z_f &= \frac{1}{1/jX_M + 1/Z_2} \\ &= \frac{1}{-j0,038 + 0,0662 \angle -1,76^\circ} \\ &= \frac{1}{0,0773 \angle -31,1^\circ} = 12,94 \angle 31,1^\circ \Omega \end{aligned}$$

Portanto, a impedância total é

$$\begin{aligned} Z_{\text{tot}} &= Z_{\text{estator}} + Z_f \\ &= 0,641 + j1,106 + 12,94 \angle 31,1^\circ \Omega \\ &= 11,72 + j7,79 = 14,07 \angle 33,6^\circ \Omega \end{aligned}$$

A corrente de estator resultante é

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_1 &= \frac{\mathbf{V}_\phi}{Z_{\text{tot}}} \\ &= \frac{266 \angle 0^\circ \text{ V}}{14,07 \angle 33,6^\circ \Omega} = 18,88 \angle -33,6^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

(c) O fator de potência da potência do motor é

$$FP = \cos 33,6^\circ = 0,833 \quad \text{atrasado}$$

(d) A potência de entrada deste motor é

$$\begin{aligned} P_{\text{entrada}} &= \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta \\ &= \sqrt{3}(460 \text{ V})(18,88 \text{ A})(0,833) = 12.530 \text{ W} \end{aligned}$$

Nessa máquina, as perdas no cobre do estator são

$$\begin{aligned} P_{\text{PCE}} &= 3I_1^2 R_1 \\ &= 3(18,88 \text{ A})^2(0,641 \Omega) = 685 \text{ W} \end{aligned} \quad (6-25)$$

A potência de entreferro é dada por

$$P_{\text{EF}} = P_{\text{entrada}} - P_{\text{PCE}} = 12.530 \text{ W} - 685 \text{ W} = 11.845 \text{ W}$$

Portanto, a potência convertida é

$$P_{\text{conv}} = (1 - s)P_{\text{EF}} = (1 - 0,022)(11.845 \text{ W}) = 11.585 \text{ W}$$

A potência  $P_{\text{saída}}$  é dada por

$$\begin{aligned} P_{\text{saída}} &= P_{\text{conv}} - P_{\text{rot}} = 11.585 \text{ W} - 1100 \text{ W} = 10.485 \text{ W} \\ &= 10.485 \text{ W} \left( \frac{1 \text{ HP}}{746 \text{ W}} \right) = 14,1 \text{ HP} \end{aligned}$$

(e) O conjugado induzido é dado por

$$\begin{aligned} \tau_{\text{ind}} &= \frac{P_{\text{EF}}}{\omega_{\text{sinc}}} \\ &= \frac{11.845 \text{ W}}{188,5 \text{ rad/s}} = 62,8 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

e o conjugado de saída é dado por

$$\begin{aligned} \tau_{\text{carga}} &= \frac{P_{\text{saída}}}{\omega_m} \\ &= \frac{10.485 \text{ W}}{184,4 \text{ rad/s}} = 56,9 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

(Em unidades inglesas, esses conjugados são 46,3 e 41,9 libras-pés, respectivamente.)

(f) Nessa condição de funcionamento, a eficiência do motor é

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100\% \\ &= \frac{10.485 \text{ W}}{12.530 \text{ W}} \times 100\% = 83,7\% \end{aligned}$$

## 6.5 CARACTERÍSTICAS DE CONJUGADO *VERSUS* VELOCIDADE DO MOTOR DE INDUÇÃO

Em um motor de indução, qual é a variação de conjugado quando sua carga é alterada? Na partida de um motor de indução, quanto conjugado pode ser fornecido? No motor

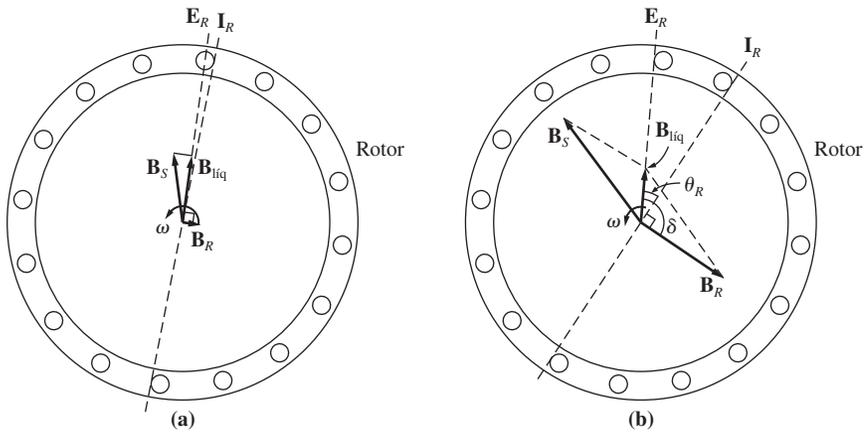


FIGURA 6-15

(a) Os campos magnéticos de um motor de indução sob condições de carga leve. (b) Os campos magnéticos de um motor de indução sob condições de carga pesada.

de indução, qual é a diminuição de velocidade quando a carga no eixo é aumentada? Para encontrar as respostas a essas e outras perguntas semelhantes, é necessário entender claramente as relações entre conjugado, velocidade e potência de um motor.

Nesta seção, a relação entre o conjugado e a velocidade será inicialmente examinada do ponto de vista físico do comportamento do campo magnético do motor. Em seguida, uma equação genérica será deduzida para o conjugado em função do escorregamento, a partir do circuito equivalente do motor (Figura 6-12).

### Conjugado induzido do ponto de vista físico

A Figura 6-15a mostra um motor de indução com rotor gaiola de esquilo que inicialmente está operando a vazio e, portanto, muito próximo da velocidade síncrona. Nessa máquina, o campo magnético líquido  $\mathbf{B}_{liq}$  é produzido pela corrente de magnetização  $\mathbf{I}_M$  que flui no circuito equivalente do motor (veja a Figura 6-12). O módulo da corrente de magnetização e, conseqüentemente, de  $\mathbf{B}_{liq}$  é diretamente proporcional à tensão  $\mathbf{E}_1$ . Se  $\mathbf{E}_1$  for constante, então o campo magnético líquido do motor será constante. Em uma máquina real,  $\mathbf{E}_1$  varia quando a carga varia, porque as impedâncias de estator  $R_1$  e  $X_1$  causam quedas de tensão variáveis com cargas variáveis. Entretanto, essas quedas nos enrolamentos de estator são relativamente pequenas, de modo que  $\mathbf{E}_1$  (e conseqüentemente  $\mathbf{I}_M$  e  $\mathbf{B}_{liq}$ ) é aproximadamente constante com as mudanças de carga.

A Figura 6-15a mostra o motor de indução a vazio. Nesse caso, o escorregamento do rotor é muito pequeno e, portanto, o movimento relativo entre o rotor e os campos magnéticos também é muito pequeno. Além disso, a frequência do rotor também é muito pequena. Como o movimento relativo é pequeno, a tensão induzida  $\mathbf{E}_R$  nas barras do rotor é muito pequena e a corrente resultante  $\mathbf{I}_R$  é pequena. Por outro lado, como a frequência do rotor é tão pequena, a reatância do rotor é aproximadamente zero e a corrente máxima  $\mathbf{I}_R$  do rotor está quase em fase com a tensão  $\mathbf{E}_R$  do rotor. Desse modo, a corrente do rotor produz um pequeno campo magnético  $\mathbf{B}_R$ , em um ângulo ligeiramente maior do que  $90^\circ$  atrás do campo magnético líquido  $\mathbf{B}_{liq}$ . Observe que a corrente

de estator deve ser bem elevada, mesmo a vazio, porque ela deve fornecer a maior parte de  $\mathbf{B}_{\text{liq}}$ . (Essa é razão pela qual os motores de indução apresentam grandes correntes a vazio, em comparação com outros tipos de máquinas. A corrente a vazio de um motor de indução é usualmente 30 a 60% da corrente de plena carga.)

O conjugado induzido, que mantém o rotor girando, é dado pela equação

$$\tau_{\text{ind}} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{\text{liq}} \quad (3-60)$$

Seu valor é dado por

$$\tau_{\text{ind}} = kB_R B_{\text{liq}} \text{sen } \delta \quad (3-61)$$

Como o campo magnético do rotor é muito pequeno, o conjugado induzido também é muito pequeno – apenas suficientemente grande para superar as perdas rotacionais do motor.

Agora, suponha que uma carga seja aplicada ao motor de indução (Figura 6-15b). À medida que a carga do motor aumenta, a velocidade do rotor diminui e seu escorregamento aumenta. Como a velocidade do rotor é menor, há agora *mais movimento relativo* entre os campos magnéticos do rotor e do estator na máquina. Um movimento relativo maior produz uma tensão de rotor  $\mathbf{E}_R$  mais elevada, o que, por sua vez, produz uma corrente de rotor  $\mathbf{I}_R$  maior. Com uma corrente de rotor maior, o campo magnético  $\mathbf{B}_R$  do rotor também aumenta. Entretanto, o ângulo entre a corrente do rotor e  $\mathbf{B}_R$  também se altera. Como o escorregamento do rotor aumentou, a frequência do rotor eleva-se ( $f_{re} = sf_{se}$ ) e a reatância do rotor sobe ( $\omega_{re}L_R$ ). Portanto, agora a corrente do rotor fica mais para trás da tensão do rotor e o campo magnético do rotor desloca-se com a corrente. A Figura 6-15b mostra o motor de indução funcionando com uma carga bem elevada. Observe que a corrente do rotor subiu e que o ângulo  $\delta$  aumentou. O aumento em  $B_R$  tende a elevar o conjugado, ao passo que o aumento de ângulo  $\delta$  tende a diminuir o conjugado ( $\tau_{\text{ind}}$  é proporcional a  $\text{sen } \delta$  e  $\delta > 90^\circ$ ). Como o primeiro efeito é maior do que o segundo, o conjugado induzido total eleva-se para suprir o aumento de carga do motor.

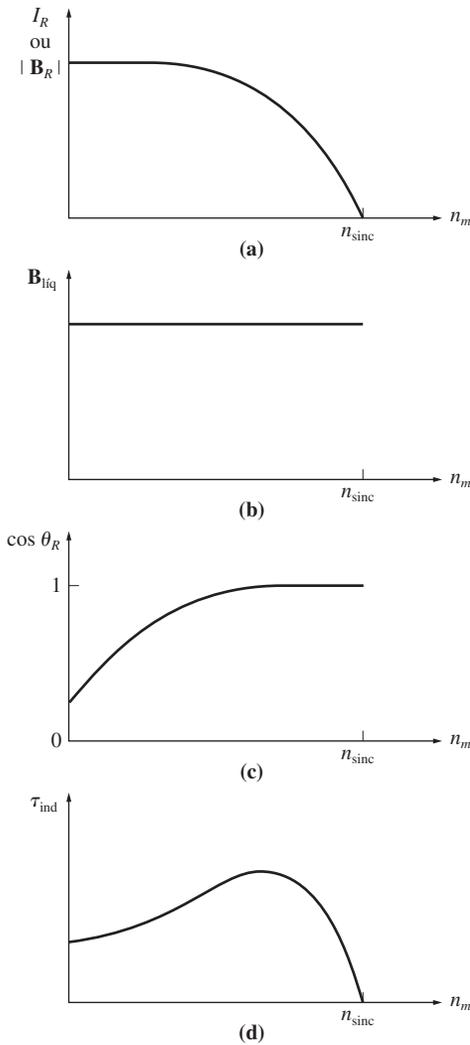
Quando um motor de indução atinge o conjugado máximo? Isso acontece quando é atingido o ponto em que, ao aumentar a carga no eixo, o termo  $\text{sen } \delta$  diminui mais do que aumenta o termo  $B_R$ . Nesse ponto, um novo aumento de carga diminui  $\tau_{\text{ind}}$  e o motor para.

Se conhecermos os campos magnéticos da máquina, poderemos usar esse conhecimento para obter de forma aproximada a característica do conjugado de saída *versus* velocidade de um motor de indução. Lembre-se de que o valor do conjugado induzido na máquina é dado por

$$\tau_{\text{ind}} = kB_R B_{\text{liq}} \text{sen } \delta \quad (3-61)$$

Para deduzir o comportamento total da máquina, cada termo dessa expressão pode ser analisado separadamente. Os termos individuais são

1.  $B_R$ . O campo magnético do rotor é diretamente proporcional à corrente que circula nele, desde que não esteja saturado. A corrente do rotor aumenta com o aumento do escorregamento (diminuição de velocidade), de acordo com a Equação (6-13). Essa corrente foi plotada na Figura 6-11 e está mostrada novamente na Figura 6-16a.
2.  $B_{\text{liq}}$ . O campo magnético líquido do motor é proporcional a  $E_1$  e, portanto, é aproximadamente constante (na realidade,  $E_1$  diminui com o aumento da cor-



**FIGURA 6-16** Desenvolvimento gráfico da característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução. (a) Gráfico da corrente de rotor (e portanto de  $|B_R|$ ) *versus* velocidade para um motor de indução; (b) gráfico do campo magnético líquido *versus* velocidade para o motor; (c) gráfico do fator de potência do rotor *versus* velocidade para o motor; (d) característica resultante de conjugado *versus* velocidade.

rente, mas esse efeito é pequeno em comparação aos outros dois. Por essa razão, será ignorado nesta abordagem gráfica). A curva de  $B_{liq}$  *versus* velocidade está mostrada na Figura 6-16b.

3.  $\text{sen } \delta$ . O ângulo  $\delta$  entre os campos magnéticos líquido e do rotor pode ser expresso de um modo muito útil. Examine a Figura 6-15b. Nesta figura, é claro que o ângulo  $\delta$  é igual ao ângulo do fator de potência do rotor mais  $90^\circ$ :

$$\delta = \theta_R + 90^\circ \tag{6-38}$$

Portanto,  $\text{sen } \delta = \text{sen}(\theta_R + 90^\circ) = \text{cos } \theta_R$ . Esse termo é o fator de potência do rotor. O ângulo desse fator de potência pode ser calculado a partir da equação

$$\theta_R = \text{arctg} \frac{X_R}{R_R} = \text{arctg} \frac{sX_{R0}}{R_R} \tag{6-39}$$

O fator de potência resultante do rotor é dado por

$$FP_R = \cos \theta_R$$

$$FP_R = \cos \left( \arctg \frac{sX_{R0}}{R_R} \right) \quad (6-40)$$

Um gráfico do fator de potência do rotor *versus* a velocidade está mostrado na Figura 6-16c.

Como o conjugado induzido é proporcional ao produto desses três termos, a característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução pode ser construída com a multiplicação gráfica dos três gráficos anteriores (Figura 6-16a a c). A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução obtida dessa forma está mostrada na Figura 6-16d.

Essa curva característica pode ser dividida de forma simples em três regiões. A primeira é a *região de escorregamento baixo* da curva. Nessa região, o escorregamento do motor aumenta de forma aproximadamente linear com o aumento de carga e a velocidade mecânica do rotor diminui de forma também aproximadamente linear com a carga. Nessa região de operação, a reatância do motor é desprezível, de modo que o fator de potência do rotor é aproximadamente unitário, ao passo que a corrente do rotor cresce linearmente com o escorregamento. *O intervalo completo de funcionamento normal do motor de indução em regime permanente está contido nessa região de baixo escorregamento linear.* Portanto, em operação normal, um motor de indução tem uma queda de velocidade linear.

A segunda região da curva do motor de indução pode ser denominada *região de escorregamento moderado*. Nessa região, a frequência do rotor é maior do que antes e a reatância do rotor é da mesma ordem de magnitude da resistência do rotor. Nessa região, a corrente do rotor não cresce tão rapidamente como antes e o fator de potência começa a cair. O conjugado de pico (o *conjugado máximo*) do motor ocorre no ponto onde, para um incremento de carga, o aumento da corrente de rotor é contrabalançado exatamente pela diminuição do fator de potência do rotor.

A terceira região da curva do motor de indução é denominada *região de escorregamento elevado*. Nessa região, na realidade, o conjugado induzido diminui com o aumento de carga, porque o incremento da corrente de rotor é completamente sobrepujado pela diminuição do fator de potência do rotor.

Em um motor de indução típico, o conjugado máximo na curva será de 200 a 250% o conjugado nominal a plena carga da máquina e o *conjugado de partida* (o conjugado na velocidade zero) será de 150% ou tanto do conjugado de plena carga. Diferentemente de um motor síncrono, o motor de indução pode arrancar com plena carga acoplada a seu eixo.

### Dedução da equação do conjugado induzido de um motor de indução

É possível usar o circuito equivalente de um motor de indução e seu diagrama de fluxo de potência para desenvolver uma expressão genérica do conjugado induzido

como função da velocidade. O conjugado induzido em um motor de indução é dado pelas Equações (6-35) ou (6-36):

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega_m} \tag{6-35}$$

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{EF}}}{\omega_{\text{sinc}}} \tag{6-36}$$

A última equação é especialmente útil, porque a velocidade síncrona é constante para uma dada frequência e número de polos. Como  $\omega_{\text{sinc}}$  é constante, conhecendo-se a potência de entreferro, pode-se obter o conjugado induzido do motor.

A potência de entreferro é a potência que cruza a lacuna de ar existente entre o circuito de estator e o de rotor. Ela é igual à potência absorvida na resistência  $R_2/s$ . Como podemos encontrar essa potência?

Consulte o circuito equivalente dado na Figura 6-17. Nessa figura, pode-se ver que a potência de entreferro fornecida a uma fase do motor é

$$P_{\text{EF}, 1\phi} = I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

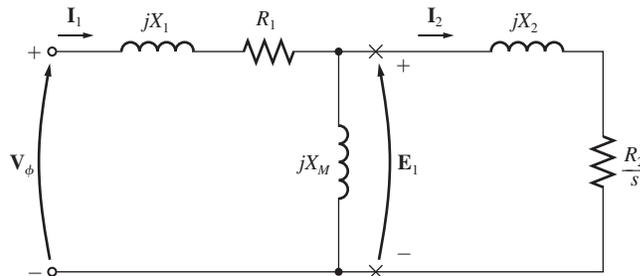
Portanto, a potência de entreferro total é

$$P_{\text{EF}} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

Se  $I_2$  puder ser determinada, então a potência de entreferro e o conjugado induzido serão conhecidos.

Embora haja diversas formas de resolver o circuito da Figura 6-17 em relação à corrente  $I_2$ , talvez a mais simples seja determinar o equivalente Thévenin da parte do circuito que está à esquerda das cruzes (×) desenhadas na figura. O teorema de Thévenin afirma que qualquer circuito linear que pode ser separado por dois terminais do resto do sistema pode ser substituído por uma única fonte de tensão em série com impedância equivalente. Se isso fosse feito com o circuito equivalente do motor de indução, o circuito resultante seria uma combinação simples de elementos em série, conforme mostra a Figura 6-18c.

Para calcular o equivalente de Thévenin do lado de entrada do circuito equivalente do motor de indução, primeiro abra o circuito nos pontos terminais indicados



**FIGURA 6-17**  
O circuito equivalente por fase de um motor de indução.

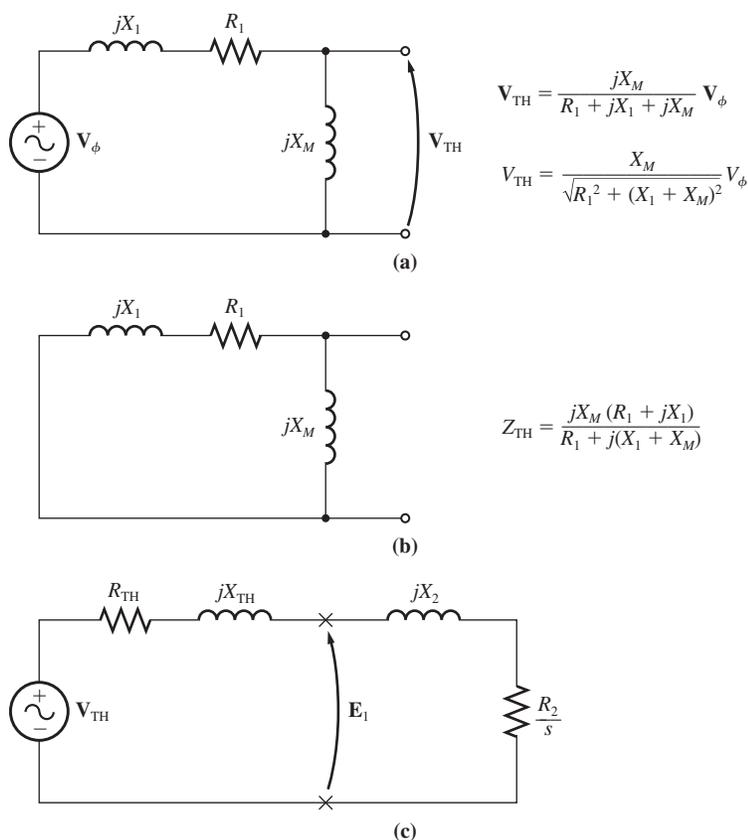


FIGURA 6-18

(a) A tensão equivalente de Thévenin do circuito de entrada de um motor de indução. (b) A impedância equivalente de Thévenin do circuito de entrada. (c) O circuito equivalente simplificado resultante do motor de indução.

por cruzeiros ( $\times$ ) e encontre a tensão resultante de circuito aberto nesse ponto. A seguir, para encontrar a impedância de Thévenin, “mate” (coloque em curto-circuito) a tensão de fase e encontre a  $Z_{eq}$  que pode ser obtida “olhando” para dentro dos terminais.

A Figura 6-18a mostra os terminais abertos sendo usados para encontrar a tensão de Thévenin. Pela regra do divisor de tensão, temos

$$\begin{aligned} V_{TH} &= V_\phi \frac{Z_M}{Z_M + Z_1} \\ &= V_\phi \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M} \end{aligned}$$

O valor da tensão de Thévenin  $V_{TH}$  é

$$V_{TH} = V_\phi \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (6-41a)$$

Como a reatância de magnetização  $X_M \gg X_1$  e  $X_M \gg R_1$ , o valor da tensão de Thévenin é aproximadamente

$$V_{TH} \approx V_\phi \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (6-41b)$$

com uma exatidão muito boa.

A Figura 6-18b mostra o circuito de entrada com a fonte de tensão de entrada “morta”. As duas impedâncias estão em paralelo e a impedância de Thévenin é dada por

$$Z_{TH} = \frac{Z_1 Z_M}{Z_1 + Z_M} \quad (6-42)$$

Essa impedância reduz-se a

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (6-43)$$

Como  $X_M \gg X_1$  e  $X_M + X_1 \gg R_1$ , a resistência e reatância de Thévenin são dadas aproximadamente por

$$R_{TH} \approx R_1 \left( \frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (6-44)$$

$$X_{TH} \approx X_1 \quad (6-45)$$

O circuito equivalente resultante está mostrado na Figura 6-18c. Desse circuito, pode-se obter a corrente  $I_2$  como

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} \quad (6-46)$$

$$= \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_2/s + jX_{TH} + jX_2} \quad (6-47)$$

O valor dessa corrente é

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (6-48)$$

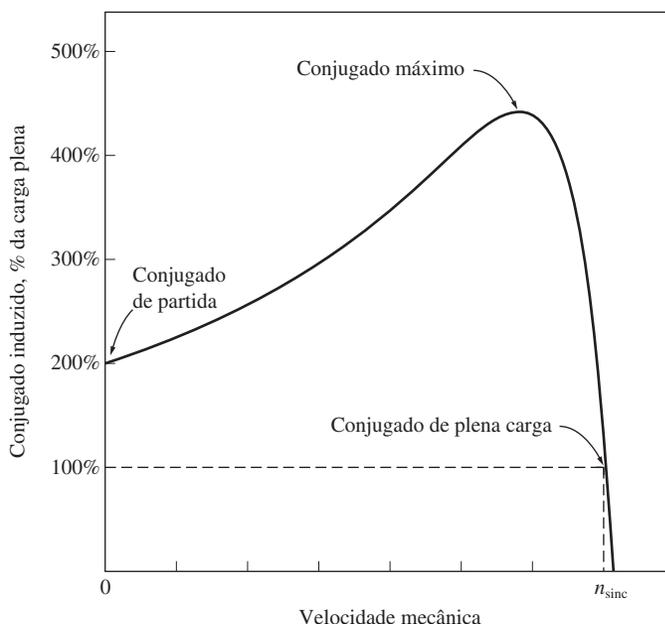
A potência de entreferro é dada, portanto, por

$$\begin{aligned} P_{EF} &= 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \\ &= \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \end{aligned} \quad (6-49)$$

e o conjugado induzido de rotor é dado por

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{sinc}}$$

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_{sinc} [(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (6-50)$$



**FIGURA 6-19**

Uma curva característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução típico.

A Figura 6-19 mostra um gráfico do conjugado de um motor de indução em função da velocidade (e do escorregamento) e a Figura 6-20 mostra um gráfico com as velocidades acima e abaixo da faixa normal de funcionamento do motor.

### Comentários sobre a curva de conjugado *versus* velocidade do motor de indução

A curva característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução, plotada nas Figuras 6-19 e 6-20, fornece diversas peças importantes de informação sobre o funcionamento dos motores de indução. Essa informação pode ser resumida como segue:

1. O conjugado induzido do motor é zero na velocidade síncrona. Esse fato foi discutido anteriormente.
2. A curva de conjugado *versus* velocidade é aproximadamente linear entre carga a vazio e plena carga. Nessa faixa, a resistência do rotor é muito maior do que sua reatância. Desse modo, a corrente do rotor, o campo magnético do rotor e o conjugado induzido aumentam linearmente com o escorregamento crescente.
3. Há um conjugado máximo possível que não pode ser excedido. Esse conjugado, denominado *conjugado máximo*, é 2 a 3 vezes o conjugado nominal de plena carga do motor. A próxima seção deste capítulo contém um método de cálculo do conjugado máximo.
4. O conjugado de partida do motor é ligeiramente superior a seu conjugado de plena carga, de modo que esse motor colocará em movimento qualquer carga que ele puder acionar a plena potência.

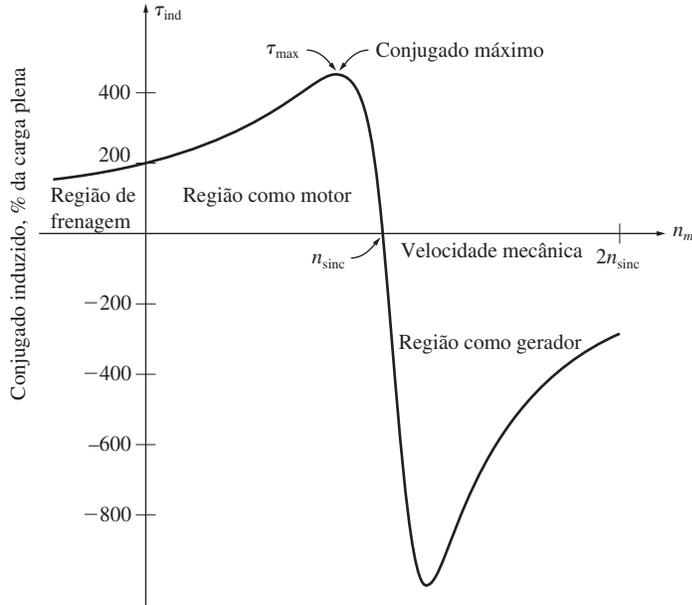


FIGURA 6-20

Uma curva característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução, mostrando as faixas estendidas de operação (região de frenagem e região como gerador).

5. Observe que o conjugado do motor para um dado escorregamento varia com o quadrado da tensão aplicada. Esse fato é útil em uma das formas de controle de velocidade dos motores de indução, que será descrita mais adiante.
6. Se o rotor do motor de indução for acionado mais rapidamente do que a velocidade síncrona, então o sentido do conjugado induzido inverte-se e a máquina torna-se um *gerador*, convertendo potência mecânica em elétrica. O uso das máquinas de indução como geradores será descrito posteriormente.
7. Se o motor estiver girando para trás em relação ao sentido dos campos magnéticos, então o conjugado induzido na máquina freará a máquina muito rapidamente e tentará fazer com que ela gire no sentido oposto. Como a inversão do sentido de rotação do campo magnético é simplesmente uma questão de chaveamento de duas fases quaisquer do estator, esse fato pode ser usado para frear muito rapidamente um motor de indução. O ato de permutar duas fases por chaveamento, para frear o motor muito rapidamente, é denominado *frenagem por inversão de fases\**.

A potência convertida para a forma mecânica em um motor de indução é igual a

$$P_{conv} = \tau_{ind}\omega_m$$

e está mostrada na Figura 6-21. Observe que a potência de pico fornecida pelo motor de indução ocorre em uma velocidade diferente da de conjugado máximo. Naturalmente, nenhuma potência é convertida para a forma mecânica quando o rotor está com velocidade zero.

\* N. de T.: *Plugging*, em inglês.

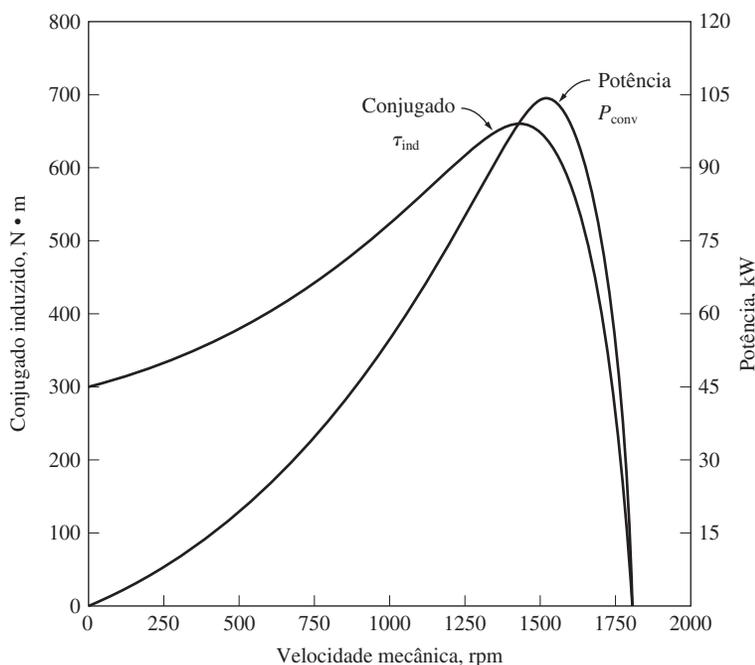


FIGURA 6-21

Conjugado induzido e potência convertida *versus* velocidade do motor em rotações por minuto para um exemplo de motor de indução de quatro polos.

### Conjugado máximo do motor de indução

Como o conjugado induzido é igual a  $P_{EF}/\omega_{\text{sync}}$ , o conjugado máximo\* possível ocorre quando a potência de entreferro é máxima. Como a potência de entreferro é igual à potência consumida no resistor  $R_2/s$ , o conjugado máximo induzido ocorrerá quando a potência consumida por esse resistor for máxima.

Quando a potência fornecida a  $R_2/s$  está em seu máximo? Consulte o circuito equivalente simplificado da Figura 6-18c. Em uma situação na qual o ângulo da impedância de carga é fixo, o teorema da transferência máxima de potência afirma que essa transferência máxima de potência para o resistor de carga  $R_2/s$  ocorrerá quando o valor da impedância for igual ao valor da impedância da fonte. A impedância da fonte equivalente do circuito é

$$Z_{\text{fonte}} = R_{\text{TH}} + jX_{\text{TH}} + jX_2 \quad (6-51)$$

Desse modo, a transferência máxima de potência ocorre quando

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{\text{TH}}^2 + (X_{\text{TH}} + X_2)^2} \quad (6-52)$$

Isolando o escorregamento na Equação (6-52), vemos que o escorregamento de conjugado máximo é dado por

\* N. de T.: *Pullout torque*, em inglês.

$$s_{\max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{\text{TH}}^2 + (X_{\text{TH}} + X_2)^2}} \quad (6-53)$$

Observe que a resistência de rotor referida  $R_2$  aparece apenas no numerador. Assim, o escorregamento do rotor no conjugado máximo é diretamente proporcional à resistência do rotor.

O valor do conjugado máximo pode ser encontrado inserindo a expressão para o escorregamento de conjugado máximo na equação de conjugado [Equação (6-50)]. A equação resultante de conjugado máximo é

$$\tau_{\max} = \frac{3V_{\text{TH}}^2}{2\omega_{\text{sinc}} [R_{\text{TH}} + \sqrt{R_{\text{TH}}^2 + (X_{\text{TH}} + X_2)^2}]} \quad (6-54)$$

Esse conjugado é proporcional ao quadrado da tensão de alimentação e relaciona-se também com o inverso das impedâncias de estator e de rotor. Quanto menores forem as reatâncias de uma máquina, maior será o conjugado máximo que ela é capaz de alcançar. Observe que o *escorregamento* para o qual ocorre o conjugado máximo é diretamente proporcional à resistência do rotor [Equação (6-53)], mas o *valor* do conjugado máximo independe do valor dessa resistência [Equação (6-54)].

A característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução de rotor bobinado está mostrada na Figura 6-22. Lembre-se de que resistências podem ser inseridas no circuito de um rotor bobinado porque é possível fazer conexões com esse circuito por meio dos anéis deslizantes. Observe na figura que, quando a resistência do rotor é aumentada, a velocidade do conjugado máximo do rotor diminui, mas o conjugado máximo permanece constante.

É possível tirar proveito dessa característica dos motores de indução de rotor bobinado para dar partida a cargas muito pesadas. Se uma resistência for inserida no circuito do rotor, o conjugado máximo poderá ser ajustado para que ocorra nas condições de partida. Portanto, o conjugado máximo possível fica disponível para ser usado na partida de cargas pesadas. Por outro lado, logo que a carga esteja girando, a resistência extra poderá ser removida do circuito e o conjugado máximo será deslocado para próximo da velocidade síncrona para operar em condições normais de funcionamento.

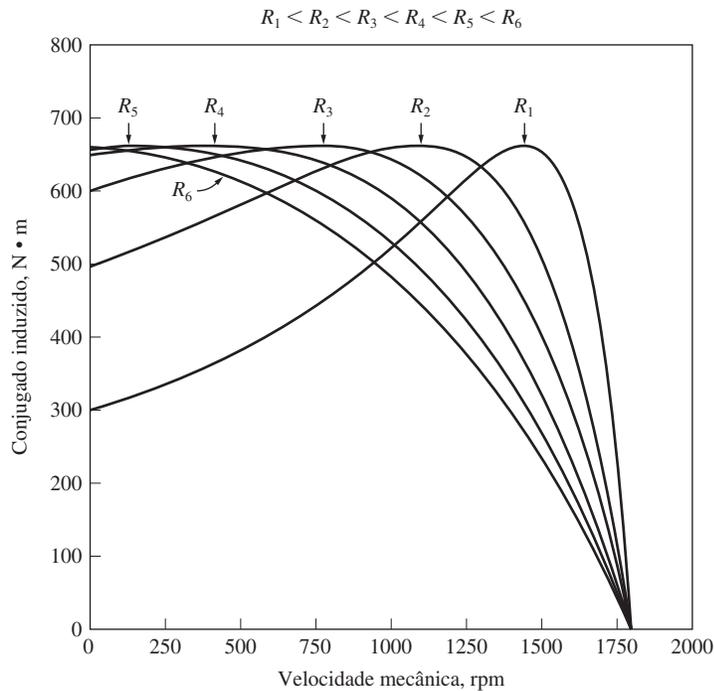
**EXEMPLO 6-4** Um motor de indução de dois polos e 50 Hz fornece 15 kW a uma carga com uma velocidade de 2950 rpm.

- Qual é o escorregamento do motor?
- Qual é o conjugado induzido no motor em N • m nessas condições?
- Qual será a velocidade de operação do motor se o seu conjugado for dobrado?
- Quanta potência será fornecida pelo motor quando o conjugado for dobrado?

### Solução

- A velocidade síncrona desse motor é

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120f_{se}}{P} = \frac{120(50 \text{ Hz})}{2 \text{ polos}} = 3000 \text{ rpm}$$



**FIGURA 6-22** O efeito da variação de resistência do rotor sobre a característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução de rotor bobinado.

Portanto, o escorregamento do motor é

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{n_{\text{sinc}} - n_m}{n_{\text{sinc}}} (\times 100\%) & (6-4) \\
 &= \frac{3000 \text{ rpm} - 2950 \text{ rpm}}{3000 \text{ rpm}} (\times 100\%) \\
 &= 0,0167 \text{ ou } 1,67\%
 \end{aligned}$$

(b) Deve-se assumir que o conjugado induzido do motor é igual ao conjugado de carga e que  $P_{\text{conv}}$  é igual a  $P_{\text{carga}}$ , porque nenhum valor foi dado para as perdas mecânicas. Assim, o conjugado é

$$\begin{aligned}
 \tau_{\text{ind}} &= \frac{P_{\text{conv}}}{\omega_m} \\
 &= \frac{15 \text{ kW}}{(2950 \text{ rotações/min})(2\pi \text{ rad/rotação})(1 \text{ min}/60 \text{ s})} \\
 &= 48,6 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

(c) Na região de escorregamento baixo, a curva de conjugado *versus* velocidade é linear e o conjugado induzido é diretamente proporcional ao escorregamento. Portanto, se o conjugado dobrar, então o novo escorregamento será 3,33%. Desse modo, a velocidade de operação do motor será

$$n_m = (1 - s)n_{\text{sinc}} = (1 - 0,0333)(3000 \text{ rpm}) = 2900 \text{ rpm}$$

(d) A potência fornecida pelo motor é dada por

$$\begin{aligned} P_{\text{conv}} &= \tau_{\text{ind}} \omega_m \\ &= (97,2 \text{ N} \cdot \text{m})(2900 \text{ rpm})(2\pi \text{ rad/rotação})(1 \text{ min}/60 \text{ s}) \\ &= 29,5 \text{ kW} \end{aligned}$$

**EXEMPLO 6-5** Um motor de indução de rotor bobinado, 460 V, 25 HP, 60 Hz, quatro polos e ligado em Y, tem as seguintes impedâncias em ohms por fase, referidas ao circuito de estator:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,641 \Omega & R_2 &= 0,332 \Omega \\ X_1 &= 1,106 \Omega & X_2 &= 0,464 \Omega & X_M &= 26,3 \Omega \end{aligned}$$

- (a) Qual é o conjugado máximo desse motor? Com que velocidade e escorregamento isso ocorre?
- (b) Qual é o conjugado de partida desse motor?
- (c) Quando a resistência do rotor é dobrada, qual é a velocidade na qual ocorre o conjugado máximo? Qual é o novo conjugado de partida do motor?
- (d) Calcule e plote a característica de conjugado *versus* velocidade desse motor com a resistência de rotor original e também com a resistência de rotor dobrada.

**Solução**

A tensão de Thévenin desse motor é

$$\begin{aligned} V_{\text{TH}} &= V_\phi \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} & (6-41a) \\ &= \frac{(266 \text{ V})(26,3 \Omega)}{\sqrt{(0,641 \Omega)^2 + (1,106 \Omega + 26,3 \Omega)^2}} = 255,2 \text{ V} \end{aligned}$$

A resistência de Thévenin é

$$\begin{aligned} R_{\text{TH}} &\approx R_1 \left( \frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 & (6-44) \\ &\approx (0,641 \Omega) \left( \frac{26,3 \Omega}{1,106 \Omega + 26,3 \Omega} \right)^2 = 0,590 \Omega \end{aligned}$$

A reatância de Thévenin é

$$X_{\text{TH}} \approx X_1 = 1,106 \Omega$$

(a) O escorregamento para o qual ocorre o conjugado máximo é dado pela Equação (6-53):

$$\begin{aligned} s_{\text{max}} &= \frac{R_2}{\sqrt{R_{\text{TH}}^2 + (X_{\text{TH}} + X_2)^2}} & (6-53) \\ &= \frac{0,332 \Omega}{\sqrt{(0,590 \Omega)^2 + (1,106 \Omega + 0,464 \Omega)^2}} = 0,198 \end{aligned}$$

Isso corresponde a uma velocidade mecânica de

$$n_m = (1 - s)n_{\text{sinc}} = (1 - 0,198)(1800 \text{ rpm}) = 1444 \text{ rpm}$$

O conjugado nessa velocidade é

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{3V_{\text{TH}}^2}{2\omega_{\text{sync}}[R_{\text{TH}} + \sqrt{R_{\text{TH}}^2 + (X_{\text{TH}} + X_2)^2}]} \\ &= \frac{3(255,2 \text{ V})^2}{2(188,5 \text{ rad/s})[0,590 \Omega + \sqrt{(0,590 \Omega)^2 + (1,106 \Omega + 0,464 \Omega)^2}]} \\ &= 229 \text{ N} \cdot \text{m}\end{aligned}\quad (6-54)$$

(b) O conjugado de partida desse motor pode ser encontrado fazendo  $s = 1$  na Equação (6-50):

$$\begin{aligned}\tau_{\text{partida}} &= \frac{3V_{\text{TH}}^2 R_2}{\omega_{\text{sync}}[(R_{\text{TH}} + R_2)^2 + (X_{\text{TH}} + X_2)^2]} \\ &= \frac{3(255,2 \text{ V})^2(0,332 \Omega)}{(188,5 \text{ rad/s})[(0,590 \Omega + 0,332 \Omega)^2 + (1,106 \Omega + 0,464 \Omega)^2]} \\ &= 104 \text{ N} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

(c) Se a resistência do rotor for dobrada, então o escorregamento no conjugado máximo também dobra. Portanto,

$$s_{\max} = 0,396$$

e a velocidade de conjugado máximo é

$$n_m = (1 - s)n_{\text{sync}} = (1 - 0,396)(1800 \text{ rpm}) = 1087 \text{ rpm}$$

O conjugado máximo ainda é

$$\tau_{\max} = 229 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Agora, o conjugado de partida é

$$\begin{aligned}\tau_{\text{partida}} &= \frac{3(255,2 \text{ V})^2(0,664 \Omega)}{(188,5 \text{ rad/s})[(0,590 \Omega + 0,664 \Omega)^2 + (1,106 \Omega + 0,464 \Omega)^2]} \\ &= 170 \text{ N} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

(d) Criaremos um programa de MATLAB (*M-file*) para calcular e plotar a característica de conjugado *versus* velocidade do motor, com a resistência de rotor original e também com a resistência de rotor dobrada. O programa calculará a impedância de Thévenin usando as equações exatas de  $V_{\text{TH}}$  e  $Z_{\text{TH}}$  [Equações (6-41a) e (6-43)], em vez das equações aproximadas, porque o computador pode realizar facilmente os cálculos exatos. A seguir, será calculado o conjugado induzido usando a Equação (6-50) e serão plotados os resultados. O programa resultante é o seguinte:

```
% M-file: torque_speed_curve.m
% M-file para criar um gráfico da curva de conjugado versus velocidade
% (torque-speed curve) do motor de indução do Exemplo 6-5.

% Primeiro, inicialize os valores necessários ao programa.
r1 = 0.641;           % Resistência do estator
x1 = 1.106;          % Reatância do estator
r2 = 0.332;          % Resistência do rotor
x2 = 0.464;          % Reatância do rotor
xm = 26.3;           % Reatância do ramo de magnetização
v_phase = 460 / sqrt(3); % Tensão de fase
n_sync = 1800;       % Velocidade síncrona (rpm)
```

```

w_sync = 188.5; % Velocidade síncrona (rad/s)

% Calcule a tensão e a impedância de Thévenin com as Equações
% 6-41a e 6-43.
v_th = v_phase * (xm / sqrt(r1^2 + (x1 + xm)^2)) ;
z_th = ((j*xm) * (r1 + j*xl)) / (r1 + j*(x1 + xm));
r_th = real(z_th);
x_th = imag(z_th);

% Agora, calcule a característica de conjugado X velocidade para diversos
% escorregamentos entre 0 e 1. Observe que o primeiro valor de escorregamento
% é ajustado para 0,001 em vez de exatamente 0 para evitar problemas de
% divisão por zero.
s = (0:1:50) / 50; % Escorregamento
s(1) = 0.001;
nm = (1 - s) * n_sync; % Velocidade mecânica

% Calcule o conjugado para a resistência de rotor original
for ii = 1:51
    t_ind1(ii) = (3 * v_th^2 * r2 / s(ii)) / ...
        (w_sync * ((r_th + r2/s(ii))^2 + (x_th + x2)^2)) ;
end

% Calcule o conjugado para a resistência de rotor dobrada
for ii = 1:51
    t_ind2(ii) = (3 * v_th^2 * (2*r2) / s(ii)) / ...
        (w_sync * ((r_th + (2*r2)/s(ii))^2 + (x_th + x2)^2)) ;
end

% Plote a curva de conjugado X velocidade
plot(nm,t_ind1,'Color','b','LineWidth',2.0);
hold on;
plot(nm,t_ind2,'Color','k','LineWidth',2.0,'LineStyle','-');
xlabel('\bf\itn_{m}');
ylabel('\bf\tau_{ind}');
title('\bfCaracterística de conjugado versus velocidade do motor de indução');
legend('R_{2} Original','R_{2} Dobrada');
grid on;
hold off;

```

As características de conjugado *versus* velocidade resultantes estão mostradas na Figura 6-23. Observe que os valores do conjugado de pico e do conjugado de partida nas curvas estão de acordo com os cálculos das partes (a) até (c). Observe também que o conjugado de partida do motor cresceu quando  $R_2$  foi aumentado.

## 6.6 VARIAÇÕES NAS CARACTERÍSTICAS DE CONJUGADO *VERSUS* VELOCIDADE DO MOTOR DE INDUÇÃO

Na Seção 6.5, foi mostrado como a característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução pode ser obtida. De fato, foram apresentadas diversas curvas características que dependiam da resistência do rotor. O Exemplo 6-5 ilustrou o dilema do projetista de um motor de indução – se o rotor for projetado com resistência elevada, nas condições normais de operação o conjugado de partida do motor será bem elevado, mas seu escorregamento também será bem elevado. Lembre-se de que

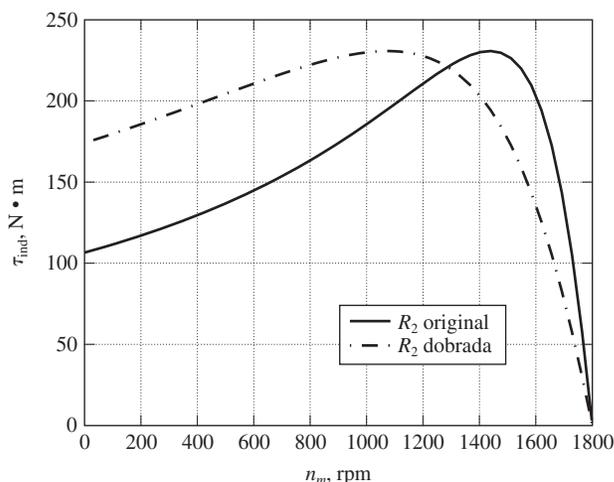


FIGURA 6-23

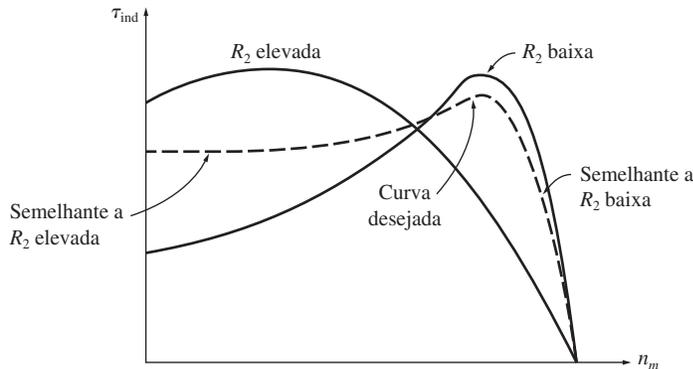
Características de conjugado *versus* velocidade para o motor do Exemplo 6-5.

$P_{conv} = (1 - s)P_{EF}$ , de modo que *quanto maior o escorregamento, menor será a fração da potência de entreferro que será realmente convertida para a forma mecânica* e, portanto, menor será a eficiência do motor. Um motor com resistência de rotor elevada tem bom conjugado de partida, mas em condições normais de funcionamento sua eficiência é pobre. Por outro lado, um motor com resistência de rotor baixa tem conjugado de partida baixo e corrente de partida elevada, mas sua eficiência é bem elevada em condições normais de funcionamento. Um projetista de motor de indução é forçado a estabelecer um compromisso entre os requisitos conflitantes de conjugado de partida elevado e de boa eficiência.

Uma solução possível para essa dificuldade foi sugerida rapidamente na Seção 6.5: use um motor de indução de rotor bobinado e insira resistência extra no rotor durante a partida. A resistência extra poderia ser completamente removida para se ter uma melhor eficiência durante o funcionamento normal. Infelizmente, os motores de rotor bobinado são mais caros, necessitam de mais manutenção e requerem um circuito de controle automático mais complexo do que os motores com rotor de gaiola de esquilo. Além disso, algumas vezes é importante selar completamente um motor quando ele é instalado em um ambiente perigoso ou explosivo e isso pode ser feito mais facilmente com um motor completando autocontido. Seria interessante elaborar uma forma de acrescentar resistência extra ao rotor durante a partida e removê-la durante o funcionamento normal sem usar anéis deslizantes e *sem a intervenção de um operador ou de um circuito de controle*.

A Figura 6-24 ilustra a característica que se deseja do motor. Ela mostra duas características de rotor bobinado, uma com resistência elevada e uma com resistência baixa. Com escorregamentos elevados, o motor desejado deveria se comportar como na curva do motor de rotor bobinado de resistência elevada. Com escorregamentos baixos, ele deveria se comportar como na curva do motor de rotor bobinado de resistência baixa.

Felizmente, é possível conseguir esses dois efeitos no projeto do rotor de um motor de indução tirando proveito apropriadamente da *reatância de dispersão*.



**FIGURA 6-24**

Uma curva característica de conjugado *versus* velocidade que combina efeitos de resistência elevada em baixas velocidades (escorregamento elevado) com efeitos de resistência baixa em altas velocidades (escorregamento baixo).

### Controle das características do motor pelo projeto do rotor do tipo gaiola de esquilo

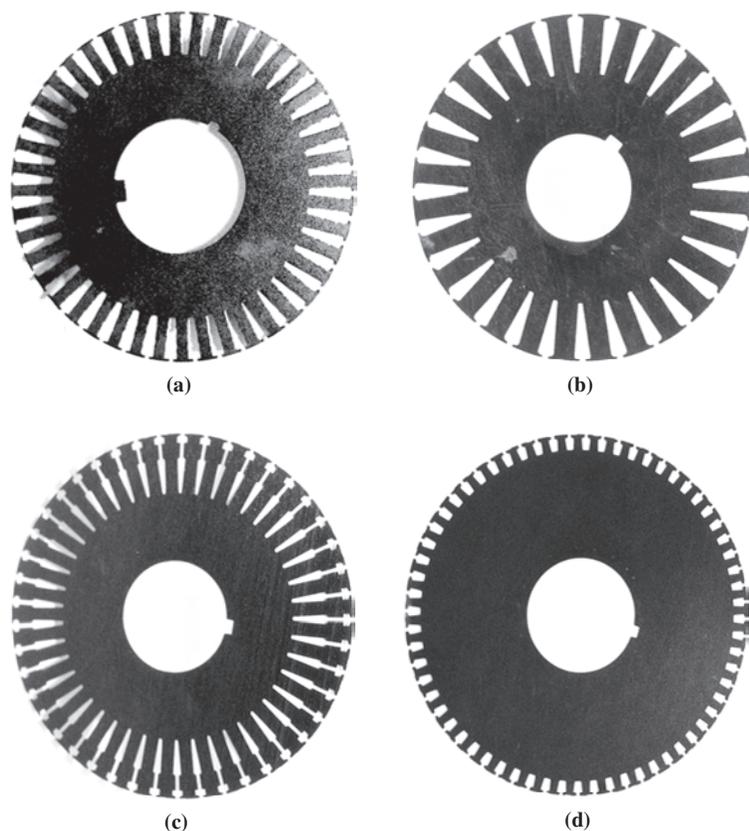
A reatância  $X_2$  do circuito equivalente de um motor de indução representa a forma referida da reatância de dispersão do rotor. Lembre-se de que a reatância de dispersão é a reatância que se origina nas linhas de fluxo do rotor que não se concatenam com os enrolamentos do estator. Em geral, quanto mais distante do estator estiver a barra de rotor, ou uma parte sua, maior será a reatância de dispersão, porque uma porcentagem menor do fluxo da barra alcançará o estator. Portanto, se as barras de um rotor de gaiola de esquilo forem colocadas próximas da superfície do rotor, elas terão apenas um pequeno fluxo de dispersão e a reatância  $X_2$  será pequena no seu circuito equivalente. Por outro lado, se as barras forem colocadas mais profundamente na superfície do rotor, haverá mais dispersão e a reatância do rotor  $X_2$  será maior.

Por exemplo, a Figura 6-25a é uma fotografia das lâminas do rotor, mostrando a seção reta das barras do rotor. Na figura, essas barras são bem grandes e estão posicionadas próximo da superfície do rotor. Tal forma construtiva apresentará uma resistência baixa (devido à sua seção reta grande) e uma reatância de dispersão ( $X_2$ ) baixa (devido à localização da barra próximo do estator). Como a resistência do rotor é baixa, o conjugado máximo estará bem próximo da velocidade síncrona [veja a Equação (6-53)] e o motor será bem eficiente. Lembre-se de que

$$P_{\text{conv}} = (1 - s)P_{\text{EF}} \tag{6-33}$$

Portanto, muito pouco da potência de entreferro será perdida na resistência do rotor. Entretanto, como  $R_2$  é pequena, o conjugado de partida do motor será pequeno e a sua corrente de partida será elevada. Esse tipo de forma construtiva é denominado classe A de projeto pela National Electrical Manufacturers Association (NEMA). É aproximadamente um motor de indução típico, sendo as suas características basicamente as mesmas de um motor de rotor bobinado sem inserção de resistência extra. Sua característica de conjugado *versus* velocidade está mostrada na Figura 6-26.

Entretanto, a Figura 6-25d mostra a seção reta do rotor de um motor de indução com *pequenas* barras posicionadas próximo da superfície do rotor. Como a área da

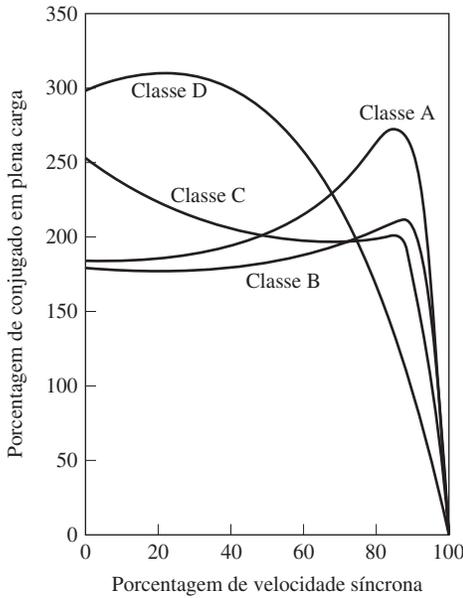
**FIGURA 6-25**

Chapas laminadas de rotores típicos de gaiola de esquilo de motores de indução, mostrando a seção reta das barras do rotor: (a) projeto classe A da NEMA – barras grandes próximas da superfície; (b) projeto classe B da NEMA – barras grandes e profundas; (c) projeto classe C da NEMA – rotor de gaiola dupla; (d) projeto classe D da NEMA – pequenas barras próximas da superfície. (Cortesia de MagneTek, Inc.)

seção reta das barras é pequena, a resistência do rotor é relativamente elevada e, como as barras estão localizadas próximo do estator, a reatância de dispersão do rotor ainda é pequena. Esse motor é muito similar a um motor de indução de rotor bobinado com a resistência extra inserida no rotor. Devido à resistência de rotor elevada, o conjugado máximo desse motor ocorre com um escorregamento elevado e seu conjugado de partida é bem alto. Um motor gaiola de esquilo com esse tipo de construção do rotor é denominado projeto classe D da NEMA. Sua característica de conjugado *versus* velocidade também está mostrada na Figura 6-26.

### **Rotores de barras profundas e de gaiola dupla de esquilo**

Ambas as formas anteriores de rotor são basicamente semelhantes a um motor de rotor bobinado com uma resistência fixa de rotor. Como se pode produzir uma resistência de rotor *variável* para combinar o conjugado de partida elevado e a corrente de



**FIGURA 6-26** Curvas típicas de conjugado *versus* velocidade para diversas classes de rotores.

partida baixa de um motor classe D com o escorregamento normal baixo de funcionamento e a alta eficiência de um motor classe A?

Pode-se produzir uma resistência de rotor variável usando rotores de barras profundas ou de gaiola dupla de esquilo. O conceito básico está ilustrado com um rotor de barras profundas na Figura 6-27. A Figura 6-27a mostra uma corrente fluindo na parte superior de uma barra profunda de rotor. Como a corrente que flui nessa área está fortemente acoplada ao estator, a indutância de dispersão é pequena nessa região. A Figura 6-27b mostra a corrente circulando mais profundamente na barra. Aqui, a indutância de dispersão é mais elevada. Como todas as partes da barra do rotor estão eletricamente em paralelo, a barra representa basicamente diversos circuitos elétricos em paralelo, os da parte superior têm uma indutância menor e os da parte inferior têm uma indutância maior (Figura 6-27c).

Com escorregamento baixo, a frequência do rotor é muito pequena e as reatâncias de todos os caminhos em paralelo através da barra são pequenas em comparação com suas resistências. As impedâncias de todas as partes da barra são aproximadamente iguais, de modo que a corrente circula igualmente por todas as partes da barra. A grande área resultante da seção reta torna a resistência do rotor muito pequena, resultando uma boa eficiência com baixos escorregamentos. Com escorregamento elevado (condições de partida), as reatâncias são grandes em comparação com as resistências nas barras do rotor, de modo que toda a corrente é forçada a circular na parte de baixa reatância da barra próxima do estator. Como a seção reta *efetiva* é menor, a resistência do rotor é maior do que antes. Com uma resistência de rotor elevada nas condições de partida, o conjugado de partida é relativamente maior e a corrente de partida é relativamente menor do que em um motor de classe A. Uma característica típica de conjugado *versus* velocidade para essa forma construtiva é a curva de classe B da Figura 6-26.

A Figura 6-25c fornece uma vista da seção reta de um rotor de dupla gaiola de esquilo. Esse rotor consiste em um conjunto de barras grandes de baixa resistência,

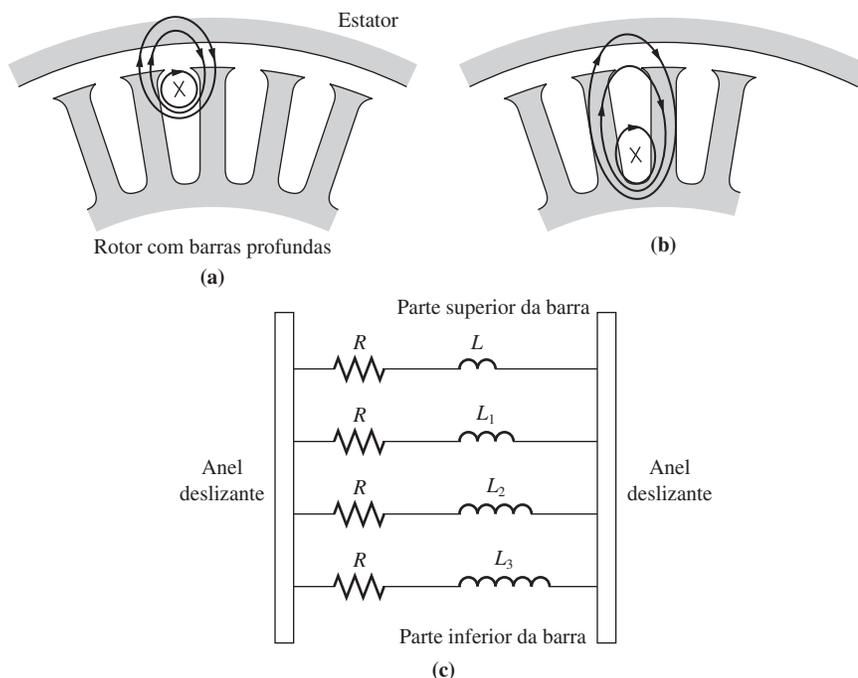


FIGURA 6-27

Fluxo concatenado em um rotor de barras profundas. (a) Para uma corrente que circula na parte superior da barra, o fluxo está fortemente concatenado com o estator e a indutância de dispersão é pequena; (b) para uma corrente que flui na parte inferior da barra, o fluxo está fracamente concatenado com o estator e a indutância de dispersão é grande; (c) circuito equivalente resultante de uma barra em função da sua profundidade no rotor.

encaixadas profundamente no rotor, e em outro conjunto de barras pequenas de alta resistência, encaixadas na superfície do rotor. É similar ao rotor de barras profundas, exceto pelo fato de que a diferença entre o funcionamento com escorregamento baixo e o funcionamento com escorregamento elevado é ainda mais exagerada. Em condições de partida, apenas as barras pequenas estão efetivamente operando e a resistência do rotor é *bem* elevada. Essa resistência elevada resulta em um conjugado de partida elevado. Entretanto, em velocidades normais de funcionamento, ambos os tipos de barra estão efetivamente operando e a resistência é quase tão baixa quanto em um rotor de barras profundas. Os rotores de dupla gaiola de esquilo desse tipo são usados para produzir as características da classe B e da classe C, segundo as normas da NEMA. Possíveis características de conjugado *versus* velocidade para um rotor com essa forma construtiva são denominados projetos classe B e C na Figura 6-26.

Os motores com rotores de dupla gaiola de esquilo têm a desvantagem de custo mais elevado do que os demais tipos com rotores de gaiola. Mesmo assim, eles são mais baratos do que os motores com rotores bobinados. Eles apresentam algumas das melhores características dos motores de rotor bobinado (elevado conjugado de partida, baixa corrente de partida e boa eficiência em condições normais de funcionamento) a um custo mais baixo, sem necessidade da manutenção das escovas e dos anéis deslizantes.

## Classes de projeto de motor de indução

É possível produzir uma grande variedade de curvas de conjugado *versus* velocidade variando as características dos rotores dos motores de indução. Para auxiliar a indústria a selecionar motores para diversas aplicações na faixa de potência elevada, a NEMA nos Estados Unidos e a International Electrotechnical Commission (IEC) na Europa\* definiram uma série de classes padronizadas de projeto com diversas curvas de conjugado *versus* velocidade. Esses projetos padronizados são denominados *classes de projeto* e um motor individual pode ser referido como um motor da classe X de projeto. São essas classes de projeto NEMA e IEC que foram apresentadas anteriormente. A Figura 6-26 mostra curvas típicas de conjugado *versus* velocidade para as quatro classes padronizadas de projeto NEMA. Os atributos característicos de cada classe padronizada de projeto são dados a seguir.

**CLASSE DE PROJETO A.** Os motores da classe A constituem a classe padrão de motor, com conjugado de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento. O escorregamento a plena carga dos motores da classe A deve ser 5% menor do que o escorregamento de um motor da classe B com especificação nominal equivalente. O conjugado máximo é 200 a 300% o conjugado de plena carga e ocorre com um valor baixo de escorregamento (inferior a 20%). O conjugado de partida dessa classe é no mínimo o conjugado nominal dos motores maiores e é 200% ou mais o conjugado nominal dos motores menores. O problema principal dessa classe é sua corrente transitória inicial extremamente alta. As correntes na partida são tipicamente de 500 a 800% a corrente nominal. Para tamanhos acima de 7,5 HP, esses motores devem ser usados com alguma forma de partida de tensão reduzida, para evitar problemas de queda de tensão temporária durante a partida no sistema de potência ao qual eles estão ligados. No passado, os motores da classe A eram o padrão para a maioria das aplicações inferiores a 7,5 HP e superiores a aproximadamente 200 HP. Atualmente, contudo, eles foram largamente substituídos por motores da classe B. Aplicações típicas desses motores são o acionamento de ventiladores, bombas, sopradores, tornos mecânicos e outras máquinas ferramentas.

**CLASSE DE PROJETO B.** Os motores da classe B têm conjugado de partida normal, corrente de partida menor e baixo escorregamento. Esse motor produz aproximadamente o mesmo conjugado de partida que o motor de classe A com cerca de 25% menos corrente. O conjugado máximo é superior ou igual a 200% o conjugado de carga nominal, mas inferior ao da classe A, devido à reatância de rotor aumentada. O escorregamento do rotor é ainda relativamente baixo (inferior a 5 por cento) em plena carga. As aplicações são similares às da classe A, mas a classe B é preferida porque requer menor corrente de partida. Os motores da classe B substituíram largamente os motores da classe A nas novas instalações.

**CLASSE DE PROJETO C.** Os motores da classe C têm um conjugado de partida elevado, baixa corrente de partida e baixo escorregamento (inferior a 5%) com plena carga. O conjugado máximo é ligeiramente inferior ao dos motores da classe A, ao passo que o conjugado de partida é até 250% o conjugado a plena carga. Esses motores são construídos com rotores de dupla gaiola de esquilo, de modo que eles são mais caros

\* N. de T.: No Brasil, as categorias de motores de indução são regulamentadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

do que os motores das classes anteriores. Eles são usados para cargas com elevados conjugados de partida, como bombas, compressores e esteiras transportadoras, todos inicialmente já carregados.

**CLASSE DE PROJETO D.** Os motores da classe D têm um conjugado de partida muito elevado (275% ou mais o conjugado nominal) e uma corrente de partida baixa. Eles também têm um escorregamento elevado com plena carga. São basicamente motores de indução comuns da classe A, cujas barras de rotor são menores e feitas de um material de maior resistividade. A alta resistência do rotor desloca o conjugado de pico até uma velocidade muito baixa. É possível que o conjugado mais elevado ocorra na velocidade zero (100% de escorregamento). O escorregamento de plena carga desses motores é bem elevado, devido à elevada resistência de rotor; tipicamente, é de 7 a 11%, mas podem chegar até 17% ou mais. Esses motores são usados em aplicações que exigem a aceleração de cargas com inércia extremamente elevada, especialmente os grandes volantes usados em prensas de perfuração, estampagem ou corte. Nessas aplicações, o motor acelera gradativamente um volante de grande massa até a velocidade plena, quando então efetua a prensagem. Depois de uma operação dessa, o motor acelera novamente o volante durante um tempo bem longo preparando-se para a próxima prensagem.

Além dessas quatro classes, a NEMA costumava reconhecer motores de classes E e F, os quais eram denominados motores de indução de *partida suave* (veja a Figura 6-28). Os motores dessas classes distinguiam-se por ter correntes de partida muito baixas e eram usados para cargas de baixo conjugado de partida, em situações em que as correntes de partida eram problemáticas. Atualmente, no entanto, essas classes estão obsoletas.

**EXEMPLO 6-6** Um motor de indução de 460 V, 30 HP, 60 Hz, quatro polos e ligado em Y pode ter dois rotores de classes de projeto diferentes: um rotor de gaiola de esquilo simples e um rotor de gaiola de esquilo dupla. (O estator é idêntico em ambos os casos.) O motor com rotor de gaiola de esquilo simples pode ser modelado pelas seguintes impedâncias em ohms por fase, referidas ao circuito do estator:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,641 \, \Omega & R_2 &= 0,300 \, \Omega \\ X_1 &= 0,750 \, \Omega & X_2 &= 0,500 \, \Omega & X_M &= 26,3 \, \Omega \end{aligned}$$

O motor com o rotor de gaiola de esquilo dupla pode ser modelado como uma gaiola externa fortemente concatenada e de resistência elevada em paralelo com uma gaiola interna fracamente concatenada e de resistência baixa (similar à estrutura da Figura 6-25c). O estator, a resistência e a reatância de magnetização serão idênticos aos do motor com gaiola de esquilo simples.

A resistência e a reatância da gaiola externa são:

$$R_{2e} = 3,200 \, \Omega \quad X_{2e} = 0,500 \, \Omega$$

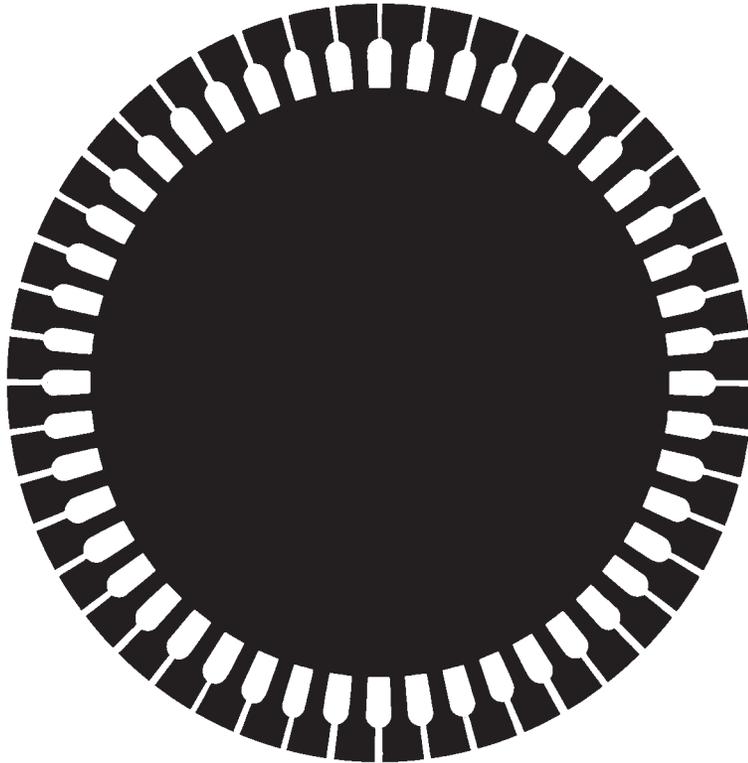
Observe que a resistência é alta porque as barras externas têm uma seção reta pequena, ao passo que a reatância é a mesma que a reatância do rotor de gaiola de esquilo simples, já que a gaiola externa está muito próxima do estator e a reatância de dispersão é pequena.

A resistência e a reatância da gaiola interna são:

$$R_{2i} = 0,400 \, \Omega \quad X_{2i} = 3,300 \, \Omega$$

Aqui, a resistência é baixa porque as barras têm uma área grande de seção reta, mas a reatância de dispersão é muito elevada.

Calcule as características de conjugado *versus* velocidade dos motores para cada um dos dois tipos de rotor. Como se comparam?

**FIGURA 6-28**

Seção reta de um rotor, mostrando a construção usada no motor de indução da antiga classe F. Como as barras do rotor estão profundamente encaixadas, elas têm uma reatância de dispersão muito elevada. Essa reatância elevada reduz o conjugado e a corrente de partida desse motor. Por essa razão, essa classe é denominada de *partida suave*. (Cortesia de MagneTek, Inc.)

### Solução

A característica de conjugado *versus* velocidade do motor com rotor de gaiola simples pode ser calculada exatamente da mesma maneira que no Exemplo 6-5. A característica de conjugado *versus* velocidade do motor com rotor de gaiola dupla também pode ser calculada da mesma maneira, *exceto* que, para cada escorregamento, a resistência e a reatância do rotor serão a combinação em paralelo das impedâncias das gaiolas interna e externa. Em escorregamentos baixos, a reatância do rotor será relativamente sem importância e a gaiola interna grande desempenhará um papel importante no funcionamento da máquina. Em escorregamentos elevados, a reatância elevada da gaiola interna quase a remove do circuito.

Um programa de MATLAB (*M-file*) para calcular e plotar as duas características de conjugado *versus* velocidade é dado a seguir:

```
% M-file: torque_speed_2.m
% M-file para criar e plotar a curva de conjugado versus velocidade
% (torque-speed curve) de um motor de indução com rotor de gaiola dupla.

% Primeiro, inicialize os valores necessários ao programa.
r1 = 0.641;           % Resistência do estator
x1 = 0.750;           % Reatância do estator
r2 = 0.300;           % Resistência do rotor para o motor
```

```

% de gaiola simples
r2i = 0.400; % Resistência do rotor para a gaiola interna
% do motor de gaiola dupla
r2e = 3.200; % Resistência do rotor para a gaiola externa
% do motor de gaiola dupla
x2 = 0.500; % Reatância do rotor para o motor
% de gaiola simples
x2i = 3.300; % Reatância do rotor para a gaiola interna
% do motor de gaiola dupla
x2e = 0.500; % Reatância do rotor para a gaiola externa
% do motor de gaiola dupla
xm = 26.3; % Reatância do ramo de magnetização
v_phase = 460 / sqrt(3); % Tensão de fase
n_sync = 1800; % Velocidade síncrona (rpm)
w_sync = 188.5; % Velocidade síncrona (rad/s)

% Calcule a tensão e a impedância de Thévenin com as Equações
% 6-41a e 6-43.
v_th = v_phase * (xm / sqrt(r1^2 + (x1 + xm)^2)) ;
z_th = ((j*xm) * (r1 + j*x1)) / (r1 + j*(x1 + xm));
r_th = real(z_th);
x_th = imag(z_th);

% Agora, calcule a velocidade do motor para diversos escorregamentos
% entre 0 e 1. Observe que o primeiro valor de escorregamento é ajustado
% para 0,001 em vez de exatamente 0 para evitar problemas de
% divisão por zero.
s = (0:1:50) / 50; % Escorregamento
s(1) = 0.001; % Evitar divisão por zero
nm = (1 - s) * n_sync; % Velocidade mecânica

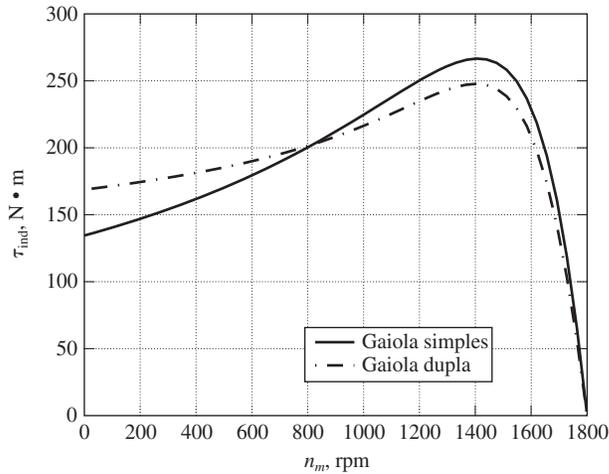
% Calcule o conjugado para o rotor de gaiola simples.
for ii = 1:51
    t_ind1(ii) = (3 * v_th^2 * r2 / s(ii)) / ...
        (w_sync * ((r_th + r2/s(ii))^2 + (x_th + x2)^2)) ;
end

% Calcule a resistência e a reatância do rotor de gaiola dupla
% para esse escorregamento e, em seguida, use esses valores para
% calcular o conjugado induzido.
for ii = 1:51
    y_r = 1/(r2i + j*s(ii)*x2i) + 1/(r2e + j*s(ii)*x2e);
    z_r = 1/y_r; % Impedância efetiva do rotor
    r2eff = real(z_r); % Resistência efetiva do rotor
    x2eff = imag(z_r); % Reatância efetiva do rotor

    % Calcule o conjugado induzido para o rotor de gaiola dupla.
    t_ind2(ii) = (3 * v_th^2 * r2eff / s(ii)) / ...
        (w_sync * ((r_th + r2eff/s(ii))^2 + (x_th + x2eff)^2)) ;
end

% Plote as curvas de conjugado X velocidade
plot(nm,t_ind1,'b-','LineWidth',2.0);
hold on;
plot(nm,t_ind2,'k-.','LineWidth',2.0);
xlabel('\bf\itn_{m}');

```



**FIGURA 6-29**  
 Comparação das características de conjugado *versus* velocidade dos rotores de gaiola simples e dupla do Exemplo 6-6.

```
ylabel('\bf\tau_{ind}');
title ('\bfCaracterísticas de conjugado versus velocidade do motor de indução');
legend ('Gaiola simples','Gaiola dupla');
grid on;
hold off;
```

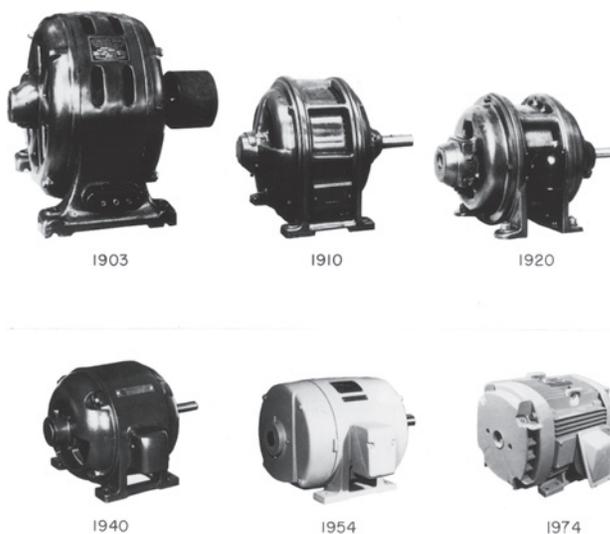
As características resultantes de conjugado *versus* velocidade estão mostradas na Figura 6-29. Observe que o rotor de gaiola dupla tem um escorregamento ligeiramente maior na faixa de funcionamento normal, um conjugado máximo menor e um conjugado maior de partida em comparação com o respectivo rotor de gaiola simples. Esse comportamento está de acordo com as nossas discussões teóricas desta seção.

## 6.7 TENDÊNCIAS DE PROJETO DE MOTORES DE INDUÇÃO

As ideias fundamentais por trás do motor de indução foram desenvolvidas durante o final da década de 1880 por Nicola Tesla, que recebeu uma patente por suas ideias em 1888. Naquela ocasião, ele apresentou um artigo para o American Institute of Electrical Engineers [AIEE, antecessor do atual Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)] no qual descreve os princípios básicos do motor de indução de rotor bobinado, juntamente com ideias para outros dois importantes motores CA – o motor síncrono e o motor de relutância.

Embora as ideias básicas do motor de indução tenham sido descritas em 1888, o motor em si não surgiu como um produto completamente acabado. Houve um período inicial de desenvolvimento rápido, seguido de uma série de melhoramentos evolutivos lentos que continuam até os dias atuais.

O motor de indução tomou uma forma reconhecidamente moderna entre 1888 e 1895. Durante esse período, foram desenvolvidas fontes de potência bifásicas e trifásicas para produzir os campos magnéticos girantes no interior do motor. Também foram desenvolvidos os enrolamentos de estator distribuídos e foi introduzido o rotor

**FIGURA 6-30**

A evolução do motor de indução. Todos os motores mostrados nesta figura têm especificações nominais de 220 V e 15 HP. Desde que os primeiros motores de indução de uso prático foram produzidos na década de 1890, houve uma diminuição dramática no seu tamanho e na quantidade de material usado. (*Cortesia de General Electric Company.*)

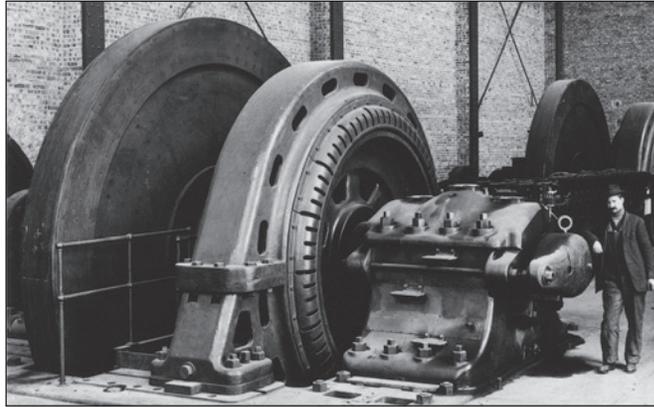
de gaiola de esquilo. Em torno de 1896, motores de indução trifásicos, completamente funcionais e reconhecíveis como tais, já estavam disponíveis comercialmente.

No período entre aquela época e o início da década de 1970, houve melhorias contínuas na qualidade dos aços, nas técnicas de fundição, na isolamento e nas características construtivas usadas nos motores de indução. Essas tendências resultaram em um motor menor para uma dada potência de saída, propiciando uma economia considerável nos custos de fabricação. De fato, um motor moderno de 100 HP tem o mesmo tamanho físico que um motor de 7,5 HP de 1897. Esse progresso está vivamente ilustrado pelos motores de 15 HP mostrados na Figura 6-30. (Veja também a Figura 6-31.)

Entretanto, essas melhorias no projeto do motor de indução *não* levam necessariamente a melhoramentos na eficiência de funcionamento do motor. Inicialmente, o esforço principal de projeto foi dirigido à redução do custo material das máquinas, e não ao aumento de sua eficiência. O esforço de projeto foi orientado naquela direção porque a eletricidade era de custo tão baixo que o critério principal de seleção adotado pelos compradores tornou-se o custo do motor.

Desde que o custo do petróleo iniciou sua espetacular ascensão em 1973, os custos operacionais das máquinas durante a sua vida útil tornaram-se mais e mais importantes, de tal modo que o custo inicial de instalação tornou-se relativamente de menor importância. Como resultado dessas tendências, uma nova ênfase foi colocada na eficiência do motor, tanto pelos projetistas como pelos usuários finais das máquinas.

Atualmente, novas linhas de motores de indução de alta eficiência são produzidas por todos os fabricantes importantes. Com isso, são ocupando uma fatia em contínuo crescimento do mercado de motores de indução. Diversas técnicas são usadas para aumentar a eficiência desses motores em comparação com os motores de eficiência padrão tradicionais. Entre essas técnicas, destacam-se



**FIGURA 6-31**

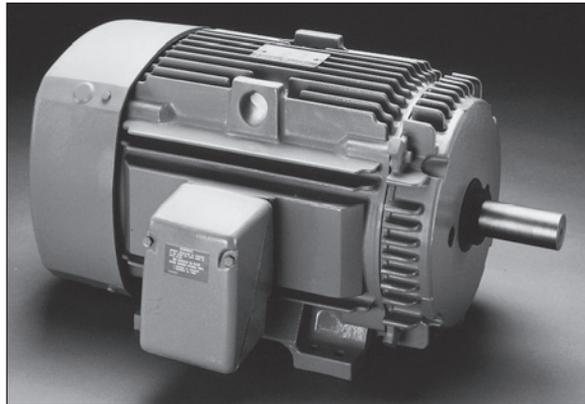
Primeiros motores de indução de grande porte. Os motores mostrados tinham uma potência nominal de 2000 HP. (Cortesia de General Electric Company.)

1. Mais cobre é utilizado nos enrolamentos do estator para que as perdas no cobre sejam reduzidas.
2. O comprimento dos núcleos do rotor e do estator é aumentado para reduzir a densidade de fluxo magnético no entreferro da máquina. Isso reduz a saturação magnética, diminuindo as perdas no núcleo.
3. Mais aço é usado no estator da máquina, permitindo uma maior transferência de calor para fora do motor e reduzindo sua temperatura de funcionamento. O ventilador do rotor é então modificado para reduzir as perdas por ventilação.
4. O aço usado no estator é um aço elétrico especial de alta qualidade, com baixas perdas por histerese.
5. O aço é feito de uma espessura especialmente reduzida (isto é, as lâminas são muito delgadas) e tem uma resistividade interna muito elevada. Como consequência, as perdas por corrente parasita no motor tendem a diminuir.
6. O rotor é cuidadosamente construído para produzir um entreferro uniforme, reduzindo as perdas suplementares do motor.

Além dessas técnicas genéricas recém descritas, cada fabricante tem seus próprios métodos para melhorar a eficiência do motor. Um motor de indução típico de alta eficiência está mostrado na Figura 6-32.

Para auxiliar na comparação das eficiências dos motores, a NEMA adotou uma técnica padronizada para medir a eficiência de motores com base no Método B da Norma 112 da IEEE, *Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*\*. A NEMA também introduziu uma especificação denominada *eficiência nominal NEMA*, que aparece nas placas de identificação dos motores das classes A, B e C. A eficiência nominal identifica a eficiência média de um grande número de motores de um dado modelo e também garante certa eficiência mínima para aquele tipo de motor. As eficiências nominais NEMA padronizadas estão mostradas na Figura 6-33.

\* N. de T.: Procedimento de teste para motores e geradores de indução polifásicos, em português.

**FIGURA 6-32**

Um motor economizador de energia da General Electric, típico dos motores de indução de alta eficiência modernos. (Cortesia de General Electric Company.)

Eficiência nominal, %	Eficiência mínima garantida, %	Eficiência nominal, %	Eficiência mínima garantida, %
95,0	94,1	80,0	77,0
94,5	93,6	78,5	75,5
94,1	93,0	77,0	74,0
93,6	92,4	75,5	72,0
93,0	91,7	74,0	70,0
92,4	91,0	72,0	68,0
91,7	90,2	70,0	66,0
91,0	89,5	68,0	64,0
90,2	88,5	66,0	62,0
89,5	87,5	64,0	59,5
88,5	86,5	62,0	57,5
87,5	85,5	59,5	55,0
86,5	84,0	57,5	52,5
85,5	82,5	55,0	50,5
84,0	81,5	52,5	48,0
82,5	80,0	50,5	46,0
81,5	78,5		

**FIGURA 6-33**

Tabela de padrões NEMA de eficiência nominal. A eficiência nominal representa a eficiência média de um grande número de motores amostras e a eficiência mínima garantida representa a eficiência mínima permitida para qualquer motor dado da classe. (Reproduzido com permissão de *Motors and Generators*, Publicação NEMA MG-1, direito autoral 1987 da NEMA.)

Outras organizações de padronização também estabeleceram normas de eficiência para os motores de indução. As mais importantes são a britânica (BS-269), a da IEC (IEC 34-2) e a japonesa (JEC-37). Entretanto, as técnicas prescritas para medir a eficiência dos motores de indução são diferentes em cada norma e produzem *resultados diferentes para a mesma máquina física*. Se dois motores tiverem eficiência nominal de 82,5%, mas medidos segundo normas diferentes, porém eles poderão não ser igualmente eficientes. Quando dois motores são comparados, é importante que as medidas sejam realizadas segundo a mesma norma.

## 6.8 PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO

Os motores de indução não apresentam os tipos de problema de partida apresentados pelos motores síncronos. Em muitos casos, a partida dos motores de indução pode ser feita simplesmente ligando-os diretamente à linha de potência. Entretanto, algumas vezes há razões para não proceder assim. Por exemplo, a corrente de partida pode causar tal queda de tensão temporária no sistema de potência que torna inaceitável a *partida com ligação direta à linha*.

No caso de motores de indução de enrolamento bobinado, a partida pode ser feita com correntes relativamente baixas inserindo resistências extras no circuito do rotor durante a partida. Essas resistências não só aumentam o conjugado de partida, como também reduzem a corrente de partida.

No caso de motores de indução de gaiola de esquilo, a corrente de partida pode variar amplamente dependendo primariamente da potência nominal do motor e da resistência efetiva do rotor nas condições de partida. Para estimar a corrente do rotor nas condições de partida, todos os motores de gaiola têm agora uma *letra de código* de partida (não confundir com a letra da sua *classe de projeto*) nas suas placas de identificação. A letra de código especifica limites para a quantidade de corrente que o motor pode consumir na partida.

Esses limites são expressos em termos da potência aparente de partida do motor em função da sua especificação nominal de potência (HP). A Figura 6-34 é uma tabela que contém os quilovolts-ampères por HP para cada letra de código.

Para determinar a corrente de partida de um motor de indução, leia a tensão nominal, a potência (HP) e a letra de código de sua placa. Então, a potência aparente do motor será

$$S_{\text{partida}} = (\text{potência nominal em HP})(\text{fator da letra de código}) \quad (6-55)$$

e a corrente de partida pode ser encontrada com a equação

$$I_L = \frac{S_{\text{partida}}}{\sqrt{3}V_T} \quad (6-56)$$

**EXEMPLO 6-7** Qual é a corrente de partida de um motor de indução trifásico de 15 HP, 208 V e letra de código F?

### Solução

De acordo com a Figura 6-34, o máximo de quilovolts-ampères por HP é 5,6. Portanto, o máximo de quilovolts-ampères de partida deste motor é

$$S_{\text{partida}} = (15 \text{ HP})(5,6) = 84 \text{ kVA}$$

Letra de código nominal	Rotor bloqueado, kVA/HP	Letra de código nominal	Rotor bloqueado, kVA/HP
A	0–3,15	L	9,00–10,00
B	3,15–3,55	M	10,00–11,20
C	3,55–4,00	N	11,20–12,50
D	4,00–4,50	P	12,50–14,00
E	4,50–5,00	R	14,00–16,00
F	5,00–5,60	S	16,00–18,00
G	5,60–6,30	T	18,00–20,00
H	6,30–7,10	U	20,00–22,40
J	7,10–8,00	V	22,40 e acima
K	8,00–9,00		

FIGURA 6-34

Tabela de letras de código NEMA, indicando os quilovolts-ampères por HP do valor nominal de partida de um motor. Cada código de letra estende-se até, mas não inclui, o limite inferior da classe superior seguinte. (*Reproduzido com permissão de Motors and Generators, Publicação NEMA MG-1, direito autoral 1987 da NEMA.*)

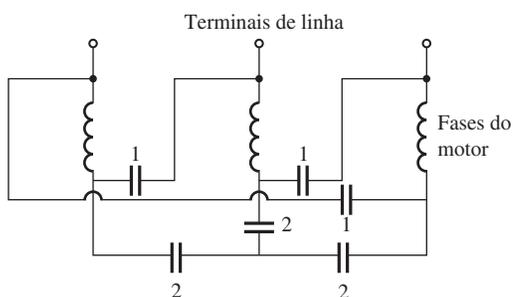
A corrente de partida é, portanto,

$$\begin{aligned}
 I_L &= \frac{S_{\text{partida}}}{\sqrt{3}V_T} \\
 &= \frac{84 \text{ kVA}}{\sqrt{3}(208 \text{ V})} = 233 \text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{6-56}$$

Se necessário, a corrente de partida de um motor de indução poderá ser reduzida por meio de um circuito de partida. Entretanto, caso isso seja feito, o conjugado de partida do motor também será reduzido.

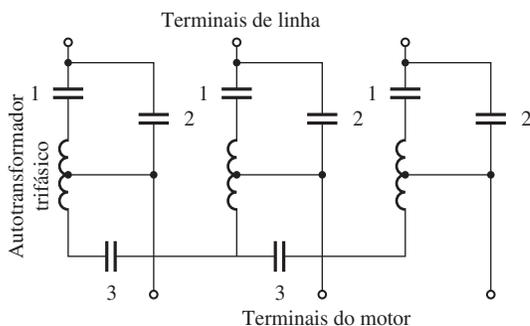
Uma maneira de se reduzir a corrente de partida é trocar a ligação normal em  $\Delta$  do motor por uma ligação em Y durante o processo de partida. Se o enrolamento de estator do motor for mudado de uma ligação  $\Delta$  para uma ligação Y, então a tensão de fase no enrolamento diminuirá de  $V_L$  para  $V_L / \sqrt{3}$ , reduzindo a corrente máxima de partida pelo mesmo fator. Quando o motor acelera até próximo da velocidade plena, os enrolamentos do estator podem ser abertos e religados em uma configuração  $\Delta$  (Veja a Figura 6-35).

Outro modo de reduzir a corrente de partida é inserir indutores ou resistores extras na linha de potência durante a partida. Mesmo tendo sido comum no passado, hoje esse método é usado raramente. Uma abordagem alternativa é reduzir a tensão de terminal do motor durante a partida usando autotransformadores para baixá-la. A Figura 6-36 mostra um circuito típico de partida com tensão reduzida que usa autotransformadores. Durante a partida, os contatos 1 e 3 são fechados, fornecendo uma tensão mais baixa ao motor. Quando o motor estiver próximo da velocidade plena, esses contatos são abertos e os contatos 2 são fechados. Esses contatos aplicam a tensão plena da linha ao motor.



Sequência de partida:  
 (a) Feche 1  
 (b) Abra 1 quando o motor estiver girando  
 (c) Feche 2

**FIGURA 6-35**  
 Um circuito de partida Y-Δ para motor de indução.



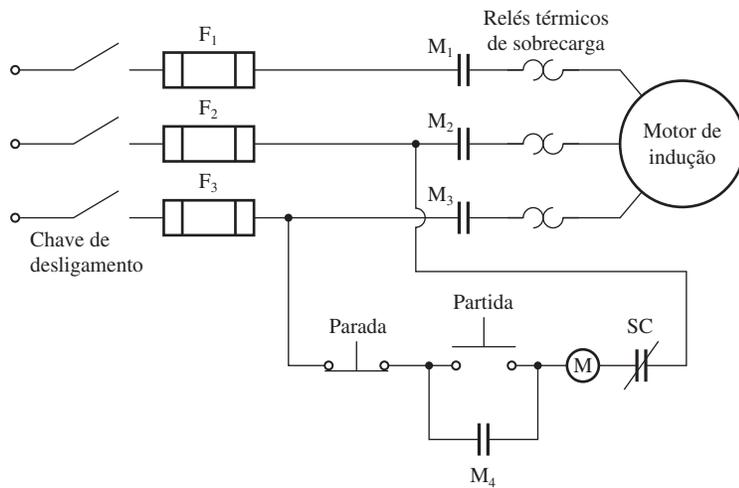
Sequência de partida:  
 (a) Feche 1 e 3  
 (b) Abra 1 e 3  
 (c) Feche 2

**FIGURA 6-36**  
 Um circuito de partida com autotransformador para motor de indução.

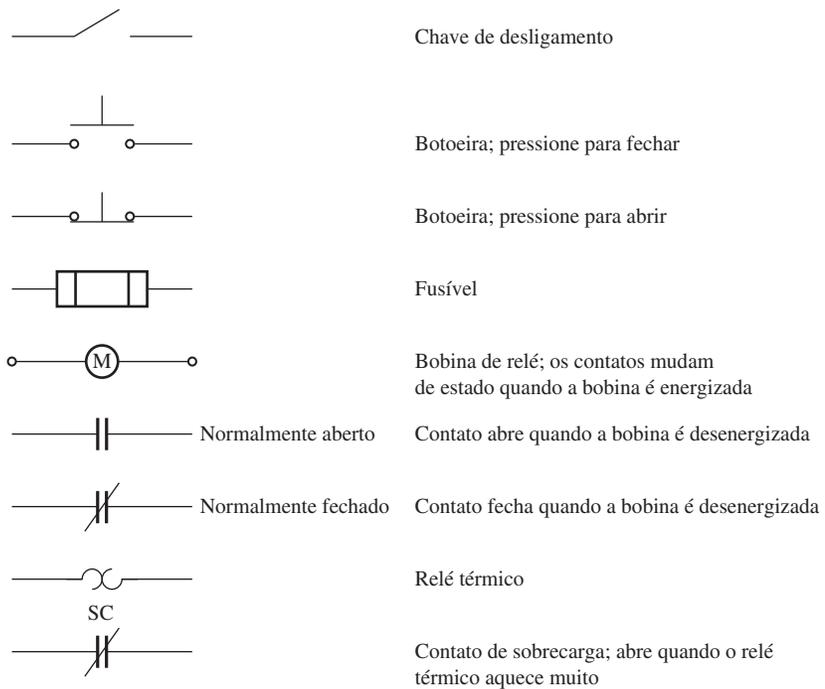
É importante compreender que a corrente de partida é reduzida de forma diretamente proporcional à diminuição da tensão de terminal, ao passo que o conjugado de partida diminui com o *quadrado* da tensão aplicada. Portanto, se o motor for usado com uma carga acoplada ao seu eixo, então poderemos aplicar apenas um valor limitado de redução de corrente.

### Circuitos de partida de um motor de indução

Um circuito de partida para motor de indução de tensão plena ou de linha está mostrado na Figura 6-37 e os significados dos símbolos estão explicados na Figura 6-38. O funcionamento desse circuito é muito simples: quando o botão de partida é pressionado, a bobina do relé (ou *contator*) M é energizada, fazendo com que os contatos normalmente abertos M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> e M<sub>3</sub> sejam fechados. Quando isso acontece, o motor é energizado e ocorre a partida do motor. O contato M<sub>4</sub> também é fechado, colocando



**FIGURA 6-37**  
Um típico circuito de partida para motor de indução ligado à linha.



**FIGURA 6-38**  
Componentes típicos encontrados nos circuitos de controle de um motor de indução.

em curto a chave de partida e permitindo que o operador solte-a sem que o relé M seja desenergizado. Quando o botão de parada é pressionado, o relé M é desenergizado e o contato M é aberto, parando o motor.

Um circuito de partida magnético para motor desse tipo tem diversos mecanismos internos de proteção:

1. Proteção contra curto-circuito
2. Proteção contra sobrecarga
3. Proteção contra subtensão

A *proteção contra curto-circuito* do motor é propiciada pelos fusíveis  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ . Se um curto-circuito repentino ocorrer dentro do motor e causar um fluxo de corrente muitas vezes superior à corrente nominal, então esses fusíveis queimarão, desligando o motor da fonte de potência e evitando que ele queime. Entretanto, esses fusíveis *não* devem queimar durante a partida normal do motor. Por essa razão, eles são projetados para suportar correntes muito superiores à corrente de plena carga antes de abrir o circuito. Isso significa que curtos-circuitos através de uma resistência elevada e/ou cargas excessivas do motor não serão interrompidos por fusíveis.

A *proteção contra sobrecarga* do motor é propiciada pelos dispositivos com o rótulo SC (sobrecarga) na figura. Esses dispositivos consistem em duas partes, um relé térmico de sobrecarga e contatos de sobrecarga. Em condições normais, os contatos de sobrecarga estão fechados. Entretanto, quando há elevação demasiada da temperatura do relé térmico, os contatos SC são abertos e o relé M é desativado, o que, por sua vez, abre os contatos M, normalmente abertos, e desliga o motor.

Quando um motor de indução está sobrecarregado, ele terminará sendo danificado pelo aquecimento excessivo causado pelas correntes elevadas. Entretanto, esse dano precisa de tempo para ocorrer e normalmente uma corrente elevada (como a de partida) aplicada a um motor de indução durante períodos curtos não é capaz de danificar o motor. A avaria ocorrerá somente se a corrente elevada for mantida. O relé térmico de sobrecarga também depende de aquecimento para seu funcionamento. Ele não é afetado por períodos curtos de corrente elevada durante a partida. O relé térmico poderá suportar uma corrente elevada durante um longo período de tempo, antes de desligar o motor para que este não seja danificado.

A *proteção contra subtensão* também é propiciada pelo controlador do motor. Observe na figura que a tensão de controle do relé M vem diretamente das linhas de potência conectadas ao motor. Se a tensão aplicada ao motor cair demais, então a tensão aplicada ao relé M também cairá e o relé será desenergizado. Como consequência, os contatos M serão abertos e a potência elétrica dos terminais do motor será removida.

Um circuito de partida de um motor de indução com resistores para reduzir a corrente de partida está mostrado na Figura 6-39. Esse circuito é similar ao anterior, exceto pelo fato de que há componentes adicionais presentes para controlar a remoção do resistor de partida. Os relés 1RT, 2RT e 3RT da Figura 6-39 são denominados relés de tempo ou com retardo, significando que, quando eles são energizados, ocorre um retardo de tempo previamente ajustado para que seus contatos sejam fechados.

Quando o botão de partida é pressionado neste circuito, o relé M é energizado e potência é aplicada ao motor como antes. Como os contatos 1RT, 2RT e 3RT estão todos abertos, o resistor de partida está completamente em série com o motor, reduzindo a corrente de partida.

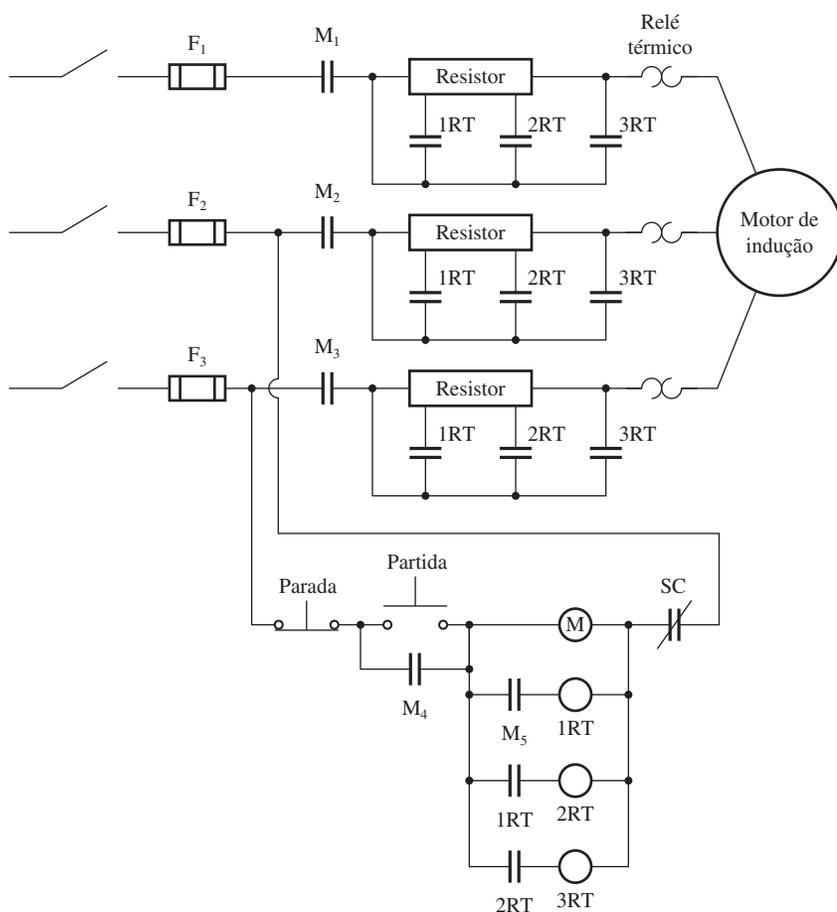


FIGURA 6-39

Um controlador de partida resistivo de três passos para um motor de indução.

Quando o contato M fecha, observe que o relé de retardo 1RT é energizado. Entretanto, há um retardo finito antes que os contatos de 1RT fechem. Durante esse período, o motor acelera parcialmente e a corrente de partida cai um tanto. Após, os contatos de 1RT fecham, removendo parte da resistência de partida e simultaneamente energizando o relé 2RT. Após outro retardo, os contatos de 2RT fecham, removendo a segunda parte do resistor e energizando o relé 3RT. Finalmente, os contatos de 3RT fecham e o resistor de partida fica completamente fora do circuito.

Por meio de uma seleção criteriosa dos valores dos resistores e dos tempos de retardo, esse circuito de partida pode ser usado para evitar que as correntes de partida tornem-se perigosamente elevadas e, ao mesmo tempo, permitem que corrente suficiente circule para assegurar uma aceleração rápida até as velocidades normais de operação.

## 6.9 CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES DE INDUÇÃO

Até o advento dos acionamentos modernos de estado sólido, os motores de indução não eram em geral máquinas boas para aplicações que exigissem um controle considerável de velocidade. A faixa de funcionamento normal de um motor de indução típico (Classes A, B e C) está limitada a menos de 5% de escorregamento e a variação de velocidade dentro dessa faixa é mais ou menos diretamente proporcional à carga no eixo do motor. Mesmo que o escorregamento pudesse ser maior, a eficiência do motor iria se tornar muito pobre, porque as perdas no cobre do rotor são diretamente proporcionais ao escorregamento do motor (lembre-se de que  $P_{PCR} = sP_{EF}$ ).

Na realidade, há apenas duas técnicas que podem ser usadas para controlar a velocidade de um motor de indução. Uma consiste em variar a velocidade síncrona, que é a velocidade dos campos magnéticos do estator e do rotor, já que a velocidade do rotor sempre permanece próximo de  $n_{sinc}$ . A outra técnica consiste em variar o escorregamento do motor para uma dada carga. Cada uma dessas técnicas será analisada com mais detalhes.

A velocidade síncrona de um motor de indução é dada por

$$n_{sinc} = \frac{120 f_{se}}{P} \quad (6-1)$$

Desse modo, as únicas formas de variar a velocidade síncrona da máquina são (1) alterando a frequência elétrica e (2) alterando o número de polos da máquina. O controle do escorregamento pode ser conseguido variando a resistência do rotor ou a tensão de terminal do motor.

### Controle de velocidade de motores de indução por troca de polos

Há duas maneiras principais de alterar o número de polos de um motor de indução:

1. O método dos polos consequentes
2. Enrolamentos de estator múltiplos

O *método dos polos consequentes* é um método bem antigo de controle de velocidade, tendo sido originalmente desenvolvido em 1897. Baseia-se no fato de que o número de polos do enrolamento do estator de um motor de indução pode ser alterado facilmente na razão 2:1 simplesmente fazendo trocas simples nas conexões das bobinas. A Figura 6-40 mostra um estator simples de um motor de indução de dois polos adequado para troca de polos. Observe que as bobinas individuais são de passo bem encurtado (60 a 90°). A Figura 6-41 mostra separadamente a fase *a* desses enrolamentos para melhor visibilidade dos detalhes.

A Figura 6-41a mostra o fluxo de corrente na fase *a* dos enrolamentos de estator em um instante de tempo durante o funcionamento normal. Observe que o campo magnético sai do estator no grupo superior da fase (polo norte) e entra no estator no grupo inferior da fase (polo sul). Portanto, esse enrolamento está produzindo dois polos magnéticos de estator.

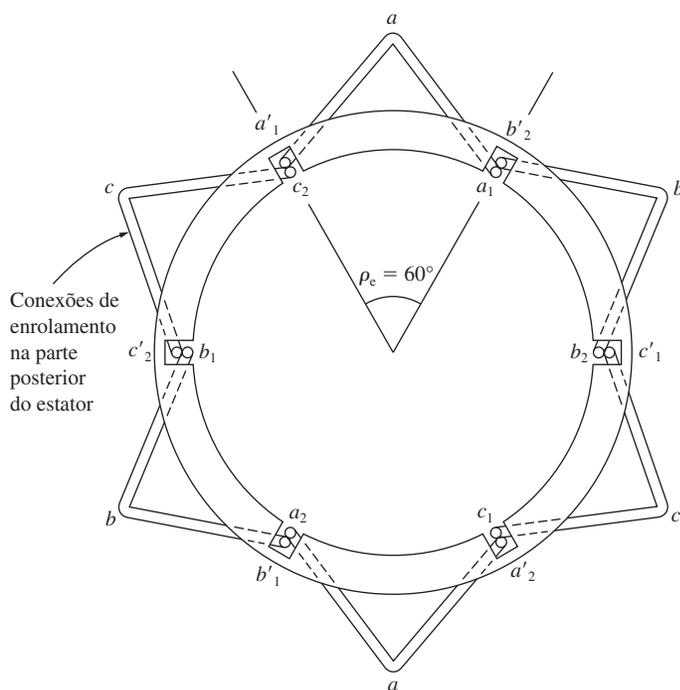


FIGURA 6-40

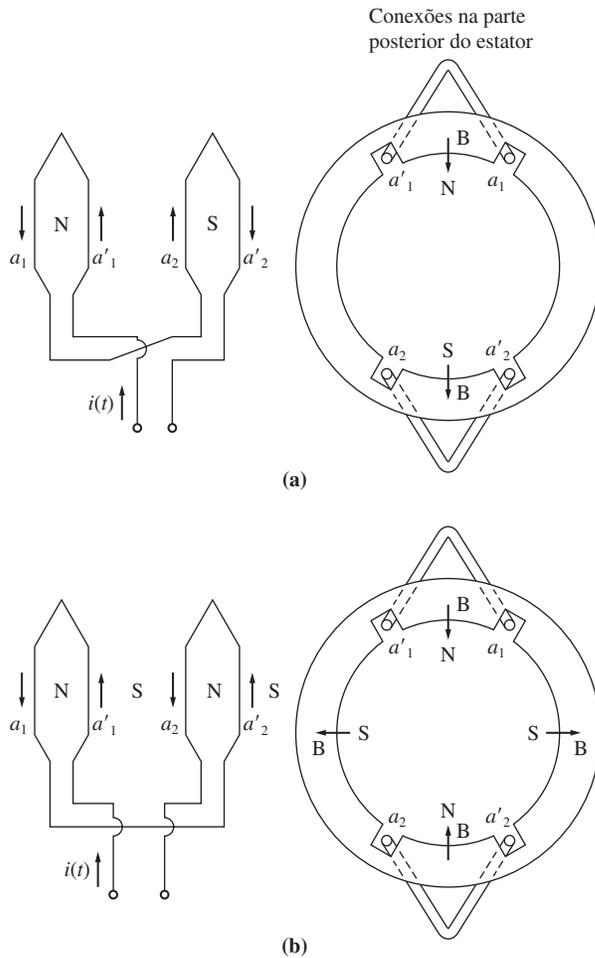
Um enrolamento de estator de dois polos para troca de polos. Observe o passo muito pequeno desses enrolamentos no rotor.

Agora, suponha que o sentido do fluxo da corrente no grupo de fase *inferior* do estator seja invertido (Figura 6-41b). Nesse caso, o campo magnético deixará o estator *tanto* no grupo de fase superior *como* no inferior – cada um dos quais será um polo magnético norte. O fluxo magnético desta máquina deverá retornar ao estator *entre* os dois grupos de fase, produzindo um par de polos magnéticos *consequentes*, ambos de polaridade sul. Observe agora que o estator tem quatro polos magnéticos – o dobro de antes.

O rotor de um motor como esse é do tipo de gaiola de esquilo, porque o rotor de gaiola sempre tem tantos polos induzidos nele quantos são os polos do estator e, desse modo, pode se ajustar quando o número de polos do estator muda.

Quando as conexões do motor são alteradas durante a mudança de dois para quatro polos, o conjugado máximo resultante do motor de indução pode ser o mesmo de antes (conexão de conjugado constante), a metade de seu valor anterior (conexão de conjugado segundo a lei do quadrado, usado para ventiladores, etc.) ou o dobro de seu valor anterior (conexão de potência de saída constante), dependendo de como os enrolamentos do estator são configurados. A Figura 6-42 mostra as conexões de estator possíveis e seus efeitos sobre a curva de conjugado *versus* velocidade.

A desvantagem principal do método de polos consequentes para alteração de velocidade é que as velocidades devem estar na razão 2:1. A maneira tradicional de superar essa limitação foi empregar *enrolamentos de estator múltiplos*, com números diferentes de polos, que eram energizados apenas um de cada vez. Por exemplo, o es-



**FIGURA 6-41**

Vista em detalhe de uma fase de um enrolamento para mudança de polos. (a) Na configuração de dois polos, uma bobina é um polo norte (N) e a outra é um polo sul (S). (b) Quando a conexão em uma das duas bobinas é invertida, ambas se tornam de polaridade norte (N) e o fluxo magnético retorna ao estator em pontos a meio caminho entre as duas bobinas. Os polos S são denominados *polos consequentes* e o enrolamento é agora de quatro polos.

tador de um motor poderia ser enrolado com um conjunto de enrolamentos de quatro polos e com outro conjunto de seis polos. Em um sistema de 60 Hz, sua velocidade síncrona poderia ser trocada de 1800 para 1200 rpm simplesmente fornecendo potência ao outro conjunto de enrolamentos. Infelizmente, os enrolamentos de estator múltiplos encarecem o motor e são usados, portanto, somente quando absolutamente necessários.

Combinando o método dos polos consequentes com o método dos enrolamentos múltiplos de estator, é possível construir um motor de indução de quatro velocidades. Por exemplo, com enrolamentos separados de quatro e seis polos, é possível construir um motor de 60 Hz capaz de funcionar a 600, 900, 1200 e 1800 rpm.

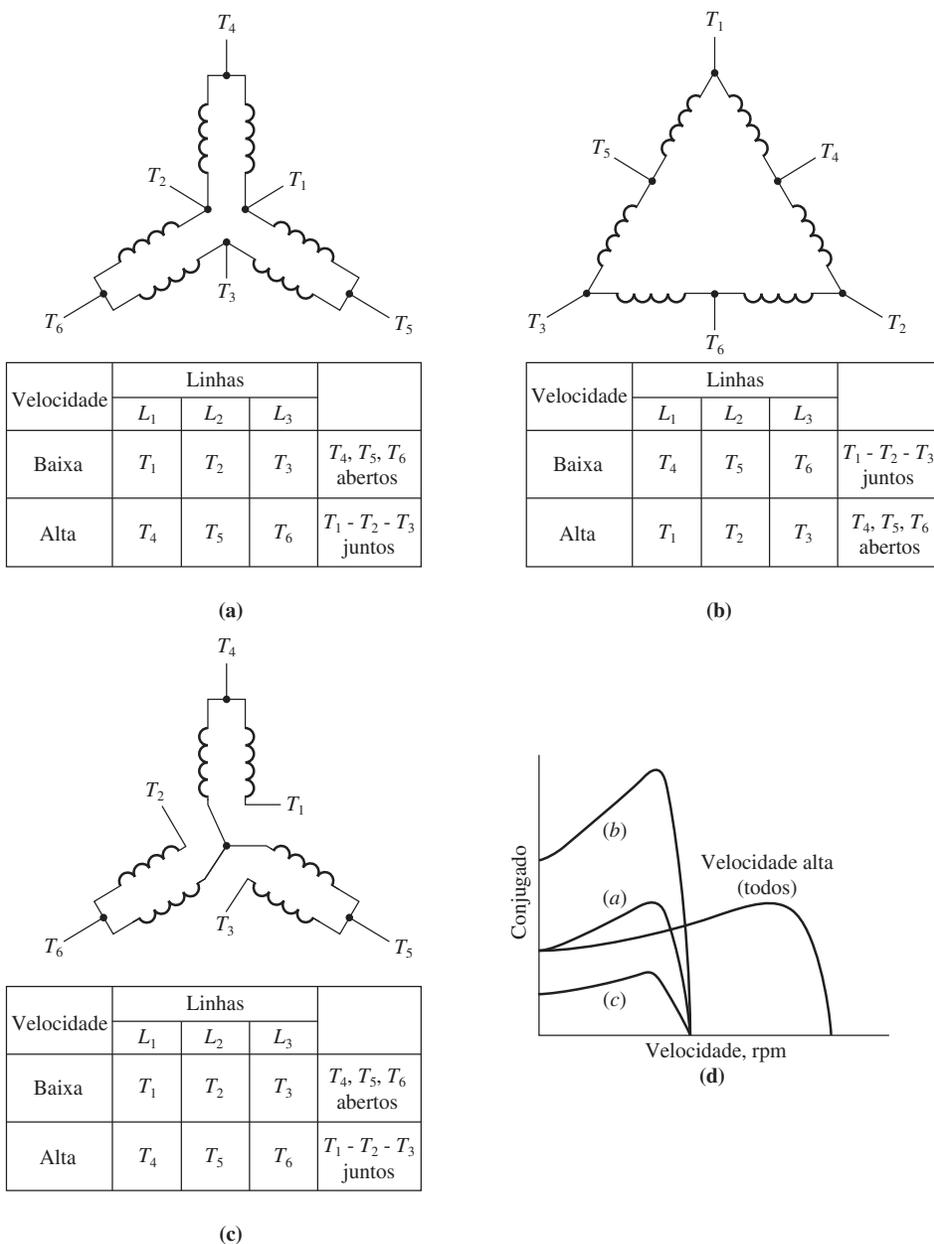


FIGURA 6-42

Conexões possíveis das bobinas do estator em um motor com troca de polos, juntamente com as características resultantes de conjugado *versus* velocidade: (a) *Conexão de conjugado constante* – a capacidade de conjugado do motor permanece aproximadamente constante, tanto na conexão de velocidade alta como na de velocidade baixa. (b) *Conexão de potência constante* – a capacidade de potência do motor permanece aproximadamente constante, tanto na conexão de velocidade alta como na de velocidade baixa. (c) *Conexão de conjugado do tipo usado em ventilador* – a capacidade de conjugado do motor muda com a velocidade, da mesma forma que ocorre com as cargas de um ventilador.

## Controle de velocidade por mudança da frequência de linha

Se a frequência elétrica aplicada ao estator de um motor de indução for alterada, a velocidade de rotação  $n_{\text{sync}}$  dos seus campos magnéticos mudará de forma diretamente proporcional à alteração da frequência elétrica. Na curva característica de conjugado *versus* velocidade, o ponto de carga a vazio também irá se alterar (veja a Figura 6-43). Em condições nominais, a velocidade síncrona do motor é conhecida como *velocidade base*. Usando o controle por frequência variável, é possível ajustar a velocidade do motor, tanto para cima como para baixo da velocidade base. Um acionamento de motor de indução de frequência variável, projetado apropriadamente, pode ser *muito* flexível. Ele é capaz de controlar a velocidade de um motor de indução na faixa que vai desde um valor tão baixo como 5% da velocidade de base até um valor superior ao dobro da velocidade de base. Entretanto, quando a frequência é alterada, é importante que certos limites de tensão e conjugado sejam mantidos no motor para assegurar um funcionamento sem riscos.

Quando o motor estiver operando em velocidades abaixo da velocidade base, é necessário reduzir a tensão de terminal aplicada ao estator para um funcionamento apropriado. A tensão de terminal aplicada ao estator deve ser diminuída linearmente com a diminuição da frequência do estator. Esse processo é denominado *redução dos valores nominais*\*. Se isso não for realizado, ocorrerá a saturação do aço no núcleo do motor de indução e correntes excessivas de magnetização circularão na máquina.

Para compreender a necessidade da redução dos valores nominais, lembre-se de que um motor de indução é basicamente um transformador em rotação. Como em qualquer transformador, o fluxo no núcleo de um motor de indução pode ser obtido a partir da lei de Faraday:

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1-36)$$

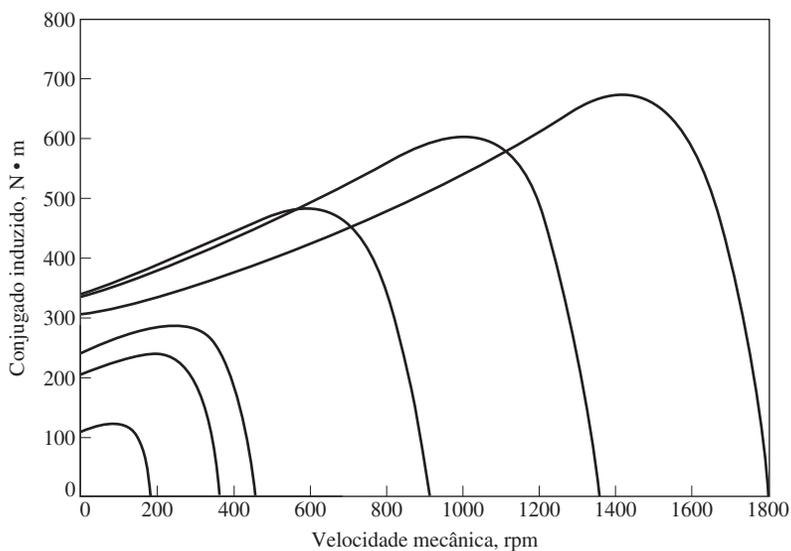
Se uma tensão  $v(t) = V_M \text{ sen } \omega t$  for aplicada ao núcleo, o fluxo resultante  $\phi$  será

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \frac{1}{N_p} \int v(t) dt \\ &= \frac{1}{N_p} \int V_M \text{ sen } \omega t dt \end{aligned}$$

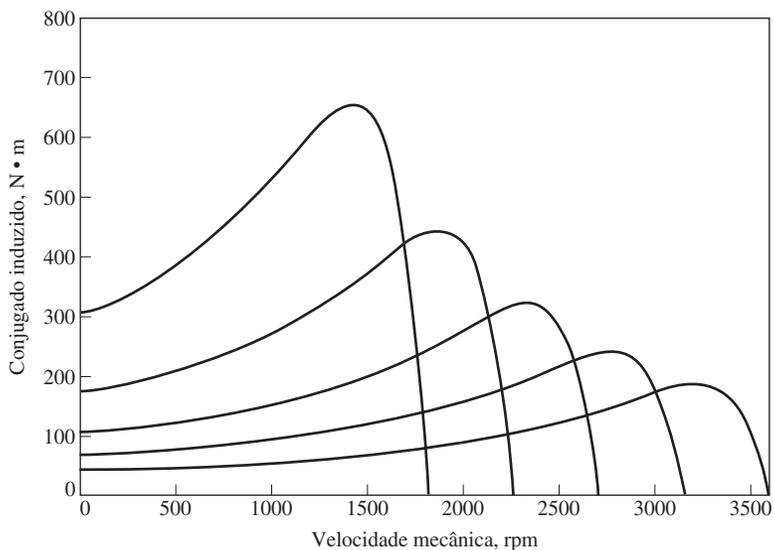
$$\phi(t) = -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t \quad (6-57)$$

Observe que a frequência elétrica aparece no *denominador* dessa expressão. Portanto, se a frequência elétrica aplicada ao estator *diminuir* em 10%, ao passo que o valor da tensão aplicada ao estator permanece constante, o fluxo no núcleo do motor *umentará* em cerca de 10% e a corrente de magnetização do motor subirá. Na região não saturada da curva de magnetização do motor, o aumento da corrente de magnetização também será em torno de 10%. Entretanto, na região saturada da curva de magnetização do motor, um aumento de 10% de fluxo requer um aumento muito maior da corrente de magnetização. Normalmente, os motores de indução são projetados para

\* N. de T.: *Derating*, em inglês.



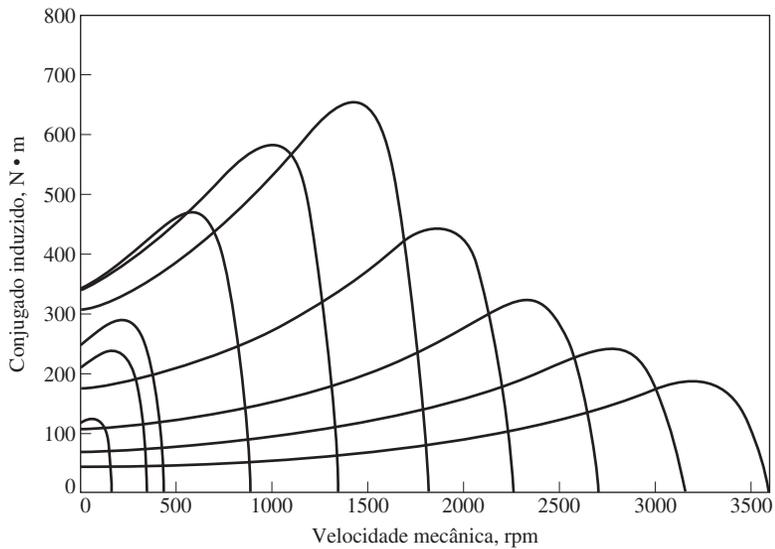
(a)



(b)

**FIGURA 6-43**

Controle de velocidade por frequência variável de um motor de indução: (a) A família de curvas características de conjugado *versus* velocidade para velocidades abaixo da velocidade base, assumindo que a tensão nominal de linha foi reduzida linearmente com a frequência. (b) A família de curvas características de conjugado *versus* velocidade para velocidades acima da velocidade base, assumindo que a tensão de linha foi mantida constante.



(c)

**FIGURA 6-43 (conclusão)**

(c) Curvas características de conjugado *versus* velocidade para todas as frequências.

operar próximo do ponto de saturação de suas curvas de magnetização. Desse modo, o aumento de fluxo devido a uma diminuição na frequência fará com que correntes de magnetização excessivas circulem no motor. (Esse mesmo problema foi observado nos transformadores; veja a Seção 2.12.)

Na prática, a tensão aplicada ao estator é diminuída de forma diretamente proporcional à diminuição da frequência. Procedese assim para evitar correntes de magnetização excessiva e sempre que a frequência estiver abaixo da frequência nominal do motor. Como a tensão aplicada  $v$  aparece no numerador da Equação (6-57) e a frequência  $\omega$  aparece no denominador da Equação (6-57), os dois efeitos se neutralizam e a corrente de magnetização não é afetada.

Quando a tensão aplicada a um motor de indução é variada linearmente com a frequência abaixo da velocidade base, o fluxo no motor permanece aproximadamente constante. Portanto, o conjugado máximo que o motor pode fornecer mantém-se bem elevado. Entretanto, a potência nominal máxima do motor deve ser diminuída linearmente com o decréscimo de frequência para proteger o circuito de estator do sobreaquecimento. A potência fornecida a um motor de indução trifásico é dada por

$$P = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta$$

Se a tensão  $V_L$  for diminuída, a potência máxima  $P$  também deverá ser diminuída, caso contrário, a corrente que flui no motor será excessiva e o motor sobreaquecerá.

A Figura 6-43a mostra uma família de curvas características de conjugado *versus* velocidade para velocidades abaixo da velocidade base. Assume-se que o valor da tensão do estator varia linearmente com a frequência.

Quando a frequência elétrica aplicada ao motor excede a frequência nominal, a tensão do estator deve ser mantida constante com o valor nominal. Nessas circunstâncias, a tensão poderia ser elevada acima do valor nominal desde que o comportamento da saturação fosse analisado e levado em consideração. No entanto, a tensão é limitada ao valor nominal para proteger a isolação do enrolamento do motor. Quanto mais elevada for a frequência elétrica em relação à velocidade base, maior será o denominador da Equação (6-57). Como o numerador é mantido constante acima da frequência nominal, o fluxo resultante na máquina diminui e o conjugado máximo também diminui. A Figura 6-43b mostra uma família de curvas características de conjugado *versus* velocidade do motor de indução para velocidades superiores à velocidade base. Assume-se que a tensão do estator é mantida constante.

Se, abaixo da velocidade base, a tensão de estator for variada linearmente com a frequência e, acima da velocidade base, for mantida constante no valor nominal, então a família resultante de características de conjugado *versus* velocidade é como mostra a Figura 6-43c. A velocidade nominal para o motor mostrado na Figura 6-43 é 1800 rpm.

No passado, para que funcionasse, a principal desvantagem do controle de frequência elétrica como método de alteração de velocidade era a necessidade de um gerador dedicado ou de um conversor mecânico de frequência. Esse problema desapareceu com o desenvolvimento dos acionamentos modernos para motores de frequência variável e estado sólido. De fato, a alteração da frequência de linha por meio de acionamentos de estado sólido tornou-se o método preferido para controle de velocidade dos motores de indução. Observe que esse método pode ser usado com *qualquer* motor de indução, diferentemente da técnica de mudança de polos que requer um motor com enrolamentos de estator especiais.

Um típico acionamento de motor de frequência variável de estado sólido será descrito na Seção 6.10.

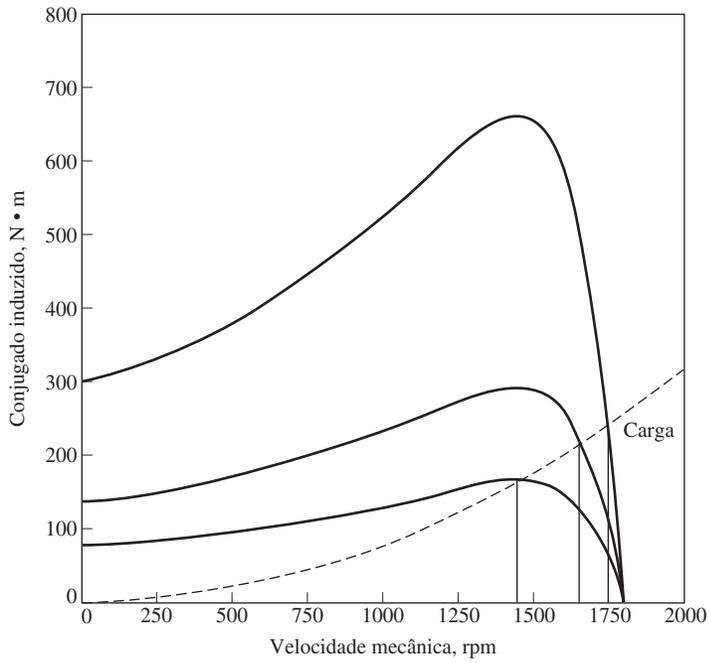
### Controle de velocidade por mudança da tensão de linha

O conjugado desenvolvido por um motor de indução é proporcional ao quadrado da tensão aplicada. Se uma carga tiver uma característica de conjugado *versus* velocidade, como a mostrada na Figura 6-44, a velocidade do motor poderá ser controlada dentro de uma faixa limitada se a tensão de linha for variada. Esse método de controle de velocidade é usado algumas vezes em pequenos motores que acionam ventiladores.

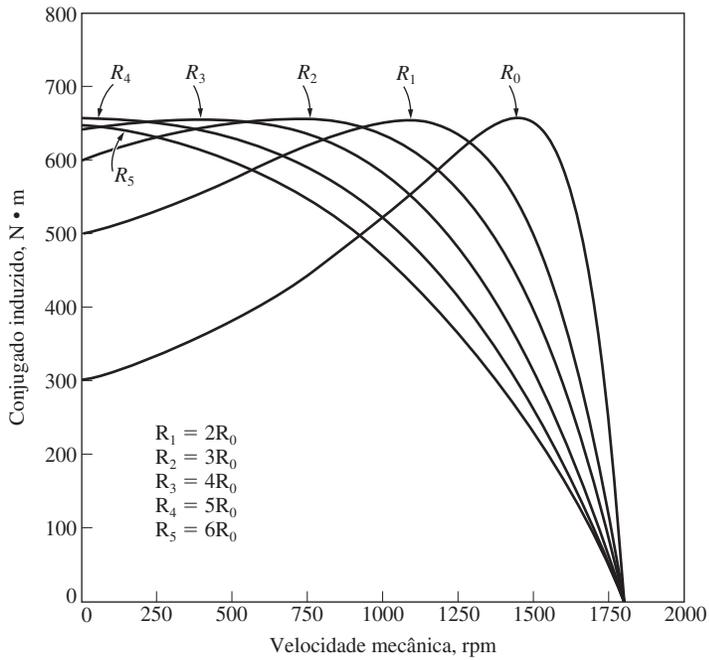
### Controle de velocidade por mudança da resistência do rotor

Em motores de indução de rotor bobinado, pode-se alterar a forma da curva de conjugado *versus* velocidade pela inserção de resistências extras no circuito do rotor da máquina. As curvas características de conjugado *versus* velocidade resultantes estão mostradas na Figura 6-45. Se a curva de conjugado *versus* velocidade da carga for como a mostrada na figura, então a alteração da resistência do rotor mudará a velocidade de funcionamento do motor. Entretanto, a inserção de resistências extras no circuito do rotor de um motor de indução reduz seriamente a eficiência da máquina.

Esse método de controle de velocidade é no máximo de interesse apenas histórico, porque pouquíssimos motores de indução com rotor bobinado ainda são construídos. Quando utilizados, normalmente é por períodos curtos, devido ao problema de eficiência mencionado no parágrafo anterior.



**FIGURA 6-44**  
 Controle de velocidade por variação da tensão de linha de um motor de indução.



**FIGURA 6-45**  
 Controle de velocidade por variação da resistência do rotor de um motor de indução de rotor bobinado.

## 6.10 ACIONAMENTO DE ESTADO SÓLIDO PARA MOTORES DE INDUÇÃO

Como foi mencionado na seção anterior, atualmente, o método preferido para controlar a velocidade dos motores de indução é o acionamento (ou inversor) de frequência variável de estado sólido para motor de indução. Um exemplo de acionamento desse tipo está mostrado na Figura 6-46. O acionamento é muito flexível: sua entrada pode ser monofásica ou trifásica, 50 ou 60 Hz e para qualquer valor de tensão entre 208 a 230 V. A saída desse acionamento é um conjunto trifásico de tensões cuja frequência pode ser variada de 0 a 120 Hz e cuja tensão pode ser variada desde 0 V até a tensão nominal do motor.

O controle da tensão e da frequência de saída é obtido usando técnicas de modulação de largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*).<sup>1</sup> Tanto a frequência de saída como a tensão de saída podem ser controladas independentemente por modulação de largura de pulso. A Figura 6-47 ilustra o modo pelo qual o acionamento PWM pode controlar a frequência de saída, mantendo constante um valor de tensão eficaz. A Figura 6-48 ilustra o modo pelo qual o acionamento PWM pode controlar o nível de tensão eficaz, mantendo uma frequência constante.

Como descrevemos na Seção 6.9, muitas vezes é desejável variar em conjunto e linearmente a frequência e a tensão eficaz de saída. A Figura 6-49 mostra formas de onda típicas da tensão de saída de uma das fases do acionamento, para o caso em que a frequência e a tensão são variadas simultaneamente de forma linear.<sup>2</sup> A Figura

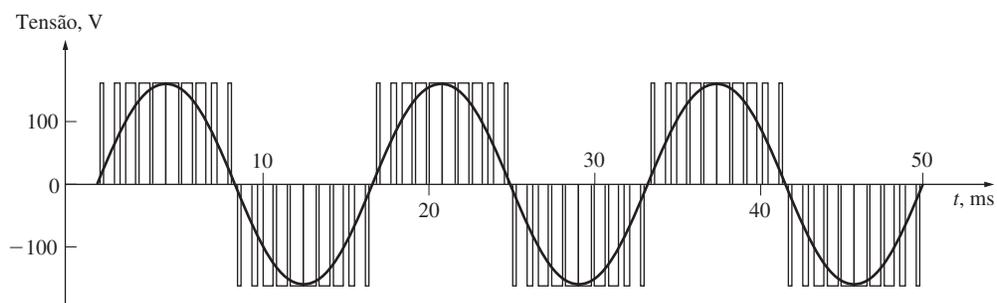


**FIGURA 6-46**

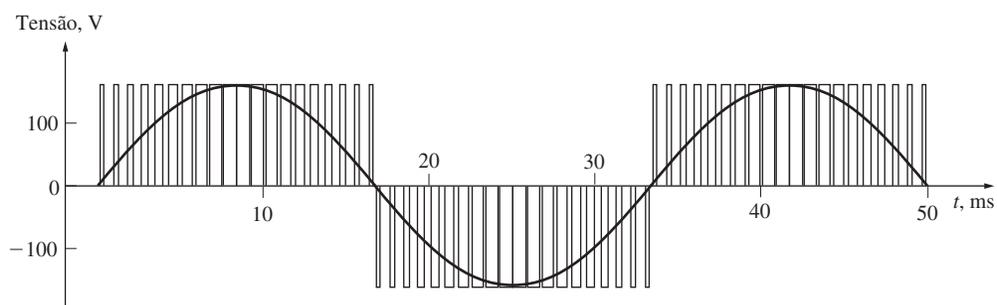
Um acionamento típico de frequência variável de estado sólido para motor de indução. (Cortesia de MagneTek, Inc.)

<sup>1</sup> As técnicas de PWM são descritas no suplemento *online* deste livro, *Introduction to Power Electronics*, que está disponível no *site* do livro.

<sup>2</sup> Na realidade, as formas de onda da Figura 6-48 estão simplificadas. Um acionamento real de motor de indução tem uma frequência portadora muito superior a que está mostrada na figura.



(a)



(b)

**FIGURA 6-47**

Controle de frequência variável com formas de onda PWM típicas: (a) forma de onda PWM de 60 Hz e 120 V; (b) forma de onda PWM de 30 Hz e 120 V.

6-49a mostra a tensão de saída ajustada para uma frequência de 60 Hz e uma tensão eficaz de 120 V. A Figura 6-49b mostra a saída ajustada para uma frequência de 30 Hz e uma tensão eficaz de 60 V e a Figura 6-49c mostra a saída ajustada para uma frequência de 20 Hz e uma tensão eficaz de 40 V. Observe que a tensão de pico de saída do acionamento permanece a mesma em todos os casos. O nível da tensão eficaz é controlado pela fração de tempo durante a qual a tensão está ligada. A frequência é controlada pela taxa em que a polaridade dos pulsos é chaveada de positiva para negativa e novamente para positiva.

O acionamento típico de motor de indução, que está mostrado na Figura 6-46, apresenta muitos recursos internos que contribuem à capacidade de fazer ajustes e à facilidade de uso. Um resumo de alguns desses recursos será apresentado a seguir.

### Ajuste de frequência (velocidade)

A frequência de saída do acionamento pode ser controlada manualmente a partir de um controle montado no gabinete do acionamento, ou então pode ser controlada remotamente por um sinal externo de tensão ou corrente. A capacidade de ajuste da frequência do acionamento em resposta a algum sinal externo é muito importante, porque permite que um computador ou um controlador de processo externo possa

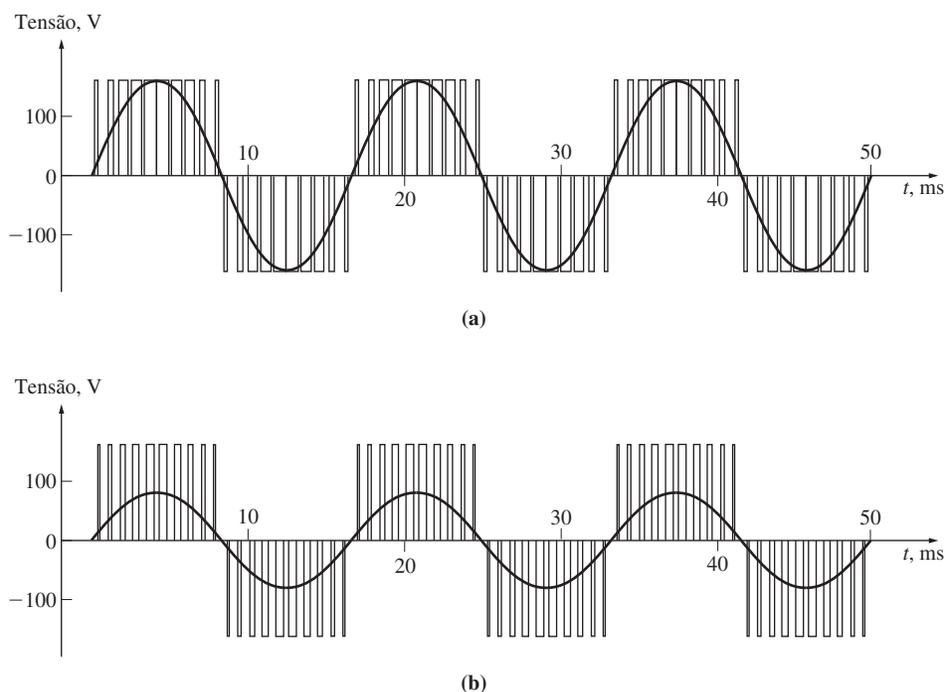


FIGURA 6-48

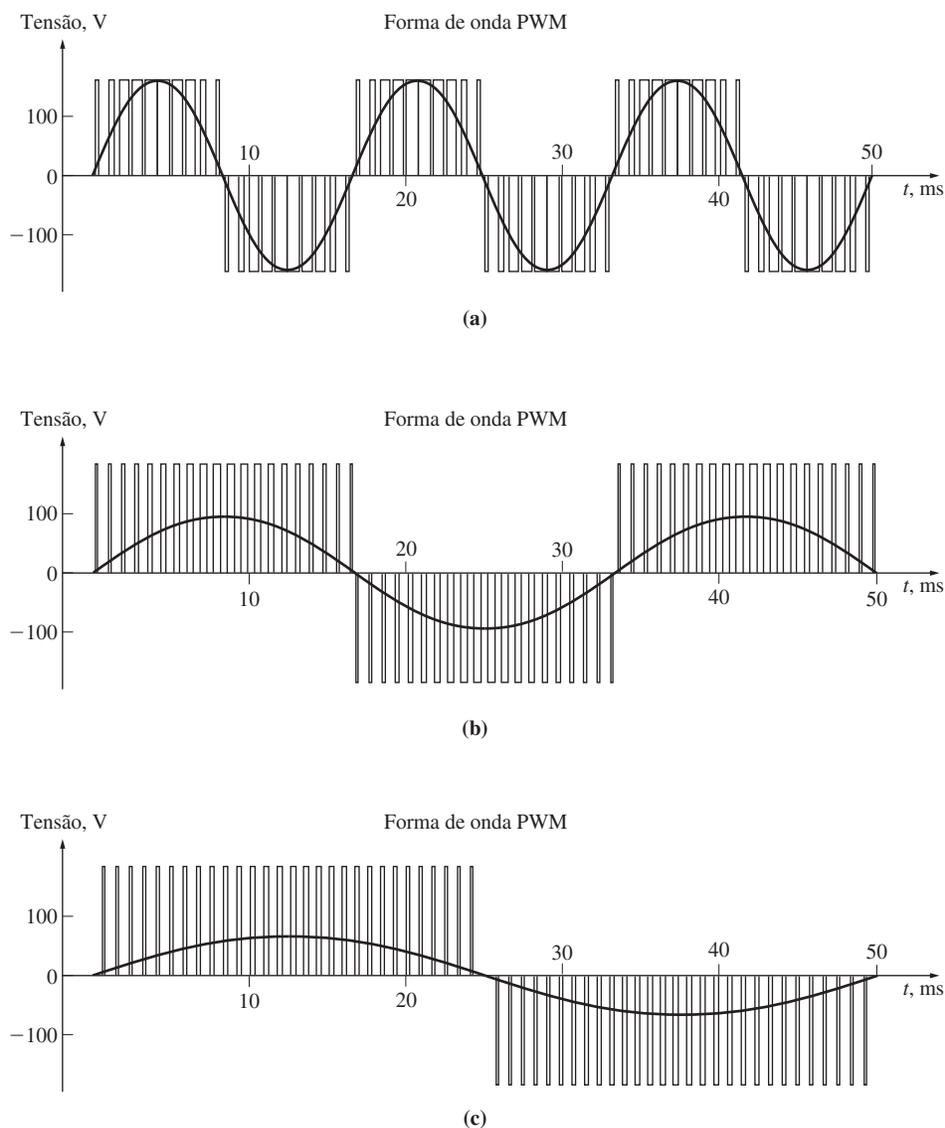
Controle de tensão variável com uma forma de onda PWM: (a) forma de onda PWM de 60 Hz e 120 V; (b) forma de onda PWM de 60 Hz e 60 V.

controlar a velocidade do motor de acordo com as necessidades da planta em que ele está instalado.

### Uma seleção de padrões de tensão *versus* frequência

Os tipos de cargas mecânicas que podem ser acopladas a um motor de indução variam grandemente. Algumas cargas, como as de ventiladores, requerem um conjugado muito baixo na partida (ou quando estão funcionando com velocidades baixas) e têm conjugados que crescem com o quadrado da velocidade. Outras cargas podem ser de partida mais difícil, exigindo um conjugado maior do que o conjugado nominal de plena carga do motor, somente para colocar a carga em movimento. Este acionamento oferece uma série de padrões de tensão *versus* frequência que podem ser selecionados para adequar o conjugado aplicado pelo motor ao conjugado requerido pela sua carga. Três desses padrões estão mostrados nas Figuras 6-50 a 6-52.

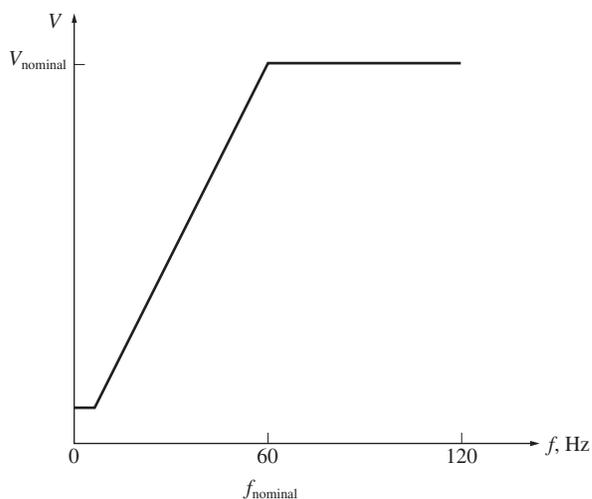
A Figura 6-50a mostra o padrão normal ou de uso geral de tensão *versus* frequência descrito na seção anterior. Para velocidades abaixo da velocidade base, esse padrão altera linearmente a tensão de saída em função das mudanças na frequência de saída e, para velocidades acima da velocidade base, mantém a tensão constante. (A



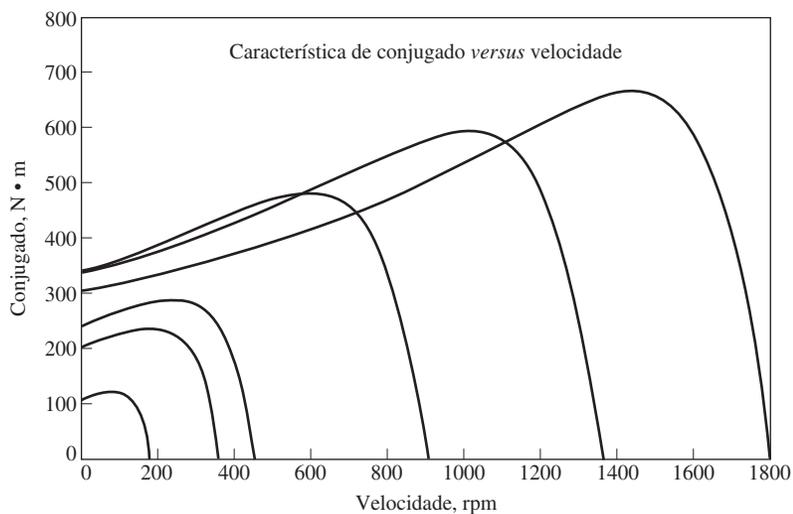
**FIGURA 6-49**

Controle simultâneo de tensão e frequência com uma forma de onda PWM: (a) forma de onda PWM de 60 Hz e 120 V; (b) forma de onda PWM de 30 Hz e 60 V; (c) forma de onda PWM de 20 Hz e 40 V.

região de tensão baixa constante em frequências muito baixas é necessária para assegurar que haverá algum conjugado de partida nas velocidades extremamente baixas.) A Figura 6-50b mostra a característica resultante de conjugado *versus* velocidade para diversas frequências de funcionamento inferiores à velocidade base.



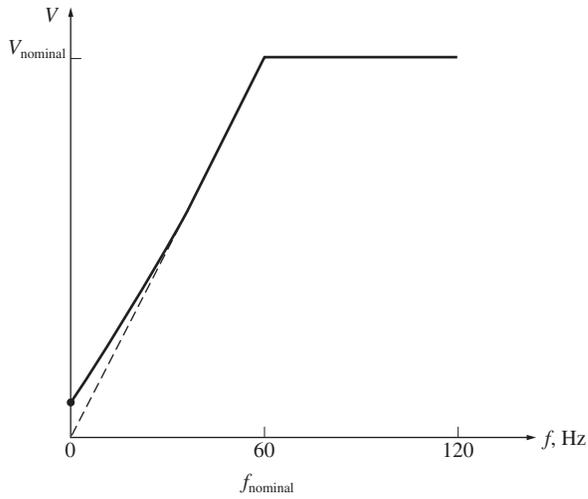
(a)



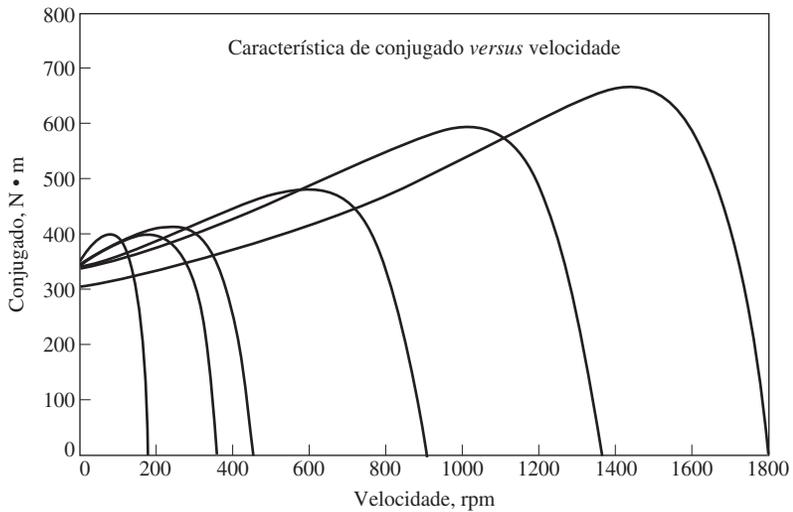
(b)

**FIGURA 6-50**

(a) Padrões possíveis de tensão *versus* frequência para o acionamento de frequência variável de estado sólido para motor de indução: *padrão de uso geral*. Esse padrão consiste em uma reta de tensão *versus* frequência para frequências abaixo da frequência nominal, e em uma curva de tensão constante para frequências acima da frequência nominal. (b) As curvas características resultantes de conjugado *versus* velocidade para velocidades abaixo da frequência nominal (velocidades superiores à frequência nominal assemelham-se à Figura 6-42b).



(a)



(b)

**FIGURA 6-51**

(a) Padrões possíveis de tensão *versus* frequência para o acionamento de frequência variável de estado sólido para motor de indução: *padrão de conjugado elevado de partida*. Este é um padrão modificado de tensão *versus* frequência adequado para cargas que exigem conjugados elevados de partida. É o mesmo que o padrão linear de tensão *versus* frequência, exceto em baixas velocidades. A tensão é desproporcionalmente elevada em velocidades muito baixas, isso produz um conjugado extra à custa de uma maior corrente de magnetização. (b) As curvas características resultantes de conjugado *versus* velocidade para velocidades abaixo da frequência nominal (velocidades superiores à frequência nominal assemelham-se à Figura 6-42b).

A Figura 6-51a mostra o padrão de tensão *versus* frequência usado para cargas com conjugados de partida elevados. Para velocidades inferiores à velocidade base, esse padrão também altera a tensão de saída linearmente com as mudanças na frequência de saída. Entretanto, para frequências abaixo de 30 HZ, a inclinação torna-se menos acentuada. Para qualquer frequência dada abaixo de 30 Hz, a tensão de saída será *superior* à tensão que seria fornecida com o padrão anterior. Essa tensão mais elevada produzirá um conjugado maior, mas à custa de uma saturação magnética aumentada e correntes de magnetização maiores. Frequentemente, a saturação aumentada e as correntes maiores podem ser toleradas por períodos curtos necessários para dar partida às cargas pesadas. A Figura 6-51b mostra as características de conjugado *versus* velocidade do motor de indução para diversas frequências de funcionamento abaixo da velocidade base. Observe os conjugados maiores disponíveis em baixas frequências, quando comparados com os da Figura 6-50b.

A Figura 6-52a mostra o padrão de tensão *versus* frequência usado para cargas com baixos conjugados de partida (denominadas *cargas de partida suave*). Quando muda a frequência de saída, esse padrão altera de forma parabólica a tensão de saída para velocidades abaixo da velocidade base. Para qualquer frequência dada abaixo de 60 Hz, a tensão de saída será inferior à produzida no padrão de uso geral. Essa tensão inferior produzirá um conjugado menor, propiciando uma partida lenta e suave para cargas de conjugado baixo. A Figura 6-52b mostra a característica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução para diversas frequências de operação inferiores à velocidade base. Observe o conjugado menor disponível em baixas frequências quando comparado com o da Figura 6-50.

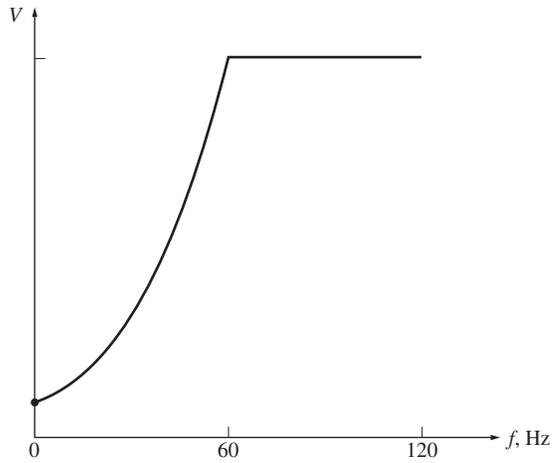
## Rampas de aceleração e desaceleração independentemente ajustáveis

Quando a velocidade desejada de operação do motor é mudada, seu acionamento altera a frequência levando o motor até a nova velocidade de funcionamento. Se a mudança de velocidade for repentina (por exemplo, um salto instantâneo de 900 para 1200 rpm), o acionamento não tenta fazer com que o motor salte instantaneamente da velocidade anterior para a nova velocidade desejada. Em vez disso, a taxa de aceleração ou desaceleração do motor é limitada a um nível seguro por circuitos especiais construídos na eletrônica do acionamento. Essas taxas de aceleração e desaceleração podem ser ajustadas independentemente.

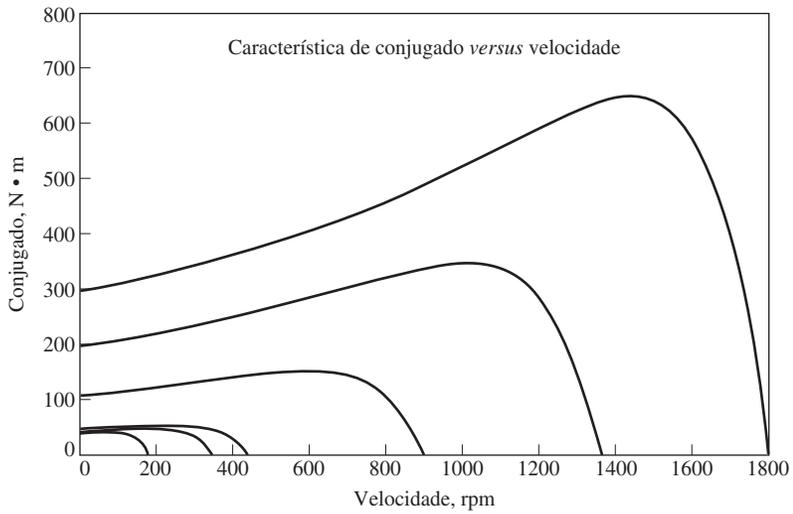
## Proteção de motor

O acionamento do motor de indução contém diversos recursos projetados para proteger o motor que ele controla. O acionamento pode detectar correntes excessivas de regime permanente (uma condição de sobrecarga), correntes instantâneas excessivas e condições de sobre tensão ou subtensão. Em qualquer um desses casos, o acionamento desligará o motor.

Atualmente, os acionamentos de motor de indução, como o descrito acima, são tão flexíveis e confiáveis que os motores de indução com esses acionamentos estão substituindo os motores CC em muitas aplicações que requerem uma faixa bem ampla de variação de velocidade.



(a)



(b)

**FIGURA 6-52**

(a) Padrões possíveis de tensão *versus* frequência para o acionamento de frequência variável de estado sólido para motor de indução: *padrão de conjugado para ventilador*. Esse é um padrão de tensão *versus* frequência adequado para uso com motores que acionam ventiladores e bombas centrífugas, os quais apresentam um conjugado de partida muito baixo. (b) As curvas características resultantes de conjugado *versus* velocidade para velocidades abaixo da frequência nominal (velocidades superiores à frequência nominal assemelham-se à Figura 6-42b).

## 6.11 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE CIRCUITO

O circuito equivalente de um motor de indução é uma ferramenta muito útil para determinar a resposta do motor às mudanças de carga. Entretanto, se o modelo é para ser usado com uma máquina real, será necessário determinar quais são os valores dos elementos de circuito que participarão do modelo. Como determinar  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_M$  de um motor real?

Essas informações podem ser obtidas executando uma série de testes ou ensaios no motor de indução. Esses testes são semelhantes aos ensaios de curto-circuito e a vazio de um transformador. Os ensaios devem ser executados sob condições precisamente controladas, porque as resistências variam com a temperatura e a resistência do rotor também varia com a frequência do rotor. Os detalhes exatos de como cada ensaio de motor de indução deve ser realizado para se obter resultados acurados são descritos pela Norma 112 da IEEE.\* Embora os detalhes dos ensaios sejam muito complicados, os conceitos envolvidos são relativamente simples e serão explicados a seguir.

### O ensaio sem carga ou a vazio

O ensaio a vazio (ou sem carga) de um motor de indução mede as perdas rotacionais do motor e fornece informação sobre sua corrente de magnetização. O circuito de teste para esse ensaio está mostrado na Figura 6-53a. Wattímetros, um voltímetro e três amperímetros são conectados a um motor de indução, que é deixado livre para girar. As perdas por atrito e ventilação são a única carga do motor. Desse modo, toda a  $P_{\text{conv}}$  desse motor é consumida por perdas mecânicas e o escorregamento do motor é muito pequeno (possivelmente tão baixo quanto 0,001 ou menos). O circuito equivalente desse motor está mostrado na Figura 6-53b. Com seu escorregamento muito pequeno, a resistência correspondente à potência convertida,  $R_2(1-s)/s$ , é muitíssimo maior do que a resistência  $R_2$  correspondente às perdas no cobre do rotor e muito maior do que a reatância  $X_2$  do rotor. Nesse caso, o circuito equivalente reduz-se aproximadamente ao último circuito da Figura 6-53b, no qual o resistor de saída está em paralelo com a reatância de magnetização  $X_M$  e as perdas no núcleo  $R_C$ .

Nesse motor em condições a vazio, a potência de entrada medida pelos instrumentos deve ser igual às perdas do motor. As perdas no cobre do rotor são desprezíveis porque a corrente  $I_2$  é *extremamente* pequena [devido à elevada resistência de carga  $R_2(1-s)/s$ ]. Portanto, elas podem ser ignoradas. As perdas no cobre do estator são dadas por

$$P_{\text{PCE}} = 3I_1^2 R_1 \quad (6-25)$$

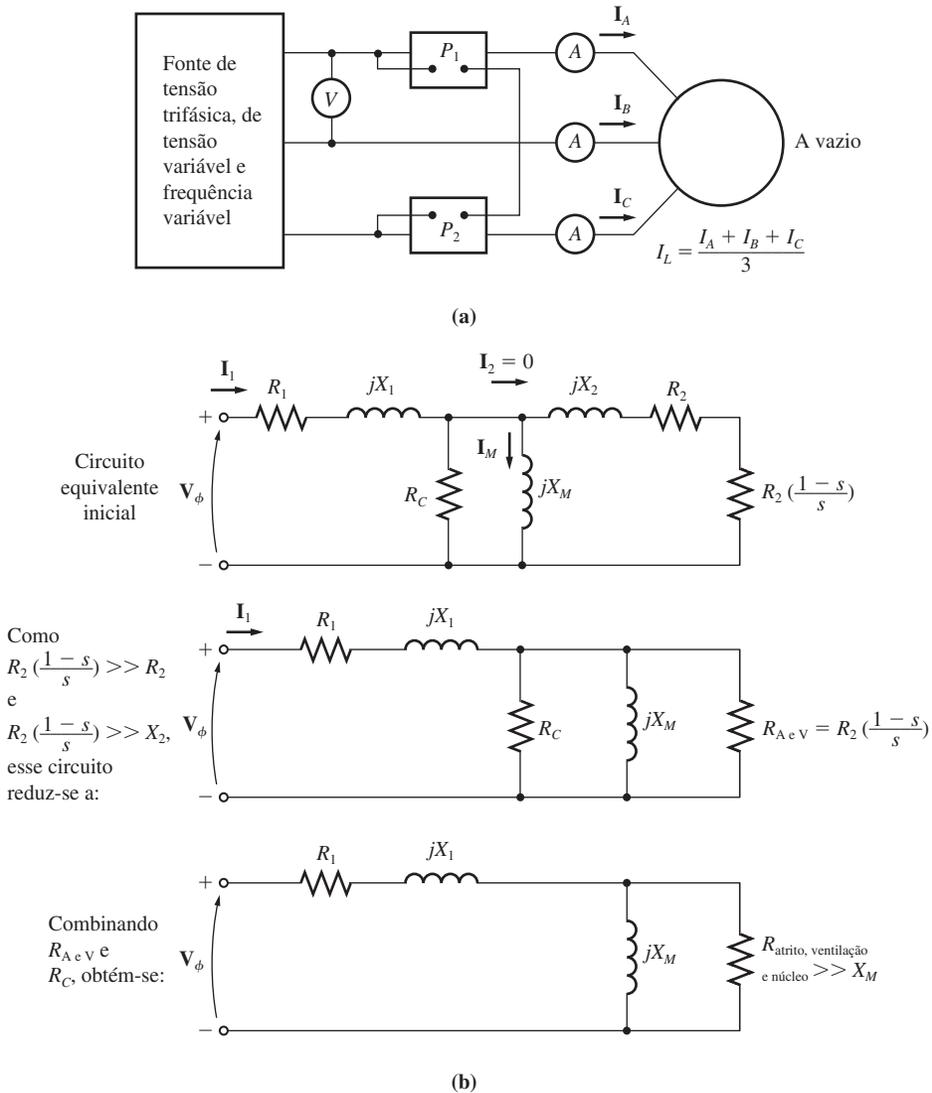
Assim, a potência de entrada deve ser igual a

$$\begin{aligned} P_{\text{entrada}} &= P_{\text{PCE}} + P_{\text{núcleo}} + P_{\text{AeV}} + P_{\text{diversas}} \\ &= 3I_1^2 R_1 + P_{\text{rot}} \end{aligned} \quad (6-58)$$

em que  $P_{\text{rot}}$  são as perdas rotacionais do motor:

$$P_{\text{rot}} = P_{\text{núcleo}} + P_{\text{AeV}} + P_{\text{diversas}} \quad (6-59)$$

\* N. de T.: No Brasil, esses ensaios são padronizados pela ABNT.



**FIGURA 6-53**

O ensaio a vazio de um motor de indução: (a) circuito de teste; (b) circuito equivalente resultante do motor. Observe que, a vazio, a impedância do motor é basicamente a combinação em série de  $R_1$ ,  $jX_1$  e  $jX_M$ .

Portanto, conhecendo-se a potência de entrada do motor, as perdas rotacionais da máquina podem ser determinadas.

O circuito equivalente que descreve o funcionamento do motor nessas condições contém os resistores  $R_C$  e  $R_2(1 - s)/s$  em paralelo com a reatância de magnetização  $X_M$ . Em um motor de indução, a corrente necessária para estabelecer um campo magnético é bem elevada, devido à alta relutância de seu entreferro. Desse modo, a reatância  $X_M$  será muito menor do que as resistências em paralelo com ela e o fator de potência geral de entrada será muito baixo. Com a elevada corrente em atraso, a

maior parte da queda de tensão será sobre os componentes indutivos do circuito. A impedância de entrada equivalente é aproximadamente

$$|Z_{eq}| = \frac{V_{\phi}}{I_{1,vz}} \approx X_1 + X_M \quad (6-60)$$

e, se  $X_1$  puder ser obtida de algum outro modo, a impedância de magnetização do motor será conhecida.

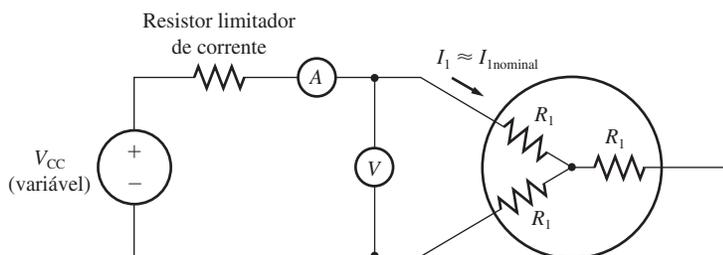
### O ensaio CC para a resistência de estator

A resistência de rotor  $R_2$  desempenha um papel extremamente crítico no funcionamento de um motor de indução. Entre outras coisas,  $R_2$  determina a forma da curva de conjugado *versus* velocidade, determinando a velocidade na qual o conjugado máximo ocorre. Um ensaio padrão denominado *ensaio de rotor bloqueado* pode ser usado para determinar a resistência total do circuito do motor (esse ensaio será visto na próxima seção). Entretanto, esse teste encontra apenas a resistência *total*. Para obter com exatidão a resistência  $R_2$  do rotor, é necessário conhecer  $R_1$  para que ela seja subtraída do total.

Há um teste para  $R_1$  que independe de  $R_2$ ,  $X_1$  e  $X_2$ . Esse teste é denominado *ensaio CC*. Basicamente, uma tensão CC é aplicada aos enrolamentos do estator de um motor de indução. Como a corrente é contínua, não haverá tensão induzida no circuito do rotor e fluxo resultante de corrente no rotor. Além disso, a reatância do motor é zero com corrente contínua. Portanto, a única grandeza que limita o fluxo de corrente no motor é a resistência de estator, a qual pode ser determinada.

O circuito básico para o ensaio CC está ilustrado na Figura 6-54. Essa figura mostra uma fonte de tensão CC conectada a dois dos três terminais de um motor de indução ligado em Y. Para realizar o ensaio, a corrente nos enrolamentos do estator é ajustada para o valor nominal e, em seguida, a tensão entre os terminais é medida. A corrente nos enrolamentos do estator é ajustada para o valor nominal como uma tentativa de aquecer os enrolamentos com a mesma temperatura que eles teriam durante o funcionamento normal (lembre-se de que a resistência de enrolamento é uma função de temperatura).

A corrente na Figura 6-54 circula através de dois dos enrolamentos, de modo que a resistência total no caminho da corrente é  $2R_1$ . Portanto,



**FIGURA 6-54**  
Circuito usado no ensaio CC para resistência.

$$2R_1 = \frac{V_{CC}}{I_{CC}}$$

ou

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{2I_{CC}} \quad (6-61)$$

Com esse valor de  $R_1$ , as perdas no cobre do estator a vazio podem ser determinadas. As perdas rotacionais podem ser encontradas pela diferença entre a potência de entrada a vazio e as perdas no cobre do estator.

O valor de  $R_1$  calculado desse modo não é completamente exato porque ignora o efeito pelicular que ocorre quando uma tensão CA é aplicada aos enrolamentos. Mais detalhes sobre correções de temperatura e efeito pelicular podem ser encontrados na Norma 112 da IEEE.

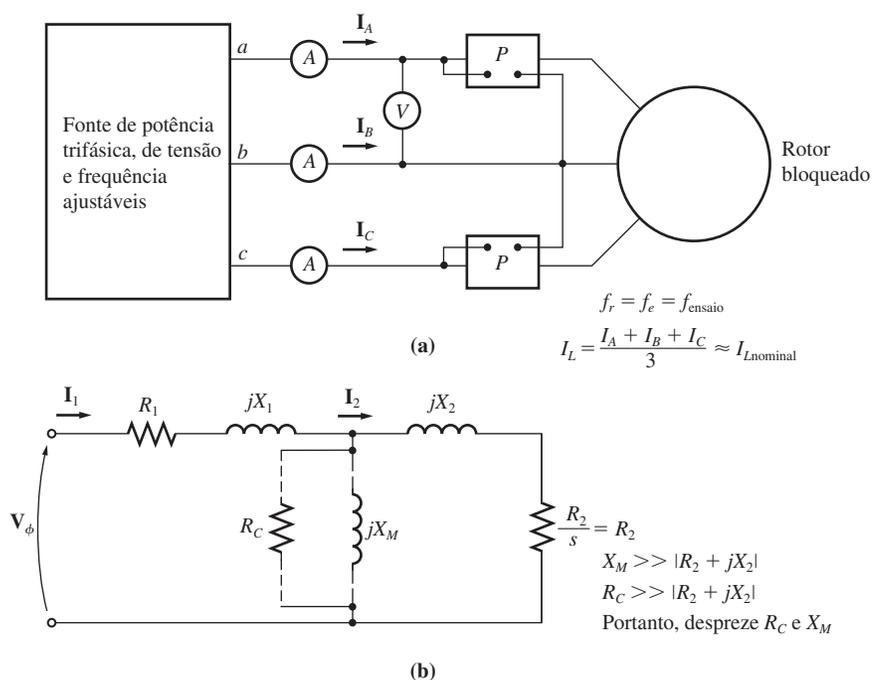
### O ensaio de rotor bloqueado

O terceiro teste que pode ser realizado em um motor de indução para determinar seus parâmetros de circuito é denominado *ensaio de rotor bloqueado* ou algumas vezes *ensaio de rotor travado*. Esse ensaio corresponde ao ensaio de curto-circuito de um transformador. Nesse ensaio, o rotor é bloqueado ou travado de modo que *não* possa se mover, uma tensão é aplicada ao motor e a tensão, corrente e potência resultantes são medidas.

A Figura 6-55a mostra as ligações usadas no ensaio de rotor bloqueado. Para executar esse ensaio, uma tensão CA é aplicada ao estator e o fluxo de corrente é ajustado para ser aproximadamente o valor de plena carga. Quando a corrente está em plena carga, a tensão, a corrente e a potência do motor que estão presentes são medidas. O circuito equivalente desse ensaio está mostrado na Figura 6-55b. Observe que, como o rotor não está se movendo, o escorregamento é  $s = 1$  e portanto a resistência  $R_2/s$  é simplesmente igual a  $R_2$  (um valor bem pequeno). Como os valores de  $R_2$  e  $X_2$  são muito baixos, quase toda a corrente de entrada circulará através delas, em vez de fluir através da reatância de magnetização  $X_M$ , que é muito maior. Portanto, o circuito nessas condições assemelha-se a uma combinação em série de  $X_1$ ,  $R_1$ ,  $X_2$  e  $R_2$ .

Entretanto, há um problema com esse ensaio. Em funcionamento normal, a frequência do estator é a frequência de linha do sistema de potência (50 ou 60 Hz). Nas condições de partida, o rotor também está com a frequência de linha. Por outro lado, nas condições normais de funcionamento, o escorregamento da maioria dos motores é de apenas 2 a 4% e a frequência resultante do rotor está na faixa de 1 a 3 Hz. Isso cria um problema no sentido de que *a frequência de linha não representa as condições normais de funcionamento do rotor*. Como, nos motores das classes B e C, a resistência efetiva do rotor depende muito da frequência, nesse ensaio uma frequência não correta do rotor pode levar a resultados enganadores. Uma solução típica é usar uma frequência que é 25% ou menos a frequência nominal. Embora essa solução seja aceitável para rotores de resistência basicamente constante (classes A e D), ela deixa muito a desejar quando se está tentando determinar a resistência normal do rotor para o caso de rotores de resistência variável. Devido a esse e a outros problemas similares, muito cuidado deve ser tomado na realização de medidas nesses ensaios.

Depois que a tensão e a frequência do ensaio estiverem ajustadas, a corrente do motor é ajustada rapidamente até apresentar um valor em torno da corrente nominal.



**FIGURA 6-55** O ensaio de rotor bloqueado para um motor de indução: (a) circuito de teste; (b) circuito equivalente do motor.

A seguir, a potência, a tensão e a corrente de entrada são medidas antes que o rotor possa aquecer demais. A potência de entrada do motor é dada por

$$P = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta$$

de modo que o fator de potência do rotor bloqueado pode ser obtido de

$$\text{FP} = \cos \theta = \frac{P_{\text{entrada}}}{\sqrt{3}V_T I_L} \tag{6-62}$$

e o ângulo de impedância  $\theta$  é igual a  $\arccos \text{FP}$ .

O valor da impedância total do circuito do motor, com o rotor bloqueado (RB), neste momento é

$$|Z_{\text{RB}}| = \frac{V_\phi}{I_1} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_L} \tag{6-63}$$

e o ângulo da impedância total é  $\theta$ . Portanto,

$$\begin{aligned} Z_{\text{RB}} &= R_{\text{RB}} + jX'_{\text{RB}} \\ &= |Z_{\text{RB}}| \cos \theta + j|Z_{\text{RB}}| \sin \theta \end{aligned} \tag{6-64}$$

Tipo de rotor	$X_1$ e $X_2$ em função de $X_{RB}$	
	$X_1$	$X_2$
Rotor bobinado	$0,5 X_{RB}$	$0,5 X_{RB}$
Classe A	$0,5 X_{RB}$	$0,5 X_{RB}$
Classe B	$0,4 X_{RB}$	$0,6 X_{RB}$
Classe C	$0,3 X_{RB}$	$0,7 X_{RB}$
Classe D	$0,5 X_{RB}$	$0,5 X_{RB}$

**FIGURA 6-56**

Regras práticas para dividir a reatância do circuito entre o rotor e o estator.

A resistência com o rotor bloqueado  $R_{RB}$  é igual a

$$R_{RB} = R_1 + R_2 \tag{6-65}$$

ao passo que a reatância  $X'_{RB}$  com o rotor bloqueado é igual a

$$X'_{RB} = X'_1 + X'_2 \tag{6-66}$$

em que  $X'_1$  e  $X'_2$  são as reatâncias do estator e do rotor *na frequência do ensaio*, respectivamente.

A resistência do rotor  $R_2$  pode ser obtida agora de

$$R_2 = R_{RB} - R_1 \tag{6-67}$$

em que  $R_1$  foi determinada no ensaio CC. A reatância total do rotor referida ao estator também pode ser encontrada. Como a reatância é diretamente proporcional à frequência, a reatância total equivalente, na frequência normal de funcionamento, é dada por

$$X_{RB} = \frac{f_{nominal}}{f_{ensaio}} X'_{RB} = X_1 + X_2 \tag{6-68}$$

Infelizmente, não há uma maneira simples de separar as contribuições das reatâncias do estator e do rotor entre si. Ao longo dos anos, a experiência mostrou que os motores com certas formas construtivas apresentam determinadas proporções entre as reatâncias do rotor e do estator. A Figura 6-56 resume essa experiência. Na prática normal, não importa realmente de que forma  $X_{RB}$  é dividida, porque a reatância aparece como a soma  $X_1 + X_2$  em todas as equações de conjugado.

**EXEMPLO 6-8** Os seguintes dados foram obtidos de ensaios com um motor de indução de 7,5 HP, quatro polos, 208 V, 60 Hz, classe A e ligado em Y, cuja corrente nominal é 28 A.

Ensaio CC:

$$V_{CC} = 13,6 \text{ V} \quad I_{CC} = 28,0 \text{ A}$$

Ensaio a vazio:

$$\begin{aligned} V_T &= 208 \text{ V} & f &= 60 \text{ Hz} \\ I_A &= 8,12 \text{ A} & P_{entrada} &= 420 \text{ W} \end{aligned}$$

$$I_B = 8,20 \text{ A}$$

$$I_C = 8,18 \text{ A}$$

Ensaio de rotor bloqueado:

$$V_T = 25 \text{ V} \qquad f = 15 \text{ Hz}$$

$$I_A = 28,1 \text{ A} \qquad P_{\text{entrada}} = 920 \text{ W}$$

$$I_B = 28,0 \text{ A}$$

$$I_C = 27,6 \text{ A}$$

(a) Construa o circuito equivalente por fase desse motor.

(b) Encontre o escorregamento no conjugado máximo e o valor do próprio conjugado máximo.

### Solução

(a) Do ensaio CC, temos

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{2I_{CC}} = \frac{13,6 \text{ V}}{2(28,0 \text{ A})} = 0,243 \Omega$$

Do ensaio a vazio, vem

$$I_{L, \text{ média}} = \frac{8,12 \text{ A} + 8,20 \text{ A} + 8,18 \text{ A}}{3} = 8,17 \text{ A}$$

$$V_{\phi, \text{ vz}} = \frac{208 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 120 \text{ V}$$

Portanto,

$$|Z_{\text{vz}}| = \frac{120 \text{ V}}{8,17 \text{ A}} = 14,7 \Omega = X_1 + X_M$$

Quando  $X_1$  é conhecida,  $X_M$  pode ser encontrada. As perdas no cobre do estator são

$$P_{\text{PCE}} = 3I_1^2 R_1 = 3(8,17 \text{ A})^2(0,243 \Omega) = 48,7 \text{ W}$$

Portanto, as perdas rotacionais a vazio são

$$\begin{aligned} P_{\text{rot}} &= P_{\text{entrada, vz}} - P_{\text{PCE, vz}} \\ &= 420 \text{ W} - 48,7 \text{ W} = 371,3 \text{ W} \end{aligned}$$

Do ensaio de rotor bloqueado, temos

$$I_{L, \text{ média}} = \frac{28,1 \text{ A} + 28,0 \text{ A} + 27,6 \text{ A}}{3} = 27,9 \text{ A}$$

A impedância de rotor bloqueado é

$$|Z_{\text{RB}}| = \frac{V_{\phi}}{I_A} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_A} = \frac{25 \text{ V}}{\sqrt{3}(27,9 \text{ A})} = 0,517 \Omega$$

e o ângulo de impedância  $\theta$  é

$$\begin{aligned} \theta &= \arccos \frac{P_{\text{entrada}}}{\sqrt{3}V_T I_L} \\ &= \arccos \frac{920 \text{ W}}{\sqrt{3}(25 \text{ V})(27,9 \text{ A})} \\ &= \arccos 0,762 = 40,4^\circ \end{aligned}$$

Portanto,  $R_{RB} = 0,517 \cos 40,4^\circ = 0,394 \Omega = R_1 + R_2$ . Como  $R_1 = 0,243 \Omega$ , então  $R_2$  deve ser  $0,151 \Omega$ . A reatância em 15 Hz é

$$X'_{RB} = 0,517 \sin 40,4^\circ = 0,335 \Omega$$

A reatância equivalente em 60 Hz é

$$X_{RB} = \frac{f_{\text{nominal}}}{f_{\text{ensaio}}} X'_{RB} = \left( \frac{60 \text{ Hz}}{15 \text{ Hz}} \right) 0,335 \Omega = 1,34 \Omega$$

Nos motores de indução da classe A, assume-se que essa reatância é dividida igualmente entre o rotor e o estator, de modo que

$$X_1 = X_2 = 0,67 \Omega$$

$$X_M = |Z_{vz}| - X_1 = 14,7 \Omega - 0,67 \Omega = 14,03 \Omega$$

O circuito equivalente final por fase está mostrado na Figura 6-57.

(b) Para esse circuito equivalente, os equivalentes Thévenin são encontrados a partir das Equações (6-41b), (6-44) e (6-45), obtendo-se

$$V_{TH} = 114,6 \text{ V} \quad R_{TH} = 0,221 \Omega \quad X_{TH} = 0,67 \Omega$$

Portanto, o escorregamento no conjugado máximo é dado por

$$\begin{aligned} s_{\max} &= \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} & (6-53) \\ &= \frac{0,151 \Omega}{\sqrt{(0,243 \Omega)^2 + (0,67 \Omega + 0,67 \Omega)^2}} = 0,111 = 11,1\% \end{aligned}$$

O conjugado máximo desse motor é dado por

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{\text{sinc}} [R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]} & (6-54) \\ &= \frac{3(114,6 \text{ V})^2}{2(188,5 \text{ rad/s})[0,221 \Omega + \sqrt{(0,221 \Omega)^2 + (0,67 \Omega + 0,67 \Omega)^2}]} \\ &= 66,2 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

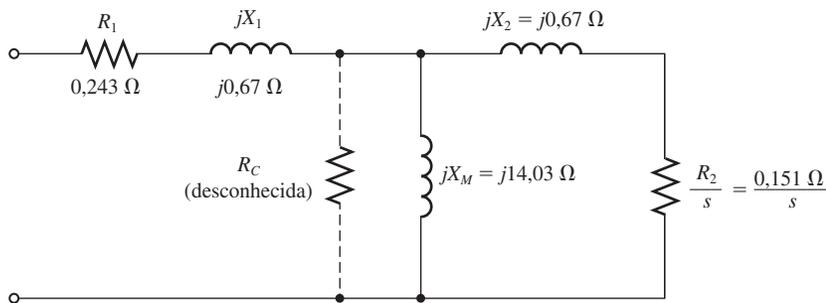


FIGURA 6-57

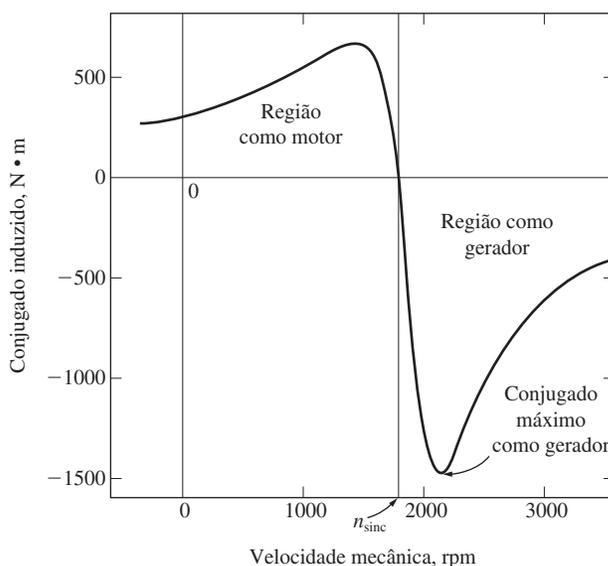
Circuito equivalente por fase do motor do Exemplo 6-8.

## 6.12 O GERADOR DE INDUÇÃO

A curva característica de conjugado *versus* velocidade da Figura 6-20 mostra que, se um motor de indução for acionado por um máquina motriz externa com uma velocidade *superior* a  $n_{\text{sinc}}$ , o sentido do seu conjugado induzido será invertido e ele funcionará como gerador. À medida que o conjugado aplicado ao seu eixo pela máquina motriz cresce, a quantidade de potência produzida pelo gerador de indução também aumenta. Como a Figura 6-58 mostra, há um conjugado induzido máximo possível no modo de funcionamento como gerador. Esse conjugado é conhecido como *conjugado máximo como gerador*.\* Se uma máquina motriz aplicar ao eixo do gerador de indução um conjugado maior do que o conjugado máximo como gerador, a velocidade do gerador irá disparar.

Como gerador, uma máquina de indução tem diversas limitações. Como lhe falta um circuito de campo separado, um gerador de indução *não pode* produzir potência reativa. De fato, ela consome potência reativa e, portanto, uma fonte externa de potência reativa deve ser ligada permanentemente a ela para manter o campo magnético em seu estator. Essa fonte externa de potência reativa também deve controlar a tensão de terminal do gerador – sem corrente de campo, um gerador de indução não pode controlar sua própria tensão de saída. Normalmente, a tensão do gerador é mantida pelo sistema de potência externo ao qual ela está ligada.

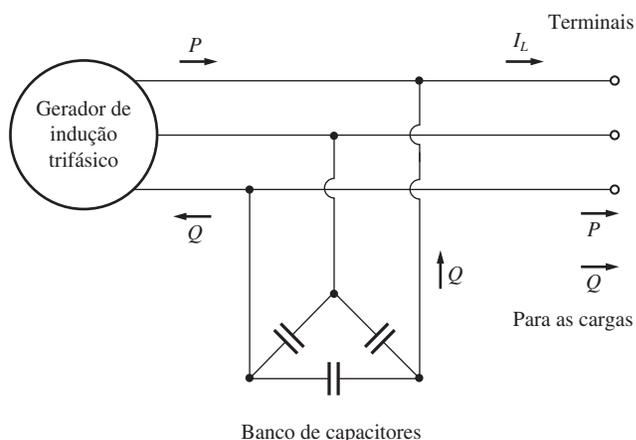
A vantagem principal de um gerador de indução é sua simplicidade. Um gerador de indução não necessita de um circuito de campo separado e não precisa ser acionado continuamente com velocidade fixa. Enquanto a velocidade da máquina tiver um valor superior à velocidade  $n_{\text{sinc}}$  do sistema de potência ao qual ela está ligada,



**FIGURA 6-58**

A característica de conjugado *versus* velocidade de uma máquina de indução, mostrando a região de funcionamento como gerador. Observe o conjugado máximo como gerador.

\* N. de T.: *Pushover torque*, em inglês.


**FIGURA 6-59**

Um gerador de indução operando isolado com um banco de capacitores para fornecer potência reativa.

ela funcionará como gerador. Quanto maior o conjugado aplicado ao seu eixo (até um certo ponto), maior será a potência de saída resultante. O fato de não haver necessidade de um controle sofisticado faz com que esse gerador seja uma boa escolha para geradores eólicos, sistemas recuperadores de calor e fontes suplementares similares de potência que são conectadas a um sistema de potência. Em tais aplicações, a correção do fator de potência pode ser propiciada por capacitores e a tensão de terminal do gerador pode ser controlada pelo sistema de potência externo.

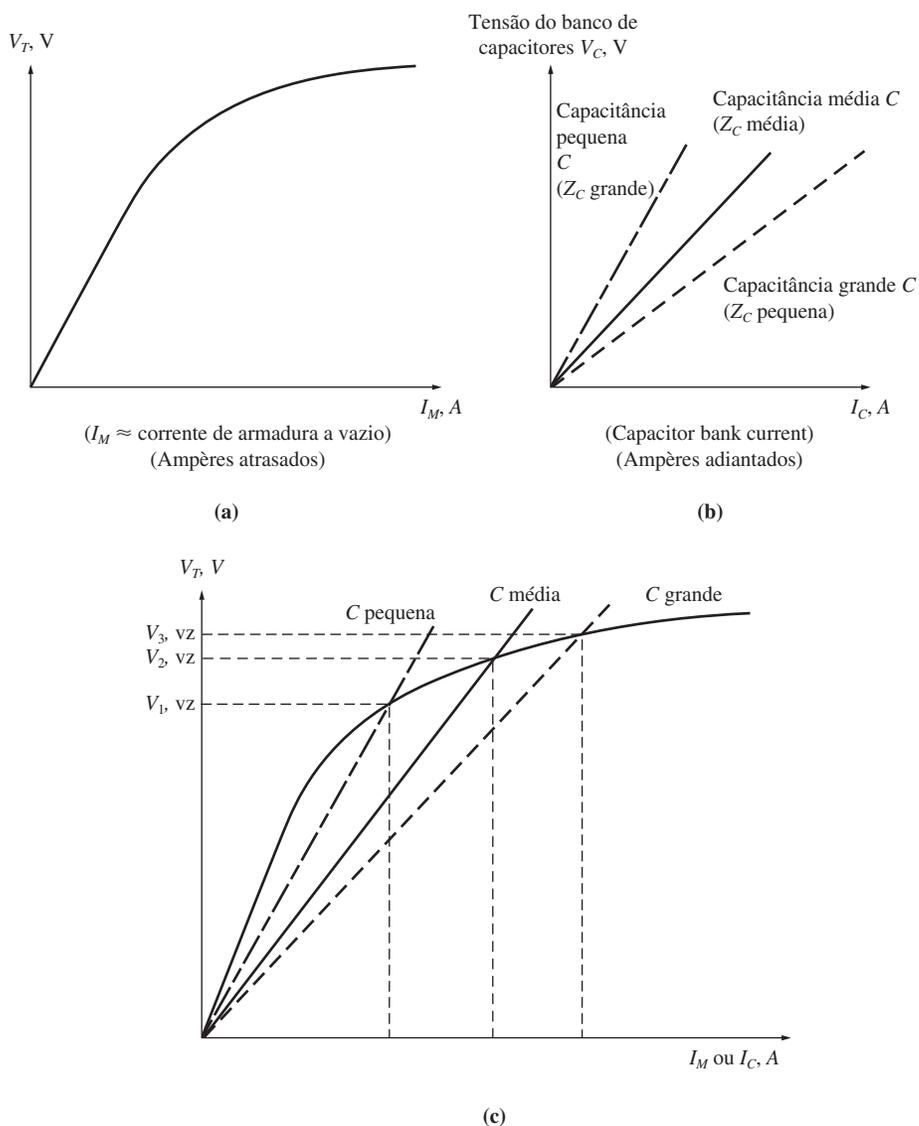
### O gerador de indução operando isolado

Uma máquina de indução também pode funcionar como um gerador isolado, independentemente de qualquer sistema de potência, desde que capacitores estejam disponíveis para fornecer a potência reativa requerida pelo gerador e por quaisquer outras cargas acopladas. Esse gerador de indução isolado está mostrado na Figura 6-59.

A corrente de magnetização  $I_M$  exigida por uma máquina de indução em função da tensão de terminal pode ser obtida fazendo a máquina funcionar como um motor a vazio e medindo sua corrente de armadura em função da tensão de terminal. Essa curva de magnetização está mostrada na Figura 6-60a. Para alcançar um dado nível de tensão em um gerador de indução, capacitores externos deverão suprir a corrente de magnetização correspondente àquele nível.

Como a corrente reativa que um capacitor pode fornecer é *diretamente proporcional* à tensão que lhe é aplicada, o lugar de todas as combinações possíveis de tensão e corrente de um capacitor é uma linha reta. Tal gráfico de tensão *versus* corrente para uma dada frequência está mostrado na Figura 6-60b. *Se um conjunto trifásico de capacitores for conectado aos terminais de um gerador de indução, a tensão a vazio do gerador de indução será a intersecção da curva de magnetização do gerador e da reta de carga do capacitor.* A tensão de terminal a vazio de um gerador de indução para três conjuntos diferentes de capacitores está mostrada na Figura 6-60c.

Quando um gerador de indução começa a funcionar, como surge sua tensão? Inicialmente, quando um gerador de indução começa a girar, o magnetismo residual



**FIGURA 6-60**

(a) A curva de magnetização de uma máquina de indução. Trata-se do gráfico da tensão de terminal da máquina em função da sua corrente de magnetização (que está *atrasada* em relação à tensão de fase em aproximadamente  $90^\circ$ ). (b) Gráfico da característica de tensão *versus* corrente de um banco de capacitores. Observe que, quanto maior a capacitância, maior será a corrente para uma dada tensão. Essa corrente está *adiantada* em relação à tensão de fase em aproximadamente  $90^\circ$ . (c) A tensão de terminal a vazio de um gerador de indução isolado pode ser encontrada plotando a característica de terminal do gerador e a característica de tensão *versus* corrente do capacitor no mesmo gráfico. A intersecção das duas curvas é o ponto onde a potência reativa demandada pelo gerador é suprida exatamente pelos capacitores. Esse ponto fornece a *tensão de terminal a vazio* do gerador.

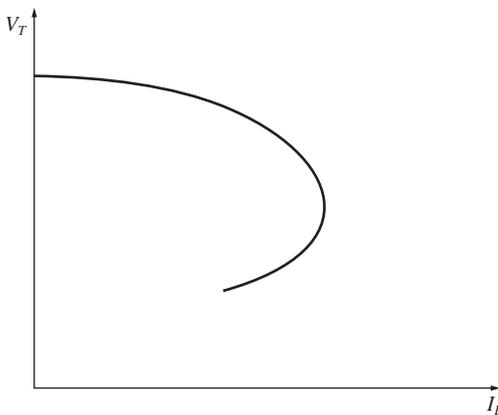
presente no seu circuito de campo produz uma pequena tensão. Essa pequena tensão produz um fluxo capacitivo de corrente que faz aumentar a tensão. Isso por sua vez aumenta mais a corrente capacitiva e assim por diante, até que atinja a velocidade normal. Se não houver fluxo residual no rotor do gerador de indução, não haverá surgimento de tensão. Nesse caso, ele deverá ser magnetizado fazendo o gerador funcionar momentaneamente como motor.

O problema mais sério com um gerador de indução é que sua tensão varia grandemente com as mudanças de carga, especialmente as cargas reativas. A Figura 6-61 mostra curvas características de terminal, típicas de um gerador de indução que está funcionando isolado, com uma capacitância em paralelo constante. Observe que, no caso de carga indutiva, a tensão entra *muito* rapidamente em colapso. Isso ocorre porque os capacitores fixos devem suprir toda a potência reativa requerida por ambos, o gerador e a carga. Qualquer potência reativa desviada para a carga faz o gerador retroceder em sua curva de magnetização, causando uma queda acentuada na tensão do gerador. Portanto, é muito difícil dar partida a um motor de indução que está ligado a um sistema de potência alimentado por um gerador de indução – técnicas especiais devem ser empregadas para aumentar a capacitância efetiva durante a partida e então diminuí-la durante o funcionamento normal

Devido à natureza da característica de conjugado *versus* velocidade da máquina de indução, a frequência de um gerador de indução varia com as mudanças de carga: mas, como a característica de conjugado *versus* velocidade tem uma inclinação muito acentuada na faixa normal de operação, a variação total de frequência é limitada usualmente a menos de 5%. Essa faixa de variação pode ser bem aceitável em muitas aplicações de geradores isolados ou de emergência.

### Aplicações do gerador de indução

Os geradores de indução estiveram em uso desde o início do século XX, mas, nas décadas de 1960 e 1970, eles deixaram de ser usados em grande escala. Entretanto, o gerador de indução ressurgiu com a crise do preço do petróleo de 1973. Com os custos de energia muito elevados, a recuperação de energia tornou-se uma parte importante da economia em muitos processos industriais. O gerador de indução é ideal para tais aplicações porque requer muito pouco em termos de sistemas de controle ou de manutenção.



**FIGURA 6-61**

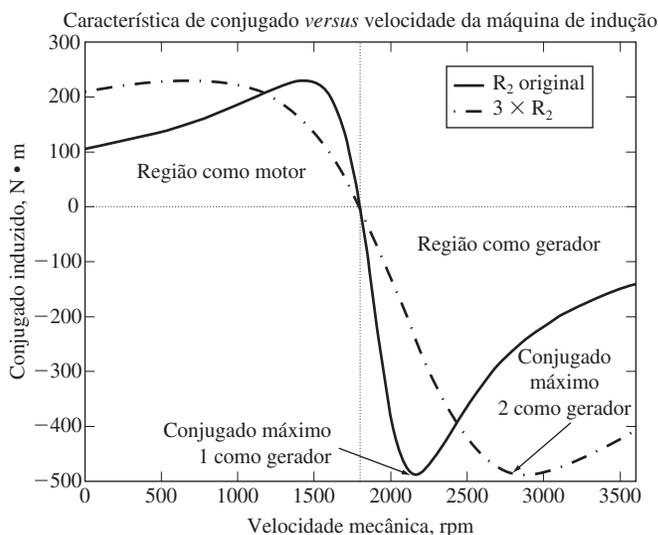
A característica de tensão *versus* corrente de um gerador de indução para uma carga com fator de potência atrasado constante.

Devido à sua simplicidade e ao pequeno tamanho por quilowatt de potência de saída, os geradores de indução são também muito indicados para geradores eólicos de pequeno porte. Muitos geradores eólicos à venda no comércio são projetados para operar em paralelo com os grandes sistemas de potência, fornecendo uma fração das necessidades totais de potência dos consumidores. Nessa forma de operação, pode-se deixar o controle de tensão e frequência com o sistema de potência. Além disso, capacitores estáticos podem ser usados para corrigir o fator de potência.

É interessante observar que as máquinas de indução de rotor bobinado vêm resurgindo na forma de geradores de indução eólicos. Como foi mencionado anteriormente, as máquinas de rotor bobinado são mais caras do que as máquinas com rotor de gaiola de esquilo e requerem mais manutenção devido aos anéis deslizantes e às escovas incluídas na sua construção. Entretanto, as máquinas de rotor bobinado permitem controlar a resistência do rotor, como foi discutido na Seção 6-9. A inserção ou remoção da resistência do rotor altera a forma da característica de conjugado *versus* velocidade e, portanto, a velocidade de funcionamento da máquina (veja a Figura 6-45).

Essa característica das máquinas de rotor bobinado pode ser muito importante para os geradores de indução eólicos. O vento é uma forma de energia bem mutável e incerta: algumas vezes sopra fortemente, algumas vezes sopra fracamente e algumas não sopra. Para usar uma máquina de indução comum com gaiola de esquilo como gerador, o vento deve estar girando o eixo da máquina com uma velocidade entre  $n_{\text{sinc}}$  e a velocidade máxima como gerador (como mostrado na Figura 6-58). Essa é uma faixa relativamente estreita de velocidades, limitando as condições de vento dentro das quais um gerador eólico pode ser usado.

Nesse caso, as máquinas de rotor bobinado são melhores porque é possível inserir uma resistência de rotor e assim alterar a forma da característica de conjugado



**FIGURA 6-62**

A característica de conjugado *versus* velocidade de um gerador de indução de rotor bobinado, com a resistência de rotor original e com três vezes a resistência de rotor original. Observe que a faixa de velocidades dentro da qual a máquina pode funcionar como gerador é aumentada grandemente pelo acréscimo de resistência ao rotor.

versus velocidade. A Figura 6-62 dá um exemplo de máquina de indução de rotor bobinado, com a resistência de rotor  $R_2$  original e a resistência de rotor triplicada  $3R_2$ . Observe que o conjugado máximo como gerador é o mesmo em ambos os casos, mas a faixa de velocidades entre  $n_{\text{sinc}}$  e a velocidade máxima como gerador é muito maior quando o gerador está com a resistência de rotor inserida. Isso permite que o gerador produza potência útil em uma faixa mais ampla de velocidades do vento.

Praticamente, nos geradores modernos de indução de rotor bobinado, controladores de estado sólido substituem os resistores para ajustar a resistência de rotor efetiva. Entretanto, o efeito sobre a característica de conjugado versus velocidade é o mesmo.

### 6.13 ESPECIFICAÇÕES NOMINAIS DO MOTOR DE INDUÇÃO

A Figura 6-63 mostra uma placa de identificação de um motor de indução típico de pequeno a médio porte e eficiência elevada. As especificações nominais mais importantes presentes na placa são

1. Potência de saída (essa potência será em HP (*horsepower*) nos Estados Unidos e em quilowatts no restante do mundo.)
2. Tensão
3. Corrente
4. Fator de potência

<b>SPARTAN™ MOTOR</b>																
MODEL 27987J-X																
TYPE CJ4B						FRAME 324TS										
VOLTS 230/460						OC AMB. INS. CL. 40 B										
FRT. BRG. 210 SF						EXT. BRG. 312 SF										
SERV. FACT. 1.0						OPER. INSTR. C-517										
PHASE 3				HZ 60				CODE G		WDGS. 1						
H.P. 40																
R.P.M. 3565																
AMPS 97/48.5																
NEMA NOM. EFF. .936																
NOM. P.F. .827																
MIN. AIR VEL FT/MIN.																
DUTY Cont										NEMA DESIGN B						
FULL WINDING						PART WINDING										
LOW VOLTAGE						LOW VOLTAGE										
L1	L2	L3		L1	L2	L3	JOIN			L1	L2	L3				
T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T5	T6	STARTER			T1	T2	T3	T4
T7	T8	T9	T6	T7	T8	T9	START IM CONTACTOR			T7	T8	T9	T6			
						RUN 2M CONTACTOR										

SNP00205-0100

**LOUIS ALLIS**  
Milwaukee Wisconsin 53201

**FIGURA 6-63**  
Placa de identificação de um motor de indução típico de eficiência elevada. (Cortesia de MagneTek, Inc.)

5. Velocidade
6. Eficiência nominal
7. Classe de projeto NEMA
8. Código de partida

A placa de identificação de um motor típico de indução de eficiência padrão seria similar, exceto pelo fato de que ele poderia não mostrar a eficiência nominal.

O limite de tensão do motor baseia-se na corrente de magnetização máxima aceitável, porque quanto maior a tensão, mais saturado torna-se o ferro do motor e mais elevada fica a corrente de magnetização. Como no caso dos transformadores e das máquinas síncronas, um motor de indução de 60 Hz poderá ser usado em um sistema de potência de 50 Hz, mas somente se a tensão nominal for diminuída proporcionalmente à diminuição da frequência. Essa redução do valor nominal é necessária porque o fluxo no núcleo do motor é proporcional à integral da tensão aplicada. Para manter constante o fluxo máximo no núcleo, quando o intervalo de integração aumenta, o nível de tensão médio deve diminuir.

O limite de corrente de um motor de indução baseia-se no aquecimento máximo aceitável nos enrolamentos do motor. O limite de potência é definido pela combinação da tensão e da corrente nominais, juntamente com o fator de potência e a eficiência da máquina.

As classes de projeto NEMA, as letras dos códigos de partida e as eficiências nominais foram discutidas em seções anteriores deste capítulo.

## 6.14 SÍNTESE DO CAPÍTULO

O motor de indução é o tipo mais popular de motor CA devido à sua simplicidade e facilidade de operação. Um motor de indução não tem um circuito de campo separado. Em vez disso, ele depende da ação de transformador para induzir tensões e correntes no seu circuito de campo. De fato, um motor de indução é basicamente um transformador rotativo. Seu circuito equivalente é similar ao de um transformador, exceto pelos efeitos da velocidade variável.

Há dois tipos de rotores para motor de indução: rotor de gaiola de esquilo e rotor bobinado. Os rotores de gaiola de esquilo consistem em uma série de barras paralelas em torno de todo o rotor, que estão em curto-circuito em ambas as extremidades. Os rotores bobinados apresentam enrolamentos trifásicos completos, tendo suas fases trazidas para fora do rotor por meio de anéis deslizantes e escovas. Os rotores bobinados são mais caros e requerem mais manutenção do que os rotores de gaiola de esquilo. Por essa razão, eles são usados muito raramente (exceto ocasionalmente nos geradores de indução).

Um motor de indução funciona normalmente com uma velocidade próxima da velocidade síncrona, mas nunca pode operar exatamente em  $n_{\text{sinc}}$ . Sempre deve haver movimento relativo para que uma tensão seja induzida no circuito de campo do motor de indução. A tensão de rotor induzida pelo movimento relativo entre o rotor e o campo magnético do estator produz uma corrente no rotor e essa corrente interage com o campo magnético do estator para produzir o conjugado induzido no motor.

Em um motor de indução, o escorregamento ou velocidade em que ocorre o conjugado máximo pode ser controlado alterando a resistência do rotor. O valor desse conjugado máximo independe da resistência do rotor. Uma resistência elevada de

rotor baixa a velocidade na qual ocorre o conjugado máximo, aumentando assim o conjugado de partida do motor. Entretanto, o preço por esse conjugado de partida é uma regulação da velocidade muito pobre na faixa normal de funcionamento. Uma resistência de rotor baixa, por outro lado, reduz o conjugado de partida do motor e melhora a regulação de velocidade. Qualquer projeto normal de motor de indução deve ser um compromisso entre esses dois requisitos conflitantes.

Uma maneira de conseguir tal compromisso é através do emprego de rotores de barras profundas ou de dupla gaiola de esquilo. Esses rotores têm uma resistência efetiva elevada na partida e uma resistência efetiva baixa em condições normais de funcionamento. Isso resulta em um conjugado de partida elevado e também em uma boa regulação de velocidade no mesmo motor. O mesmo efeito poderá ser alcançado com um motor de indução de rotor bobinado se a resistência de campo do rotor for variada.

Os motores de indução são classificados em uma série de classes de projeto NEMA, de acordo com suas características de conjugado *versus* velocidade. Os motores da classe A são motores de indução padrão, com conjugado de partida normal, corrente de partida relativamente alta, baixo escorregamento e conjugado máximo elevado. Quando estão ligados diretamente à linha de potência, esses motores podem causar problemas de partida devido às elevadas correntes. Os motores da classe B são construídos com barras profundas para produzir conjugado de partida normal, corrente de partida mais baixa, escorregamento um pouco mais elevado e conjugado máximo um pouco menor, se comparados com os motores da classe A. Como eles requerem em torno de 25% menos corrente de partida, esses motores trabalham melhor em aplicações nas quais o sistema de potência não pode atender a demanda de surtos de corrente elevada. Os motores da classe C são construídos com barras profundas ou com dupla gaiola de esquilo para produzir um conjugado de partida elevado com baixa corrente de partida, à custa de um escorregamento maior e um conjugado máximo menor. Esses motores podem ser usados em aplicações nas quais é necessário um conjugado de partida elevado sem consumir correntes excessivas de linha. Os motores da classe D usam barras de resistência elevada para produzir conjugados muito elevados de partida com correntes baixas, à custa de um escorregamento muito alto. O conjugado máximo é bem elevado nesta classe, porém ele poderá ocorrer com escorregamentos extremamente altos.

O controle de velocidade dos motores de indução pode ser obtido pela alteração do número de polos da máquina, pela mudança da frequência elétrica aplicada, pela variação da tensão de terminal aplicada ou pela modificação da resistência do rotor no caso de um motor de indução de rotor bobinado. Todas essas técnicas são usadas regularmente (exceto no caso de variação da resistência do rotor), mas de longe a técnica mais comum atualmente utilizada é a mudança da frequência elétrica aplicada por meio de um acionamento (inversor) de estado sólido.

Um motor de indução tem uma corrente de partida que é muitas vezes a corrente nominal do motor. Isso pode causar problemas para os sistemas de potência aos quais os motores estão conectados. A corrente de partida de um dado motor de indução é especificada por uma letra de código NEMA, que está gravada na placa de identificação do motor. Quando essa corrente de partida é alta demais para ser fornecida pelo sistema de potência, circuitos de partida de motor são usados para reduzir a corrente de partida a um nível seguro. Durante a partida, os circuitos de partida podem mudar as ligações do motor de  $\Delta$  para Y, podem inserir resistores extras ou podem reduzir a tensão aplicada (e a frequência).

A máquina de indução também pode ser usada como gerador desde que haja alguma fonte de potência reativa (capacitores ou uma máquina síncrona) disponível no sistema de potência. Um gerador de indução que está operando isolado tem sérios problemas de regulação de tensão, mas, quando ele funciona em paralelo com um grande sistema de potência, o sistema de potência pode controlar a tensão da máquina. Usualmente, os geradores de indução são máquinas relativamente pequenas e são usadas principalmente com fontes alternativas de energia, como geradores eólicos ou sistemas de recuperação de energia. Quase todos os geradores realmente de grande porte em uso são síncronos.

## PERGUNTAS

- 6.1 O que são o escorregamento e a velocidade de escorregamento de um motor de indução?
- 6.2 Como um motor de indução desenvolve conjugado?
- 6.3 Por que é impossível para um motor de indução operar na velocidade síncrona?
- 6.4 Construa e explique a forma da curva característica de conjugado *versus* velocidade típica de um motor de indução.
- 6.5 Que elemento do circuito equivalente tem controle mais direto sobre a velocidade na qual ocorre o conjugado máximo?
- 6.6 O que é um rotor gaiola de esquilo de barras profundas? Por que é usado? Que classe(s) de projeto NEMA pode(m) ser construído(s) com ele?
- 6.7 O que é um rotor de dupla gaiola de esquilo? Por que é usado? Que classe(s) de projeto NEMA pode(m) ser construído(s) com ele?
- 6.8 Descreva as características e usos dos motores de indução de rotor bobinado e de cada uma das classes de projeto NEMA dos motores de gaiola de esquilo.
- 6.9 Por que a eficiência de um motor de indução (rotor bobinado ou gaiola de esquilo) é tão pobre com escorregamentos elevados?
- 6.10 Mencione e descreva quatro modos de controle da velocidade dos motores de indução.
- 6.11 Por que é necessário reduzir a tensão aplicada a um motor de indução quando a frequência elétrica é diminuída?
- 6.12 Por que o controle de velocidade por tensão de terminal é limitado na faixa de funcionamento?
- 6.13 O que são letras de código de partida? O que elas dizem a respeito da corrente de partida de um motor de indução?
- 6.14 Como funciona um circuito resistivo de partida para um motor de indução?
- 6.15 Que informação é obtida com um ensaio de rotor bloqueado?
- 6.16 Que informação é obtida com um ensaio a vazio?
- 6.17 Que ações podem ser tomadas para melhorar a eficiência dos motores modernos de indução de eficiência elevada?
- 6.18 O que controla a tensão de terminal de um gerador de indução que funciona isolado?
- 6.19 Os geradores de indução são geralmente usados em que aplicações?
- 6.20 Como um motor de indução de rotor bobinado pode ser usado como conversor de frequência?
- 6.21 Como os diferentes padrões de tensão *versus* frequência afetam as características de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução?
- 6.22 Descreva as características principais do acionamento de estado sólido para o motor de indução que foi discutido na Seção 6.10.

- 6.23** Dois motores de indução de 480 V e 100 HP são construídos. Um deles é projetado para funcionamento em 50 Hz e o outro, para 60 Hz, mas fora isso eles são similares. Qual dessas máquinas é a maior?
- 6.24** Um motor de indução está funcionando nas condições nominais. Se a carga no eixo for aumentada, como serão alteradas as seguintes grandezas?
- Velocidade mecânica
  - Escorregamento
  - Tensão induzida no rotor
  - Corrente no rotor
  - Frequência do rotor
  - $P_{PCR}$
  - Velocidade síncrona

## PROBLEMAS

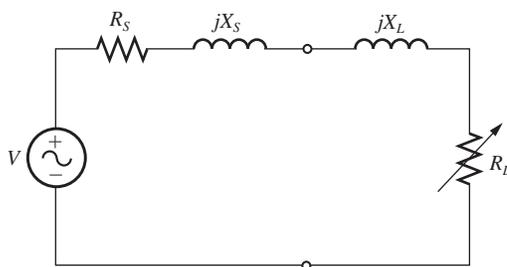
- 6.1** Um motor de indução trifásico de 220 V, seis polos e 50 Hz está operando com um escorregamento de 3,5%. Encontre:
- A velocidade dos campos magnéticos em rotações por minuto
  - A velocidade do rotor em rotações por minuto
  - A velocidade de escorregamento do rotor
  - A frequência do rotor em hertz
- 6.2** Responda às questões do Problema 6-1 para o caso de um motor de indução trifásico de 480 V, dois polos e 60 Hz, que está funcionando com um escorregamento de 0,025.
- 6.3** Um motor de indução trifásico de 60 Hz funciona a vazio com 715 rpm e a plena carga com 670 rpm.
- Quantos polos tem este motor?
  - Qual é o escorregamento com carga nominal?
  - Qual é a velocidade com um quarto da carga nominal?
  - Qual é a frequência elétrica do rotor com um quarto da carga nominal?
- 6.4** Um motor de indução de 50 kW, 460 V, 50 Hz e dois polos, tem um escorregamento de 5% quando está funcionando em condições de plena carga. Para essas condições, as perdas por atrito e ventilação são 700 W e as no cobre são 600 W. Encontre os seguintes valores nessas condições:
- A velocidade no eixo  $n_m$
  - A potência de saída em watts
  - O conjugado de carga  $\tau_{carga}$  em newtons-metros
  - O conjugado induzido  $\tau_{ind}$  em newtons-metros
  - A frequência do rotor em hertz
- 6.5** Um motor de indução de 208 V, quatro polos, 60 Hz, ligado em Y e de rotor bobinado tem potência nominal de 30 HP. Os componentes do seu circuito equivalente são

$$\begin{array}{lll}
 R_1 = 0,100 \Omega & R_2 = 0,070 \Omega & X_M = 10,0 \Omega \\
 X_1 = 0,210 \Omega & X_2 = 0,210 \Omega & \\
 P_{mec} = 500 \text{ W} & P_{diversas} \approx 0 & P_{núcleo} = 400 \text{ W}
 \end{array}$$

Para um escorregamento de 0,05, encontre

- A corrente de linha  $I_L$
- As perdas no cobre do estator  $P_{PCE}$

- (c) A potência de entreferro  $P_{EF}$
  - (d) A potência convertida da forma mecânica em elétrica  $P_{conv}$
  - (e) O conjugado induzido  $\tau_{ind}$
  - (f) O conjugado de carga  $\tau_{carga}$
  - (g) A eficiência total da máquina  $\eta$
  - (h) A velocidade do motor em rotações por minuto e em radianos por segundo
- 6.6** Para o motor do Problema 6-5, qual é o escorregamento no conjugado máximo? Qual é o valor desse conjugado?
- 6.7** (a) Calcule e plote a característica de conjugado *versus* velocidade do motor do Problema 6-5.  
(b) Calcule e plote a curva de potência de saída *versus* velocidade do motor do Problema 6-5.
- 6.8** Para o motor do Problema 6-5, quanta resistência adicional (referida ao circuito de estator) seria necessário acrescentar ao circuito do rotor para fazer com que o conjugado máximo ocorra nas condições de partida (quando o eixo não está se movendo)? Plote a característica de conjugado *versus* velocidade desse motor com a resistência adicional inserida.
- 6.9** Se o motor do Problema 6-5 tiver de funcionar em um sistema de potência de 50 Hz, o que deverá ser feito com sua tensão de alimentação? Por quê? Em 50 Hz, quais serão os valores dos componentes do circuito equivalente? Responda às perguntas do Problema 6-5 com a máquina operando em 50 Hz, com um escorregamento de 0,05 e tensão adequada para essa máquina.
- 6.10** Um motor de indução trifásico de 60 Hz e dois polos funciona com uma velocidade de 3580 rpm a vazio e de 3440 rpm a plena carga. Calcule o escorregamento e a frequência elétrica do rotor a vazio e a plena carga. Qual é a regulação de velocidade desse motor [Equação (3-68)]?
- 6.11** A potência de entrada do circuito de rotor de um motor de indução de seis polos e 60 Hz é 5 kW quando está funcionando a 1100 rpm. Quais são as perdas no cobre do rotor desse motor?
- 6.12** A potência que cruza o entreferro de um motor de indução de 60 Hz e quatro polos é 25 kW, e a potência convertida da forma elétrica em mecânica no motor é 23,2 kW.  
(a) Qual é o escorregamento do motor nesse momento?  
(b) Qual é o conjugado induzido nesse motor?  
(c) Assumindo que as perdas mecânicas são de 300 W com esse escorregamento, qual é o conjugado de carga do motor?
- 6.13** A Figura 6-18a mostra um circuito simples que consiste em uma fonte de tensão, um resistor e duas reatâncias. Encontre a tensão e impedância equivalentes Thévenin desse circuito nos terminais. A seguir, obtenha expressões para o módulo de  $V_{TH}$  e o valor de  $R_{TH}$ , dados pelas Equações (6-41b) e (6-44).
- 6.14** A Figura P6-1 mostra um circuito simples que consiste em uma fonte de tensão, dois resistores e duas reatâncias em série. Se o resistor  $R_L$  ficar livre para variar e todos os demais componentes permanecerem constantes, para qual valor de  $R_L$  a potência fornecida a este resistor será a máxima possível? Prove a sua resposta. (Sugestão: deduza uma expressão para a potência de carga em termos de  $V$ ,  $R_S$ ,  $X_S$ ,  $R_L$  e  $X_L$ . A seguir, obtenha a derivada parcial dessa expressão em relação a  $R_L$ .) Utilize esse resultado para deduzir a expressão de conjugado máximo [Equação (6-54)].



**FIGURA P6-1**  
Circuito para o Problema 6-14.

- 6.15** Um motor de indução de 460 V, 60 Hz, quatro polos e ligado em Y tem potência nominal de 25 HP. Os parâmetros do seu circuito equivalente são

$$\begin{array}{lll}
 R_1 = 0,15 \, \Omega & R_2 = 0,154 \, \Omega & X_M = 20 \, \Omega \\
 X_1 = 0,852 \, \Omega & X_2 = 1,066 \, \Omega & \\
 P_{\text{Acv}} = 400 \, \text{W} & P_{\text{diversas}} = 150 \, \text{W} & P_{\text{núcleo}} = 400 \, \text{W}
 \end{array}$$

Para um escorregamento de 0,02, encontre

- (a) A corrente de linha  $I_L$
  - (b) O fator de potência do estator
  - (c) O fator de potência do rotor
  - (d) A frequência do rotor
  - (e) As perdas no cobre do estator  $P_{\text{PCE}}$
  - (f) A potência de entreferro  $P_{\text{EF}}$
  - (g) A potência convertida da forma mecânica em elétrica  $P_{\text{conv}}$
  - (h) O conjugado induzido  $\tau_{\text{ind}}$
  - (i) O conjugado de carga  $\tau_{\text{carga}}$
  - (j) A eficiência total da máquina  $\eta$
  - (k) A velocidade do motor em rotações por minuto e em radianos por segundo
  - (l) Qual é a letra de código para a partida desse motor?
- 6.16** Para o motor do Problema 6-15, qual é o conjugado máximo? Qual é o escorregamento no conjugado máximo? Qual é a velocidade do rotor no conjugado máximo?
- 6.17** Se o motor do Problema 6-15 for acionado com uma fonte de tensão de 460 V e 50 Hz, qual será o conjugado máximo? Qual será o escorregamento no conjugado máximo?
- 6.18** Plote as seguintes grandezas para o motor do Problema 6-15, quando o escorregamento varia de 0 até 10%: (a)  $\tau_{\text{ind}}$  (b)  $P_{\text{conv}}$  (c)  $P_{\text{saída}}$  (d) eficiência  $\eta$ . Com qual escorregamento,  $P_{\text{saída}}$  é igual à potência nominal da máquina?
- 6.19** Um ensaio CC é realizado em um motor de indução de 460 V, ligado em  $\Delta$  e 100 HP. Se  $V_{\text{CC}} = 21 \, \text{V}$  e  $I_{\text{CC}} = 72 \, \text{A}$ , qual será a resistência de estator  $R_1$ ? Por quê?
- 6.20** No laboratório, um motor de indução da classe B (NEMA) de 208 V, seis polos, ligado em Y e 25 HP é testado, obtendo-se os seguintes resultados:
- |                  |                               |
|------------------|-------------------------------|
| A vazio:         | 208 V, 24,0 A, 1400 W, 60 Hz  |
| Rotor bloqueado: | 24,6 V, 64,5 A, 2200 W, 15 Hz |
| Ensaio CC:       | 13,5 V, 64 A                  |
- Encontre o circuito equivalente desse motor e plote sua curva característica de conjugado versus velocidade.

- 6.21** Um motor de indução de 460 V, 10 HP, quatro polos, ligado em Y, classe de isolamento F e fator de serviço 1,15 tem os seguintes parâmetros:

$$\begin{array}{lll} R_1 = 0,54 \, \Omega & R_2 = 0,488 \, \Omega & X_M = 51,12 \, \Omega \\ X_1 = 2,093 \, \Omega & X_2 = 3,209 \, \Omega & \\ P_{\text{AeV}} = 150 \, \text{W} & P_{\text{diversas}} = 50 \, \text{W} & P_{\text{núcleo}} = 150 \, \text{kW} \end{array}$$

Para um escorregamento de 0,02, encontre

- A corrente de linha  $I_L$
  - O fator de potência do estator
  - O fator de potência do rotor
  - A frequência do rotor
  - As perdas no cobre do estator  $P_{\text{PCE}}$
  - A potência de entreferro  $P_{\text{EF}}$
  - A potência convertida da forma mecânica em elétrica  $P_{\text{conv}}$
  - O conjugado induzido  $\tau_{\text{ind}}$
  - O conjugado de carga  $\tau_{\text{carga}}$
  - A eficiência total da máquina  $\eta$
  - A velocidade do motor em rotações por minuto e em radianos por segundo
  - Construa o diagrama do fluxo de potência desse motor
  - Qual é a letra de código para a partida do motor?
  - Dada a classe de isolamento do motor, qual é o aumento de temperatura máximo aceitável?
  - Que o fator de serviço desse motor significa?
- 6.22** Plote a característica de conjugado *versus* velocidade do motor do Problema 6-21. Qual é o conjugado de partida desse motor?
- 6.23** Um motor de indução trifásico de 460 V, quatro polos, 75 HP, 60 Hz e ligado em Y, desenvolve seu conjugado induzido de plena carga com 3,5% de escorregamento quando está operando em 60 Hz e 460 V. As impedâncias por fase do modelo de circuito do motor são

$$\begin{array}{ll} R_1 = 0,058 \, \Omega & X_M = 18 \, \Omega \\ X_1 = 0,32 \, \Omega & X_2 = 0,386 \, \Omega \end{array}$$

As perdas mecânicas, no núcleo e suplementares podem ser ignoradas neste problema.

- Encontre o valor da resistência de rotor  $R_2$ .
  - Para este motor, encontre  $\tau_{\text{max}}$ ,  $s_{\text{max}}$  e a velocidade do rotor no conjugado máximo.
  - Encontre o conjugado de partida do motor.
  - Qual é a letra de código que deve ser atribuída ao motor?
- 6.24** Responda às seguintes questões sobre o motor do Problema 6-21.
- Se a partida desse motor for realizada a partir de um barramento de 460 V, quanta corrente circulará no motor durante a partida?
  - Se uma linha de transmissão com uma impedância de  $0,50 + j0,35 \, \Omega$  por fase for usada para conectar o motor de indução ao barramento infinito, qual será a corrente de partida do motor? Qual será a tensão de terminal do motor na partida?
  - Se um autotransformador ideal abaixador de 1,4:1 for ligado entre a linha de transmissão e o motor, qual será a corrente na linha de transmissão durante a partida? Qual será a tensão no lado do motor da linha de transmissão durante a partida?

- 6.25** Neste capítulo, aprendemos que um autotransformador abaixador pode ser usado para reduzir a corrente de partida consumida por um motor de indução. Embora essa técnica funcione, um autotransformador é relativamente caro. Um modo bem mais barato para reduzir a corrente de partida é utilizar um dispositivo denominado *circuito ou chave de partida* Y- $\Delta$  (descrito anteriormente neste capítulo). Se um motor de indução for ligado normalmente em  $\Delta$ , então será possível reduzir sua tensão de fase  $V$  (e consequentemente a sua corrente de partida) simplesmente trocando a ligação dos enrolamentos do estator para Y durante a partida e, a seguir, voltando a ligar em  $\Delta$  quando o motor tiver atingido a velocidade de funcionamento. Responda às seguintes perguntas sobre esse tipo de circuito de partida.
- (a) Como a tensão de fase durante a partida é comparada com a tensão de fase durante o funcionamento normal?
- (b) Como a corrente de partida do motor ligado em Y é comparada com a corrente de partida no caso de o motor permanecer ligado em  $\Delta$  durante a partida?
- 6.26** Um motor de indução trifásico de 460 V, 50 HP, seis polos, ligado em  $\Delta$  e 60 Hz, tem um escorregamento de plena carga de 4%, uma eficiência de 91% e um fator de potência de 0,87 atrasado. Na partida, o motor desenvolve 1,75 vezes o conjugado de plena carga, mas consome 7 vezes a corrente nominal na tensão nominal. A partida desse motor deve ser realizada com um autotransformador de tensão reduzida.
- (a) Qual deverá ser a tensão de saída do circuito de partida para reduzir o conjugado de partida até que ele seja igual ao conjugado nominal do motor?
- (b) Quais serão a corrente de partida do motor e a corrente consumida da fonte de potência nessa tensão?
- 6.27** Um motor de indução de rotor bobinado está operando na tensão e frequência nominais com seus anéis deslizantes em curto-circuito e com uma carga em torno de 25% do valor nominal da máquina. Se a resistência de rotor dessa máquina for dobrada pela inserção de resistores externos no circuito do rotor, explique o que acontecerá ao:
- (a) Escorregamento  $s$
- (b) Velocidade do motor  $n_m$
- (c) A tensão induzida no rotor
- (d) A corrente do rotor
- (e)  $\tau_{ind}$
- (f)  $P_{saída}$
- (g)  $P_{PCR}$
- (h) Eficiência total  $\eta$
- 6.28** Um motor de indução de 460 V, 75 HP, quatro polos e ligado em Y tem os seguintes parâmetros:

$$\begin{array}{lll}
 R_1 = 0,058 \Omega & R_2 = 0,037 \Omega & X_M = 9,24 \Omega \\
 X_1 = 0,320 \Omega & X_2 = 0,386 \Omega & \\
 P_{AeV} = 650 \text{ W} & P_{diversas} = 150 \text{ W} & P_{núcleo} = 600 \text{ kW}
 \end{array}$$

Para um escorregamento de 0,01, encontre

- (a) A corrente de linha  $I_L$
- (b) O fator de potência do estator
- (c) O fator de potência do rotor
- (d) A frequência do rotor
- (e) As perdas no cobre do estator  $P_{PCE}$

- (f) A potência de entreferro  $P_{EF}$
- (g) A potência convertida da forma mecânica em elétrica  $P_{conv}$
- (h) O conjugado induzido  $\tau_{ind}$
- (i) O conjugado de carga  $\tau_{carga}$
- (j) A eficiência total da máquina  $\eta$
- (k) A velocidade do motor em rotações por minuto e em radianos por segundo
- (l) Construa o diagrama do fluxo de potência desse motor
- (m) Qual é a letra de código para a partida do motor?
- 6.29** Plote a característica de conjugado *versus* velocidade do motor do Problema 6-28. Qual é o conjugado de partida desse motor?
- 6.30** Responda às seguintes perguntas a respeito de um motor de indução de 460 V, ligado em  $\Delta$ , dois polos, 100 HP, 60 Hz e letra F de código de partida:
- (a) Que corrente de partida máxima que deve ser levada em consideração ao projetar o controlador de partida da máquina?
- (b) Se o controlador for projetado para trocar a ligação dos enrolamentos do estator de  $\Delta$  para Y durante a partida, que corrente de partida máxima e deve ser levada em consideração ao projetar o controlador de partida da máquina?
- (c) Se for usado um autotransformador abaixador de 1,25:1 durante a partida, que corrente máxima de partida deve ser levada em consideração ao projetar o autotransformador?
- 6.31** Quando há necessidade de parar muito rapidamente um motor de indução, muitos controladores de motor de indução invertem o sentido de rotação dos campos magnéticos pela troca dos terminais de dois enrolamentos do estator. Quando o sentido de rotação dos campos magnéticos é invertido, o motor desenvolve um conjugado induzido oposto ao sentido de rotação naquele momento. Desse modo, ele rapidamente pára e tenta começar a girar no sentido oposto. Se a potência elétrica for removida do circuito de estator no instante quando a velocidade do rotor está passando por zero, o motor será parado muito rapidamente. Essa técnica de frenagem rápida de um motor de indução é denominada *frenagem por inversão de fase\**. O motor do Problema 6-21 está funcionando em condições nominais e deve ser parado com frenagem por inversão de fase.
- (a) Qual é o escorregamento  $s$  antes da frenagem por inversão de fase?
- (b) Qual é a frequência do rotor antes da frenagem por inversão de fase?
- (c) Qual é o conjugado induzido  $\tau_{ind}$  antes da frenagem por inversão de fase?
- (d) Qual é o escorregamento  $s$  imediatamente após a troca dos terminais do estator?
- (e) Qual é a frequência do rotor imediatamente após a troca dos terminais do estator?
- (f) Qual é conjugado induzido  $\tau_{ind}$  imediatamente após a troca dos terminais do estator?
- 6.32** Um motor de indução de 460 V, 10 HP, dois polos e ligado em Y tem os seguintes parâmetros:

$$\begin{array}{lll}
 R_1 = 0,54 \, \Omega & X_1 = 2,093 \, \Omega & X_M = 51,12 \, \Omega \\
 P_{Acv} = 150 \, W & P_{diversas} = 50 \, W & P_{n\u00facleo} = 150 \, kW
 \end{array}$$

O rotor é do tipo de dupla gaiola de esquilo, com barras externas fortemente concatenadas de resistência elevada e barras internas fracamente concatenadas de resistência baixa (veja a Figura 6-25c). Os parâmetros das barras externas são

$$R_{2e} = 4,80 \, \Omega \quad X_{2e} = 3,75 \, \Omega$$

\* N. de T.: *Plugging*, em inglês.

A resistência é alta devido à pequena área da seção reta e a reatância é relativamente baixa devido ao forte concatenamento entre o rotor e o estator. Os parâmetros das barras internas são

$$R_{2i} = 0,573 \Omega \quad X_{2i} = 4,65 \Omega$$

A resistência é baixa devido à grande área da seção reta, mas a reatância é relativamente alta devido ao concatenamento bem fraco entre o rotor e o estator.

Calcule a característica de conjugado *versus* velocidade desse motor de indução e compare-a com a característica de conjugado *versus* velocidade do motor de indução de rotor simples do Problema 6-21. De que forma as curvas diferem entre si? Explique as diferenças.

## REFERÊNCIAS

1. Alger, Phillip. *Induction Machines*, 2ª ed., Gordon and Breach, Nova York, 1970.
2. Del Toro, V.: *Electric Machines and Power Systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1985.
3. Fitzgerald, A. E. e C. Kingsley, Jr. *Electric Machinery*. McGraw-Hill, Nova York, 1952.
4. Fitzgerald, A. E., C. Kingsley, Jr. e S. D. Umans: *Electric Machinery*, 6ª ed., McGraw-Hill, Nova York, 2003.
5. Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, IEEE Standard 112-1996, IEEE, Nova York, 1996.
6. Kosow, Irving L.: *Control of Electric Motors*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1972.
7. McPherson, George. *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*. Wiley, Nova York, 1981.
8. National Electrical Manufacturers Association: *Motors and Generators*, Publicação MG1-2006, NEMA, Washington, 2006.
9. Slemon, G. R. e A. Straughen: *Electric Machines*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1980.
10. Vithayathil, Joseph: *Power Electronics: Principles and Applications*, McGraw-Hill, Nova York, 1995.
11. Werninck, E. H. (ed.): *Electric Motor Handbook*, McGraw-Hill, London, 1978.