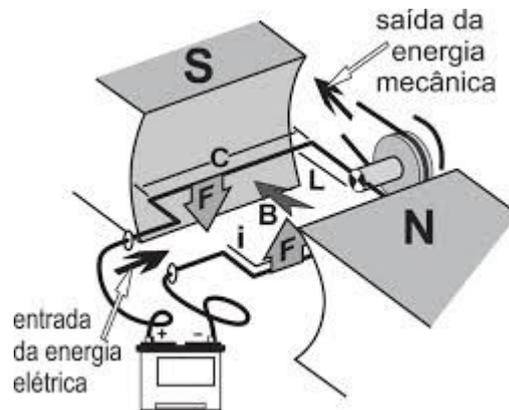


# MÁQUINAS ELÉTRICAS



MOTORES

MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS –  
CORRENTE ALTERNADA E CORRENTE  
CONTÍNUA.

# MÁQUINAS ELÉTRICAS

MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS – CORRENTE ALTERNADA E  
CORRENTE CONTÍNUA.

## SUMÁRIO

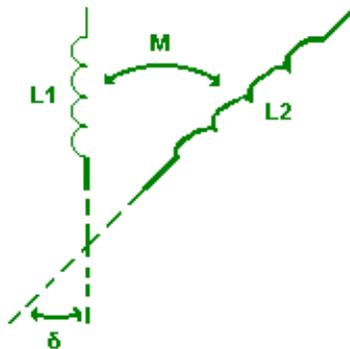
5. MÁQUINAS SÍNCRONAS .....	3
5.1 Princípio de Funcionamento .....	3
5.2 Aspectos Construtivos .....	4
5.3. Potência Desenvolvida pela Máquina Síncrona.....	7
5.4 Motor Síncrono .....	8
5.4.1 Princípios de operação e características do motor síncrono de pólos lisos.....	9
5.5 Operação do Gerador Síncrono em Paralelo com Sistema de Potência .....	12
5.6 Máquinas Síncronas de Pólos Salientes .....	14
5.7 Potência Sincronizante .....	16
5.8 Exercícios .....	16
6. MÁQUINAS ASSÍNCRONAS.....	27
6.1 Tipos de Motores.....	27
6.2 Motores de Indução Trifásicos - Motores Assíncronos.....	27
6.3 A Origem do Movimento em Motores Elétricos .....	28
6.3.1 A formação do campo girante .....	29
6.4 Princípio de Funcionamento .....	32
6.5 Motor com Rotor em Curto-Circuito .....	35
6.5.1 Características do motor com rotor em curto-circuito.....	35
6.5.2 Motor com rotor em curto-circuito com ranhuras especiais .....	36
6.5.2.1 Rotor de campo distorcido .....	37
6.5.2.2 Rotores com condutores em grande profundidade.....	38
6.5.2.3 Barras do rotor com maior resistência.....	39
6.6 Motores com Rotor Bobinado (motor de anéis) .....	39
6.6.1 Características e empregos .....	39
6.7 Motores com Enrolamento de Comutação Polar.....	41
6.7.1 Motores com dois enrolamentos separados.....	41
6.7.2 Motores com comutação de pólos, de enrolamento único .....	41
6.7.2.1 Propriedades dos motores Dahlander.....	43
6.8. Modelamento das Máquinas Assíncronas .....	44
6.8.1 Modelo da máquina assíncrona em funcionamento .....	45
6.8.2 Balanço de potência do motor de indução .....	47
6.8.3 Conjugado eletromagnético desenvolvido .....	49
6.8.4 Conjugado máximo em função do escorregamento s.....	50
6.8.5 Determinação dos parâmetros do circuito equivalente aproximado da máquina assíncrona .....	51
6.8.6 Curvas de conjugado e corrente em função do escorregamento s.....	53
6.8.7 Influência da tensão $V_1$ e da resistência rotórica sobre as curvas de corrente e conjugado .....	54
6.9 Exercícios .....	55
7. MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA.....	75
7.1 Máquinas de Corrente Contínua - Imã Permanente .....	80
7.2 Máquina de Corrente Contínua - Excitação Independente .....	82
7.3 Máquina de Corrente Contínua - Excitação Série.....	82
7.4. Máquina de Corrente Contínua - Excitação Paralela (shunt) .....	83
7.5 Máquina de Corrente Contínua - Excitação Combinada (série-paralela, mista, compound, composta).....	83
7.6. Modelamento das máquinas de corrente contínua.....	84
7.7 Exercícios .....	89
8. MOTOR UNIVERSAL.....	102
9. MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUÇÃO.....	105

<b>9.1 Tipos de motores</b> .....	105
<b>9.2 Motor de fase dividida (split-phase)</b> .....	105
<b>9.3 Motor de capacitor de partida (capacitor-start)</b> .....	106
<b>9.4 Motor de capacitor permanente (permanent-split capacitor)</b> .....	107
<b>9.6 Motor de campo distorcido ou pólos sombreados (shaded-pole)</b> .....	107
<b>9.7 Exercícios</b> .....	108
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	109

## 5. MÁQUINAS SÍNCRONAS

### 5.1 Princípio de Funcionamento

Seja o o esquemático de um dispositivo eletromecânico representado na figura 5.1, constituído de duas bobinas cujos eixos estão separados por um ângulo  $\delta$ .



**Fig. 5.1** Esquema simplificado de uma máquina elétrica.

Excitando os dois enrolamentos com correntes  $I_1$  e  $I_2$  constante, tem-se o conjugado eletromagnético desenvolvido:

$$C_{des.}(\sigma) = I_1^2 \frac{dL_1}{d\sigma} + I_2^2 \frac{dL_2}{d\sigma} + I_1 I_2 \frac{dM}{d\sigma} \quad [5.1]$$

ou

$$C_{des.}(\sigma) = -I_1^2 \Delta L_1 \text{sen } 2\sigma - I_1 I_2 M_{\max.} \text{sen } \sigma; \sigma = \sigma(t) \quad [5.2]$$

Pode-se verificar que se  $\delta$  variar ciclicamente no tempo, devido ao deslizamento relativo ao estator e ao rotor, tem-se um ângulo  $\delta = \delta(t)$  e conseqüentemente um Conjugado Desenvolvido Médio = 0.

Para transformar esse dispositivo em um motor síncrono lança-se mão da seguinte modificação:

- rotor: corrente contínua
- estator: estacionário com corrente polifásica, produzindo um campo girante com velocidade constante, velocidade síncrona dada por:

$$n_s = \frac{f}{p} [rps] \quad [5.3]$$

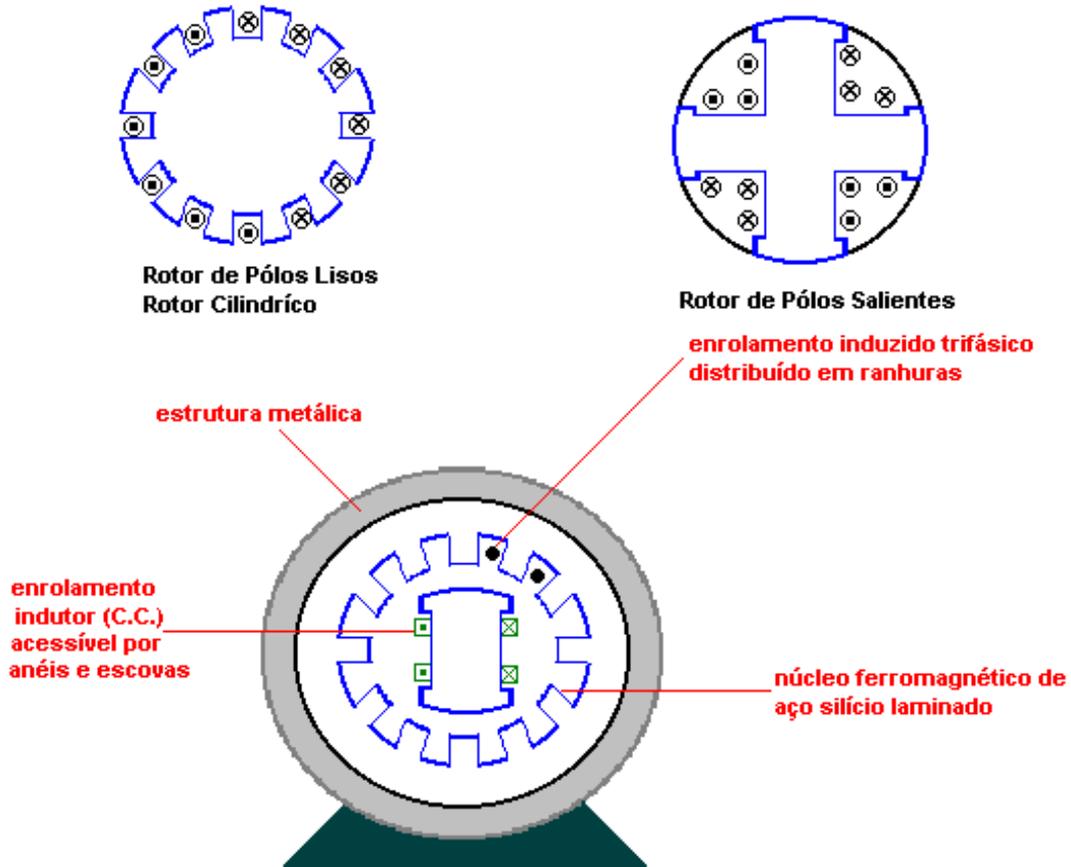
onde:  $f$  = frequência e  $p$  = pares de pólos

Supondo que o rotor tenha sido acelerado até a velocidade do sincronismo,  $n_r = n_s$ . A sequência de pólos magnéticos relativos N-S desse campo girante do estator tende a se alinhar com o núcleo ferromagnético do rotor (conjugado de relutância) e também com o campo magnético produzido pelo rotor (conjugado de mútua indutância). Esse conjugado resultante tende a arrastar o rotor, continuamente, na direção do campo relativo, com atraso de um ângulo ( que depende do conjugado resistente a ser vencido no eixo.

## 5.2 Aspectos Construtivos

As duas partes básicas de uma máquina síncrona são:

- induzido ou armadura : com um enrolamento trifásico distribuído em ranhuras. Normalmente localizado na parte fixa (estator).
- indutor : com um enrolamento de campo de excitação com excitação C.C. . Esse enrolamento é conectado a uma fonte externa por meios de anéis deslizantes e escovas. Normalmente é colocado na parte móvel (rotor). Dependendo da construção do rotor, uma máquina síncrona pode ser do tipo rotor cilíndrico (ou pólos lisos) ou do tipo pólos salientes conforme a figura 5.2.



**Fig. 5.2** Corte Transversal da Máquina Síncrona

A máquina síncrona pode funcionar como motor síncrono ou como gerador síncrono, também denominado alternador :

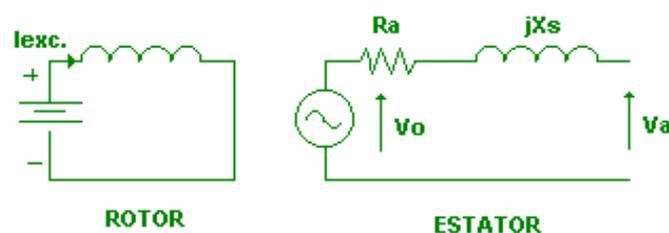
Motor Síncrono:

Uma rede de alimentação impõe o campo girante no estator. O rotor magnetizado gira com velocidade do campo girante sob quaisquer condições de carga.

Gerador Síncrono:

Impõe-se no eixo uma velocidade e o campo girante é então consequência do magnetismo produzido no rotor. Os condutores do estator produzem força eletromotriz induzida.

Na figura 5.3 é apresentado o circuito equivalente por fase da máquina síncrona de pólos lisos.

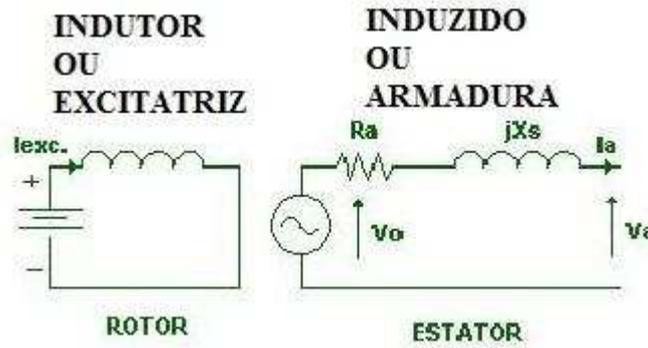


**Fig. 5.3** Circuito equivalente por fase da máquina síncrona de pólos lisos.

Onde :  $V_o$  = tensão gerada internamente no enrolamento do estator  
 $R_a$  = resistência ôhmica do enrolamento do estator  
 $jX_s$  = reatância síncrona (reatância indutiva do enrolamento do estator)

**GERADOR SÍNCRONO:**

A figura 5.4 apresenta o circuito equivalente por fase do gerador síncrono de pólos lisos.

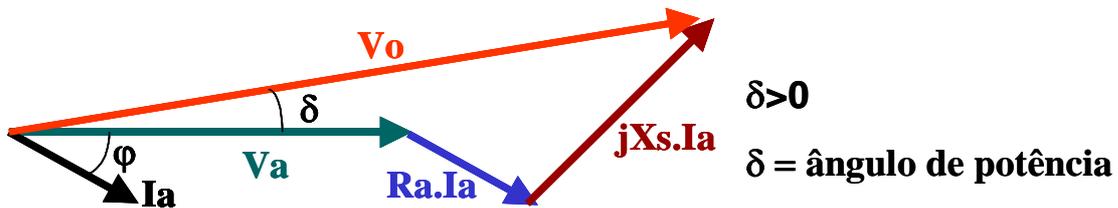


**Fig. 5.4** Circuito equivalente por fase do gerador síncrono de pólos lisos.

A tensão gerada internamente no enrolamento do estator é dada por:

$$\dot{V}_o = \dot{V}_a + R \dot{I}_a + jX_s \dot{I}_a \quad [5.4]$$

E sua representação fasorial está na figura 5.5.

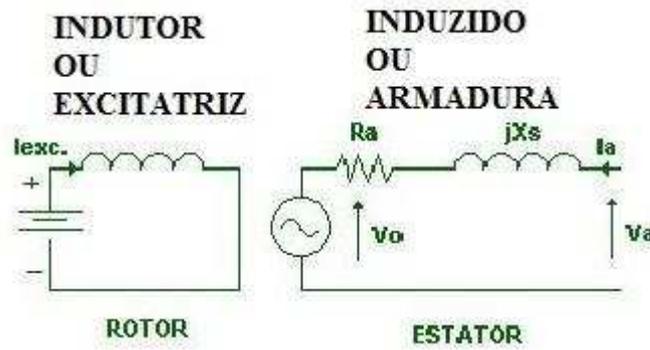


**Fasorialmente**

**Fig. 5.5** Representação fasorial do gerador síncrono de pólos lisos.

**MOTOR SÍNCRONO:**

A figura 5.6 apresenta o circuito equivalente por fase do motor síncrono de pólos lisos.

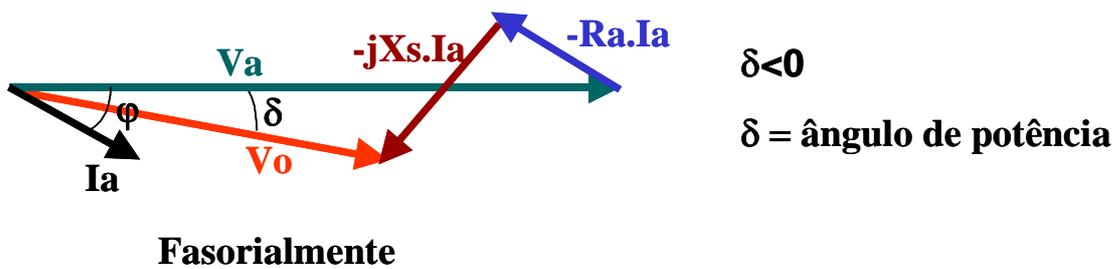


**Fig. 5.6** Circuito equivalente por fase do motor síncrono de pólos lisos.

A tensão gerada internamente no enrolamento do estator é dada por:

$$\dot{V}_o = \dot{V}_a - R \dot{I}_a - jX_s \dot{I}_a \quad [5.5]$$

E sua representação fasorial está na figura 5.7.



**Fig. 5.7** Representação fasorial do motor síncrono de pólos lisos.

### 5.3. Potência Desenvolvida pela Máquina Síncrona

#### GERADOR SÍNCRONO:

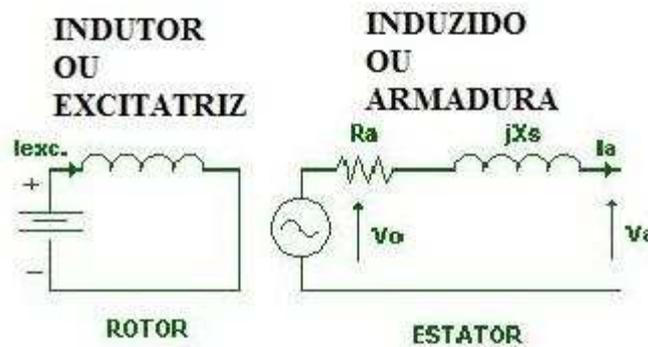


Fig. 5.8 Circuito equivalente por fase do gerador síncrono de pólos lisos.

Desprezando a resistência da armadura  $R_a$ , tem-se :

$$\dot{V}_o = \dot{V}_a + jX_s \dot{I}_a \quad [5.6]$$

Fasorialmente :

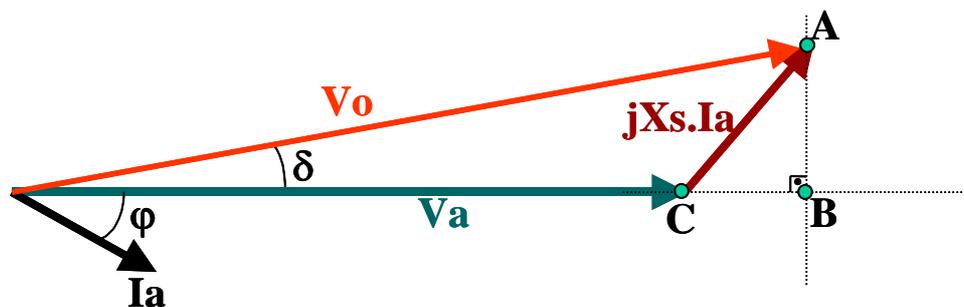


Fig. 5.9 Representação fasorial do gerador síncrono de pólos lisos.

O segmento  $\overline{AB}$  é dado por:

$$\begin{aligned} \overline{AB} &= V_o \text{sen } \delta \\ \overline{AB} &= X_s I_a \cos \varphi \end{aligned} \quad [5.7]$$

Multiplicando o segmento  $\overline{AB}$  por  $V_a$ , tem-se :

$$V_a X_s I_a \cos \varphi = V_a V_o \text{sen } \delta \quad [5.8]$$

E assim:

$$V_a I_a \cos \varphi = \frac{V_a V_o \text{sen } \delta}{X_s} \quad [5.9]$$

Portanto, a potência desenvolvida pelo gerador síncrono de pólos lisos, por fase, é :

$$P = \frac{V_a V_o}{X_s} \text{sen } \delta \quad [5.10]$$

## 5.4 Motor Síncrono

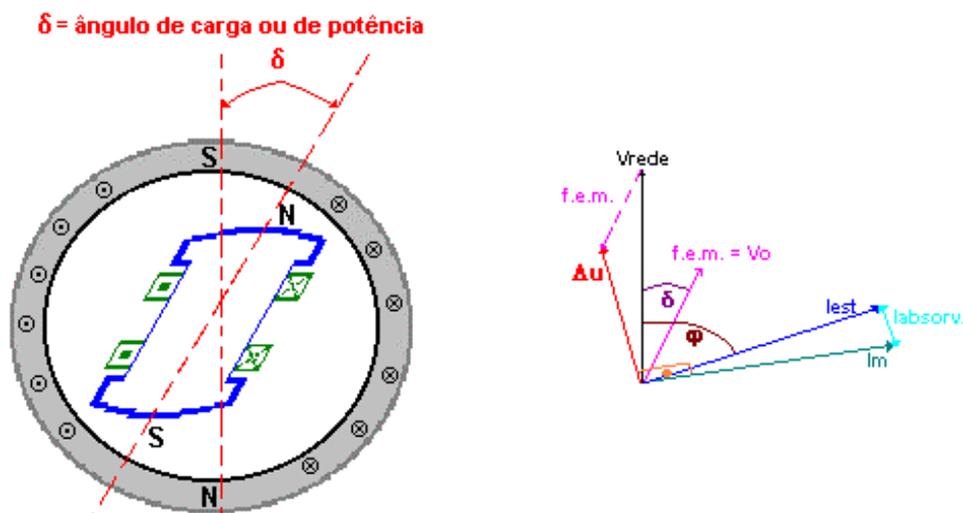
**Partida:** ligando-se o enrolamento trifásico à rede, então o campo girante do enrolamento do estator, que não tem inércia, inicia imediatamente o seu movimento à plena velocidade, atuando apenas instantaneamente sobre os pólos fixos do rotor.

Nesta fase, não se pode formar o conjugado necessário para vencer a inércia da massa do rotor. Por esta razão, o motor síncrono em repouso não parte por si. O rotor, sem carga, tem que iniciar o seu movimento em função de um outro motor ou de um dispositivo de partida assíncrono (por exemplo um anel de curto-circuito), até que sua velocidade alcance um valor próximo ao nominal do campo girante.

Pela ligação da excitação de C.C., o próprio rotor se aproxima do movimento dos pólos do campo girante, pois estes atuam continuamente sobre o rotor. Devido a este movimento igual de rotação, entre o campo girante e o rotor, este tipo de máquina é chamada de síncrona (sincronismo entre campo do estator e rotor).

**Em vazio:** em virtude da carga, que o atrito ocasiona, os pólos do rotor nunca alcançam a mesma velocidade do campo girante do estator permanecendo em atraso por um certo ângulo (ângulo de carga  $\delta$  da figura 5.10).

Os pólos que giram, induzem uma f.e.m. no enrolamento do estator, f.e.m. esta que permanece em atraso em relação à tensão de rede pelo ângulo de carga  $\delta$ . A diferença de tensão  $\Delta U$  entre a tensão de rede e a f.e.m., é o fator que determina o valor da corrente do estator ( $I_{est.}$ ) que em vazio é praticamente igual a corrente de magnetização  $I_m$  (corrente reativa).



**Fig. 5.10** Representação dos enrolamentos do estator e rotor de uma máquina síncrona e seu diagrama fasorial para condição em vazio.

**Sob Carga :** quando a máquina recebe uma carga mecânica, os pólos do rotor ficam tanto mais em atraso em relação aos pólos do estator quanto maior a carga, sem que com isto a rotação síncrona sofra qualquer alteração.

Em virtude do ângulo de carga maior, a f.e.m. em atraso aumenta o seu valor em relação a tensão da rede, com isto também eleva-se a diferença de tensão  $\Delta U$  no estator, e a corrente absorvida ( $I_{absorv.}$ ) se eleva.

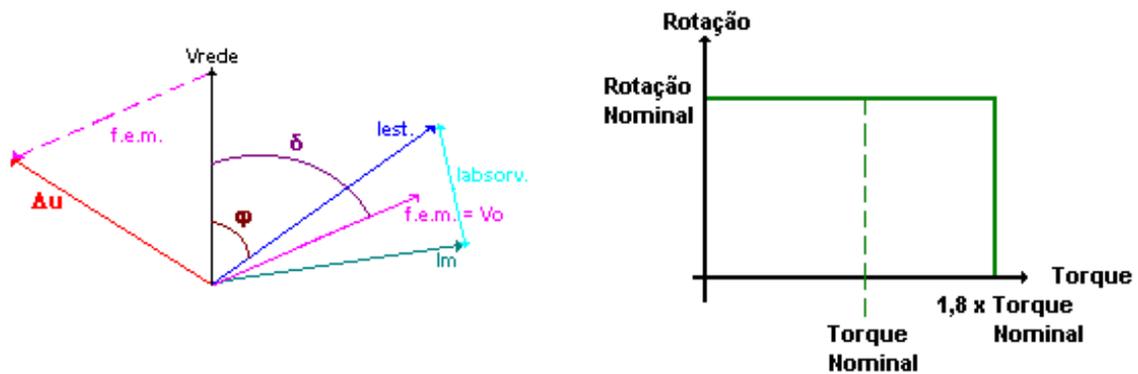
Uma corrente mais elevada no estator origina um campo girante mais forte e este desenvolve, com o campo do rotor, uma elevação do conjugado para vencer a carga. Disto resulta uma grande estabilidade de rotação e a possibilidade de elevada sobrecarga de 1,8 vezes o conjugado nominal.

Somente com uma sobrecarga acima deste valor o ângulo de carga aumenta acentuadamente, reduzindo a força de atração entre os pólos do estator e do rotor. Nestas condições a rotação do rotor cai acentuadamente em relação à do campo girante, sai do sincronismo e para rapidamente. Simultaneamente, em virtude da inexistência da f.e.m. ( $V_o$ ), a corrente do estator sobe rapidamente.

A corrente absorvida pelo estator não depende entretanto apenas da carga, mas também da excitação do enrolamento do rotor. Quando o valor da corrente de excitação é baixo, a f.e.m. ( $V_o$ ) também é baixa, e o enrolamento do estator absorve a potência indutiva necessária para construir o campo magnético, na forma de uma corrente em atraso à tensão da rede.

Se a corrente de excitação é elevada sem alteração da carga, eleva-se também a f.e.m. no estator; chega-se o momento no qual a corrente do estator  $I_{est.}$ , que está em atraso em relação com a tensão ativa do estator  $\Delta U$ , fica em fase com a tensão da rede ( $\cos \varphi = 1$ ).

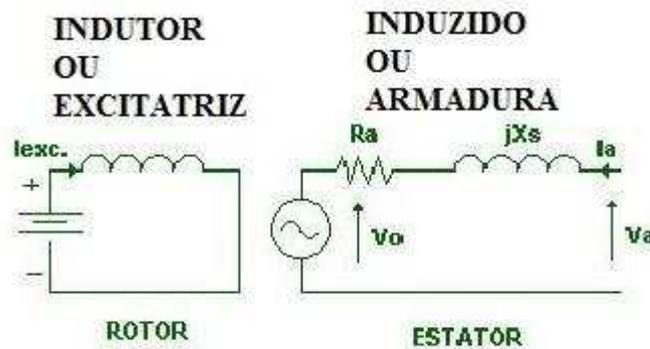
Continuando a elevação da corrente de excitação do rotor, resulta uma corrente adiantada em relação à tensão da rede. Isto significa que o motor síncrono não absorve mais potência indutiva, mas sim fornece potência.



**Fig. 5.11** Digrama fasorial da máquina síncrona com carga e o comportamento da velocidade em função do torque da carga.

#### 5.4.1 Princípios de operação e características do motor síncrono de pólos lisos

A figura 5.12 apresenta o circuito equivalente por fase do gerador síncrono de pólos lisos.



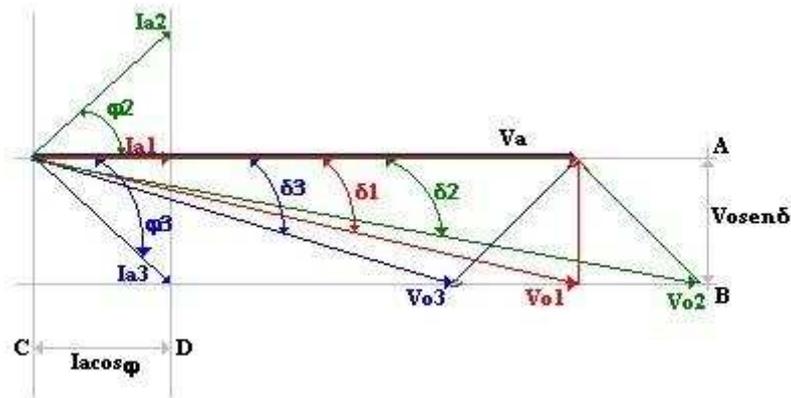
**Fig. 5.12** Circuito equivalente por fase do motor síncrono de pólos lisos.

A tensão gerada internamente no enrolamento do estator, desprezando a resistência da armadura é dada por:

$$\dot{V}_o = \dot{V}_a - jX_s \dot{I}_a \quad [5.11]$$

E sua representação fasorial está na figura 5.13, para diferentes correntes de excitações e o motor síncrono em operação com potência constante.

### Variação da excitação - potência constante



- índice 1 : motor “resistivo”
- índice 2 : motor “capacitivo”
- índice 3 : motor “indutivo”

**Fig. 5.13** Representação fasorial do motor síncrono operando com potência constante e com variação da corrente de excitação.

Para que a potência ativa permaneça constante, o segmento  $\overline{AB} = V_o \text{sen} \delta$  e o segmento  $\overline{CD} = I_a \text{cos} \varphi$ , para condição de excitação deve ficar sempre constante. O ângulo de potência ( $\delta$ ) varia para ajustar o novo valor de  $V_o$ .

Pois a potência ativa é:

$$P = \frac{V_a V_o}{X_s} \text{sen} \delta = V_a I_a \text{cos} \varphi \quad [5.12]$$

Como a potência mecânica solicitada pelo motor é constante, a potência absorvida também o é. O produto  $I_a \text{cos} \varphi$  e  $V_o \text{sen} \delta$  permanecem constantes. Daí:

- **Mínima excitação ou subexcitação**  $\Rightarrow \text{cos} \varphi$  indutivo

Quando a corrente de excitação é reduzida, tem-se:

Redução do fluxo magnético produzido pela excitatriz ( $\dot{\phi}_{CC}$ );

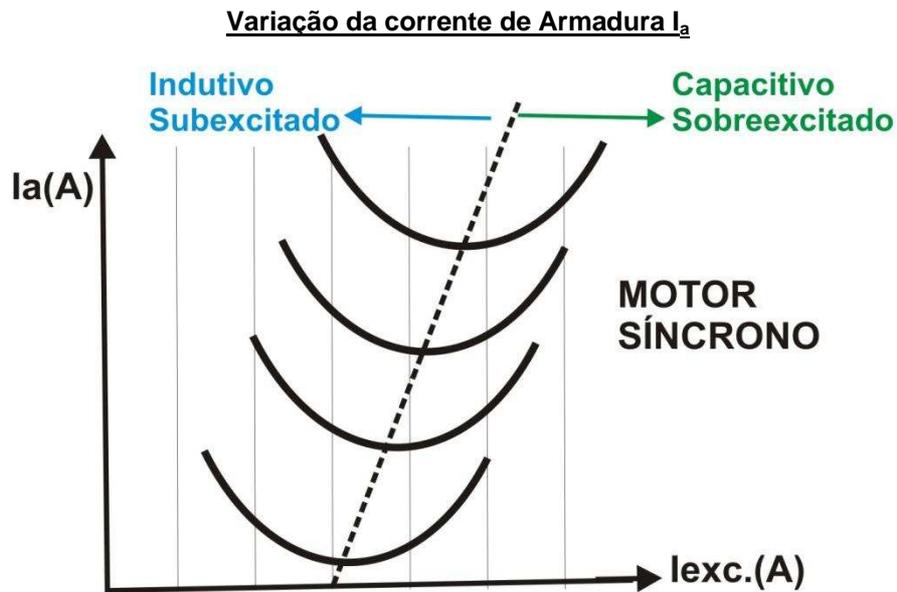
Como a carga mecânica é constante, a potência desenvolvida também é, para isso, a armadura deve reagir com uma corrente  $I_a$  atrasada produzindo um fluxo magnético  $\dot{\phi}_{CA}$  que produz um efeito magnetizante para garantir um fluxo magnético resultante no entreferro constante  $\dot{\phi}_{\text{entreferro}} = \dot{\phi}_{CA} + \dot{\phi}_{CC}$ , que garantirá um torque desenvolvido constante e conseqüentemente uma potência desenvolvida constante.

- **Máxima excitação ou sobreexcitação**  $\Rightarrow \text{cos} \varphi$  capacitivo

Quando aumenta-se a corrente de excitação, tem-se:

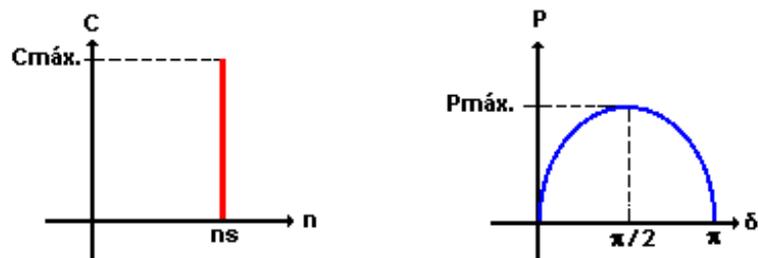
Aumento do fluxo magnético produzido pela excitatriz ( $\dot{\phi}_{CC}$ );

Como a carga mecânica é constante, a potência desenvolvida também é, para isso, a armadura deve reagir com uma corrente  $I_a$  adiantada produzindo um fluxo magnético  $\dot{\phi}_{CA}$  que produz um efeito desmagnetizante para garantir um fluxo magnético resultante no entreferro constante  $\dot{\phi}_{\text{entreferro}} = \dot{\phi}_{CA} + \dot{\phi}_{CC}$ , que garantirá um torque desenvolvido constante e conseqüentemente uma potência desenvolvida constante.



**Fig. 5.14** Gráfico da corrente de armadura em função da corrente de excitação. Curva “V” da máquina síncrona operando como motor.

A figura 5.15 apresenta o comportamento do torque desenvolvido pelo motor em função da velocidade e a potência desenvolvida pelo motor em função do ângulo de potência ou de carga ( $\delta$ ).



**Fig. 5.15** Torque do motor em função da velocidade e potência desenvolvida pelo motor em função do ângulo de potência ou de carga ( $\delta$ ).

## 5.5. Operação do Gerador Síncrono em Paralelo com Sistema de Potência

Com certa frequência se requer que dois ou mais geradores síncronos operem conjuntamente para alimentar uma carga que exceda a saída nominal de um dos geradores. Este caso é geralmente o que acontece nas redes de energia elétrica de uma região ou país. A carga pode variar muito e a operação dos geradores em paralelo é necessária para produzir a quantidade de energia requerida pelas cargas.

Para se colocar uma máquina síncrona em paralelo com um sistema de potência (barramento infinito), deve-se as seguintes condições necessárias:

- A máquina síncrona deve ter a mesma sequência de fases do sistema;
  - A tensão gerada por fase (ou de linha) na máquina síncrona a ser sincronizada deve ser rigorosamente igual à do sistema de potência;
  - A frequência da tensão gerada pela máquina síncrona deve ser igual à do sistema de potência.
- A operação do paralelismo em máquinas síncronas de grande porte é feita por aparelhos especiais chamados sincronoscópicos.

Como mencionado anteriormente, a potência desenvolvida pela máquina síncrona, desprezando a resistência da armadura é:

$$P = \frac{V_a V_o}{X_s} \text{sen} \delta = V_a I_a \cos \varphi \quad [5.12]$$

Mantendo a potência ativa constante, com o barramento infinito, a tensão  $V_a$  e a frequência são constantes, tem-se:

$$\begin{aligned} I_a \cos \varphi &= \text{cte.} \\ V_o \text{sen} \delta &= \text{cte.} \end{aligned} \quad [5.13]$$

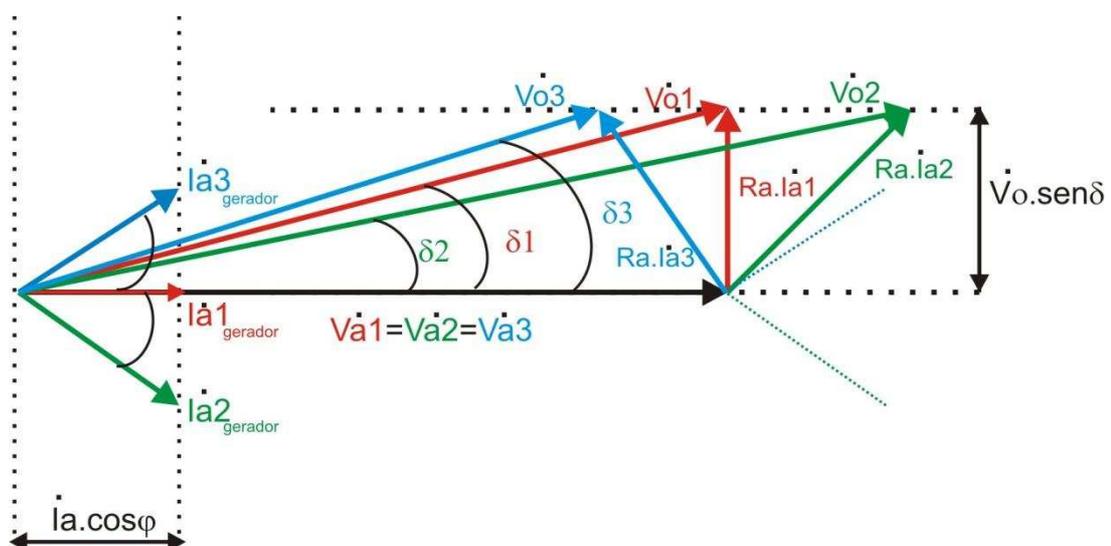
Alterando a corrente de excitação da máquina síncrona, altera-se o módulo da tensão gerada internamente  $V_o$  e o ângulo  $\varphi$  da corrente da armadura  $I_a$ , de forma a manter:

$$\begin{aligned} I_a \cos \varphi &= \text{cte.} \\ V_o \text{sen} \delta &= \text{cte.} \end{aligned}$$

Nessas condições não se altera a potência ativa que a máquina troca com a rede e sim a reativa, como indicado nos diagramas fasoriais.

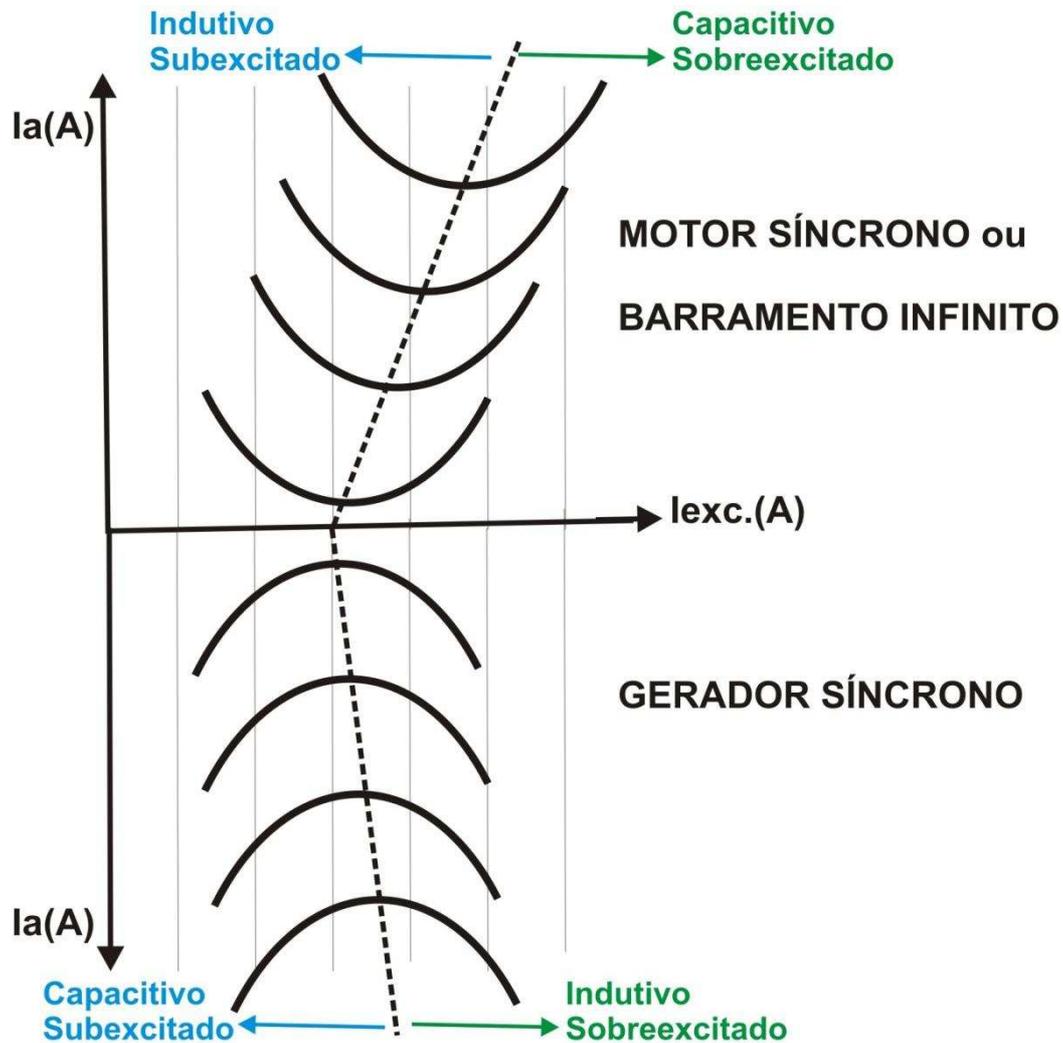
Desprezando a resistência da armadura  $R_a$ , conforme a equação 5.6, tem-se os diagramas fasoriais da figura 5.16, para as seguintes condições:

- índice 1 : gerador "resistivo"
- índice 2 : gerador indutivo"
- índice 3 : gerador "capacitivo"



**Fig. 5.16** Representação fasorial do gerador síncrono operando com potência constante e com variação da corrente de excitação.

Resultando da observação dos diagramas de fasores as seguintes curvas em “V”.



**Fig. 5.17** Gráfico da corrente de armadura em função da corrente de excitação. Curva “V” motor síncrono e gerador síncrono.

Variando a corrente de excitação ( $I_{exc}$ ), variar-se a corrente do gerador, mas a potência ( $P$ ) e a tensão  $V$  permanecem constante.

Variando o torque mecânico na máquina síncrona através do controle da vazão de uma turbina, por exemplo, conseqüentemente variar-se a potência ativa ( $P$ ) gerada pela máquina síncrona conectada num barramento infinito, pois a tensão e frequência da rede ficam constantes impostas pelo barramento infinito, pois:

$$P = T \cdot \omega_s = T \cdot \frac{120 \cdot f}{P} \cdot \frac{1}{60} \cdot 2\pi \quad [5.14]$$

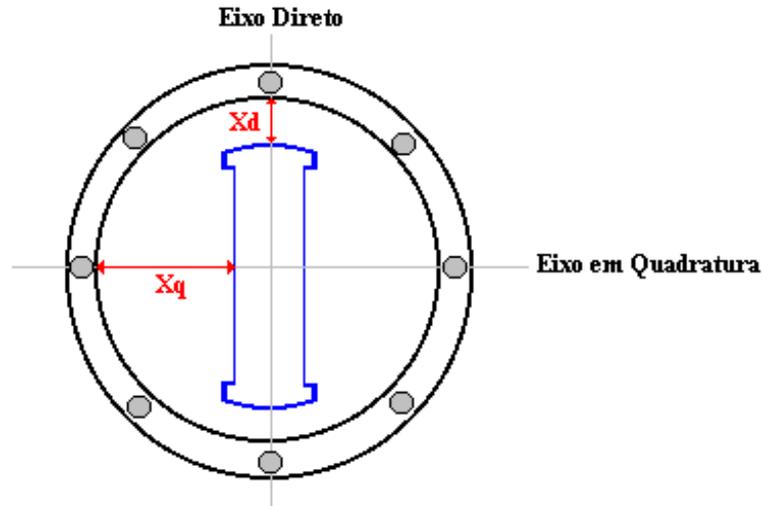
Sabendo que o torque que aciona o gerador e a corrente de excitação podem ser variados de forma independente, então o operador pode decidir quanto de potência ativa e quanto de potência reativa há de entregar do gerador para a rede.

A carga ativa pode ser variada através do torque de entrada.

A carga reativa pode ser variada através da corrente de excitação.

## 5.6 Máquinas Síncronas de Pólos Salientes

Na máquina síncrona de pólos salientes são definidos duas reatâncias associadas respectivamente aos eixos direto e em quadratura com os pólos do rotor conforme a figura 5.18.



**Fig. 5.18** Esquema simplificado de uma máquina síncrona de pólos salientes.

Onde :

$X_d$  = reatância segundo o eixo direto e  $X_q$  = reatância segundo o eixo em quadratura

Sabendo que a reatância indutiva de um circuito magnético é dada:

$$X = 2 \pi f L \Rightarrow X = 2 \pi f (N^2 / R)$$

$$X = \frac{2 \pi f N^2}{\frac{1}{\mu_o} * \frac{l}{S}} \Rightarrow X = 2 \pi \mu_o \frac{f S N^2}{l} \quad [5.15]$$

Portanto:  $X_d > X_q$

Assim, a tensão gerada internamente no enrolamento do estator  $V_o$  será:

$$\dot{V}_o = \dot{V}_a + R_a \dot{I}_a + jX_d \dot{I}_d + jX_q \dot{I}_q \quad [5.16]$$

Onde:

$I_d$  = componente da corrente de armadura que produz fluxo segundo o eixo direto.

$I_q$  = componente da corrente de armadura que produz fluxo segundo o eixo em quadratura.

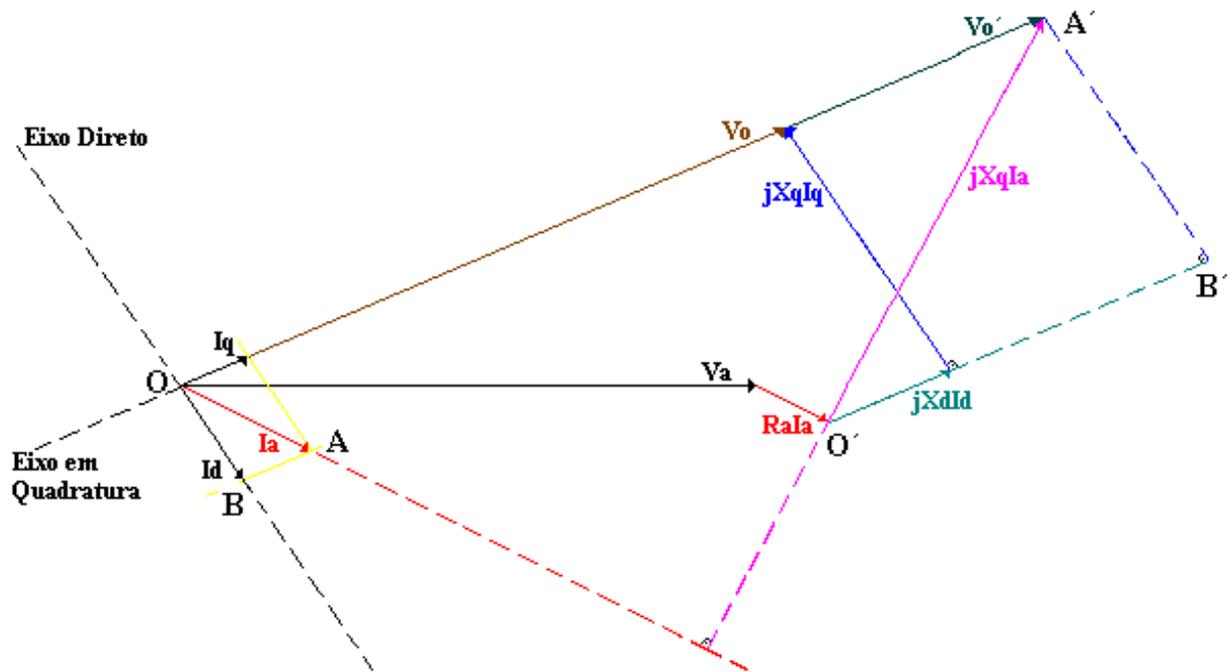


Fig. 5.19 Representação fasorial do gerador síncrono de pólos salientes.

$$\Delta ABO \equiv \Delta A'B'O'$$

$$\frac{O'A'}{OA} = \frac{A'B'}{AB} \Rightarrow \frac{O'A'}{\dot{I}_a} = \frac{jX_q \dot{I}_q}{\dot{I}_q}$$

Portanto:  $O'A' = jX_q \dot{I}_q$

O vetor  $V_o'$  dá a direção do eixo de quadratura  
 Pode-se então determinar as componentes  $I_d$  e  $I_q$ :

$$\dot{V}'_o = \dot{V}_a + R_a \dot{I}_a + jX_q \dot{I}_q \quad [5.17]$$

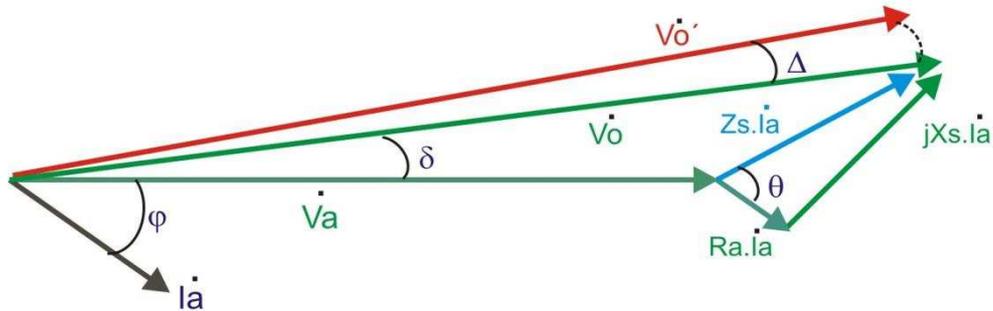
$$\dot{I}_d = \dot{I}_a \text{ sen}(\delta + \varphi) \angle -(90^\circ - \delta) \quad [5.18]$$

$$\dot{I}_q = \dot{I}_a \text{ cos}(\delta + \varphi) \angle \delta \quad [5.19]$$

## 5.7 Potência Sincronizante

Seja um gerador síncrono de rotor cilíndrico operando em paralelo com uma barra infinita (tensão constante independente da carga). Devido a algum distúrbio, o ângulo de carga varia de um ângulo (o que corresponde à máquina desenvolver uma potência adicional, de modo que ela mantém o sincronismo. Essa potência adicional é conhecida como potência sincronizante.

A potência sincronizante é dada por :



**Fig. 5.20** Representação fasorial do gerador síncrono de pólos salientes, para representação da potência sincronizante.

$$P_s = \frac{V_o V_a}{Z_s} \left[ \text{sen} \Delta \text{sen}(\theta + \sigma) + 2 \cos(\theta + \sigma) \text{sen}^2 \frac{\Delta}{2} \right] \quad [5.20]$$

Aproximações :

a)  $\Delta$  pequeno  $\Rightarrow \text{sen} \Delta \approx \Delta$  e  $\text{sen}^2 \Delta/2 \approx 0$

b)  $R_a \leq X_s \Rightarrow Z_s = (R_a^2 + X_s^2)^{1/2} \Rightarrow Z_s = X_s \Rightarrow \theta = 90^\circ$

$\text{sen}(\theta + \delta) = \cos \delta$

Portanto:

$$P_s = \frac{V_o V_a}{X_s} \Delta \cos \sigma \quad \text{por fase.} \quad [5.21]$$

## 5.8 Exercícios

1) Para um motor síncrono de pólos lisos, tensão nominal de alimentação de 220 V em ligação estrela. Determinar a f.e.m. gerada internamente de forma a manter uma corrente na linha de 20 A, com um fator de potência 0,8 atrasado. A resistência do enrolamento da armadura vale 0,15  $\Omega$ /fase e a reatância síncrona 2  $\Omega$ /fase.

Resp.:

105  $\angle -16,7^\circ$  V

2) [exercício 6.19-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um motor síncrono de rotor liso trifásico, 2300 V, ligação em estrela, tem uma reatância síncrona de 3  $\Omega$ /fase e uma resistência de armadura de 0,25  $\Omega$ /fase. O motor opera com uma carga tal que o ângulo de potência  $\delta = -15^\circ$ , e a sua excitação é ajustada de modo que a tensão induzida internamente tenha módulo igual ao da tensão terminal. Determinar:

- Corrente de armadura
- Fator de potência do motor
- Potência absorvida do barramento

Resp.:

a) 115,15  $\angle -2,74^\circ$  A   b) 0,99 indutivo   c) 458KW

3) [exercício 6.9; 6.10-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um gerador síncrono, trifásico, ligação estrela, rotor cilíndrico, 10 KVA, 230 V, tem uma reatância síncrona de  $1,2 \Omega/\text{fase}$  e uma resistência de armadura de  $0,5 \Omega/\text{fase}$ . Calcule a regulação percentual de tensão a plena carga com F.P.=0,8 atrasado e depois com F.P.=0,8 adiantado.

Resp.:  
21,24% e -3,04%

4) Seja um gerador síncrono trifásico, 250 KVA, 440 V de linha (Y), 60 Hz, 4 pólos, com reatância síncrona de  $1 \Omega/\text{fase}$ , ligado a um barramento infinito. A corrente de excitação é ajustada para a condição nominal com F.P. = 1,0.

a) Determinar  $V_o$  e  $\delta$  para esta condição.

b) Determinar novos valores de  $V_o$ ,  $\delta$ , P, I e  $\cos\phi$ , devido um acréscimo de 15% na corrente de excitação.

c) Com a corrente acrescida de 15%, eleva-se o conjugado do motor em 10%, determinar I,  $\cos\phi$  e P para esta condição.

Resp.:

a)  $414,9 \angle 52,2^\circ$  V b)  $477,1 \angle 43,4^\circ$  V; 250 KW;  $340,64 \angle -2,74^\circ$  A; 0,962 indutivo

c)  $477,1 \angle 49,14^\circ$  V; 275 KW;  $364 \angle -9,51^\circ$  A; 0,986 indutivo

5) Um gerador síncrono de pólos lisos **será** conectado em paralelo com um barramento infinito.

a) Quais são os procedimentos que devem ser tomados para efetuar a conexão em paralelo?

b) Uma vez colocado em paralelo o gerador, quais são os efeitos da corrente da bobina excitatriz e da vazão da água na potência entregue ao **barramento infinito**?

c) Admitindo-se que o **gerador** em paralelo com o barramento infinito está trabalhando com uma determinada carga que exige uma corrente de 1,0 p.u. com fator de potência atrasado (gerador).

Explique o que acontece com:

- a tensão interna gerada ( $V_o$ )
- a tensão terminal ( $V_a$ )
- a corrente ( $I_a$ )
- o ângulo de defasagem ( $\phi$ ), no barramento infinito.
- o ângulo de carga ( $\delta$ )
- a potência ativa gerada (P)
- a velocidade do gerador ( $w$ )

Quando a corrente do campo é diminuída em 30%.

d) Admitindo-se que o gerador em paralelo com o barramento infinito está trabalhando com carga que exige uma corrente de 0,8 p.u.. Explique o que acontece com:

- a tensão interna gerada ( $V_o$ )
- a tensão terminal ( $V_a$ )
- a corrente ( $I_a$ )
- o ângulo de defasagem ( $\phi$ ), no barramento infinito.
- o ângulo de carga ( $\delta$ )
- a potência ativa gerada (P)
- a velocidade do gerador ( $w$ )

Quando a vazão da turbina é controlada de maneira a aumentar o torque da máquina síncrona em 40%.

OBS: Utilizar Diagramas Fasoriais

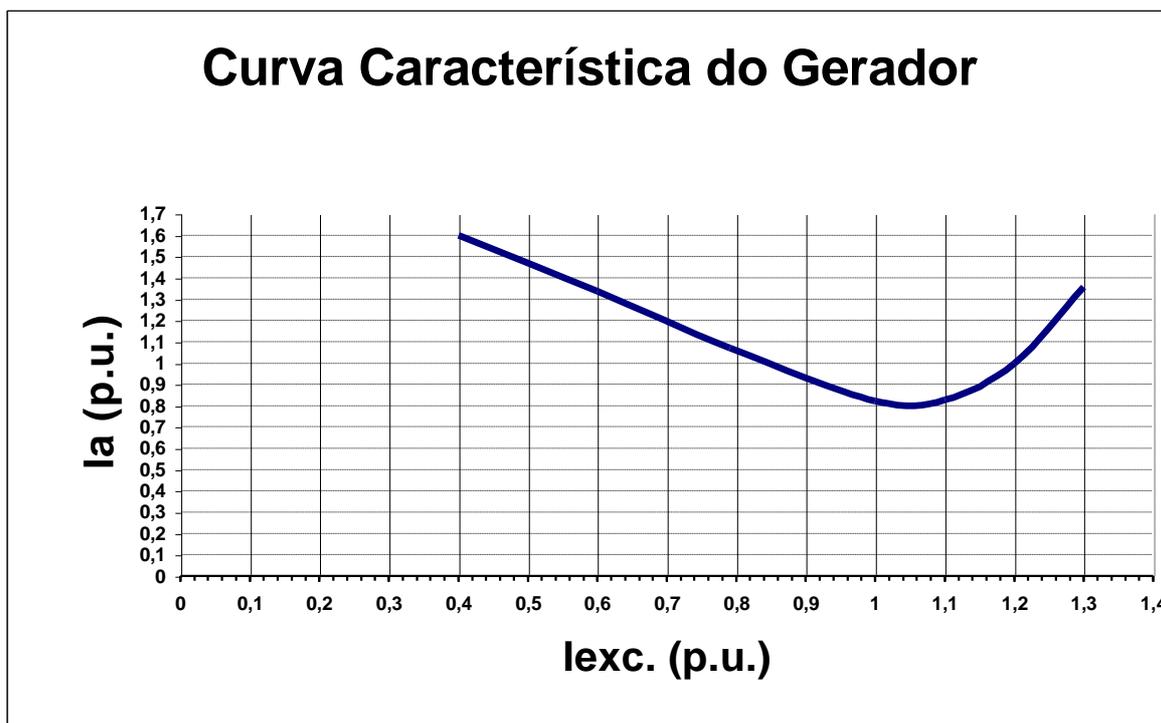


Fig. 5.21

6) Um gerador síncrono trifásico, de pólos cilíndricos, conectado em  $\Delta$ , 60 Hz, 230 V, 5 KVA tem uma resistência de armadura de  $0,4 \Omega$  por fase e uma reatância síncrona de  $1,8 \Omega$  por fase. Calcular:

- A regulação de tensão a plena carga e fator de potência 0,7 atrasado.
- A corrente na linha a meia carga e fator de potência 0,85 adiantado.

Resp.:

- 4,58%
- $6,27 \angle 31,79^\circ \text{ A}$

7) Um gerador síncrono de pólos lisos **será** conectado em paralelo com um barramento infinito.

- Quais são os procedimentos que devem ser tomados para efetuar a conexão em paralelo?
- Uma vez colocado em paralelo o gerador, quais são os efeitos da corrente da bobina excitatriz e da vazão da água na potência entregue ao **barramento infinito**?
- Admitindo-se que **o gerador** em paralelo com o barramento infinito está trabalhando com uma determinada carga que exige uma corrente de 1,2 p.u. com fator de potência adiantado (gerador). Explique o que acontece com:

- a tensão interna gerada ( $V_o$ )
- a tensão terminal ( $V_a$ )
- a corrente ( $I_a$ )
- o ângulo de defasagem ( $\varphi$ ), no barramento infinito.
- o ângulo de carga ( $\delta$ )
- a potência ativa gerada ( $P$ )
- a velocidade do gerador ( $\omega$ )

Quando a corrente do campo é aumentada em 40%.

OBS: Utilizar Diagramas Fasoriais

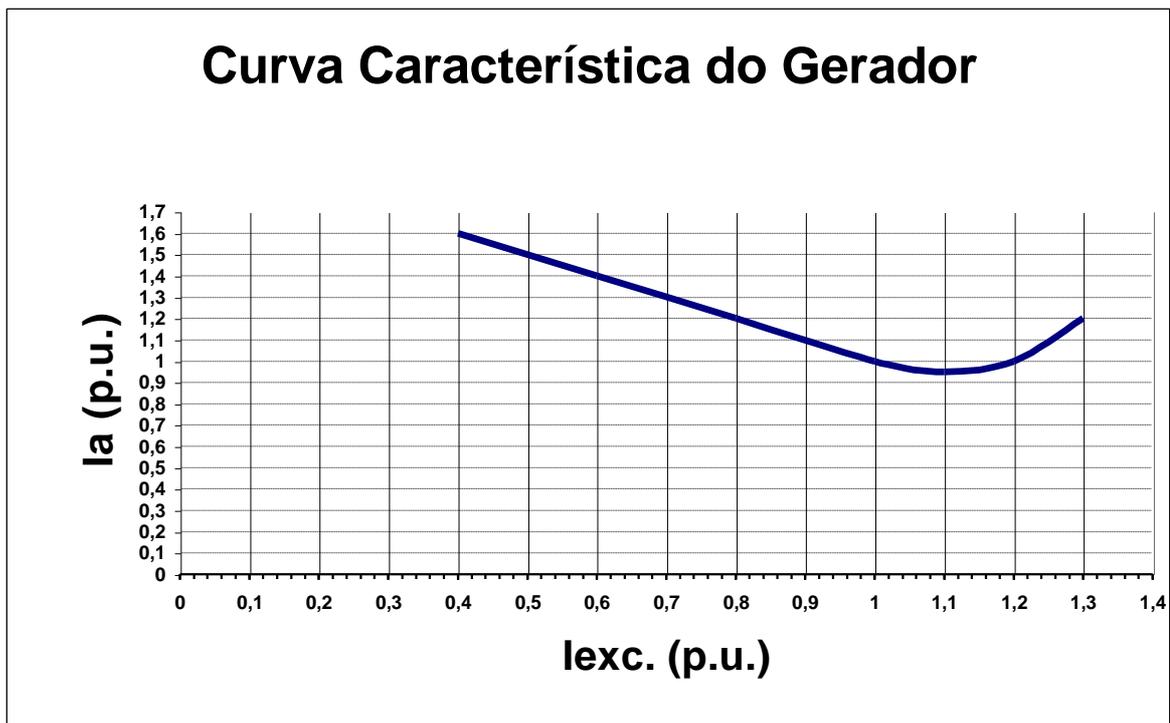


Fig. 5.22

8) Um gerador síncrono de rotor cilíndrico, entrega 500KW a um grupo de motores de indução com fator de potência de 0,8 em atraso. Se a capacidade do gerador é de 750 KVA, calcule:

- O número de lâmpadas incandescentes de 100W que pode ser alimentado, além dos motores, sem que o gerador ultrapasse a sua carga nominal.
- Repita (a) se o fator de potência dos motores cai para 0,7.

Resp.:

- a) 1495 b) 498

9) Um motor síncrono trifásico, de pólos cilíndricos, conectado em  $\Delta$ , 60 Hz, 13500 V tem uma resistência de armadura de 1,52  $\Omega$  por fase e uma reatância síncrona de 37,4  $\Omega$  por fase. Quando o motor entrega 2000 HP, o rendimento é de 96% e a corrente de campo é ajustada de forma que o motor tenha uma corrente adiantada de 85 A. <sup>2002\_5D</sup>

- Com que fator de potência o motor está operando.
- Calcule a tensão interna gerada  $V_o$ .
- Calcule a potência e o torque mecânico desenvolvido.

Resp.:

- a) 0,78 capacitivo b) 14665  $\angle -5,79^\circ$  V c) 1554KW; 7.915,3Nm

10) Um gerador síncrono de pólos lisos **será** conectado em paralelo com um barramento infinito.

- Quais são os procedimentos que devem ser tomados para efetuar a conexão em paralelo?
- Uma vez colocado em paralelo o gerador, quais são os efeitos da corrente da bobina excitatriz e da vazão da água na potência entregue ao **barramento infinito**?
- Admitindo-se que o **gerador** em paralelo com o barramento infinito está trabalhando com uma determinada carga que exige uma corrente de 1,0 p.u. com fator de potência adiantado. Explique o que acontece com:
  - a tensão interna gerada ( $V_o$ )
  - a tensão terminal ( $V_a$ )
  - a corrente ( $I_a$ )
  - o ângulo de defasagem ( $\varphi$ ), no barramento infinito.
  - o ângulo de carga ( $\delta$ )
  - a potência ativa gerada (P)

- a velocidade do gerador ( $\omega$ )

Quando a corrente do campo é aumentada em 20%.

d) Admitindo-se que o gerador em paralelo com o barramento infinito está trabalhando com carga que exige uma corrente de 0,95 p.u.. Explique o que acontece com:

- a tensão interna gerada ( $V_o$ )

- a tensão terminal ( $V_a$ )

- a corrente ( $I_a$ )

- o ângulo de defasagem ( $\varphi$ ), no barramento infinito.

- o ângulo de carga ( $\delta$ )

- a potência ativa gerada ( $P$ )

- a velocidade do gerador ( $\omega$ )

Quando a vazão da turbina é controlada de maneira a aumentar o torque da máquina síncrona em 15%. **OBS: Utilizar Diagramas Fasoriais**

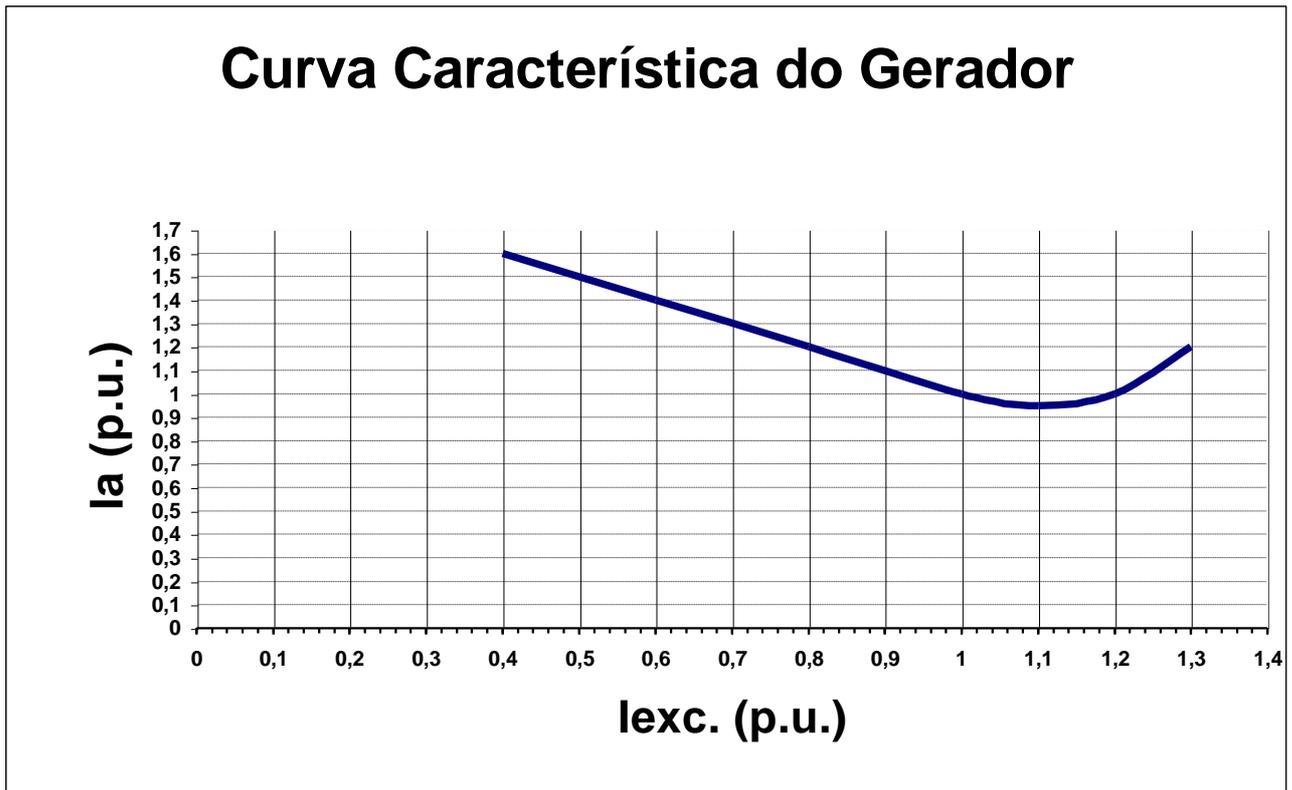


Fig. 5.23

11) Um gerador síncrono de pólos lisos **será** conectado em paralelo com um barramento infinito.

a) Quais são os procedimentos que devem ser tomados para efetuar a conexão em paralelo?

b) Uma vez colocado em paralelo o gerador, quais são os efeitos da corrente da bobina excitatriz e da vazão da água na potência entregue ao **barramento infinito**?

c) Admitindo-se que o **gerador** em paralelo com o barramento infinito está trabalhando com uma determinada carga que exige uma corrente de 1,0 p.u. com fator de potência atrasado. Explique o que acontece com:

- a tensão interna gerada ( $V_o$ )

- a tensão terminal ( $V_a$ )

- a corrente ( $I_a$ )

- o ângulo de defasagem ( $\varphi$ ), no barramento infinito.

- o ângulo de carga ( $\delta$ )

- a potência ativa gerada ( $P$ )

- a velocidade do gerador ( $\omega$ )

Quando a corrente do campo é diminuída em 20%.

d) Admitindo-se que o gerador em paralelo com o barramento infinito está trabalhando com carga que exige uma corrente de 0,8 p.u.. Explique o que acontece com:

- a tensão interna gerada ( $V_o$ )

- a tensão terminal ( $V_a$ )

- a corrente ( $I_a$ )

- o ângulo de defasagem ( $\varphi$ ), no barramento infinito.
- o ângulo de carga ( $\delta$ )
- a potência ativa gerada (P)
- a velocidade do gerador ( $\omega$ )

Quando a vazão da turbina é controlada de maneira a aumentar o torque da máquina síncrona em 40%. **OBS: Utilizar Diagramas Fasoriais**

12) Um gerador síncrono de pólos lisos **será** conectado em paralelo com um barramento infinito.

- Quais são os procedimentos que devem ser tomados para efetuar a conexão em paralelo?
- Uma vez colocado em paralelo o gerador, quais são os efeitos da corrente da bobina excitatriz e da vazão da água na potência entregue ao **barramento infinito**?
- Admitindo-se que **o gerador** em paralelo com o barramento infinito está trabalhando com uma determinada carga que exige uma corrente de 1,2 p.u. com fator de potência adiantado. Explique o que acontece com:

- a tensão interna gerada ( $V_o$ )
- a tensão terminal ( $V_a$ )
- a corrente ( $I_a$ )
- o ângulo de defasagem ( $\varphi$ ), no barramento infinito.
- o ângulo de carga ( $\delta$ )
- a potência ativa gerada (P)
- a velocidade do gerador ( $\omega$ )

Quando a corrente do campo é aumentada em 30%.

- Admitindo-se que o gerador em paralelo com o barramento infinito está trabalhando com carga que exige uma corrente de 0,8 p.u.. Explique o que acontece com:
- a tensão interna gerada ( $V_o$ )
  - a tensão terminal ( $V_a$ )
  - a corrente ( $I_a$ )
  - o ângulo de defasagem ( $\varphi$ ), no barramento infinito.
  - o ângulo de carga ( $\delta$ )
  - a potência ativa gerada (P)
  - a velocidade do gerador ( $\omega$ )

Quando a vazão da turbina é controlada de maneira a aumentar o torque da máquina síncrona em 20%. **OBS: Utilizar Diagramas Fasoriais**

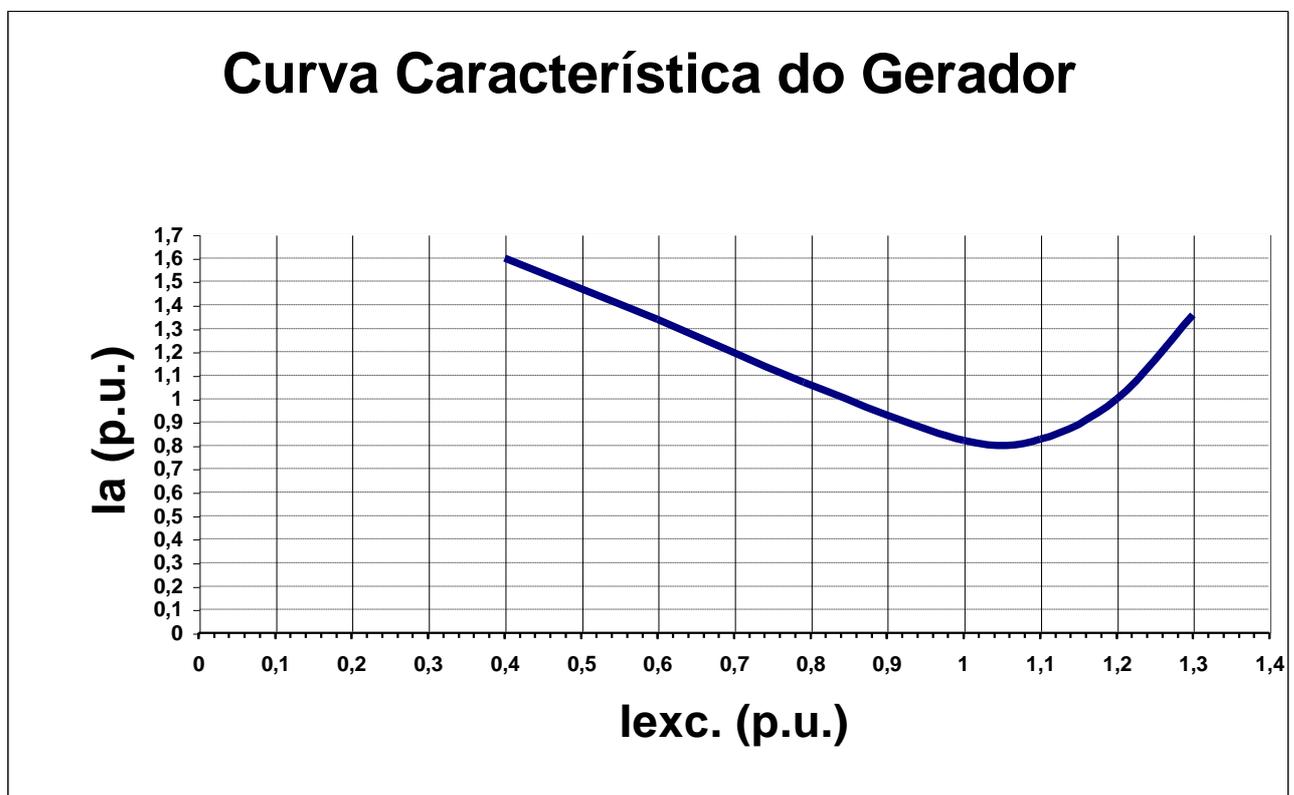


Fig. 5.24

- 13) [exercício 6.5-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Um motor síncrono trifásico, de pólos cilíndricos, conectado em Y, 60 Hz, 13500 V tem uma resistência de armadura de  $1,52 \Omega$  por fase e uma reatância síncrona de  $37,4 \Omega$  por fase. Quando o motor entrega 2000 HP, o rendimento é de 96% e a corrente de campo é ajustada de forma que o motor tenha uma corrente adiantada de 85 A.
- Com que fator de potência o motor está operando.
  - Calcule a tensão interna gerada  $V_o$ .
  - Calcule a potência e o torque mecânico desenvolvido.
  - Este motor será instalado no mesmo barramento que alimenta uma carga de 2500 kVA com fator de potência de 0,85 indutivo. Qual será o fator de potência do barramento?

Resp.:

- a) 0,78 capacitivo b)  $10009,4 \angle -14,86^\circ$  V c) 1492 KW; 7915,3Nm d) 1,0

- 14) Um gerador síncrono trifásico, ligação estrela, rotor cilíndrico, 5KVA, 230V, tem uma reatância síncrona de  $1,8 \Omega$  por fase e uma resistência de armadura de  $0,4 \Omega$  por fase. Calcular:

- Regulação de tensão à plena carga e fator de potência 0,8 atrasado.
- Fator de potência tal que a regulação seja igual a 15%.

Resp.:

- a) 13,8% b) 0,711 indutivo

- 15) Um motor síncrono está operando a plena carga com um fator de potência, tal que a corrente está adiantada de  $45^\circ$  da tensão. Quais são os efeitos sobre: o ângulo de defasagem, a corrente de armadura, o ângulo de carga e a velocidade do motor quando:

- A corrente do campo é aumentada de 10% e a tensão terminal é mantida constante.
- A corrente de campo é mantida constante e a tensão terminal é aumentada de 10%.

- 16) Um gerador síncrono tem as seguintes reatâncias: eixo direto 1 p.u.; eixo de quadratura 0,5 p.u.. Está alimentando uma carga nominal com fator de potência 0,8 adiantado. Para essas condições, determinar:

- Tensão induzida internamente e o ângulo da carga.
- Potência desenvolvida devido a variação da mútua indutância e a devido a variação da relutância.

OBS:

$$P_D = \frac{V_o V_a}{x_d} \text{sen} \sigma + \frac{V_a^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right) \text{sen} 2\sigma$$

Resp.:

- a)  $0,74 \angle 29,73^\circ$  b) 0,9 p.u.

- 17) [exercício 8.1-Máquinas Elétricas, Irving I. Kosow, 1989] A frequência da tensão que deve ser aplicada ao estator de um motor síncrono trifásico de 220V , 10 pólos que deve operar a 1200 RPM. O número de pólos necessário para que um motor síncrono trifásico, de 220V, opere a uma velocidade de 500 RPM quando se aplica uma tensão de uma rede de 50 Hz ao estator.

Resp.:

- a) 100Hz b) 12.

- 18) [exercício 8.19-Máquinas Elétricas, Irving I. Kosow, 1989] Calcule a capacidade do compensador síncrono trifásico necessário para elevar o fator de potência de uma carga de 20.000KW, que funciona a um fator de potência de 0,6 em atraso, para:

- Um fator de potência de 0,8 em atraso (desprezando as perdas do compensador).
- O fator de potência unitário (imaginando um compensador síncrono com um fator de potência de 10% em avanço).

c) Em (b), qual a potência em KW que pode ser acrescentada ao sistema para produzir os KVA totais originais?

Resp.:

a) 0 – j11.667 MVA    b) 2,68 – j26,67 MVA    c) 10,65 MW

19) [exercício 8.21-Máquinas Elétricas, Irving I. Kosow, 1989] Um motor síncrono trifásico de 1300HP, com um fator de potência de 0,8 supre uma carga mecânica desse valor. O motor é ligado a uma linha, que também alimenta uma carga de 1200VA com um fator de potência de 0,6 em atraso, constituída por vários motores de indução. Imagine que o rendimento do motor síncrono é 90%. Calcule:

a) Se é possível que o motor síncrono traga o fator de potência da linha para o valor unitário sem que exceda a capacidade do motor síncrono.

b) O fator de potência final do sistema, com o motor síncrono funcionando em sua capacidade nominal, entregando 1300HP e estando o motor em sobreexcitação.

Resp.:

a) Não    b) 0,997 indutivo.

20) [exercício 8.22-Máquinas Elétricas, Irving I. Kosow, 1989] Um motor síncrono trifásico eleva o fator de potência de um sistema de 0,7 para 0,9 indutivo quando o mesmo é ligado à linha. Se o motor síncrono solicita 500 KVA, a um fator de potência de 0,8 em avanço, qual era a carga original do sistema em KVA antes de ser acrescido o motor?

Resp.:

a) 1316KVA; 0,70 indutivo

21) [exercício 8.24-Máquinas Elétricas, Irving I. Kosow, 1989] Uma área industrial tem uma carga de 4000 KVA a um fator de potência de 0,6 em atraso. Um motor síncrono de 800 HP, com um rendimento de 88% é acrescido para acionar uma carga mecânica, mas, sobretudo para elevar o fator de potência do sistema para 0,9 em atraso. Calcule:

a) O fator de potência no qual funciona o motor síncrono.

b) A capacidade nominal, em KVA, do motor síncrono.

c) A potência útil do motor síncrono de (b), se ele funciona para uma carga que lhe solicita a capacidade nominal com um fator de potência unitário (imaginando o mesmo rendimento).

Resp.:

a) 0,367 capacitivo    b) 1838,8KVA    c) 2169HP

22) [exercício 8.25-Máquinas Elétricas, Irving I. Kosow, 1989] Um conversor de frequência consiste de duas máquinas síncronas acopladas, sendo o alternador de 10 pólos, 50 Hz, acionado por um motor de 60 Hz. Calcule o número de pólos que o motor deve ter.

Resp.:

12 pólos

23) [exercício 8.26-Máquinas Elétricas, Irving I. Kosow, 1989] Utilizando-se um motor síncrono de 60 Hz para produzir 400 Hz, especifique o menor número de pólos necessários para cada uma das máquinas síncronas, de modo a conseguir a conversão de frequência.

Resp.:

$P_a = 40$  pólos;  $P_m = 6$  pólos

24) [exercício 8.28-Máquinas Elétricas, Irving I. Kosow, 1989] Um centrifugador de alta velocidade foi projetado para funcionar a uma velocidade constante de 1000 RPM, a fim de produzir a força centrífuga necessária. Escolhe-se um motor que satisfaz a condição, mas dispõe-se apenas de

60Hz. Especifique o conversor de frequência que realizará a conversão necessária para que o motor funcione.

Resp.:  
72 pólos

25) [exercício 6.37-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Uma bobina de 60 espiras, montadas numa armadura de 120mm de diâmetro e 100mm de comprimento axial, gira a 3000 RPM num campo magnético uniforme de 0,5T. Qual é a tensão instantânea induzida na bobina?

Resp.:  
 $V(t) = 113 \text{ sen } 314,16t \text{ (V)}$

26) [exercício 6.39; 6.40; 6.41-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um gerador síncrono trifásico de 25 KVA, ligação estrela, 400 V, tem uma impedância síncrona de  $0,05 + j 1,6\Omega$  por fase. Determine a regulação de tensão a plena carga para:

- Fator de potência 0,8 atrasado.
- Fator de potência unitário.
- Fator de potência 0,8 adiantado.
- Determine os ângulos de carga para os itens a, b e c.
- Se o gerador tiver regulação de tensão nula a meia carga. Desprezando a resistência da armadura, qual o fator de potência de operação e a potência desenvolvida.

Resp.:  
a) 22,2% b) 10,67% c) -5,47% d)  $7,2^\circ$ ;  $13,05^\circ$ ;  $15,14^\circ$  e) 0,998 adiantado; 12,5KW

27) [exercício 6.42-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um gerador síncrono trifásico, 500 KVA, 6 pólos, 500 V, ligação em estrela, tem uma impedância síncrona de  $0,1 + j 1,5\Omega$  por fase. Se o gerador está girando a 1000 RPM, qual é a frequência da tensão gerada? Determine a tensão de excitação e o ângulo de carga para plena e o fator de potência 0,8 atrasado.

Resp.:  
50 Hz;  $1078,58 \angle 37,61^\circ$

28) [exercício 6.49-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um gerador síncrono de rotor cilíndrico, ligação em estrela, tem  $X_s=1,2\Omega$  por fase e  $R_a=0,4\Omega$  por fase. O gerador alimenta uma carga de 30 KVA a 200 V e fator de potência 0,8 atrasado. A característica de excitação é apresentada na figura 5.25. Calcule o ângulo de carga e a corrente de campo.

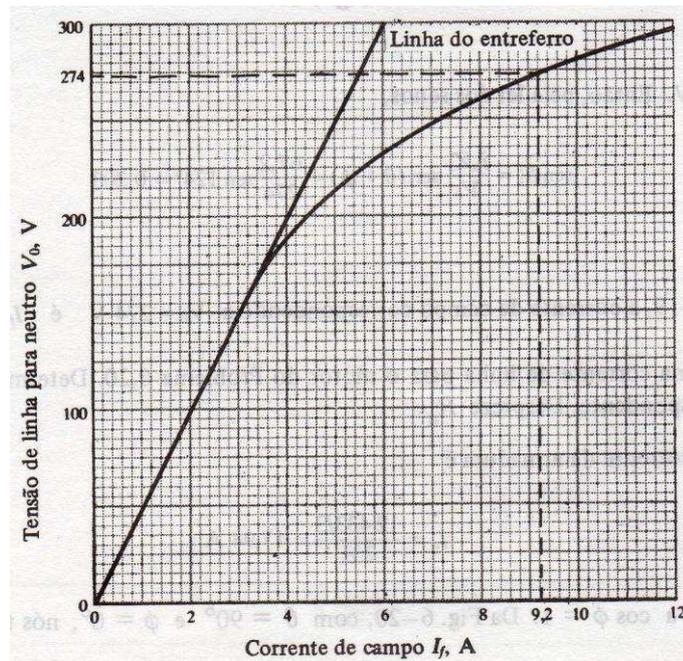


FIG. 5.25

Resp.:

214,78∠16,88° V; 5,2A

29) [exercício 6.56-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um motor síncrono de rotor cilíndrico, 400 V, trifásico, tem um rendimento de 92% quando desenvolvendo 18HP no eixo. A impedância síncrona por fase é  $0,5 + j 1,5\Omega$ . Se o motor opera com fator de potência de 0,9 atrasado. Determine o ângulo de carga e a corrente de campo. A característica de saturação do motor é apresentada na figura 5.25.

Resp.:

206,81∠-7,36° V; 4,5A

30) [exercício 6.59-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um gerador síncrono de rotor cilíndrico opera numa barra infinita com 2300 V de linha. O gerador é conectado em estrela, tem uma reatância síncrona de  $2\Omega$  por fase, resistência da armadura desprezível e supre uma corrente de 300 A com fator de potência de 0,8 atrasado. Um distúrbio causa o ângulo de carga oscilar  $2^\circ$  elétricos. Determine a potência sincronizante por fase.

Resp.:

39,1 KW

31) [exercício 6.60-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Dois geradores síncronos idênticos, conectados em estrela, operando em paralelo, reparem igualmente uma carga de 1 MW a 11 KV e fator de potência 0,8 atrasado. Se uma das máquinas supre 40 A com fator de potência atrasado, determine:

- Corrente da segunda máquina.
- Fator de potência da segunda máquina.

Resp.:

27,82A; 0,944 indutivo

32) Determinar a tensão  $V_0$  necessária, em vazio, para que com carga nominal resulte tensão nominal nos terminais da máquina assíncrona.

São dados:  $R_a = 5\%$ ;  $x_d = 40\%$ ;  $x_q = 20\%$ . A máquina síncrona funciona com carga nominal e FP = 0,8 indutivo.

Resp.:  
 $1,3\angle-6,4^\circ$  p.u.

33) [exercício 6.26-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um gerador síncrono de rotor cilíndrico, trifásico, 3300V, 1000KVA, 60 Hz, 4 pólos, ligação em estrela. Tem uma reatância síncrona de  $1\Omega$ /fase; a reatância da armadura é desprezível. O gerador está operando a plena carga com FP = 0,8 indutivo, numa barra infinita. Calcule a potência sincronizante por fase, se um distúrbio causa uma variação de  $1^\circ$  mecânico no ângulo de carga.

Resp.:  
115 KW

34) Um gerador síncrono de rotor cilíndrico, trifásico, 1000KVA, 2,3KV, ligação em estrela, 60 HZ, 4 pólos, tem uma reatância síncrona de  $6\Omega$ /fase e uma resistência de armadura de  $0,5\Omega$ /fase. Está operando em paralelo com um barramento de tensão da rede. A corrente de excitação foi ajustada para condição nominal e com fator de potência unitário. Determinar:

- $V_o$  e o ângulo de carga para esta situação.
- Novos valores de  $V_o$ ,  $\delta$ , da potência ativa,  $I_a$  e do novo FP devido um acréscimo da corrente de excitação de 20%.
- Novos valores de  $V_o$ ,  $\delta$ , da potência ativa,  $I_a$  e do novo FP devido um acréscimo do conjugado da máquina através do controle da vazão da água de 10%. A máquina estava na condição inicial.

Resp.:  
a)  $2093,04\angle46,02^\circ$  V b)  $2511,65\angle36,84^\circ$  V c)  $2093,04\angle52,33^\circ$  V; 1100KW;  $275,29\angle6,45^\circ$  A; 0,99 capacitivo d)  $2511,65\angle36,84^\circ$  V; 1000KW;  $274,29\angle-19,61^\circ$  A; 0,94 indutivo

35) Um motor síncrono está operando com plena carga com um fator de potência, tal que a corrente está atrasada de  $45^\circ$ . Quais são os efeitos sobre: o ângulo de defasagem, a corrente de armadura, o ângulo de carga e a velocidade do motor quando.

- A corrente de campo é aumentada de 20 % e a tensão terminal é mantida constante.
- A corrente de campo é mantida constante e a tensão terminal é aumentada de 15%.

36) Um gerador síncrono trifásico, ligado em estrela, 60Hz, 13500V, resistência de armadura de  $1,52\Omega$ /fase e reatância síncrona de  $37,4\Omega$ /fase está operando com uma carga nominal de 2000HP. Para essa carga o rendimento do gerador é de 96% e a corrente do barramento é 85A adiantada. Determinar:

- O fator de potência do barramento.
- A tensão interna na armadura  $V_o$ .
- A regulação de tensão.
- O diagrama fasorial.

Resp.:  
a) 0,75 adiantado b)  $10253\angle12,97^\circ$  V c) 31,54%

- 37) a) Descreva os aspectos da máquina assíncrona.  
b) Explique por que um motor síncrono não tem torque de partida.  
c) Explique por que um motor síncrono ou funciona à velocidade síncrona ou não funciona.  
d) Explique como o ângulo de potência pode caracterizar o funcionamento da máquina síncrona como motor ou gerador. Utiliza diagrama fasorial.  
e) Explique como a corrente de excitação influencia no comportamento da máquina síncrona quando funcionando como motor. Utilize diagrama fasorial.  
f) Comente sobre a curv "V" do motor síncrono.  
g) Explique o comportamento do gerador síncrono para diferentes tipos de carga (resistiva, indutiva, capacitiva). Utiliza gráfico  $I_{exc}$ . vs.  $I_{Linha}$ .

## 6. MÁQUINAS ASSÍNCRONAS

A primeira indicação de que poderia haver um intercâmbio entre energia mecânica e energia elétrica foi mostrada por Michael Faraday em 1831, através da lei da indução eletromagnética, considerada uma das maiores descobertas individuais para o progresso da ciência e aperfeiçoamento da humanidade. Baseando-se nos estudos de Faraday, o físico Galileu Ferraris, em 1885, desenvolveu o motor elétrico assíncrono de corrente alternada.

Com uma construção simples, versátil e de baixo custo, aliado ao fato de utilizar como fonte de alimentação a energia elétrica, o motor elétrico é hoje o meio mais indicado para a transformação de energia elétrica em mecânica.

### 6.1 Tipos de Motores

Através dos tempos, foram desenvolvidos vários tipos de motores elétricos para atender as necessidades do mercado. A figura 6.1 apresenta de um modo geral os diversos tipos de motores atualmente existentes.

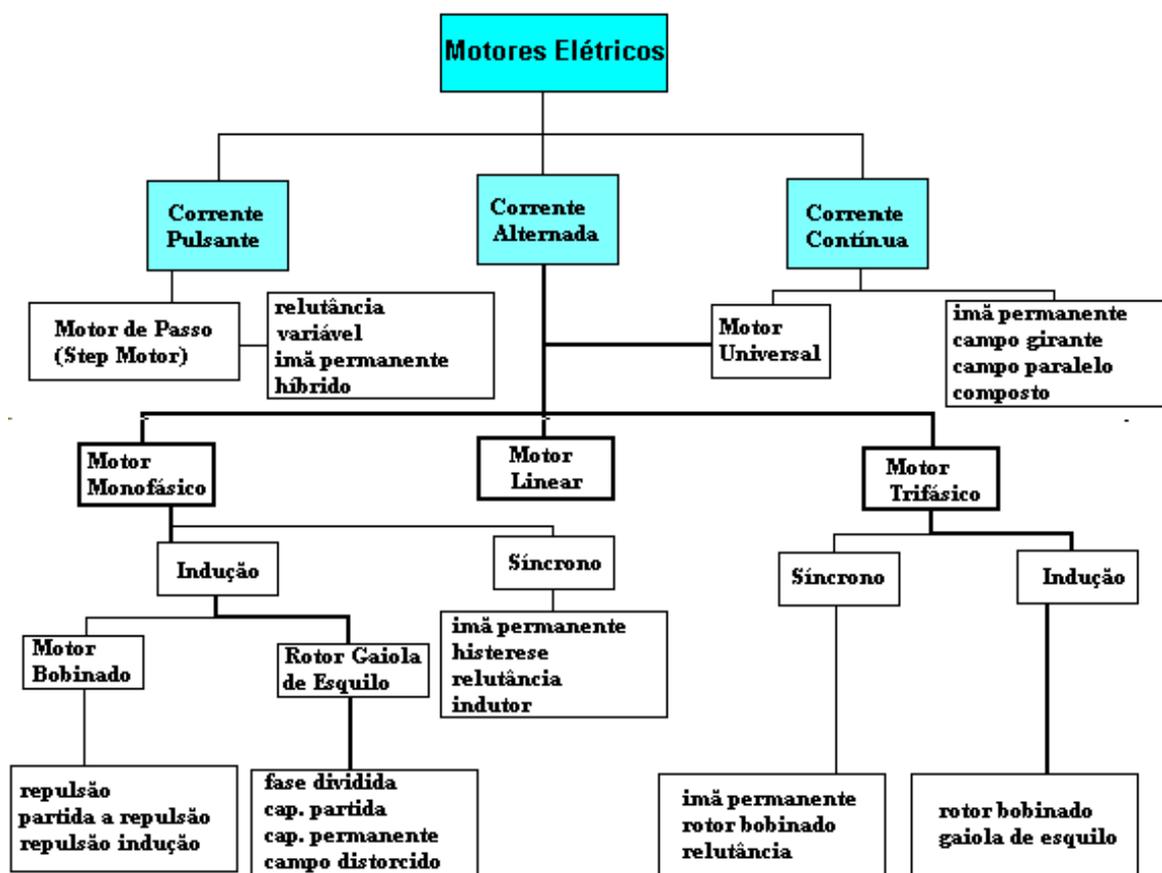


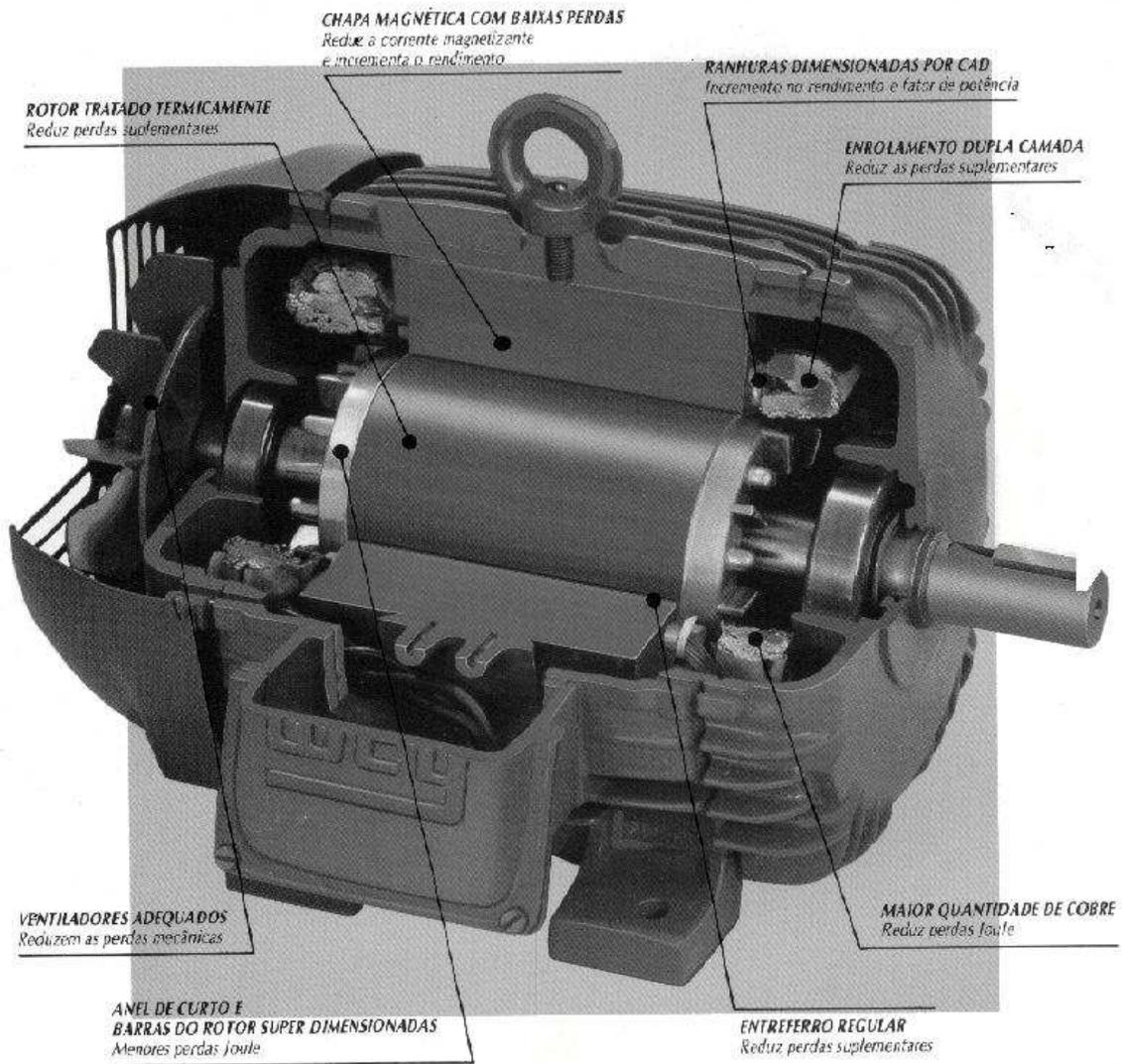
Fig. 6.1 Tipos de Motores.

### 6.2 Motores de Indução Trifásicos - Motores Assíncronos

De todos os tipos de motores elétricos existentes, este é o mais simples e robusto. É constituído basicamente de dois conjuntos: estator bobinado e conjunto do rotor.

O nome “motor de indução” se deriva do fato de que as correntes que circulam no secundário (rotor) são induzidas por correntes alternadas que circulam no primário (estator). Os efeitos eletromagnéticos combinados das correntes do estator e do rotor produzem a força que gera o movimento.

A figura 6.2 nos permite visualizar um motor de indução em corte. Já a figura 6.3 mostra apenas a carcaça de um motor de indução.



**Fig. 6.2** Motor de Indução em corte.  
FONTE: WEG



**Fig. 6.3** Carcaça de um motor de indução.  
FONTE: WEG

### 6.3 A Origem do Movimento em Motores Elétricos

Quando da circulação de corrente elétrica nos enrolamentos do rotor e do estator, aparecem campos magnéticos cujos pólos contrários se atraem e os de mesmo nome se repelem (Lei do Magnetismo), dando origem assim ao deslocamento do rotor, que é montado de tal forma que possa girar em relação a um estator fixo. Este princípio de trabalho vale para todos os tipos de motores, apesar de variar, entre limites bastante amplos, a disposição dos campos magnéticos.

A corrente trifásica tem a particularidade, de dar origem a um campo girante.

Entende-se por um campo girante, um campo magnético cujos pólos **com enrolamento estático**, mudam de posição girando, na periferia de uma máquina. Se for constituído igualmente no rotor da máquina um campo magnético, então os pólos contrários do rotor são atraídos pelos pólos do estator e arrastados por este no seu movimento de deslocamento, sobre a periferia do estator. Com isto gira também o rotor.

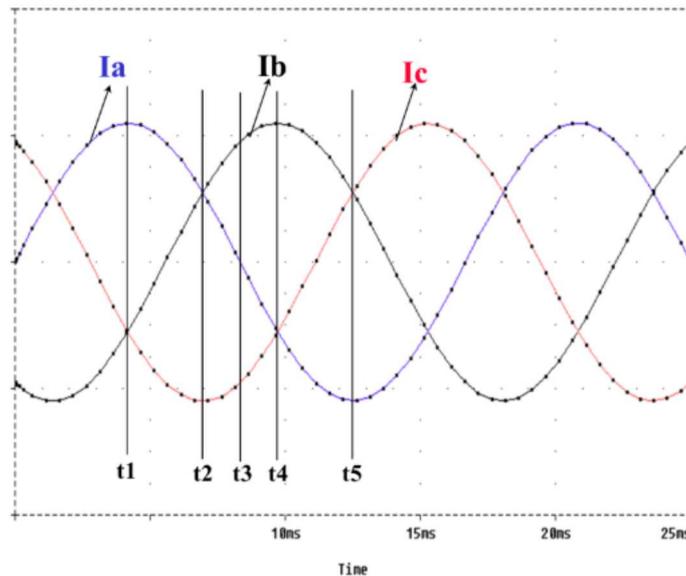
Pelo fato de os motores trifásicos basearem o seu funcionamento neste princípio, são chamados de **motores de campo girante**.

### 6.3.1 A formação do campo girante

Para a formação de um campo girante homogêneo, duas condições devem ser satisfeitas:

O estator do motor deve ser dotado de três bobinas deslocadas de  $120^\circ$ . Nas três bobinas do estator devem circular três correntes alternadas senoidais, que devem ter entre si um deslocamento de fase de  $120^\circ$ , ou seja  $1/3$  de período. Esta é a corrente trifásica, como a que é gerada num gerador trifásico.

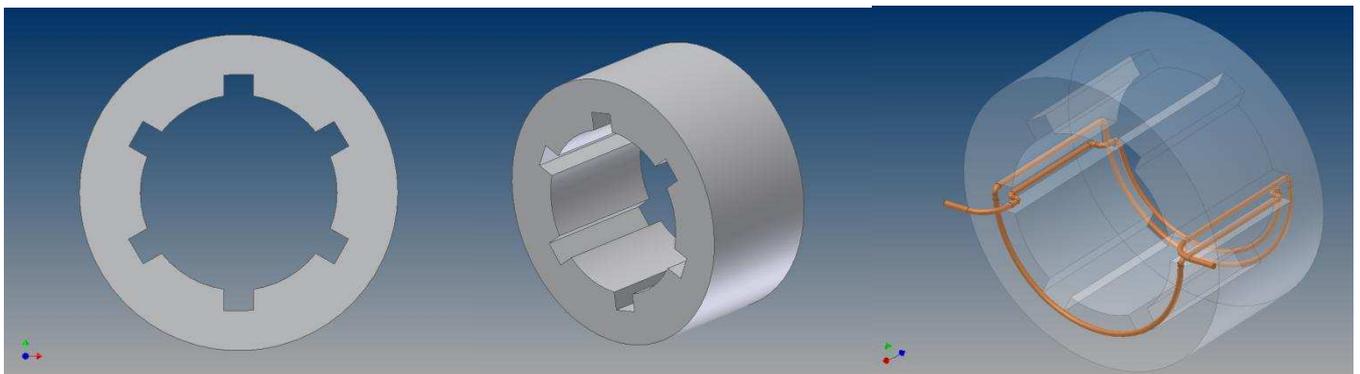
A figura 6.4 apresenta as correntes trifásicas que serão injetadas nas bobinas do estator.



**Fig. 6.4** Correntes trifásicas defasadas de  $120^\circ$ .

Quando um enrolamento monofásico é percorrido por uma corrente alternada, cria-se ao redor deste um campo magnético alternado fixo, cuja intensidade varia proporcionalmente a corrente. Como sua orientação norte-sul é sempre a mesma, diz-se que o campo magnético criado é pulsante. Porém, quando três enrolamentos defasados de  $120^\circ$  no espaço são percorridos por correntes defasadas de  $120^\circ$  no tempo (caso das correntes dos sistemas de alimentação trifásica), o campo magnético criado é girante, ou seja, sua orientação norte-sul gira continuamente e sua intensidade é constante.

Este campo magnético girante se forma em cada instante, devido a combinação de cada um dos campos magnéticos criados por cada enrolamento monofásico. A figura 6.5 ilustra o estator com seis ranhuras, o qual será utilizado para demonstrar a maneira como se produz um campo girante, para tal, será adotado a construção do enrolamento trifásico de passo pleno para a constituição de dois pólos magnéticos, conforme apresentado na figura 6.6.



**Fig. 6.5** Ilustração do estator com seis ranhuras.

## Enrolamento Trifásico – 2 pólos – Passo Pleno

$$\text{N}^\circ \text{ de Ranhuras} = 2 \text{ Pólos} * 3 = 6$$

$$\text{Graus Elétricos} = 2 \text{ Pólos} * 180^\circ = 360^\circ$$

$$\frac{\text{Graus entre Ranhuras} = \text{Graus Elétricos}}{\text{N}^\circ \text{ de Ranhuras}} = \frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$$

$$\text{Graus entre Bobinas} = 120^\circ$$

$$\text{Graus entre terminais da mesma bobina} = 180^\circ$$

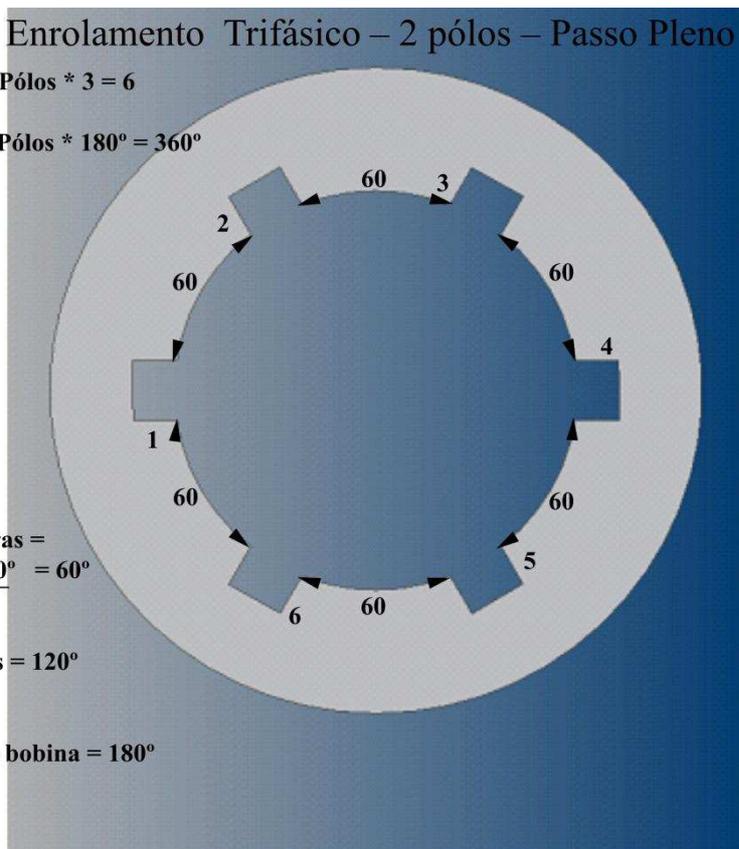


Fig. 6.6 Constituição do enrolamento trifásico de 2 pólos, passo pleno.

As correntes trifásicas variam instantaneamente, conseqüentemente os fluxos magnéticos produzidos por elas também variam instantaneamente, sendo que o fluxo magnético resultante é a soma fasorial dos três. As figuras 6.7, 6.8 e 6.9 ilustram essa composição para os instantes  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$ .

$$\phi_{\text{resultante}} = \phi_a + \phi_b + \phi_c$$

$$\phi_{\text{resultante}} = \phi_{\text{máx}} + \phi_{\text{máx.}}/2\cos 60^\circ + \phi_{\text{máx.}}/2\cos 60^\circ$$

$$\phi_{\text{resultante}} = 3/2\phi_{\text{máx}}$$

Instante T1:

$$I_a = I_{\text{máx.}} (+)$$

$$\phi_a = \phi_{\text{máx.}}$$

$$I_b = I_c = -I_a/2$$

$$\phi_b = \phi_c = \phi_{\text{máx.}}/2$$

Convenção:

$$I + \left\{ \begin{array}{l} \odot \text{ a; b; c} \\ \otimes \text{ a'; b'; c'} \end{array} \right.$$

$$I - \left\{ \begin{array}{l} \otimes \text{ a; b; c} \\ \odot \text{ a'; b'; c'} \end{array} \right.$$

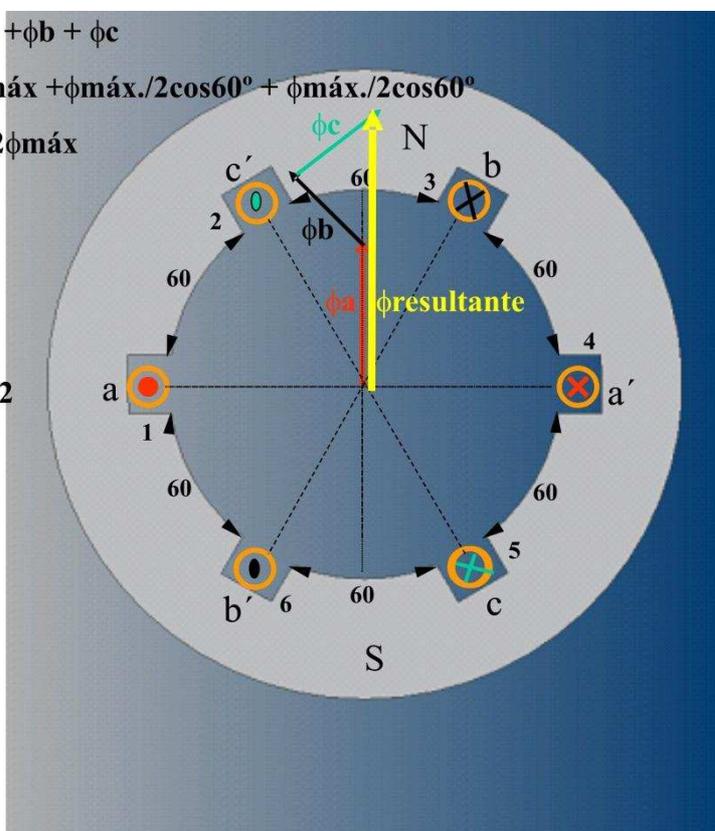


Fig. 6.7 Campo magnético estabelecido para o instante  $t_1$ , 2 pólos, passo pleno.

$$\phi_{\text{resultante}} = \phi_a + \phi_b + \phi_c$$

$$\phi_{\text{resultante}} = \phi_{\text{máx}} + \phi_{\text{máx}}/2\cos 60^\circ + \phi_{\text{máx}}/2\cos 60^\circ$$

$$\phi_{\text{resultante}} = 3/2\phi_{\text{máx}}$$

**Instante T2:**

$$I_c = I_{\text{máx.}} (-)$$

$$\phi_c = \phi_{\text{máx.}}$$

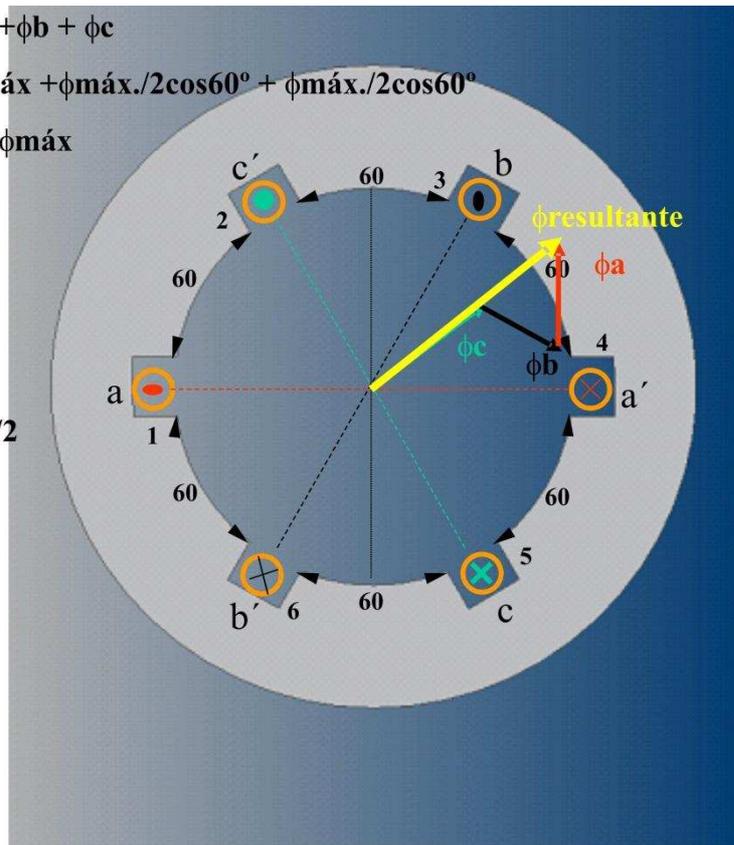
$$I_b = I_a = -I_c/2$$

$$\phi_b = \phi_a = \phi_{\text{máx.}}/2$$

**Convenção:**

$$I + \left\{ \begin{array}{l} \ominus a; b; c \\ \otimes a'; b'; c' \end{array} \right.$$

$$I - \left\{ \begin{array}{l} \otimes a; b; c \\ \ominus a'; b'; c' \end{array} \right.$$



**Fig. 6.8** Campo magnético estabelecido para o instante  $t_2$ , 2 pólos, passo pleno.

$$\phi_{\text{resultante}} = \phi_a + \phi_b + \phi_c$$

$$\phi_{\text{resultante}} = \frac{\sqrt{3}}{2}\phi_{\text{máx.}} \cos 30^\circ + \frac{\sqrt{3}}{2}\phi_{\text{máx.}} \cos 30^\circ$$

$$\phi_{\text{resultante}} = 3/2\phi_{\text{máx}}$$

**Instante T3:**

$$I_a = \text{zero}$$

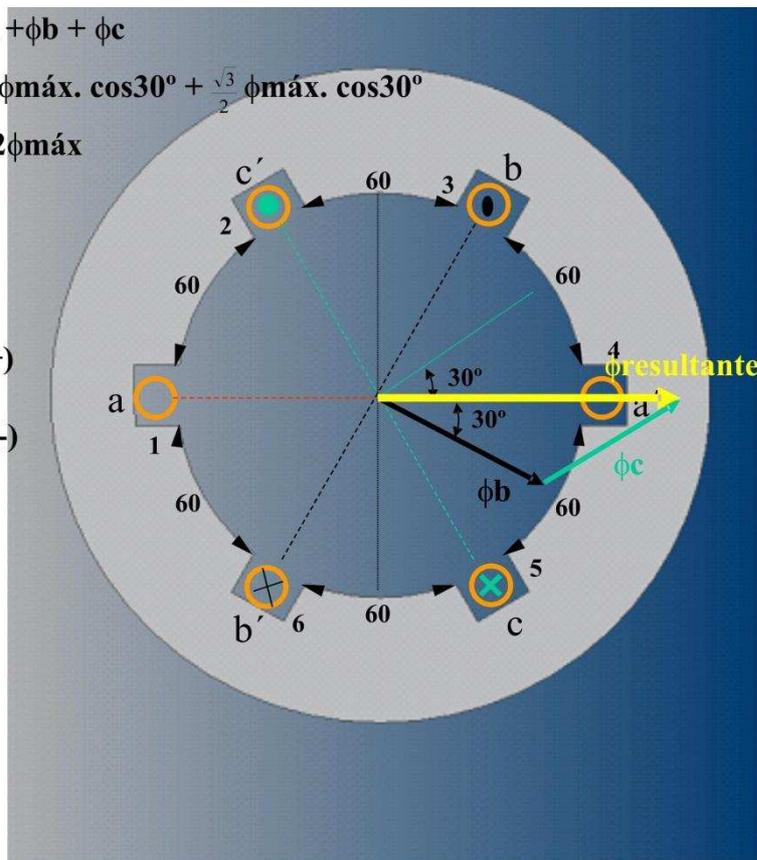
$$I_b = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{máx.}} (+)$$

$$I_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{máx.}} (-)$$

**Convenção:**

$$I + \left\{ \begin{array}{l} \ominus a; b; c \\ \otimes a'; b'; c' \end{array} \right.$$

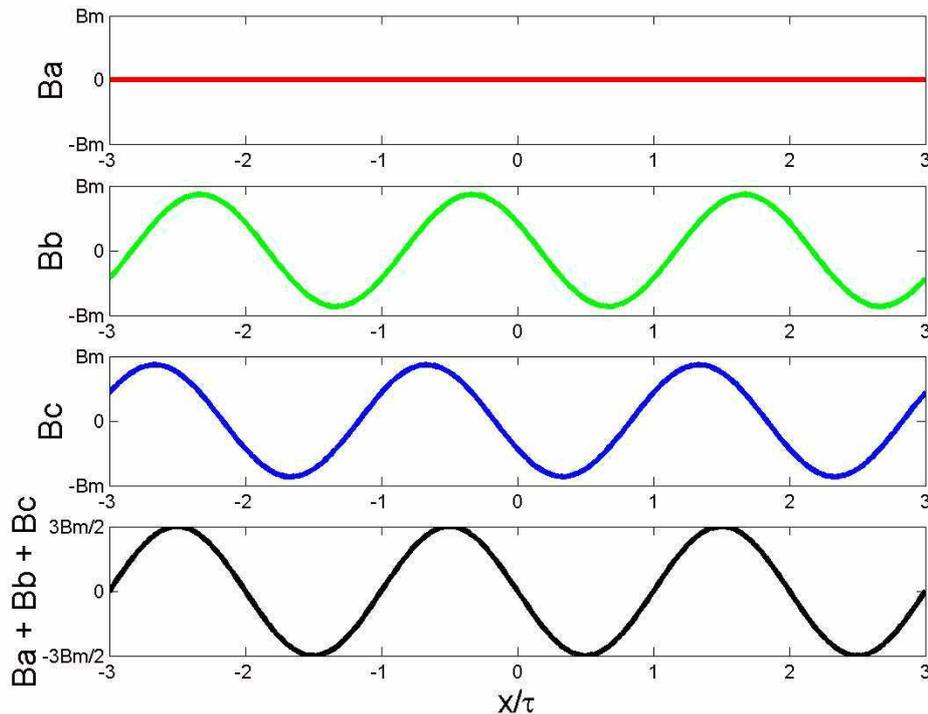
$$I - \left\{ \begin{array}{l} \otimes a; b; c \\ \ominus a'; b'; c' \end{array} \right.$$



**Fig. 6.9** Campo magnético estabelecido para o instante  $t_3$ , 2 pólos, passo pleno.

Analisando as figuras 6.7, 6.8 e 6.9 é possível visualizar o campo magnético girante estabelecido do instante  $t_1$  ao  $t_3$ , onde a amplitude do fluxo magnético resultante é contante e vale  $3/2$  do fluxo magnético máximo e sua velocidade é diretamente proporcional a frequência das correntes aplicadas. A figura 6.10

ilustra os campos magnéticos estabelecidos no instante  $t_3$  em função de cada corrente aplicada e o campo magnético resultante.



**Fig. 6.10** Campo magnético estabelecido para o instante  $t_3$ , 2 pólos, passo pleno.

A constituição do campo magnético girante foi demonstrada do instante  $t_1$  ao  $t_3$ , mas o processo para a demonstração para os demais instantes é análoga, dessa forma é possível concluir que:

*1 Ciclo de corrente  $\Rightarrow$  1 Ciclo de fluxo magnético  $\Rightarrow$  1 volta do campo magnético girante*  
*Enrolamento de 2 pólos ( $P=2$ )*  
*Frequência da corrente = Velocidade do campo magnético ( $N_s$ )*

Assim, a velocidade do campo magnético girante ou velocidade síncrona  $N_s$ , é:

$$N_s = f [RPS]$$

$$N_s = \frac{f}{\left(\frac{P}{2}\right)} [RPS]$$

$$N_s = \frac{2f}{P} [RPS]$$

$$N_s = \frac{120f}{P} [RPM]$$

[6.1]

## 6.4 Princípio de Funcionamento

O estator compõe-se de um núcleo de chapas magnéticas, que são dotadas de certo número de ranhuras, para receber o enrolamento trifásico. O rotor do tipo tambor é, tal como o estator, obtido pela justaposição de chapas magnéticas, e também ranhurado para receber o enrolamento do rotor, convenientemente distribuído.

**Partida:** ligando-se o enrolamento trifásico à tensão, então, gira o campo girante no enrolamento do estator à plena velocidade ( $n_s$ ).

Sua influência se faz sentir também sobre o enrolamento do rotor e induz neste, sucessivamente, tensões alternadas com a frequência da rede. As correntes que se estabelecem nas bobinas, estão defasadas entre si, e originam no rotor um campo comum, girante, cujos pólos de nome contrário estão atrasados de  $90^\circ$  em relação aos do campo girante do estator, como se pode concluir da figura 6.7,

aplicando-se a regra da mão direita. Desta forma, é possível, já na fase de partida, desenvolver um conjugado constante entre os pólos do estator e do rotor, cuja grandeza é da ordem de 2 a 3 vezes o conjugado nominal, que é capaz de vencer a inércia da massa do rotor e da carga plena, e também de colocar em movimento o rotor a partir do seu estado de repouso.

Observando-se que o rotor se move no sentido da rotação do campo girante, a velocidade relativa dos dois campos na fase inicial cada vez se aproxima mais, ou seja, a diferença de velocidade se reduz sucessivamente. Como a tensão induzida é consequência do corte entre os dois campos presentes, a redução da diferença de velocidade reduz a tensão, a frequência, a corrente e o campo do rotor e com isto o conjugado, são reduzidos, chegando a zero perante a velocidade síncrona. Entretanto, se sobre o rotor age um conjugado, então este se retarda em relação ao campo girante, elevando consequentemente a diferença de velocidades. Somente por meio deste retardo induz-se tensão nos enrolamentos do rotor e com isto se torna possível a existência de um campo de rotor e um conjugado. O rotor, portanto, não deve ter uma rotação síncrona, motivo pelo qual este tipo de motor é chamado de motor assíncrono. A diferença de rotação entre o rotor e o campo girante é chamado de **escorregamento**, e sua indicação é feita em porcentagem da rotação do campo girante do estator; na partida seu valor é de 100%.

Nos motores assíncronos, o campo girante do estator tem duas funções:

1. Criação de uma tensão no rotor por indução, para constituição do campo girante do rotor.
2. Criação de um conjugado, conjuntamente com o campo girante do rotor, para deslocar o rotor e a carga.

O enrolamento do estator pode por isto ser considerado análogo ao enrolamento primário de um transformador e o enrolamento secundário análogo ao enrolamento do rotor. Motores assíncronos são também chamados de **motores de indução**.

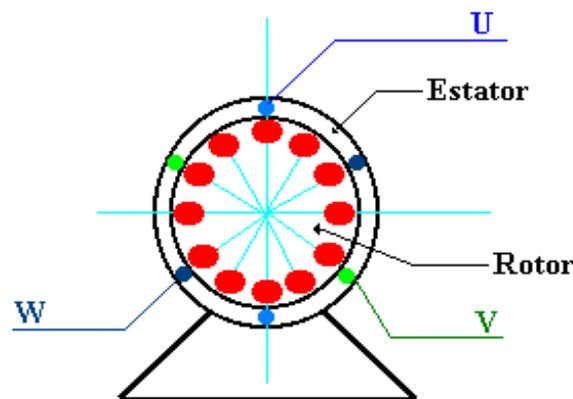
No instante da partida forma-se no rotor, em virtude do escorregamento 100%, a tensão mais elevada possível e com isto uma corrente muito elevada, um campo intenso e o já mencionado conjugado de partida elevado. O motor nesta situação equivale a um transformador com o secundário curto-circuitado; a corrente de partida é por isto igual à corrente de curto-circuito e resulta assim de 3 a 8 vezes maior que a corrente nominal.

**Em Vazio:** em vazio, o escorregamento apenas é de algumas rotações, em virtude da pequena carga presente. Tensão, frequência (menor que 1Hz), corrente e campo no rotor são por isto muito pequenos. Apesar disto, o estator, devido a sua plena magnetização absorve, em motores grandes até 30%, em motores pequenos cerca de 60% da corrente nominal da rede (da qual 90% é corrente reativa).

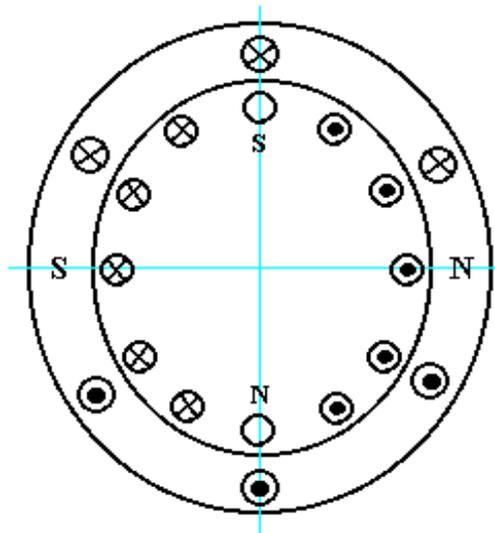
**Sob Carga:** sob carga, a rotação se reduz em virtude das resistências mecânicas encontradas, com o que entretanto o escorregamento se eleva. Com carga nominal, seu valor é de 3 a 5%.

Como consequência da elevação do escorregamento, eleva-se a tensão e a corrente do rotor, com isto, forma-se um campo mais forte e um conjugado mais potente para vencer o conjugado de carga. A rotação entretanto apenas cai pouco, pois uma maior carga pelo aumento do escorregamento, irá criar um conjugado mais elevado. Apenas nas condições de sobrecarga é que o escorregamento se eleva acentuadamente, o motor desenvolve o seu conjugado máximo, porém a rotação mesmo assim cai e o rotor pára. O escorregamento máximo é de cerca de 20 a 30%, sendo o valor do conjugado máximo estabelecido por Norma. A figura 6.14, mostra uma variação característica de conjugado, velocidade e escorregamento nas condições de partida, carga e sobrecarga. Escorregamento, tensão no rotor e frequência do rotor (também chamados de tensões de escorregamento e frequência de escorregamento), são os máximos na partida, os menores em vazio e crescem com o aumento de carga até seu valor máximo.

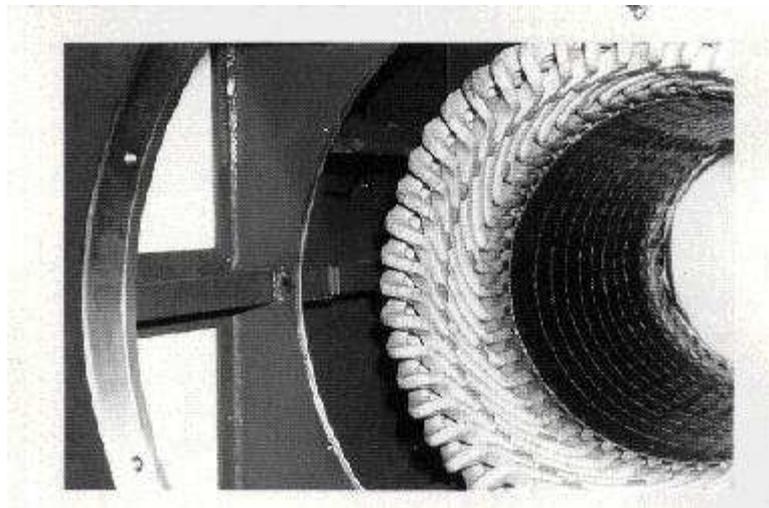
As figuras 6.11, 6.12 e 6.13, ilustram um motor assíncrono em corte, distribuição das correntes trifásicas no estator e consequentemente campos magnéticos no estator e no rotor, e detalhes do estator, respectivamente.



**Fig. 6.11** Corte de um motor assíncrono bipolar.



**Fig. 6.12** Campos girantes do estator e do rotor.



**Fig. 6.13** Estator de uma máquina assíncrona.

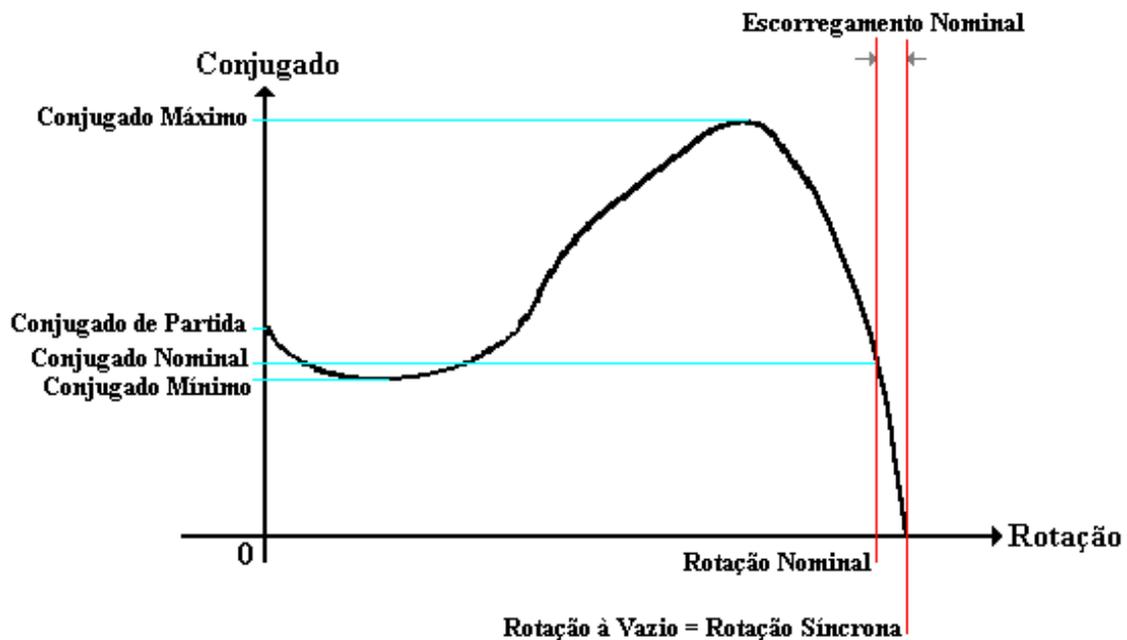


Fig. 6.14 Curva característica de um motor assíncrono.

## 6.5 Motor com Rotor em Curto-Circuito

Motores com rotor em curto-circuito são motores assíncronos com as bobinas do rotor em curto-circuito. As correntes de curto-circuito que aparecem no rotor, criam um campo girante muito intenso, que adota a polaridade do campo girante do estator.

Os lados das bobinas são barras maciças, os anéis de curto-circuito formando a cabeça da bobina, reúnem as ditas bobinas em um enrolamento. Este tipo de enrolamento, que é apresentado na figura 6.15, é chamado de “gaiola” e o motor é denominado como “rotor tipo gaiola”.

A gaiola é frequentemente fabricada pela injeção de alumínio puro nas ranhuras, onde os anéis de curto circuito e as barras, formam uma peça única e intimamente ligadas com o pacote magnético do rotor. As ranhuras e com isto as barras, em motores de curto-circuito normais, são de seção circular ou em forma de gota, de acordo com a figura 6.16. Para melhorar as características de partida, o eixo das ranhuras não é paralelo ao eixo do rotor, mas sim deslocado de uma ranhura em relação a este.

### 6.5.1 Características do motor com rotor em curto-circuito

a) Construção fácil e robusta; em virtude da transmissão indutiva da potência de excitação sobre o rotor, não há passagem de corrente de peças fixas sobre peças móveis. Disto resulta, na compra e na utilização de um motor mais barato e com pouca manutenção.

b) Possibilidade de partida sob plena carga, pois na partida está presente um conjugado de 2 a 2,8 vezes maior que o conjugado nominal.

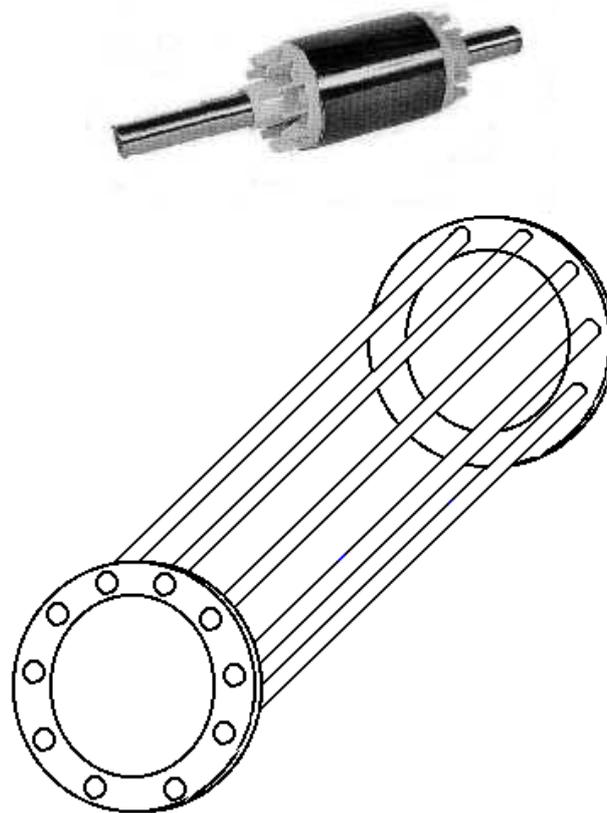
c) Conjugado máximo maior que o conjugado de partida de partida, e por isto à prova de picos de carga e de sobrecarga.

d) A rotação se altera pouco perante a variação de carga (característica paralela).

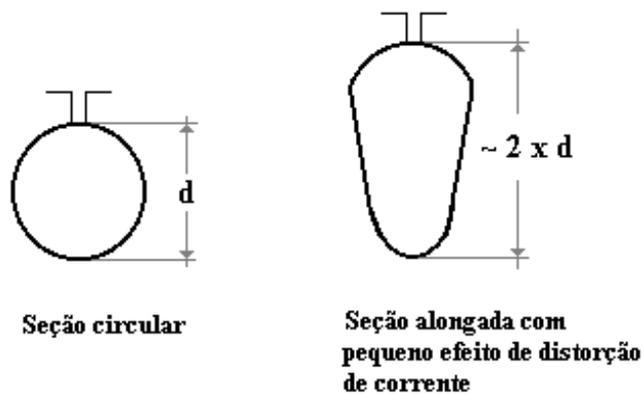
e) Bom rendimento e fator de potência (cerca de 0,8).

f) Mudando a ligação do enrolamento do estator, de estrela para triângulo, é possível o emprego deste motor em duas redes de tensão por fase, na relação 1:1,173, (por exemplo 220/380V), mantendo a potência e as mesmas condições de serviço. Recomenda-se porém, para potências pequenas, a ligação em estrela, e para potências grandes em tensões mais elevadas (440V), a ligação triângulo.

g) A corrente de partida destes motores com rotor curto-circuitado é da ordem de 5 a 8 vezes o valor da corrente nominal. Note-se que, quanto menor o número de pólos, maior a corrente. Por esta razão, as empresas concessionárias de energia elétrica, limitam a potência máxima destes motores diretamente ligados a rede, girando o seu valor normalmente em torno de 5CV. A maneira mais simples de limitar a corrente de partida é pelo emprego de uma chave estrela-triângulo.



**Fig. 6.15** Gaiola do motor em curto-circuito.



**Fig. 6.16** Formas de ranhura para rotores.

### 6.5.2 Motor com rotor em curto-circuito com ranhuras especiais

Devido a elevada tensão no estator, em virtude do escorregamento e a correspondente corrente de curto-circuito, os motores em curto-circuito apresentam, na partida, uma elevada potência de curto-circuito, que tem que ser retirada da rede mediante uma elevada corrente que passa pelo estator. Em vez de reduzir a corrente do estator por uma limitação de tensão, enfraquecendo assim o campo girante do estator e o conjugado de partida, é mais indicado reduzir a corrente de curto-circuito do rotor no local onde esta aparece, pela elevação da resistência do rotor. Isto é possível por uma configuração especial do enrolamento ou das ranhuras do rotor, (motores de ranhura especial), ou pela inclusão de resistores no circuito aberto de corrente do rotor (rotor de anéis). Neste caso, obtém-se um elevado conjugado de partida com pequenas correntes, podendo influir decisivamente na característica do conjugado, e na relação entre o conjugado de partida de aceleração e do seu valor máximo e o conjugado a plena carga.

### 6.5.2.1 Rotor de campo distorcido

O seu funcionamento baseia-se na influência da frequência sobre a indutância da gaiola do rotor. Se duas barras são montadas uma sobre a outra, dentro de uma ranhura, ou seja, em profundidades diferentes dentro do núcleo do rotor, sob idêntica corrente, o condutor mais profundo é envolto por um campo mais intenso e com isto com indutância maior do que o condutor superior, conforme a figura 6.17. Com este efeito resistivo mais acentuado no condutor interno, a corrente se desloca para o barramento superior, em proporção tanto maior quanto maior a diferença entre as indutâncias superiores ou inferiores, com o aumento da frequência de escorregamento. Assim obtém-se uma elevada resistência na partida, no rotor, (escorregamento elevado), cujo valor se reduz quando a rotação se aproxima do seu valor nominal, alcançando o seu mínimo.

**a) Rotor de dupla gaiola:** as barras da gaiola superior e inferior são fabricadas com seções e formatos iguais ou diferentes, de acordo com a figura 6.18, em função das condições e características exigidas e também de materiais diferentes (por exemplo gaiola superior de bronze ou latão e a inferior de cobre) e unidas por meio de anéis de curto-circuito, comuns ou separados. Em vários casos, a gaiola dupla é obtida por injeção de alumínio puro. Rotores de gaiola dupla, são recomendados nas máquinas que partem com pouca carga e apresentam na ligação direta um conjugado de 2 a 3 vezes superior ao nominal e um corrente de 5 a 7 vezes maior. Por esta razão, sua aplicação é feita nos casos de partida estrela-triângulo, quando a corrente de partida e o conjugado se reduzem a 1/3 do valor acima indicado. A figura 6.19, mostra uma variação característica de conjugado, velocidade e escorregamento para os motores assíncronos com rotor em dupla gaiola.

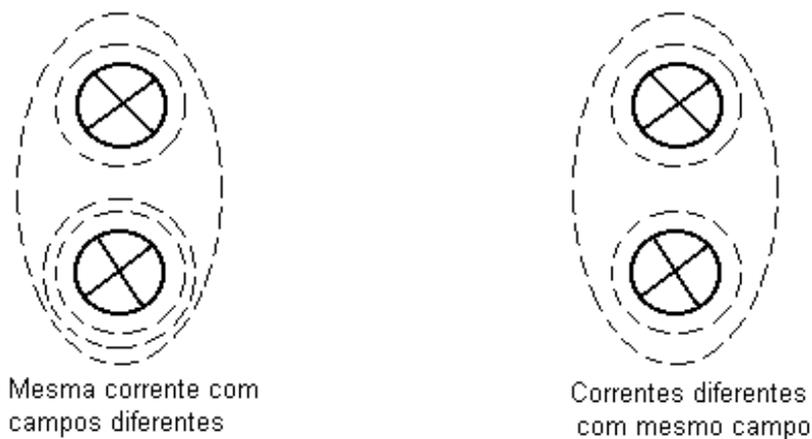


Fig. 6.17 Distorção do campo.

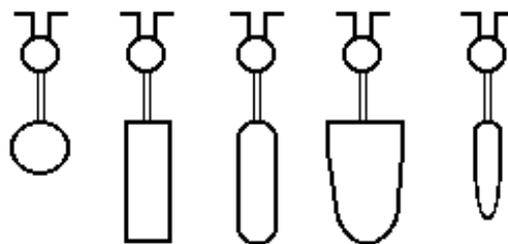


Fig. 6.18 Formatos de ranhuras para rotores de gaiola dupla.

Fig. 6.19 Característica de conjugado de rotor de dupla gaiola.

**b) Rotor com Ranhura de Grande Altura:** neste tipo de rotor, apenas uma barra é montada, que, entretanto, penetra bastante no núcleo do rotor e cuja relação entre lados é da ordem de 5 a 10 vezes mais alto do que largo, como é apresentado na figura 6.20. Dessa forma, aparece igualmente uma distribuição desuniforme da corrente, que é menor do que no caso da gaiola dupla, em virtude da falta de material magnético entre ambos os setores. Quando ligado diretamente, pode-se alcançar uma corrente de 4 a 6 vezes o valor nominal e um conjugado de 1,3 a 1,5 vezes o valor nominal, cuja curva característica de conjugado em função da velocidade e escorregamento é apresentada na figura 6.21.

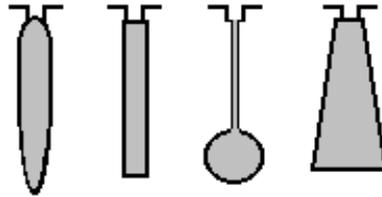


Fig. 6.20 Ranhuras de grande altura.

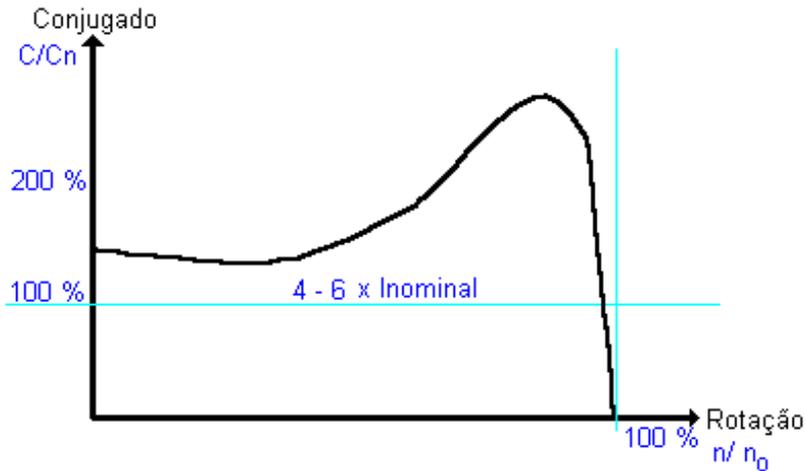


Fig. 6.21 Conjugado com ranhura de grande altura.

### 6.5.2.2 Rotores com condutores em grande profundidade

Quando as barras condutoras são instaladas à grande profundidade do núcleo, tendo na sua parte superior uma estreita abertura como apresenta a figura 6.22, a corrente de partida e os conjugados de partida e máximo, caem, devido a existência de uma forte dispersão magnética. Quando o motor é ligado, o valor da corrente de partida é da ordem de 3,5 a 4 vezes o valor nominal, porém o conjugado alcança 0,3 a 0,6 vezes o valor nominal. Com isto, este motor só pode ser usado quando a partida é sem carga, resultando numa partida suave, de acordo com a figura 6.23. Rotores de ranhuras em grande profundidade, são usadas nos casos onde os tempos de partida são longos (cerca de 15 minutos) e onde se deseja proteger todas as partes acionadas, sobretudo girantes. Isto se faz com que se aceite o pior fator de potência deste tipo, motivado pela grande dispersão nas ranhuras.

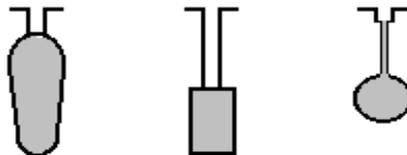


Fig. 6.22 Condutores de profundidade.

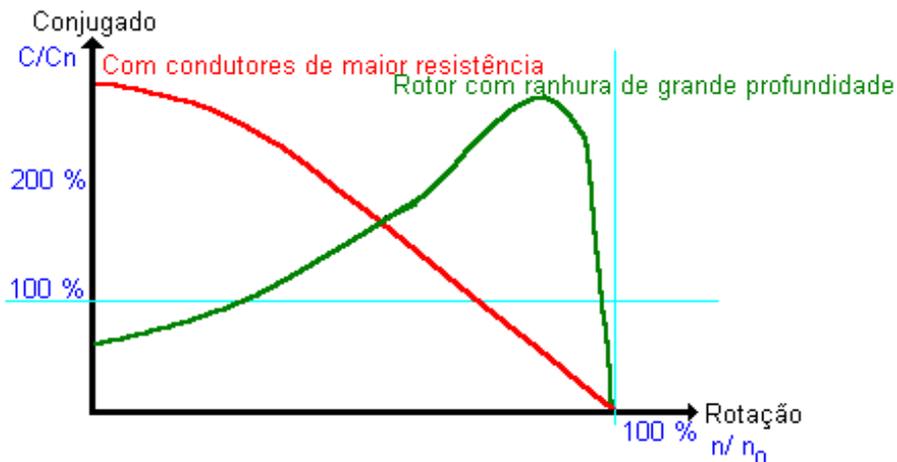


Fig. 6.23 Rotores de profundidade com condutores de maior resistência.

### 6.5.2.3 Barras do rotor com maior resistência

Se nos rotores de gaiola dupla ou de grande altura, for substituído o alumínio por condutores de latão, então eleva-se a resistência do rotor. Com isto, reduz-se a corrente de partida; o conjugado de partida, entretanto, alcança valores até 3,5 vezes o nominal, dependendo do tipo, porque, com uma resistência suficientemente elevada no rotor, o conjugado máximo pode ser deslocado para a posição do conjugado de partida, como mostra a figura 6.23. Estes motores, apresentam um rendimento um pouco baixo devido à sua resistência de partida, mas simultaneamente uma variação de rotação muito regular devido ao seu grande escorregamento, sendo por isto recomendado para os casos de acionamento de grandes cargas de massas de inércia, tais como prensas, tesouras e centrífugas.

## 6.6 Motores com Rotor Bobinado (motor de anéis)

O motor de anéis é um tipo de motor assíncrono, cujo circuito de corrente do rotor possui um resistor variável em escalões, para fins de partida e regulação. Para tanto, é necessário abandonar a construção fechada do motor tipo gaiola (o que é uma desvantagem). O rotor recebe um enrolamento de 2 ou 3 fases, normalmente um enrolamento de duas camadas, cujo número de pólos deve corresponder ao do campo girante do estator; os terminais iniciais (u,v,w), são levados a um painel de ligações por meio de anéis, enquanto os terminais das extremidades (x,y,z), são ligados conjuntamente, num ponto estrela. O circuito de corrente do rotor é fechado por meio de um segundo ponto estrela no dispositivo de partida do rotor; este não deve por isto ter posição de desligamento, de acordo com a figura 6.24. Normalmente a tensão no rotor é da ordem de 80 a 100V, com isto, a corrente no rotor é mais elevada que a corrente no estator. Assim, para a ligação do dispositivo de partida do rotor, é necessário escolher um condutor cuja seção seja um número superior ao do usado na ligação do motor à rede.

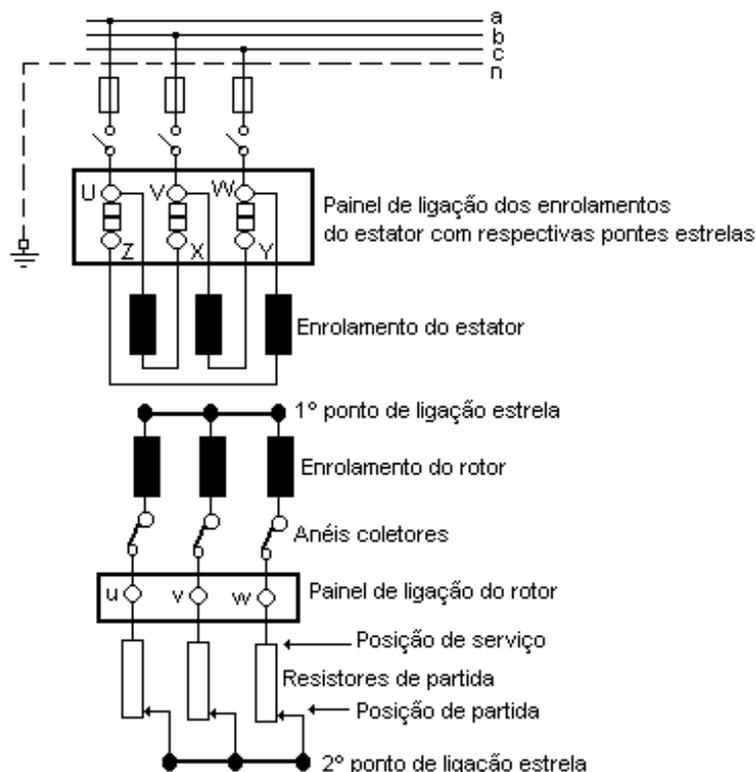


Fig. 6.24 Motor de anéis com rotor trifásico e resistores de partida.

### 6.6.1 Características e empregos

Motores de anéis fornecem um conjugado de partida elevado, tal como os motores de ranhuras especiais, com baixa corrente de partida. Por meio de um escalonamento adequado do resistor móvel e do dispositivo de partida do rotor, o conjugado máximo pode ser deslocado ao ponto de partida e após alcançar as condições nominais, e conseqüente redução da resistência do resistor, novamente deslocá-lo para a sua

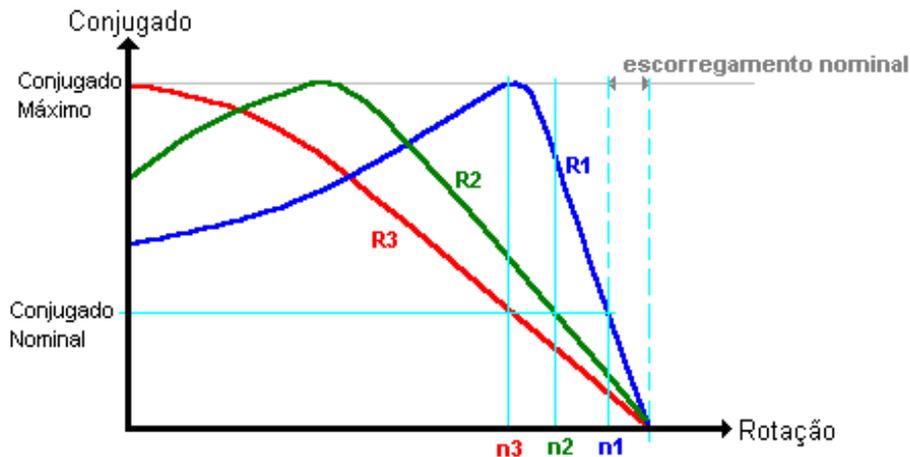
posição normal, com rotação elevada. Também uma partida com corrente nominal é possível, quando então resulta o conjugado nominal neste instante. Se o dispositivo de partida do rotor é dimensionado para carga permanente, então é possível se efetuar uma regulação da velocidade para valores interiores, por meio de um aumento artificial do escorregamento. Por isto, os motores de anéis são usados sobretudo:

a) em acionamentos, que devem fornecer um elevado conjugado de partida com reduzida corrente, portanto recomendado para a partida de grandes motores a plena carga, ou sob carga pesada, com longo tempo de partida, onde é preciso acelerar grandes massas, como por exemplo centrífugas.

b) para potências de motores, que já não permitem ligação pelos métodos normais de partida, da rede de alimentação pública.

c) para acionamentos de reguladores de velocidade.

A figura 6.25 apresenta a característica de velocidade e de conjugado, para partida com resistores (R3, R2, e R1) inseridos no rotor.



**Fig. 6.25** Característica de velocidade e de conjugado, para partida com resistores (R3, R2, e R1).

Motores de anéis são fabricados normalmente para 3600, 1800, 1200 e 900 rpm em 60Hz e para velocidades menores quando a potência do motor é maior. Com relação a utilização e tipo do porta-escovas, distinguem-se:

a) **Motor de anéis para regulação.** Com escova permanente ligada e dispositivo de partida para carga contínua. Neste tipo, além da partida com pequena corrente e elevado conjugado, é possível ajustar a velocidade até um valor de cerca de 50% da velocidade nominal. Abaixo de 50%, a característica de velocidade irá depender muito das condições de carga. Tal como no dispositivo de partida por resistores, também esta regulação se faz por meio da regulação das perdas, numa redução de rotação de 50%, o conjugado ainda apresenta um valor de 70%, enquanto a potência do motor é reduzida a 35%. Dependendo da grandeza da redução exigida de velocidade e da característica do conjugado da máquina acionada, pode haver necessidade de um aumento da potência do motor (em 25%, elevação de 5 a 15%, em 50%, uma elevação de 20 a 35%). O dispositivo de partida e da regulação deve ser ajustado segundo o motor e o tipo de acionamento, devendo-se distinguir: ajustagem para valores inferiores mantendo constante o conjugado, por exemplo, de máquinas ferramenta de corte; ajustagem para valores inferiores numa relação linear, isto é, velocidade e conjugados variando linearmente, como por exemplo, no acionamento de máquinas de tipografia; ajustagem para valores inferiores com variação do conjugado numa relação quadrática em relação à velocidade, como por exemplo, ventiladores e bombas.

b) **Motor de anéis de partida.** Com dispositivos capazes de curto-circuitar ou afastar as escovas. Após alcançar a velocidade nominal, os anéis são inicialmente curto-circuitados pela ação de um dispositivo adequado, (o segundo ponto neutro da estrela é com isto transportado do dispositivo de partida para os anéis coletores), e em seguida as escovas são separadas dos anéis por alguns milímetros. O motor apenas funciona como rotor em curto-circuito durante o serviço normal.

## 6.7 Motores com Enrolamento de Comutação Polar

### 6.7.1 Motores com dois enrolamentos separados

O serviço de motores assíncronos com duas velocidades, pode ser obtido por meio da montagem de dois enrolamentos separados, de número diferente de pólos, no mesmo estator. Por meio de um comutador de pólos, é ligado de cada vez um dos enrolamentos e desligado um outro. Para que o enrolamento desligado não sofra a circulação de correntes, o seu circuito deve estar aberto. Por isto, é normal o emprego para ambos os enrolamentos, da ligação estrela, como mostra a figura 6.26. Porém, também é possível fazer a ligação de uma outra maneira, como por exemplo, estrela-triângulo ou triângulo-estrela. Motores com enrolamentos separados também podem ser previstos para partida estrela-triângulo; para tanto, é preciso que ambos os enrolamentos sejam ligados em triângulo e o painel de ligações dotado de 12 terminais. No ato da comutação, a ligação triângulo do enrolamento desligado, deve ficar aberta.

Motores com 3 velocidades, são dotados de um enrolamento normal e o outro do tipo Dahlander, portanto também dois enrolamentos. Neste caso, o painel de ligações deve ter 9 terminais.

Motores com 4 velocidades são dotados de dois enrolamentos Dahlander, neste caso o painel de ligações é dotado de 12 terminais.

Na maior parte dos motores com enrolamento em separado, a refrigeração é insuficiente perante baixas velocidades. Sobretudo, com grande número de manobras. Como os motores trifásicos apenas apresentam características de serviço favoráveis em uma velocidade, e neste caso apenas, esta sendo aproveitado a metade de cada ranhura, não é possível evitar o aproveitamento parcial do cobre e do núcleo magnético.

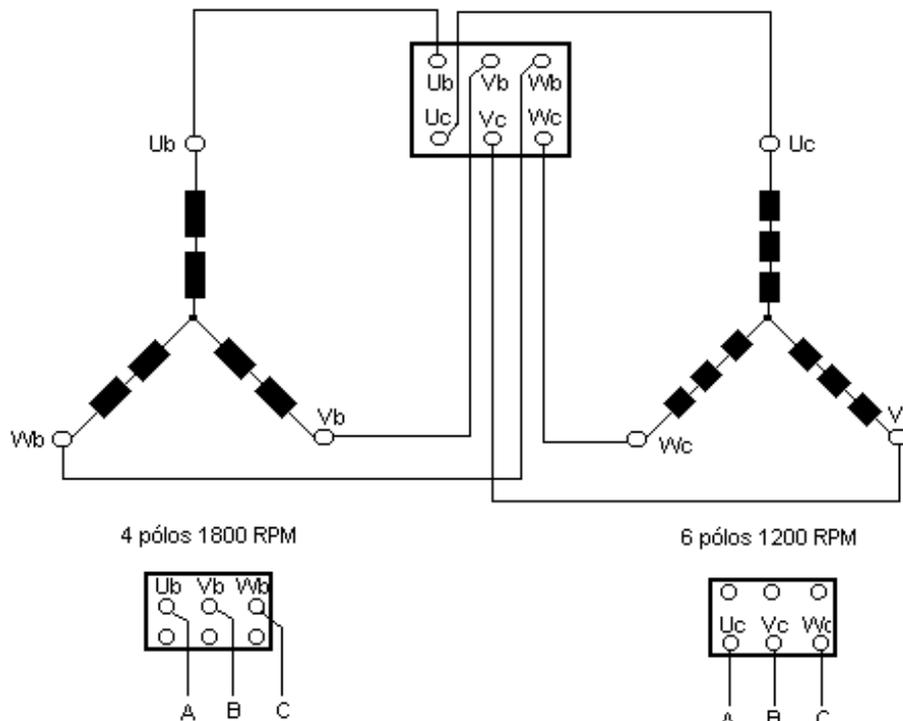


Fig. 6.26 Motor com enrolamentos separados, para 4/6 pólos.

### 6.7.2 Motores com comutação de pólos, de enrolamento único

Para simplificar as máquinas comutadoras de pólos e aproveitar melhor a seção transversal da ranhura, foram desenvolvidos diversos tipos, que permitem obter, com um único enrolamento, até 2, 3 ou 4 diferentes números de pares de pólos. A maior parte destas ligações exige a retirada de numerosas derivações do enrolamento, com saídas no painel de ligações e complexos dispositivos especiais para a comutação. Por isto, é elevado o preço de tais motores e sua utilização é restrita a casos especiais. O sistema mais simples e por isto o mais empregado de um enrolamento para comutação de pólos, é a ligação Dahlander. Por meio desta ligação o motor apresenta duas velocidades, na relação 2:1. O enrolamento de cada fase é neste caso composto de dois grupos, que são comutados em 3 formas diferentes:

- 1) Comutação dos dois grupos de uma fase da ligação normal em série, para a da ligação em oposição.
- 2) Comutação dos dois grupos de uma fase da ligação série para a ligação paralela (ou antiparalela).
- 3) Comutação das 3 fases, da ligação triângulo para estrela ou estrela dupla.

Pela ligação em oposição, o número de pólos é reduzido à metade e a velocidade é elevada ao dobro, pela ligação paralela alcança-se nas condições de serviço normal a necessária velocidade elevada e conjugado necessário. Para que a tensão não se eleve em demasia nos grupos ligados em paralelo, a ligação das fases deve ser mudada de triângulo para a ligação estrela, conforme a figura 6.27.

A simultaneidade das três comutações é obtida pela mudança das três ligações da rede, da aresta do triângulo ( $U_a, V_a, W_a$ ), para o ponto médio desta ligação ( $U_b, V_b, W_b$ ) e a inclusão de uma ponte de ligação estrela entre os terminais ( $U_a, V_a, W_a$ ). A comutação pode ser feita no painel de ligações, porém normalmente é efetuada com auxílio de uma chave de comutação polar.

Na comutação dos pólos, inverte-se a direção de giro do campo girante e com isto também a do rotor. Normalmente este fato não é desejável, motivo porque comutam-se também as duas ligações da rede de alimentação. Esta modificação é feita dentro da máquina quando da ligação do enrolamento no painel, por isto na figura 6.27 foi feita a ligação de  $V_b$  em  $W_b$  e de  $W_b$  em  $V_b$ .

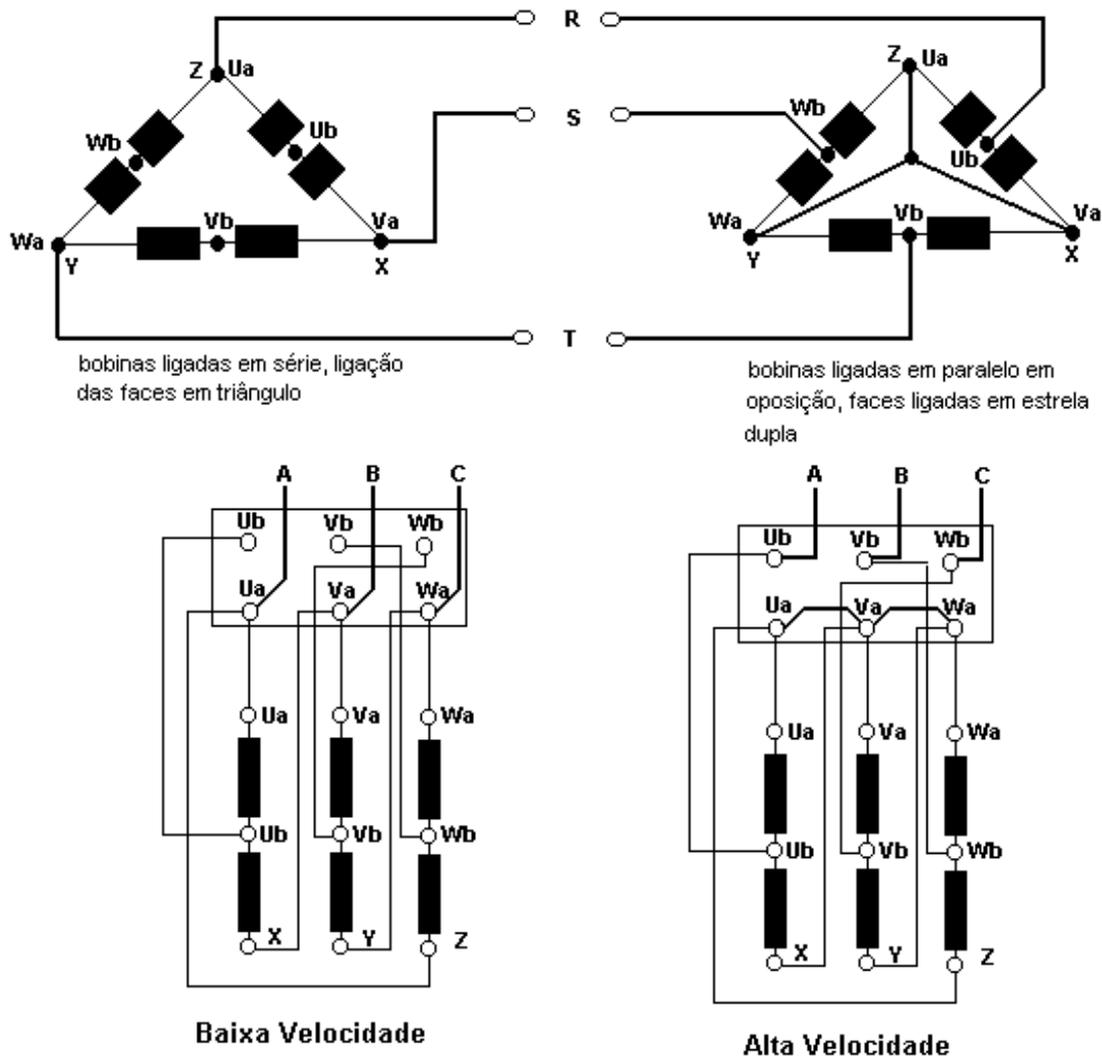


Fig. 6.27 Ligação Dahlander de 4/2 Pólos.

### 6.7.2.1 Propriedades dos motores Dahlander

- a) De construção fácil, pois, com rotor tipo gaiola, possui apenas um enrolamento estatórico, com possibilidade de execução em série e é por isto de baixo preço.
- b) Com aproveitamento do espaço dentro da ranhura, em ambos os escalões de velocidade e consequentemente bom rendimento, que é porém inferior ao dos rotores normais em curto-circuito.
- c) Comportamento normal da velocidade sob carga, em ambos os escalões de velocidade (característica paralela).
- d) Em velocidade elevada, 1,5 vezes mais potência do que na velocidade mais baixa, e, na velocidade mais baixa cerca de 0,8 vezes a potência em relação ao rotor normal em curto-circuito.
- e) Apenas permite uma relação de velocidade de 2:1.
- f) Apenas pode ser usado em uma tensão da rede.

## 6.8. Modelamento das Máquinas Assíncronas

O modelo da máquina assíncrona é obtido de forma similar ao circuito elétrico análogo do transformador apresentado no capítulo 4, onde pode-se fazer a analogia do estator da máquina assíncrona com o primário do transformador. Daí, tem-se o modelo do estator apresentado na figura 6.28.

### Modelo do Estator :

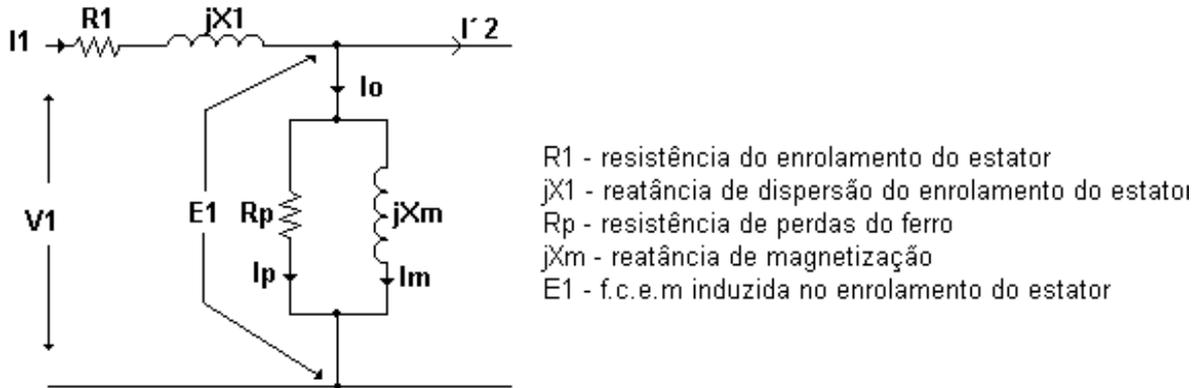


Fig. 6.28 Modelo do estator da máquina assíncrona por fase.

A corrente  $I_1$  pode ser decomposta em duas componentes:

$I'_2$  - componente de carga que produz uma f.m.m. que contrabalança a f.m.m. induzida pela corrente do rotor.

$I_0$  - componente de excitação; corrente adicional para criar o fluxo do entreferro.

A corrente  $I_0$  também tem duas componentes:

$I_p$  - corrente de perdas no ferro (núcleo), em fase com  $E_1$ .

$I_m$  - corrente de magnetização, atrasada de  $90^\circ$  de  $E_1$ .

Também pode-se fazer a analogia do rotor da máquina assíncrona com o secundário do transformador. A figura 6.29 apresenta o modelo do rotor da máquina assíncrona.

### Modelo do Rotor :

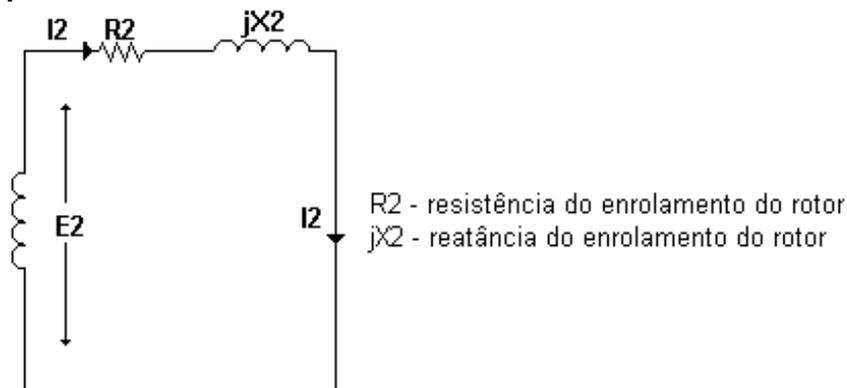


Fig. 6.29 Modelo do rotor da máquina assíncrona por fase.

### 6.8.1 Modelo da máquina assíncrona em funcionamento

Inicialmente será feito uma analogia da máquina assíncrona com o transformador para as seguintes condições:

**motor parado; corrente rotórica nula :**

- o sistema de correntes trifásicas produz uma onda de f.m.m. ( $F_0$ ), que gira em relação ao estator com velocidade síncrona  $n_s$ .

$$n_s = \frac{\text{frequencia } (f)}{\text{pares de polos } (p)} \quad [6.2]$$

- associado a  $F_0$  tem-se o campo magnético trifásico, também girante.
- indução de corrente no enrolamento do rotor.
- o fluxo  $\phi_0$  produzido no estator pode ser decomposto em duas parcelas:  $\phi_0 = \phi_m + \phi_p$
- tensões induzidas devido a esses fluxos.

$E'_1$  : no estator

$$E'_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_0$$

com duas parcelas

$$E'_1 = E_1 + E_p$$

Onde:

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \phi_m \quad [6.3]$$

- no rotor tem-se:

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \phi_m \quad [6.4]$$

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad [6.5]$$

$$E_2 = s \cdot E_1 \quad [6.6]$$

de [6.3] e [6.4] tem-se:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad [6.7]$$

- o motor comporta-se como um transformador, em vazio, cujo circuito elétrico análogo do estator e rotor da máquina assíncrona é apresentado na figura 6.30.

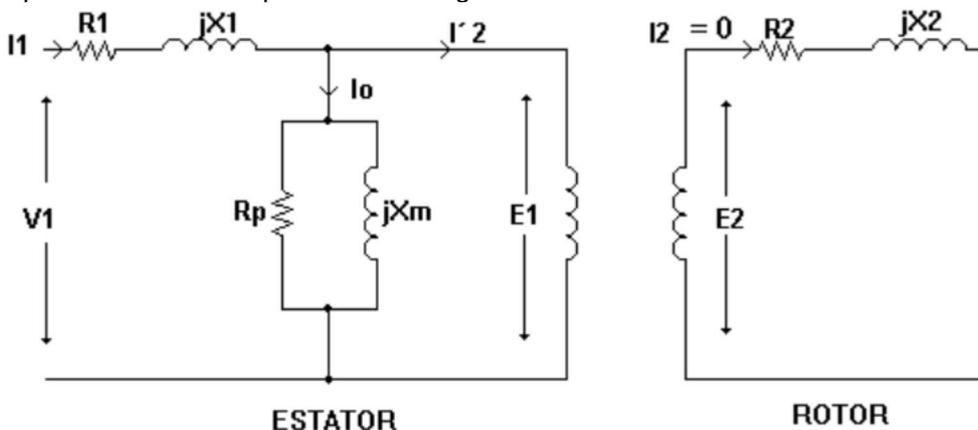


Fig. 6.30 Modelo do estator e rotor da máquina assíncrona por fase.

**- rotor girando a uma velocidade  $n_r$  (escorregamento  $s$ )**

- a corrente do rotor tem então a frequência ( $f_r$ ) :

$$f_r = s \cdot f \quad [6.8]$$

$$\text{- tensão induzida } E_{2\text{ROTÓRICA}} = 4,44 \cdot f_r \cdot N_2 \cdot \phi_m = s \cdot E_2 \quad [6.9]$$

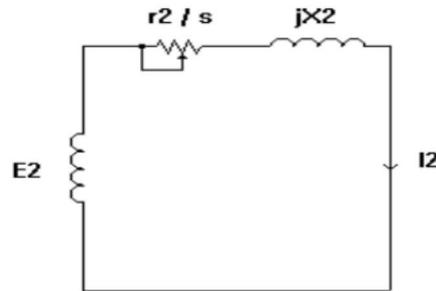
$$\text{- reatância } X_{2\text{ROTÓRICA}} = 2\pi \cdot f_r \cdot l_2 = s \cdot X_2 \quad [6.10]$$

- a corrente  $I_2$  vale :

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sX_2)^2}} \quad [6.11]$$

ou : 
$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + (x_2)^2}} \quad [6.12]$$

- rotor fica :

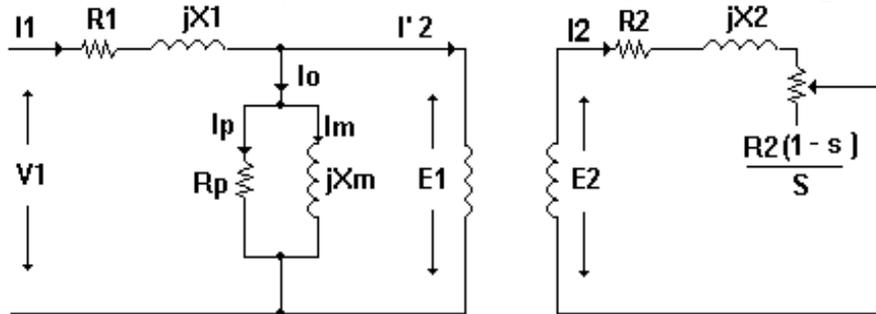


**Fig. 6.31** Modelo do rotor em funcionamento da máquina assíncrona por fase.

- o resistor  $\frac{r_2}{s}$  pode ser expandido como :

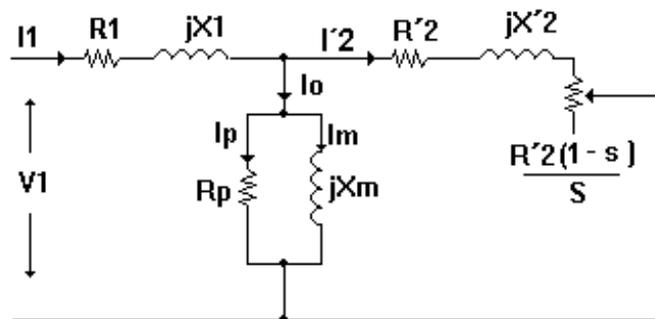
$$\frac{r_2}{s} = r_2 + \frac{r_2(1-s)}{s} \quad [6.13]$$

- o circuito equivalente da máquina assíncrona por fase é apresentado na figura 6.32.



**Fig. 6.32** Circuito equivalente da máquina assíncrona por fase.

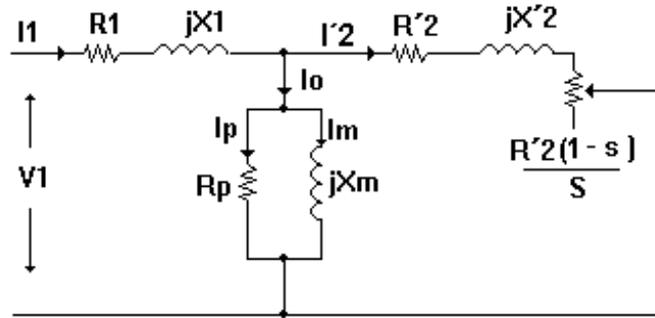
- como foi feito no transformador pode-se ter o modelo referido para o lado 1 (estator) :



**Fig. 6.33** Circuito equivalente da máquina assíncrona referido para o lado do estator por fase.

### 6.8.2 Balanço de potência do motor de indução

Considerando para a análise o seguinte circuito equivalente, por fase, da figura 6.33a.



**Fig. 6.33a** Circuito equivalente da máquina assíncrona referido para o lado do estator por fase

É possível verificar o balanço de potência do motor de indução, tal que:

1. Potência Fornecida ao Motor ( $P_f$ ):

$$P_f = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\gamma \quad [6.14]$$

2. Perda Joule no Estator ( $P_{je}$ ):

$$P_{je} = 3 R_1 I_1^2 \quad [6.15]$$

3. Perda no Ferro ( $P_{fe}$ ):

$$P_{fe} = 3 \cdot \frac{E_1^2}{R_p} = 3 \cdot R_p \cdot I_p^2 \quad [6.16]$$

4. Potência Transferida ao Rotor ( $P_{12}$ ):

$$P_{12} = P_f - P_{je} - P_{fe} \quad [6.17]$$

ou  $P_{12} = P_{jr} + P_{el}$

$$[6.18]$$

$$P_{12} = 3 \left( R_2' + \frac{R_2'(1-s)}{s} \right) I_2'^2 \quad [6.19]$$

ou

$$P_{12} = 3 \frac{R_2'}{s} I_2'^2 \quad [6.20]$$

5. Perda Joule no Rotor ( $P_{JR}$ ):

$$P_{JR} = 3 R_2' I_2'^2 \quad [6.21]$$

6. Potência Eletromagnética Desenvolvida ( $P_{el}$ ):

$$P_{el} = 3 \frac{R_2'(1-s)}{s} I_2'^2 \quad [6.22]$$

Sabendo que:  $P_{12} = P_{jr} + P_{el}$  [6.18]

Então:  $P_{el} = P_{12} - P_{jr}$  [6.23]

Substituindo [6.20] e [6.21] em [6.23], tem-se:

$$P_{el} = (1 - s)P_{12} \quad [6.24]$$

$$P_{el} = P_{12} - sP_{12} \quad [6.25]$$

Comparando [6.22] com [6.24] conclui-se que::

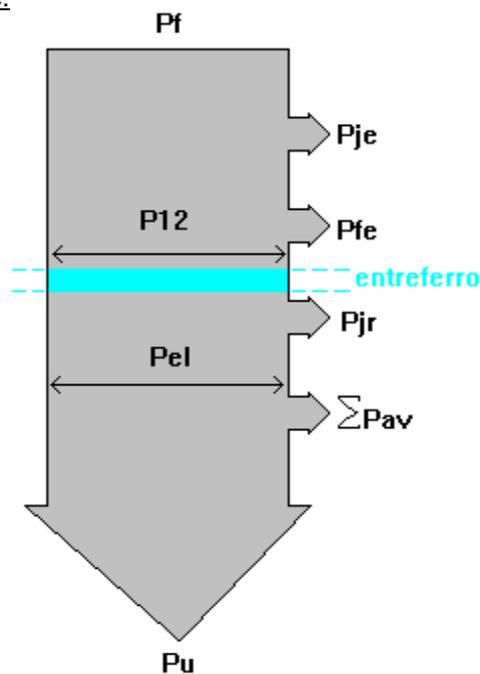
$$P_{JR} = sP_{12} \quad [6.26]$$

7. Potência Útil = Potência Mecânica = Potência de Saída no Eixo ( $P_u = P_{mec} = P_s$ ):

$$P_{\mu} = P_{el} - \sum P_{av} \quad [6.27]$$

Onde:  $\sum P_{av}$  - somatória das perdas por atrito e ventilação.

Resumidamente tem-se:



**Fig. 6.34** Resumo do balanço de energia da máquina assíncrona

### 6.8.3 Conjugado eletromagnético desenvolvido

De acordo com o modelo da máquina assíncrona a potência eletromagnética é :

$$P_{el} = P_{12} - P_{jr} \quad [6.23]$$

Onde:  $P_{12}$  = potência transferida do estator para o rotor e  $P_{jr}$  = perda Joule no rotor.

Pode-se calcular também por:

$$P_{el} = 3 \frac{R'_2 (1-s)}{s} I_2'^2 \quad [6.22]$$

Sabendo que :

$$C = P / W_r \quad [6.28]$$

onde  $W_r$  é a velocidade angular do rotor

$$W_r = 2 \pi n_r, \text{ dada em rad/seg.} \quad [6.29]$$

Assim :

$$C_{el} = \frac{3 r_2' (1-s)}{W_r \cdot s} \cdot I_2'^2 \quad [6.30]$$

Sabendo que :

$$nr = (1-s).ns \quad [6.31]$$

$$wr = (1-s).ws$$

$$\frac{1}{ws} = \frac{1-s}{wr}$$

Então :

$$C_{el} = \frac{3 r_2'^2}{s \cdot w_s} \cdot I_2'^2 \quad [6.32]$$

Por simplificação é possível utilizar o modelo equivalente da figura 6.35 onde os parâmetros estão referidos para o estator.

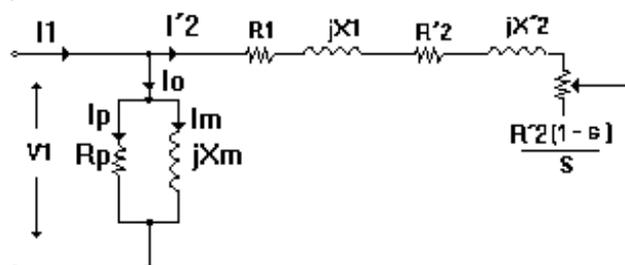


Fig. 6.35 Circuito equivalente simplificado da máquina assíncrona, referido para o lado do estator por fase

A corrente no rotor  $I'_2$  pode ser calculada por:

$$I'_2 = \frac{V_1}{Z} \Rightarrow I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(r_1 + \frac{r'_2}{s})^2 + (x_1 + x'_{2'})^2}} \quad [6.33]$$

$$\text{ou } I'_{2'} = \frac{V_1}{\sqrt{(\frac{s r_1 + r'_{2'}}{s})^2 + (x_1 + x'_{2'})^2}} \quad [6.34]$$

Substituindo [6.34] em [6.32], tem-se :

$$C_{el} = \frac{3 r'_{2'}}{s w_s} \cdot \frac{V_1^2}{[\frac{(s r_1 + r'_{2'})^2}{s^2} + (x_1 + x'_{2'})^2]} \quad [6.35]$$

Multiplicando o numerador e o denominador por s, fica :

$$C_{el} = \frac{3 r'_{2'} \cdot V_1^2 s}{w_s [(s r_1 + r'_{2'})^2 + s^2 (x_1 + x'_{2'})^2]} \quad [6.36]$$

#### 6.8.4 Conjugado máximo em função do escorregamento s

Para obter o conjugado máximo em função do escorregamento é necessário encontrar o ponto de máxima concavidade da função  $C_{el}(s)$ ; ou seja:

$$\text{Para } C_{el \text{ máx}} \square \frac{dC_{el}}{ds} = 0 \quad [6.37]$$

Assim:

$$\frac{dC_{el}}{ds} = \frac{\frac{3V_1^2}{w_s} [r'_{2'} ((s r_1 + r'_{2'})^2 + s^2 (x_1 + x'_{2'})^2)] - [2(s r_1 + r'_{2'}) \cdot r_1 + 2s (x_1 + x'_{2'})^2] \cdot s r'_{2'}}{[(s r_1 + r'_{2'})^2 + s^2 (x_1 + x'_{2'})^2]^2} \quad [6.38]$$

O valor do s para ter  $C_{máx}$  é :

$$s_{max} = \frac{r'_{2'}}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_{2'})^2}} \quad [6.39]$$

$s_{máx}$  = valor do escorregamento para se ter o conjugado máximo.

Substituindo em [6.36] tem-se:

$$C_{max} = \frac{3V_1^2}{w_s} \cdot \frac{1}{2(\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_{2'})^2} - r_1)} \quad [6.40]$$

Obs: independe de  $r'_{2'}$  (resistência do enrolamento do rotor)

A curva do conjugado (C) em função do escorregamento (S) é apresentada na figura 6.36, identificando o comportamento da máquina assíncrona para os quadrantes de operação.

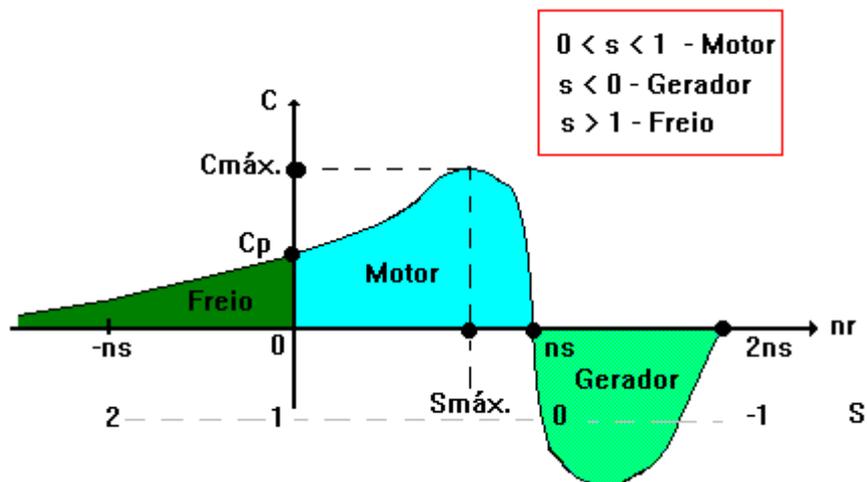


Fig. 6.36 Curva do conjugado em função do escorregamento da máquina assíncrona

### 6.8.5 Determinação dos parâmetros do circuito equivalente aproximado da máquina assíncrona

Seja o circuito equivalente referido para o estator ilustrado na figura 6.35a.

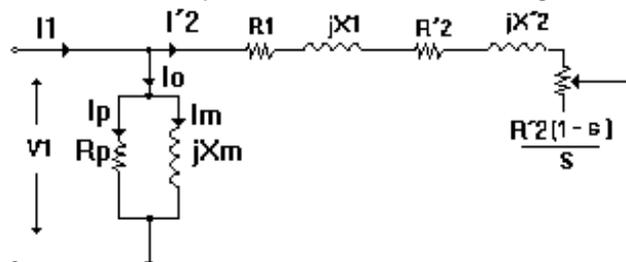


Fig. 6.35a Circuito equivalente simplificado da máquina assíncrona, referido para o lado do estator por fase.

#### a) máquina girando em vazio:

$n_r \approx n_s \Rightarrow s$  é muito pequeno, portanto tem-se o circuito equivalente da máquina assíncrona em vazio da figura 6.37.

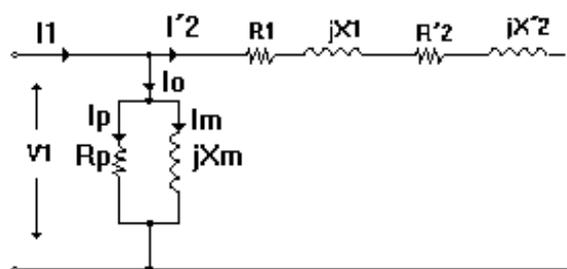


Fig. 6.37 Circuito equivalente simplificado da máquina assíncrona em vazio

Para obter os parâmetros equivalentes da máquina assíncrona é necessário efetuar dois ensaios normais, análogos aos ensaios em transformadores, que foram mencionados no capítulo 4.

No **ensaio em vazio** que possibilitará analisar o comportamento do núcleo da máquina assíncrona e das perdas rotacionais, agora no caso de uma máquina girante, tem-se os seguintes condições:

- Aplica-se a tensão nominal e mede-se :  $V_o$ ,  $I_o$  e  $P_o$ .

$$P_o = P_{oFE} + P_{A.V.} \quad [6.41]$$

Onde:

$P_o$  = são as perdas no núcleo somadas às perdas por atrito e ventilação.

$P_{oFE}$  = perdas no núcleo da máquina.

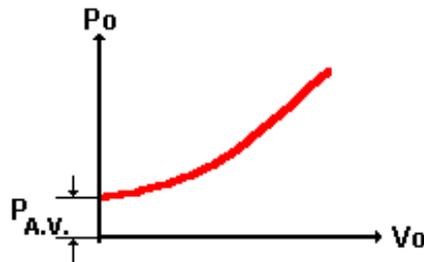
$P_{A.V.}$  = perdas por atrito e ventilação, perdas rotacionais ou perdas mecânicas.

Para determinar os parâmetros do motor utiliza-se os valores de tensão, corrente e potência por fase, assim :

$$R_p = \frac{V_o^2}{P_{oFE}} \quad [6.42]$$

$$X_m = \frac{V_o}{I_m} \Rightarrow X_m = \frac{V_o}{\sqrt{I_o^2 - \left(\frac{V_o}{R_p}\right)^2}} \quad [6.43]$$

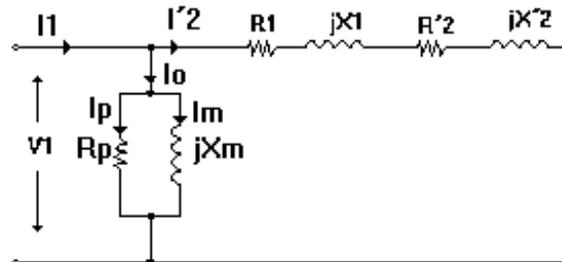
A curva do ensaio em vazio  $P_o \times V_o$  da máquina assíncrona é apresentada na figura 6.38:



**Fig. 6.38** Curva  $P_o$  em função de  $V_o$  da máquina assíncrona em vazio

b) **Máquina com o rotor bloqueado:**

Para o ensaio da máquina assíncrona com rotor bloqueado, que permitirá analisar o comportamento dos enrolamentos tem-se o circuito equivalente da máquina assíncrona com rotor bloqueado da figura 6.39. Nessa condição:  $n_r = 0 \Rightarrow s = 1$



**Fig. 6.39** Circuito equivalente simplificado da máquina assíncrona com rotor bloqueado.

**ensaio com o rotor bloqueado:**

- Aplica-se a corrente nominal e mede-se :  $I_{cc}$ ,  $V_{cc}$  e  $P_{cc}$

Para determinar os parâmetros do motor utiliza-se os valores de tensão, corrente e potência por fase, assim:

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad [6.44]$$

$$R_{cc} = R_1 + R'_2, \text{ considerando } R_1 \cong R'_2 \Rightarrow R_{cc} / 2 = R_1 = R'_2 \quad [6.45]$$

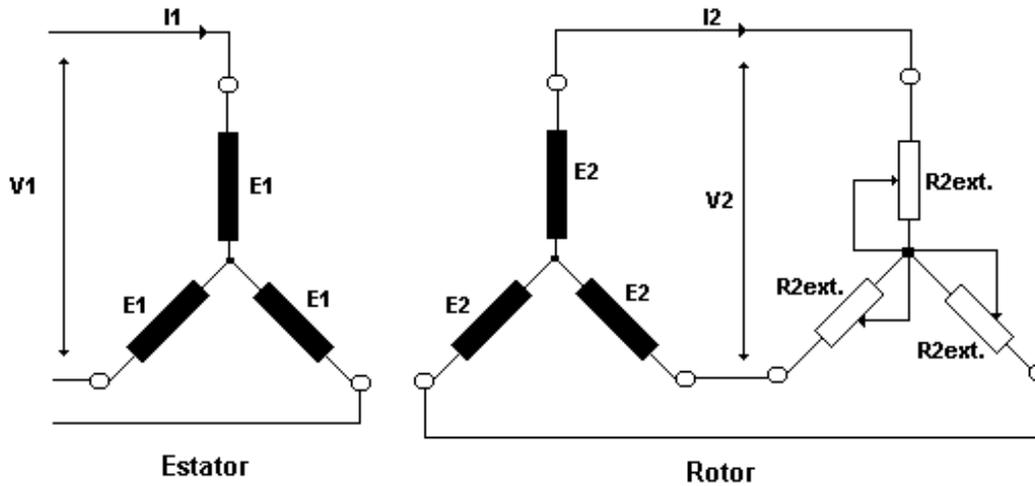
$$X_{cc} = \sqrt{Z_{xx}^2 - R_{cc}^2} \Rightarrow X_{cc} = \sqrt{\left(\frac{V_{cc}}{I_{cc}}\right)^2 - R_{cc}^2} \quad [6.46]$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2, \text{ considerando } X_1 \cong X'_2 \Rightarrow X_{cc} / 2 = X_1 = X'_2 \quad [6.47]$$



### 6.8.7 Influência da tensão $V_1$ e da resistência rotórica sobre as curvas de corrente e conjugado

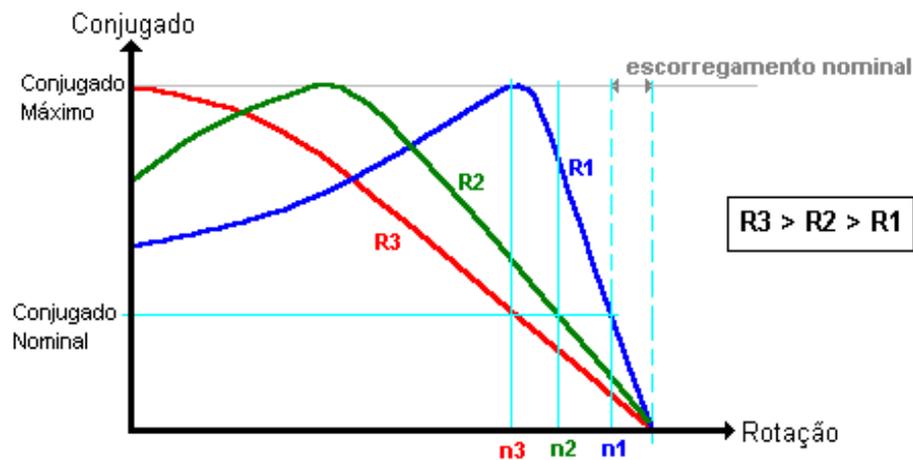
A figura 6.40 apresenta o circuito elétrico dos enrolamentos do estator e do rotor bobinado com a inserção de um banco reostático.



**Fig. 6.40** Circuito elétrico da máquina assíncrona de rotor bobinado

Pela equação 6.48, é possível verificar que a largura da faixa do 1º trecho depende dos valores de  $R_2$  e  $s.X_2$ . Quanto maior for o valor de  $R_2$  maior será o primeiro trecho, pois o motor terá que atingir escorregamentos maiores para que a reatância comece a ter influência sobre a impedância rotórica.

A figura 6.41 ilustra tal comportamento.



**Fig. 6.41** Curva do conjugado em função do escorregamento e da resistência rotórica.

Uma das aplicações dessa particularidade é poder conseguir o maior conjugado possível ( $C_{máx.}$ ) na partida, com uma corrente de partida menor do que aquela que acontece sem resistência externa. À medida que o rotor vai aumentando a velocidade, diminui-se o valor da  $R_{2ext.}$  passando para outras curvas até chegar ao curto-circuito entre elas (anéis). Este controle pode ou não ser manual.

## 6.9 Exercícios

- 1) Um motor de indução de 60 Hz, tem 2 pólos e gira a 3510 RPM. Calcular:
- Velocidade síncrona
  - Escorregamento percentual

Resp.:

a) 3600 RPM b) 2,5%

- 2) Um motor de indução trifásico, 60 Hz, de quatro pólos, opera com um escorregamento de 0,03 para uma certa carga. Calcule (em RPM):

- A velocidade do campo magnético girante.
- A velocidade do rotor e a frequência da corrente do rotor.
- A velocidade (relativa) do campo magnético do rotor em relação ao rotor.
- A velocidade (relativa) do campo magnético do rotor em relação à estrutura do estator.
- A velocidade (relativa) do campo magnético do rotor em relação ao campo magnético do estator.

Resp.:

a) 1800 RPM b) 1746 RPM; 1,8 Hz c) 54 RPM d) 1800 RPM e) zero

- 3) O rotor de um motor de indução trifásico, 60 Hz, 4 pólos, consome 120 KW a 3 Hz. Determinar:

- A velocidade do rotor
- Perdas no cobre do rotor

Resp.:

a) 1710 RPM b) 6 KW

- 4) O motor de exercício 3, tem uma perda no cobre do estator de 3 KW, uma perda mecânica rotacional de 2 KW e uma perda no núcleo de 1,7 KW. Calcule:

- Potência de saída do motor
- O rendimento do motor

Resp.:

a) 112 KW b) 89,82%

- 5) Um motor de indução trifásico, 6 pólos, 60 Hz, consome 48 KW a 1140 RPM. A perda no cobre do estator é de 1,4 KW e a perda no núcleo do estator é 1,6 KW. Se a perda mecânica rotacional é 1 KW, calcular o rendimento.

Resp.:

86,98%

- 6) Um motor de indução trifásico, 6 pólos, 60 Hz, ligado em Y, 220 V, tem os seguintes parâmetros, referidos ao estator:

$$R_1 = 0,294 \, \Omega \quad X_1 = 0,503 \, \Omega$$

$$R_2' = 0,144 \, \Omega \quad X_2' = 0,109 \, \Omega$$

$$R_p = 136,8 \, \Omega \quad X_m = 13,25 \, \Omega$$

As perdas totais, por atrito, ventilação e no ferro podem ser consideradas constante, valendo 403 W, independente da carga.

Para um escorregamento de 2%, determinar:

- Velocidade do rotor.
- Potência de saída
- A corrente do estator
- O fator de potência do motor
- Rendimento do motor

Resp.:

a) 1176 RPM b) 5.519,69 W c)  $19,32 \angle -30,09^\circ$  A d) 0,865 indutivo e) 86,7%

7) Dado um motor de indução trifásico de rotor bobinado (rotor de anéis) com 6 pólos, 60 Hz, 2,2 KV, ligação Y, com os seguintes parâmetros referidos para o estator:

$$R_1 = 0,047 \Omega \quad X_1 = 0,480 \Omega$$

$$R_2 = 0,057 \Omega \quad X_2 = 0,520 \Omega$$

Calcular:

- Rotação para escorregamento de 1%
- Conjugado desenvolvido quando o escorregamento é 1%
- Potência desenvolvida para escorregamento de 1%
- Conjugado de partida
- Conjugado máximo
- Resistência a ser inserida no circuito rotórico para que o conjugado de partida do motor seja o maior possível.

Resp.:

a) 1.188 RPM b) 6.451,89 Nm c) 802,7 KW d) 2.171,96 Nm e) 18.374,43 Nm f) 0,94Ω

8) Os resultados dos testes a vazio e com rotor bloqueado num motor de indução trifásico, conectado em Y, são os seguintes:

$$\text{Ensaio em Vazio: } V_o = 400 \text{ V} \quad P_o = 1770 \text{ W} \quad I_o = 18,5 \text{ A} \quad P_{AV} = 600 \text{ W}$$

$$\text{Ensaio com Rotor Bloqueado: } V_{cc} = 45 \text{ V} \quad P_{cc} = 2700 \text{ W} \quad I_{cc} = 63 \text{ A}$$

Determinar os parâmetros do motor referidos para o estator

Resp.:

a)  $R_p = 136,75\Omega$ ;  $X_m = 12,54\Omega$ ;  $R_{cc} = 0,227\Omega$ ;  $X_{cc} = 0,344\Omega$

9) Dado um motor de indução trifásico de rotor bobinado com 4 pólos, 60 Hz, 220 V, ligação em triângulo, 1700 RPM, 300 W; foi ensaiado a vazio e com o rotor bloqueado e possibilitou o cálculos dos parâmetros do motor, que são:

$$R_1 = 16,6 \Omega \quad X_1 = 20,82 \Omega$$

$$R_2 = 17,9 \Omega \quad X_2 = 21,22 \Omega$$

$$R_p = 1470 \Omega \quad X_m = 428,94 \Omega$$

As perdas rotacionais = 50 W

Para o escorregamento nominal (condições nominais), determinar:

- Torque mecânico e o eletromagnético desenvolvido
- O rendimento do motor (utilize o circuito equivalente simplificado)
- A corrente do estator ( $I_1$ )
- O fator de potência do motor
- Conjugado de Partida e o Conjugado Máximo
- Esboce as Curvas do Conjugado e da Corrente do Motor em função do escorregamento.

Resp.:

a) 1,69 Nm e 1,97 Nm b) 61,4% c)  $\cong 1,15$  A d) 0,64 indutivo e) 4,66 Nm e 6,23 Nm

10) Um motor de indução trifásico, de quatro pólos, rotor em gaiola com barras profundas, conectado em estrela, de 10 HP, 220 V, 60 Hz, solicita uma corrente da rede de 25 A, com um fator de potência de 0,875 atrasado, quando opera com um escorregamento não nominal de 4%. As perdas rotacionais somam 250 W. Sabe-se que o motor tem os seguintes parâmetros, expressos em ohms por fase:

$$R_1 = 0,36 \Omega \quad e \quad R_2 = 0,22 \Omega \quad X_1 = X_2 = 0,47 \Omega$$

$$R_p = 100 \Omega \quad X_m = 15 \Omega$$

Calcule a corrente no rotor por fase, referida ao estator.

- Calcule o valor da potência de saída.
- Calcule o rendimento do motor
- Calcule o torque eletromagnético desenvolvido e o de partida.
- Calcule a corrente de partida.

Resp.:

a) 7.005,39 W b) 84,04% c) 40,09 Nm e 74,15 Nm d) 102,9 A

11) Um motor de indução com rotor bobinado, conectado em estrela, 500 HP, 2200 V, 25 Hz, 12 pólos, tem os seguintes parâmetros expressos em ohms por fase:

$$R1 = 0,225 \Omega$$

$$R'2 = 0,235 \Omega$$

$$X1 + X'2 = 1,43 \Omega$$

$$Xm = 31,8 \Omega$$

$$Rp = 780 \Omega.$$

Um teste em vazio e um teste de rotor bloqueado são executados nesta máquina,

a) Com a tensão nominal aplicada no teste em vazio, calcule as leituras no amperímetro da rede, assim como a leitura total no wattímetro.

b) No teste com rotor bloqueado, a tensão aplicada é ajustada de forma que a corrente da rede seja de 228 A, em cada fase. Calcule as leituras do voltímetro da rede e a leitura total do wattímetro.

c) O escorregamento no qual ocorre o torque máximo

d) Calcule o valor da resistência que deve ser conectada externamente, por fase, ao enrolamento do rotor de forma que o torque máximo seja desenvolvido na partida. Qual o valor deste torque?

Resp.:

a) 39,91 A e 6.205,13 W b) 593,2 V e 71.737,92 W c) 0,1623 d) 1,2126Ω e 55.265,75 Nm

12) Seja um motor de indução trifásico, rotor em curto-circuito de Dupla gaiola, 200 CV, 60 Hz, 1780 RPM, 440 V, 228 A, ligação em delta; foi ensaiado em vazio e com o rotor bloqueado e apresenta os seguintes dados:

ENSAIO	EM	VAZIO	ENSAIO COM	ROTOR	BLOQUEADO
Vo (V)	Io (A)	Po (W)	Vcc (V)	Icc (A)	Pcc (W)
50	20	1500	20	45,6	888
100	30	2000	25	57	1110
200	40	3200	33	76	1480
300	50	4700	50	114	2220
440	73	7200	100	228	4440

Determine:

a) O circuito equivalente do motor de indução por fase referido ao estator.

b) O rendimento e o fator de potência do motor quando operando com carga nominal.

c) O conjugado eletromagnético nominal e de partida.

d) A corrente de partida.

e) Quais os valores da corrente de partida na linha e do torque de partida, se o motor for ligado em estrela?

Resp.:

a)  $R_p = 96,8\Omega$ ;  $X_m = 10,5\Omega$ ;  $R_{cc} = 0,08544\Omega$ ;  $X_{cc} = 0,7588\Omega$  b) 93,75% e 0,91 indutivo

c) 754,44 Nm e 847,31 Nm d) 966,8 A e) 322,3 A e 282,4 Nm

13) Um motor de anéis será utilizado para regular a velocidade de uma esteira transportadora.

Para isso é necessário comprar um banco de resistências e adicionar no rotor do motor para fazer a regulação da velocidade.

Especifique o valor do banco de resistência e sua respectiva potência para garantir o torque máximo do motor na partida que deverá ser comprado.

Dados do Motor:

10 CV, 230 volts, 4 pólos, 60 Hz, ligação em estrela.

$$R1 = 0,27 \Omega$$

$$X1 = 0,51 \Omega$$

$$R'2 = 0,22 \Omega$$

$$X'2 = 0,52 \Omega$$

$$X_m = 22 \Omega$$

Tensão nos Anéis = 180 volts, ligação em estrela.

Resp.:

0,517Ω no rotor; 20,87 KW

14) Um motor de indução trifásico, de quatro de pólos, conectado em Y, de 10 HP, 220 V, 60 Hz, solicita uma corrente da rede de 26,2 A, com um fator de potência de 0,78 atrasado, quando opera com um escorregamento de 5%. As perdas rotacionais somam 250 W. Sabe-se que o motor tem os seguintes parâmetros, expressos em ohms por fase:

$$R_1 = R_2 = 0,3$$

$$X_1 = X_2 = 1,25$$

$$R_p = 150$$

$$X_M = 18$$

a) Calcule o valor da potência de saída.

b) Determine o rendimento.

c) Calcule o torque eletromagnético e o torque mecânico.

d) Calcule o torque máximo.

e) Calcule o torque de partida e a sua corrente de partida aproximada.

Resp.:

a) 6.361,3 W b) 81,69% c) 36,92 Nm e 35,52 Nm d) 45,55 Nm e) 11,65 Nm e 49,39A

15) [exercício 4.21-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Um motor de indução trifásico tem um enrolamento do rotor conectado em Y. Em repouso, a fem induzida no rotor, por fase, é 100 V (eficazes). A resistência por fase é 0,3 Ω e a reatância de dispersão é 1,0 Ω por fase (do rotor).

a) Com o rotor bloqueado, qual é o valor eficaz da corrente do rotor? Qual é o fator de potência do circuito do rotor?

b) Quando o motor está girando com um escorregamento de 0,06, qual é o valor eficaz da corrente do rotor? Qual é o fator de potência do circuito do rotor?

Resp.:

a) 95,78∠-73,3° A e 0,288 indutivo b) 19,61∠-11,31° A e 0,981 indutivo

16) [exercício 4.20-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Um motor de indução trifásico de 6 pólos, 60 Hz, solicita 10 KW quando aciona sua carga normal. Solicita 700 W quando a carga é desconectada. As perdas no cobre do rotor e do estator sob carga normal são 295 W e 310 W, respectivamente. Considere perdas rotacionais e no núcleo iguais e perdas no cobre em vazio desprezíveis.

Calcule o rendimento e o torque no eixo deste motor.

Resp.:

86,95% e 71,45 Nm

17) Uma tensão trifásica equilibrada, 60 Hz, é aplicada a um motor de indução trifásico, de quatro pólos. Quando o motor entrega a potência de saída nominal, o escorregamento é de 0,05. Calcule:

a) A velocidade do campo magnético girante.

b) A velocidade do rotor e a frequência da corrente do rotor.

c) A velocidade (relativa) do campo magnético do rotor em relação ao rotor.

d) A velocidade (relativa) do campo magnético do rotor em relação à estrutura do estator.

e) A velocidade (relativa) do campo magnético do rotor em relação ao campo magnético do estator.

Resp.:

a) 1.800 RPM b) 1.710 RPM e 3 Hz c) 90 RPM d) 1.800 RPM e) zero

18) A saída no eixo de um motor de indução trifásico, 60 Hz, é de 75KW. As perdas por atrito e ventilação são de 900W, a perda no núcleo do estator é de 4.200W e a perda no cobre do estator

é de 2.700 W. Se o escorregamento é de 3,75%, qual é o rendimento em porcentagem nesta saída?

Resp.:  
87,46%

19) Um motor de indução trifásico, conectado em estrela, de seis pólos, 15 HP, 220V, 60Hz, tem os seguintes parâmetros por fase:

$$R_1=0,128\Omega \quad R'_2=0,0935\Omega \quad X_1+X'_2=0,496\Omega \quad R_p=183\Omega \quad X_m=8\Omega.$$

As perdas rotacionais são iguais à histerese e às perdas por corrente parasitas. Para um escorregamento de 3%, calcule:

- A corrente de linha e o fator de potência.
- A potência de saída, em HP
- O torque de saída no eixo do motor e o torque eletromagnético desenvolvido.
- O torque máximo.
- O torque de partida e a corrente de partida aproximada.

Resp.:

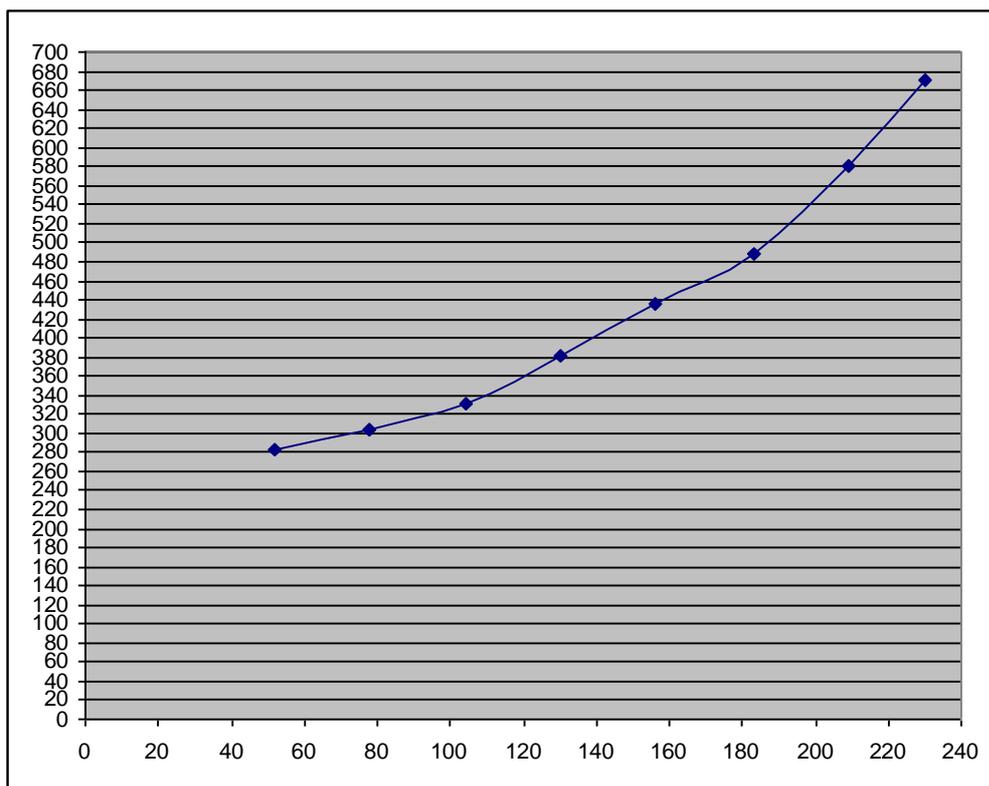
a)  $42,01 \angle -28,12^\circ$  A   b) 16,84 HP   c) 103,03 Nm e 104,89 Nm   d) 300 71 Nm   e) 122,01 Nm e 233,79 A

20) Um motor de indução trifásico, rotor em curto-circuito, 12 HP, 30 A, 4 pólos, 60 Hz, 230V - ligação em estrela; é ensaiado em vazio e com rotor bloqueado, conforme as tabelas e gráficos fornecidos. Determinar:

- O fator de potência para um escorregamento de 3,94%.
- A corrente da linha do motor para um escorregamento de 3,94%.
- A potência útil desenvolvida na ponta do eixo do motor para um escorregamento de 3,94%.
- O rendimento do motor de indução para um escorregamento de 3,94%.
- Os conjugados eletromagnético desenvolvido para um escorregamento de 3,94% e o conjugado de partida.
- A corrente de partida aproximada.

Ensaio em Vazio do Motor de Indução:

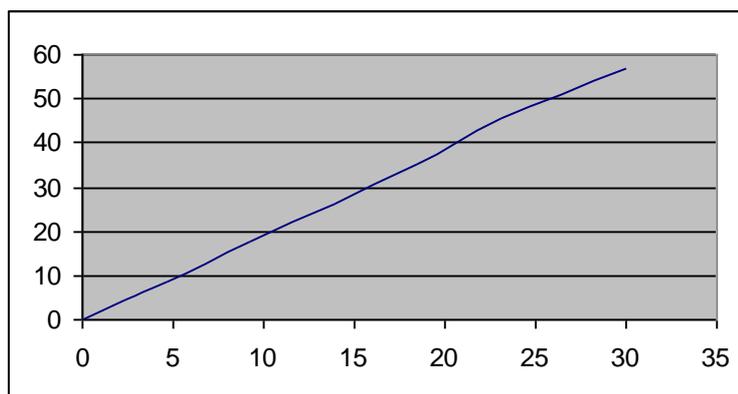
Po(W)	Vo(V)	Io (A)
283	52	2,2
304	78	2,77
332	104	3,5
382	130	4,52
435	156	5,64
488	183	6,77
580	209	7,9
670	230	9,2



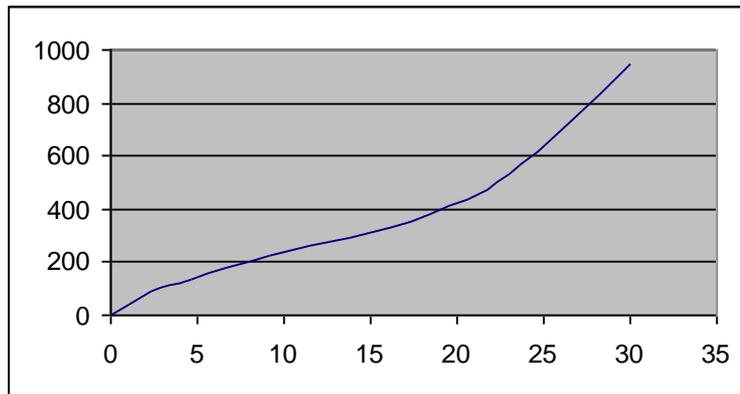
**Fig. 6.42** Gráfico de  $P_o$  em função de  $V_o$ .

Ensaio com Rotor Bloqueado do Motor de Indução:

Pcc(W)	Vcc(V)	Icc(A)
0	0	0
92	4,38	2,3
133	8,77	4,62
222	17,5	9,23
293	26,3	13,85
383	35,1	18,46
532	45,6	23,08
950	57	30



**Fig. 6.43** Gráfico de  $V_{cc}$  em função de  $I_{cc}$ .



**Fig. 6.44** Gráfico de Pcc em função de Icc.

Resp.:

a) 0,884 indutivo b)  $30,04 \angle -27,82^\circ$  A c) 12 HP d) 85,56% e) 55,41 Nm e 41,49 Nm e) 121,74 A

21) Especifique o motor para acionar uma bomba cujas características são:

Velocidade da carga = 1780 RPM

Potência da carga = 50,3 KW

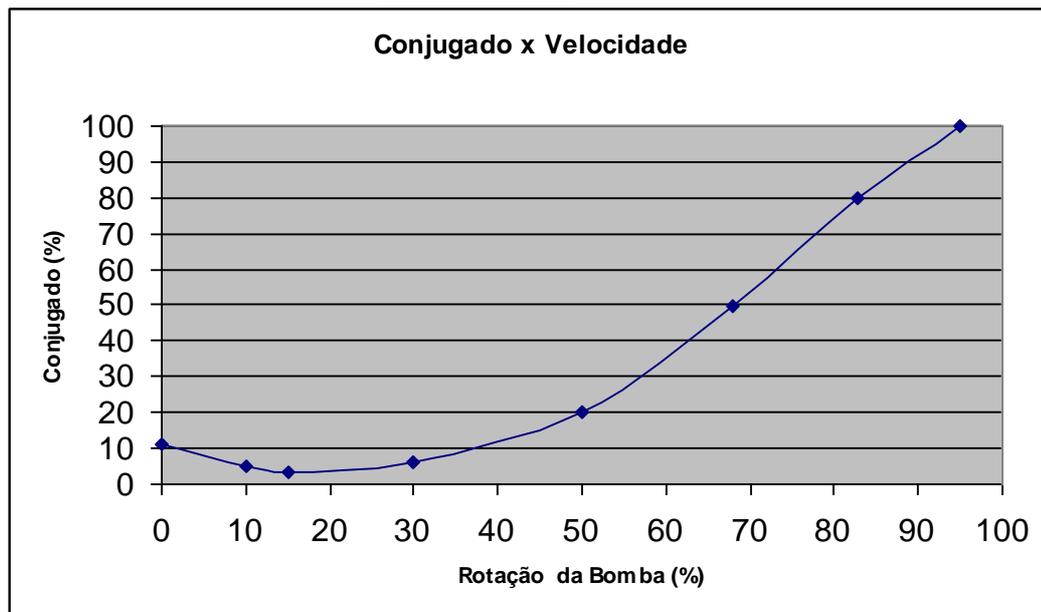
Momento de inércia da carga = 20 kgm

Acoplamento direto

Tensão da Rede = 220 V e partida estrela/triângulo

Atmosfera industrial e altitude menor que 1000 metros.

C (%)	n (%)
11	0
5	10
3,4	15
6	30
20	50
50	68
80	82,8
100	95



**Fig. 6.45** Gráfico do conjugado em função de velocidade da bomba

Resp.:

Motor 100 CV – classe F

22) Um motor de indução trifásico, rotor em curto-circuito, 50 HP, 65 A, 4 pólos, 60 Hz, 440V - ligação em estrela; é ensaiado em vazio e com rotor bloqueado, conforme as tabelas e gráficos fornecidos.

Determinar:

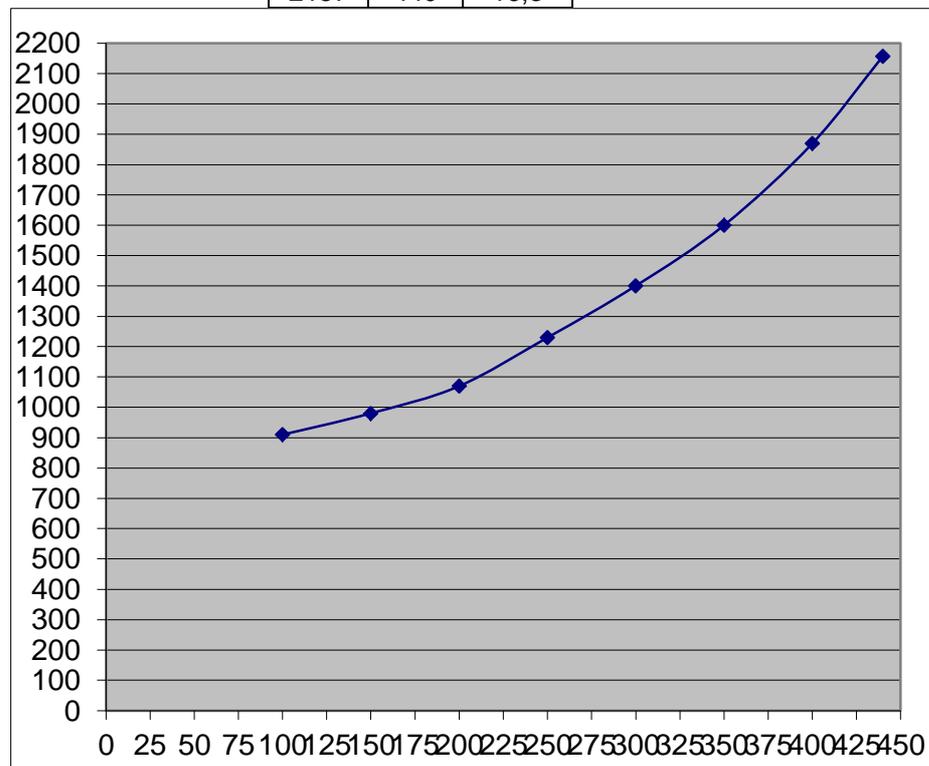
- O fator de potência para um escorregamento de 3,24%.
- A corrente da linha do motor para um escorregamento de 3,24%.
- A potência útil desenvolvida na ponta do eixo do motor para um escorregamento de 3,24%.
- O rendimento do motor de indução para um escorregamento de 3,24%.
- Os conjugados eletromagnético desenvolvido para um escorregamento de 3,24% e o conjugado de partida.
- A corrente de partida aproximada.

Ensaio com Rotor Bloqueado:

Pcc(W)	Vcc(V)	Icc(A)
0	0	0
330	8,15	5
480	16,3	10
800	32,6	20
960	48,9	30
1380	65,23	40
1920	81,5	50
3423	106	65

Ensaio em Vazio do Motor de Indução:

Po(W)	Vo(V)	Io (A)
910	100	3,9
980	150	4,9
1070	200	6,2
1230	250	8
1400	300	10
1600	350	12
1870	400	14
2157	440	16,3



**Fig. 6.46** Gráfico da potência em função da tensão em vazio.

Resp.:

a) 0,904 indutivo b)  $61,26 \angle -25,33^\circ A$  c) 50HP d) 90,26% e) 221,57 Nm e 157,04 Nm e) 270,36A

23) Um motor de indução trifásico, rotor em curto-circuito de Barra Profunda, 60 Hz, 220 V, ligação em estrela; 8 Pólos foi ensaiado em vazio e com o rotor bloqueado e apresentou os seguintes parâmetros elétricos:

$R_1 = 0,15 \Omega/\text{fase}$                        $R'_2 = 0,10 \Omega/\text{fase}$                        $X_1 + X'_2 = 0,5 \Omega/\text{fase}$   
 $R_p = 166,7 \Omega/\text{fase}$                        $X_m = 6,67 \Omega/\text{fase}$   
Perdas Rotacionais = 250 W

O motor irá trabalhar com uma determinada carga tal que seu escorregamento seja de 0,03. Determine:

- A corrente da linha e o fator de potência do motor quando operando com a carga citada.
- A potência consumida no rotor quando operando com a carga citada.
- A potência útil desenvolvida pelo motor quando operando com a carga citada.
- O rendimento do motor quando operando com carga citada.
- O conjugado eletromagnético e o conjugado mecânico quando operando com carga citada.
- O conjugado de partida do motor.
- A corrente de partida na linha aproximada.
- O conjugado máximo.
- Admitindo-se que a potência do motor fosse de 15 HP e analisando somente a potência, pode empregar tal motor para a carga citada? Comente.
- Determine os valores da tensão ( $V_o$ ), potência ( $P_o$ ), corrente ( $I_o$ ) e o fator de potência ( $\cos\phi_o$ ) que foram obtidos no ensaio em vazio.

Resp.:

a) 0,847 indutivo  $40,76 \angle -32,58^\circ A$  b) 12.162,93 W c) 11.548,04 W d) 87,78% e) 129,05 Nm e 126,92 Nm f) 275,65 Nm g) 208,08 A h) 381,99 Nm i) sim... j) 220 V; 494,46 W; 19,06 A e 0,04 indutivo.

24) Especifique o motor para acionar um ventilador cujas características são:

Velocidade da carga = 1500 RPM

Potência da carga = 20 KW

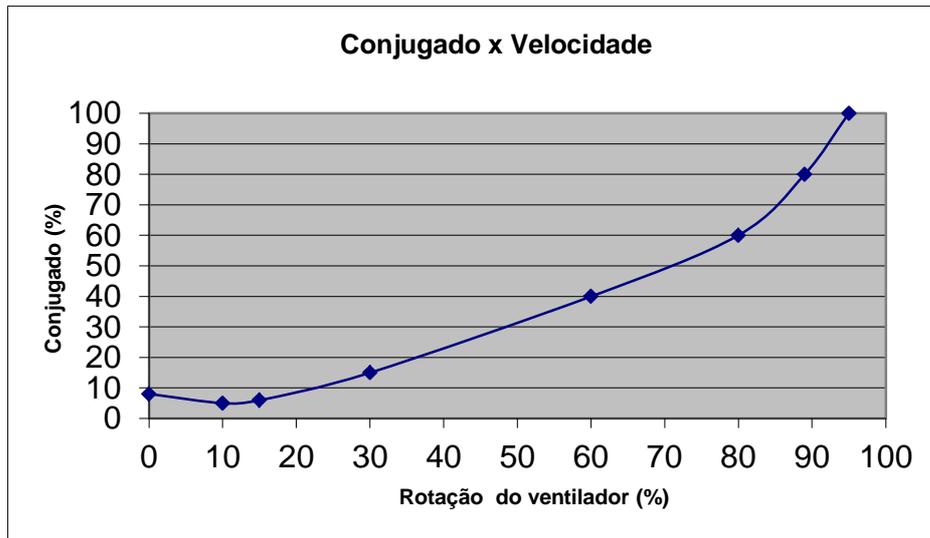
Momento de inércia da carga = 6 kgm<sup>2</sup>

Acoplamento à polia "V" com R = 0,85; rendimento do acoplamento = 95%

Tensão da Rede = 220 V e partida estrela/triângulo

Atmosfera industrial e altitude menor que 1000 metros.

C (%)	n (%)
8	0
5	10
6	15
15	30
40	60
60	80
80	89
100	95



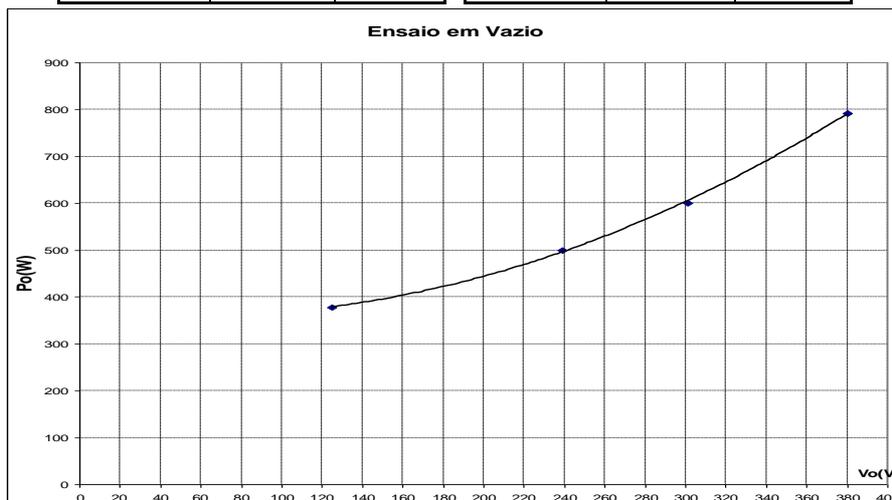
**Fig. 6.47** Gráfico do conjugado em função da rotação do ventilador.

Resp.:

Motor de 30 CV – isolamento classe F

25) Um motor trifásico de indução, rotor de gaiola profunda, 50 HP, 4 pólos, 6 terminais, 60 Hz, 1775 RPM, 380V, ligação em estrela, 70,7A; aciona uma carga com um escorregamento de 1,39%. Os dados do ensaio em vazio e com rotor bloqueado foram fornecidos da seguinte forma:

Ensaio em Vazio			Ensaio com Rotor Bloqueado		
Po (W)	Vo(V)	Io(A)	Pcc(W)	Vcc(V)	Icc(A)
273	0		0,0	0,0	0,0
378,0	125,0		576,0	14,9	20,0
500,0	238,8		989,0	26,0	32,6
600,0	301,0		1395,0	43,3	52,4
792,0	380,0	27,8	1613,5	59,9	70,7



**Fig. 6.42** Gráfico da potência em função da tensão em vazio.

Determinar:

- O rendimento do motor.
- Os conjugados eletromagnéticos para as condições de carga solicitada, de partida e o máximo conjugado.



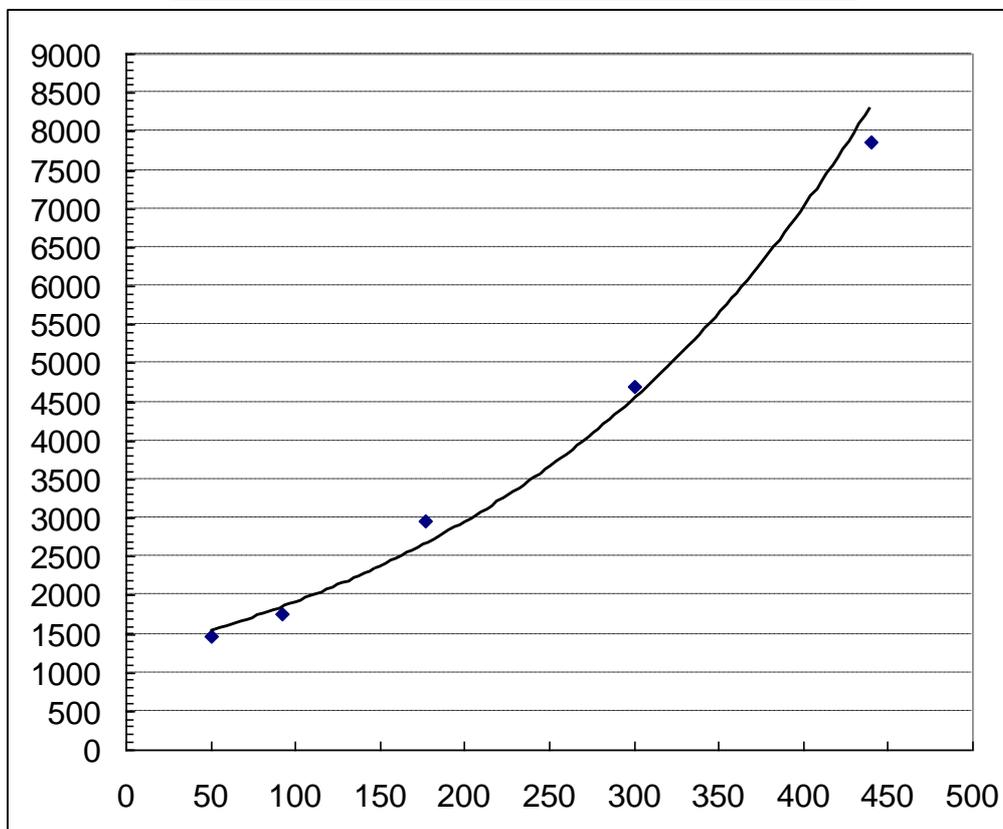
- c) Os conjugados eletromagnéticos para as condições de carga solicitada, de partida e o máximo conjugado.  
 d) A corrente de partida na linha.  
 e) A corrente de linha do motor, quando o mesmo for ligado em 380V, para acionar essa mesma carga.

Resp.:

a) 0,81 indutivo e 258,1 A b) 95,69% e 100 HP c) 677 Nm; 713 Nm e 1.576,4 Nm d) 1.058 A e) 149 A

30) Seja um motor de indução trifásico, rotor em curto-circuito de Dupla Gaiola, 400 CV, 60 Hz, 1780 RPM, 440 V, ligação em delta; foi ensaiado em vazio e com o rotor bloqueado e apresenta os seguintes dados:

ENSAIO EM VAZIO			ENSAIO ROTOR BLOQUEADO		
Vo (V)	Io (A)	Po (W)	Vcc (V)	Icc (A)	Pcc (W)
50	20	1460	20	45,6	888
92	30	1760	25	64	910
177	45,1	2950	43,5	148	1480
300	61	4700	67,3	235	2800
440	73	7870	109,5	350	4440



**Fig. 6.49** Gráfico: Potência em Vazio em função da Tensão em Vazio.

Determine:

- a) O circuito equivalente do motor de indução por fase referido ao estator.  
 b) O rendimento e o fator de potência do motor quando operando com carga nominal.  
 c) O conjugado eletromagnético nominal e de partida.  
 d) A corrente na linha de partida, aproximada  
 e) Quais os valores da corrente de partida na linha e do torque de partida, se o motor for ligado em estrela?

Resp.:

b) 95,18 % e 0,897 indutivo c) 1.667,4 Nm e 743,1 Nm d) 1.390,2 A e) 247,7 Nm e 463,38 A

31) Seja um motor de indução trifásico de rotor curto-circuitado, barra profunda, 12,5 CV, 220V em triângulo, 60 Hz, 4 pólos, que em vazio desenvolve uma velocidade de 1780 RPM e um consumo de 760W com um fator de potência de 0,20.

Numa condição de carga desenvolve uma velocidade de 1710 RPM com uma corrente de 30A a um fator de potência de 0,77. A resistência do enrolamento do estator foi medida e vale  $0,6\Omega/\text{fase}$  e as perdas rotacionais podem ser consideradas constantes e valem 200W. Determinar:

- As perdas no Ferro.
- As perdas Joule nos enrolamentos para a condição de carga dada.
- A potência mecânica para a condição de carga dada.
- O rendimento do motor.
- O conjugado eletromecânico desenvolvido e o conjugado mecânico.
- O conjugado de partida .
- A corrente de partida na linha aproximada.
- O conjugado máximo.
- O conjugado de partida e sua respectiva corrente se o motor for ligado em estrela.
- A reatância de dispersão do enrolamento do estator vale:  $j1,0$ ;  $j2,0$ ;  $j3,0$  ou  $j4,0 \Omega/\text{fase}$ .

Resp.:

a) 560 W b) 925,078 W c) 7.116,93 W d) 80,86% e) 40,86 Nm e 39,74 Nm f) 23,56 Nm g) 60,83 A h) 58,09 Nm i) 7,85 Nm e 20,28 A j)  $j3,0 \Omega/\text{fase}$

32) Seja um motor de indução trifásico de rotor curto-circuitado, barra profunda, 12,5 CV, 220V em triângulo, 60 Hz, 4 pólos, que em vazio desenvolve uma velocidade de 1780 RPM e um consumo de 760W com um fator de potência de 0,20. Numa condição de carga desenvolve uma velocidade de 1710 RPM com uma corrente de 30A a um fator de potência de 0,77. A resistência e a reatância do enrolamento do estator foram determinadas e valem  $0,6\Omega/\text{fase}$   $3,0\Omega/\text{fase}$  respectivamente. As perdas rotacionais podem ser consideradas constantes e valem 200W. Determinar:

- As perdas no Ferro.
- As perdas Joule nos enrolamentos para a condição de carga dada.
- A potência mecânica para a condição de carga dada e o respectivo rendimento do motor.
- O conjugado de partida e a corrente de partida na linha aproximada.
- O conjugado máximo.
- O conjugado de partida e sua respectiva corrente se o motor for ligado em estrela.

Resp.:

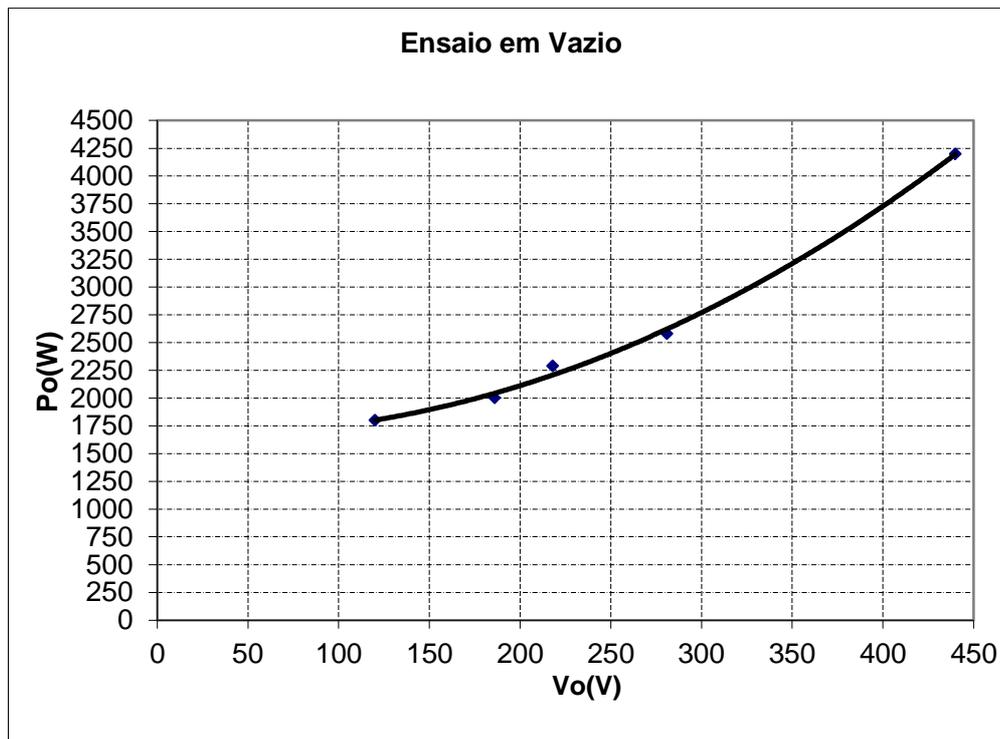
a) 560 W b) 925,11 W c) 7.117,17 W e 80,86% d) 23,56 Nm e 60,83 A e) 58,09 Nm f) 7,85 Nm e 20,28 A

33) A saída no eixo de um motor de indução trifásico, 60 Hz, é de 75KW. As perdas por atrito e ventilação são de 900W, a perda no núcleo é de 4.200W e a perda no cobre do estator é de 2.700 W. Se o escorregamento é de 3,75%, qual é o rendimento em porcentagem nesta saída?

Resp.:  
87,46%

34) Um motor de indução trifásico, 440V, conectado em triângulo, 4 pólos, 60 Hz, rotor de dupla gaiola, foi ensaiado em vazio e com rotor bloqueado e apresentou os seguintes dados:

Ensaio em Vazio			Ensaio com Rotor Bloqueado		
Po (W)	Vo(V)	Io(A)	Pcc(W)	Vcc(V)	Icc(A)
1800,0	120,0	13,0	0,0	0,0	0,0
2000,0	186,0	15,0	95,0	10,0	15,0
2290,0	218,0	20,0	308,0	20,0	30,0
2580,0	281,0	24,0	600,0	37,6	60,8
4200,0	440,0	26,0	800,0	44,7	71,5
			1130,0	50,0	81,5
			1670,0	60,0	97,6



**Fig. 6.50** Gráfico: Potência em Vazio em função da Tensão em Vazio.

O motor está operando com uma carga mecânica, tal que sua velocidade é de 1785RPM. Determinar

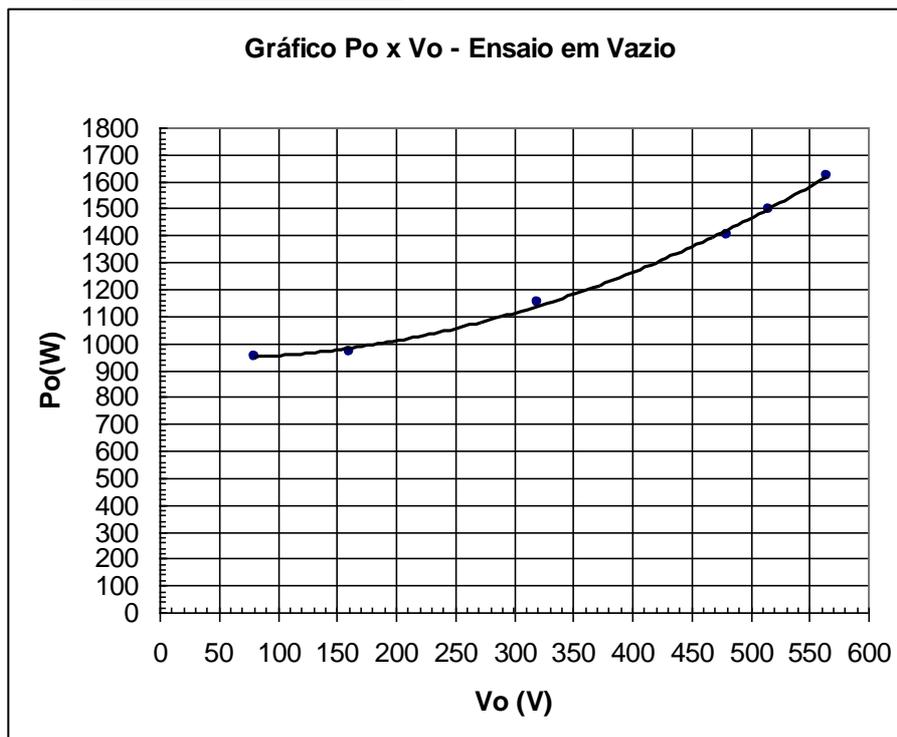
- A corrente da linha e o fator de potência do motor.
- O rendimento do motor.
- O conjugado mecânico.
- O conjugado de partida e a corrente de partida da linha aproximada.
- O conjugado máximo.
- O conjugado de partida e a corrente de partida da linha aproximada para partida na ligação estrela.

*Resp.:*

- a) 78,87 A e 0,917 indutivo b) 90,57% c) 266,18 Nm d) 834,54 Nm e 669,65 A e) 1.349,58 Nm  
f) 278,18 Nm e 223,22 A

35) Um motor de indução trifásico, rotor em curto-circuito de Barra Profunda, 30 HP, 60 Hz, 4 pólos, 500V, ligação em delta; foi submetido aos ensaios em vazio e com o rotor bloqueado e apresentou os seguintes valores:

ENSAIO EM VAZIO			ENSAIO ROTOR BLOQUEADO		
Vo (V)	Io (A)	Po (W)	Vcc (V)	Icc (A)	Pcc (W)
80	4,3	950	50	32	1600
160	4,5	970			
320	5,4	1150			
480	7,8	1400			
515	8,6	1500			
564	9,8	1620			



**Fig. 6.51** Gráfico: Potência em Vazio em função da Tensão em Vazio.

O motor está trabalhando com uma determinada carga, tal que seu escorregamento é de 2%. Determine:

- A corrente da linha para esta carga.
- O rendimento do motor quando operando com esta carga.
- O conjugado eletromagnético para esta carga.
- O conjugado de partida e a corrente na linha de partida aproximada.
- Quais os valores da corrente de partida na linha e do torque de partida, se o motor for ligado em estrela?

Resp.:

a)  $24,51 \angle -51,42^\circ$  A b) 88,13% c) 99,05 Nm d) 599,09 Nm e 268,88 A e) 199,70 Nm e 89,62 A

36) O ensaio em vazio em um motor de indução trifásico de 5HP, 60 Hz, 4 pólos, 220V em triângulo apresentou uma corrente de 6,8 A, com um consumo de 285 W desenvolvendo uma velocidade de 1786 RPM. A plena carga a corrente registrada foi de 13,45 A com um consumo de 4286 W. A resistência do enrolamento do estator fora medida e apresentou um valor de 0,89  $\Omega$ /fase. As perdas rotacionais podem ser consideradas constantes e valendo 160 W. Determinar:

- As perdas no Ferro.
- O rendimento do motor para a condição de carga dada.
- As perdas Joule no rotor para a condição de carga dada.
- A rotação do motor para a condição de carga dada.
- O conjugado eletromagnético desenvolvido.

f) O conjugado mecânico.

Resp.:

a) 125 W b) 87,03% c) 110 W d) 1750,5 RPM e) 21,22 Nm f) 20,35 Nm

37) [exercício 4.2-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Um motor de indução polifásico, 60 Hz, gira numa velocidade de 873 RPM, a plena carga. Qual é a velocidade síncrona? Calcule a frequência das correntes do rotor

Resp.:

Motor de 8 pólos, 900 RPM; 1,8 Hz

38) [exercício 4.10-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Uma tensão trifásica equilibrada, 60 Hz, é aplicada a um motor de indução trifásico, de quatro pólos. Quando o motor entrega a potência de saída nominal, o escorregamento é de 0,05. Calcule o seguinte:

- A velocidade do campo girante em relação à estrutura do estator, que acomoda o enrolamento de excitação.
- A frequência das correntes do rotor.
- A velocidade da fmm do rotor, relativa à estrutura do rotor.
- A velocidade da fmm do rotor, relativa à estrutura do estator.
- A velocidade da fmm do rotor, relativa à distribuição de campo do estator.
- Estão as condições corretas para o desenvolvimento de um torque unidirecional líquido? Explique

Resp.:

a) 1.800 RPM b) 3 Hz c) 90 RPM d) 1.800 RPM e) zero f) Sim

39) [exercício 4.13-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Determine a velocidade em vazio de um motor de indução trifásico, de rotor enrolado e de seis pólos, cujo estator é conectado a uma rede de 60 Hz e cujo rotor é conectado a uma rede de 25 Hz, quando:

- O campo do estator e o campo do rotor giram na mesma direção.
- O campo do estator e o campo do rotor giram em direções opostas.

Resp.:

a) 700 RPM b) 1.700 RPM

40) [exercício 4.16-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] A saída no eixo de um motor de indução trifásico, 60 Hz, é 75 KW. As perdas por atrito e ventilação são de 900 W, a perda no núcleo do estator é de 4.200 W e a perda no cobre do estator é 2.700 W. Se o escorregamento é de 3,75%, qual é o rendimento em porcentagem nesta saída?

Resp.:

87,46%

41) [exercício 4.17-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Com referência ao exercício 40, a resistência do enrolamento do rotor referida ao estator é conhecida como sendo 0,1  $\Omega$ . Determine o valor da corrente do rotor referida ao estator para as condições de operação especificadas.

Resp.:

95,56 A

42) [exercício 4.19-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Um motor de indução trifásico, de quatro pólos, conectado em Y, de 10 HP, 220 V, 60 Hz, solicita uma corrente da rede de 26,2 A, com um fator de potência de 0,78 atrasado, quando opera com um

escorregamento de 5%. As perdas rotacionais somam 250W. Sabe-se que o motor tem os seguintes parâmetros, expressos em ohms por fase:

$$R_1 = 0,3 \Omega \quad X_1 = X_2 = 1,25 \Omega \quad R_p = 150 \Omega \quad X_m = 18 \Omega$$

- Calcule a corrente no rotor por fase, referida ao estator.
- Calcule o valor da potência de saída.
- Determine o rendimento.
- Calcule o torque desenvolvido.

Resp.:

a)  $23,48 \angle -27,06^\circ$  A b) 6.361,32 W c) 81,69% d) 36,92 Nm

43) [exercício 4.21-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Um motor de indução trifásico tem um enrolamento do rotor conectado em Y. Em repouso, a fem induzida no rotor, por fase, é 100 V (eficazes). A resistência por fase é 0,3  $\Omega$  e a reatância de dispersão é 1,0  $\Omega$  por fase (do rotor).

- Com o rotor bloqueado, qual é o valor eficaz da corrente do rotor? Qual é o fator de potência do circuito do rotor?
- Quando o motor está girando com um escorregamento de 0,06, qual é o valor eficaz da corrente do rotor? Qual é o fator de potência do circuito do rotor?
- Calcule o valor da potência desenvolvida na parte (b).

Resp.:

a)  $95,78 \angle -73,3^\circ$  A e 0,288 indutivo b)  $1,177 \angle -11,31^\circ$  A e 0,981 indutivo c) 20,78W

44) [exercício 4.23-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Um motor de indução trifásico, 440 V, 60 Hz, conectado em Y, de oito pólos, 100 HP, tem os seguintes parâmetros, expressos por fase:

$$R_1 = 0,06 \Omega \quad R_2 = 0,048 \Omega \quad X_1 = X_2 = 0,26 \Omega$$

$$R_p = 107,5 \Omega \quad X_m = 8,47 \Omega$$

As perdas rotacionais são 1.600 W. Empregando o circuito equivalente aproximado, determine, para  $s = 0,03$ :

- A corrente da rede e o fator de potência de entrada.
- O rendimento.

Resp.:

a)  $159,7 \angle -27,46^\circ$  A e 0,887 indutivo b) 90,48%

45) [exercício 4.25-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Um motor de indução trifásico, de seis pólos, 40 HP, 60 Hz, tem uma entrada, quando carregado, de 35 KW, 51 A, 440 V, e uma velocidade de 1.152 RPM. Quando desconectado da carga, apresenta os seguintes valores: 440 V, 21,3 A, 2,3 KW e 1.199 RPM. A resistência medida entre os terminais do enrolamento do estator é 0,25  $\Omega$ , para uma conexão em Y. As perdas no núcleo do estator e as perdas rotacionais são iguais. Determine:

- O fator de potência do motor, quando carregado.
- O rendimento do motor, quando carregado.
- A potência nominal da carga, em HP.

Resp.:

a) 0,9 indutivo b) 86,88% c) 41 HP

46) [exercício 4.28-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Numa dada situação, dispõe-se apenas de 220 V, 30 Hz, trifásico. O administrador da instalação tem a oportunidade de comprar barato um motor de gaiola, trifásico, de quatro pólos, 10 HP, 440 V, 60 Hz, que seria usado para fornecer potência a uma carga de torque constante. O torque da carga corresponde ao do motor de 10 HP.

- Pode o motor ser usado? Justifique a sua resposta.
- Em caso afirmativo, qual seria o seu valor nominal.
- Como seria afetado o rendimento da operação.

d) Calcule a mudança aproximada no torque de partida.

47) [exercício 4.33-Fundamentos de Máquinas Elétricas, Vincent Del Toro, 1994] Referindo-se ao exercício 42. Calcule o escorregamento no qual o torque máximo ocorre e o valor de torque máximo.

Resp.:

0,0836 e 45,55 Nm

48) [exercício 9.1-Máquinas Elétricas, Irving I. Kosow, 1989] O escorregamento a plena carga de um motor de indução do tipo rotor de gaiola de 12 pólos, 60 Hz é 5%. Calcule:

- a) A velocidade à plena carga.
- b) A velocidade síncrona.
- c) A regulação em velocidade.

Resp.:

a) 600 RPM b) 570 RPM c) 5,26%

49) [exercício 9.2-Máquinas Elétricas, Irving I. Kosow, 1989] Um motor de indução do tipo rotor de gaiola de 6 pólos, 60 Hz tem uma velocidade nominal de 1.1140 RPM. Calcule:

- a) A velocidade síncrona.
- b) O escorregamento à plena carga.
- c) A regulação em velocidade.

Resp.:

a) 1.200 RPM b) 5% c) 5,26%

50) [exercício 5.28-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um motor de indução trifásico, 60 Hz, tem 8 pólos e opera com um escorregamento de 0,05 para uma certa carga. Calcule em RPM:

- a) A velocidade do rotor em relação ao estator.
- b) A velocidade do rotor em relação ao campo magnético do estator.
- c) A velocidade do campo magnético do rotor em relação ao rotor.
- d) A velocidade do campo magnético do rotor em relação ao estator.
- e) A velocidade do campo magnético do rotor em relação ao campo magnético do estator.

Resp.:

a) 855 RPM b) 45 RPM c) 45 RPM d) 900 RPM e) zero

51) [exercício 5.29-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um motor de indução trifásico, 60 Hz, 6 pólos, gira em vazio a 1.160 RPM e a plena 1.092 RPM. Determine o escorregamento e a frequência das correntes do rotor a vazio e a plena carga.

Resp.:

a) 3,3% e 2 Hz b) 9,0% e 5,4 Hz

52) [exercício 5.33-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um motor de indução trifásico, de 60 Hz, 4 pólos, tem uma reatância de dispersão do rotor de  $0,8\Omega$  por fase e uma resistência de  $0,1\Omega$  por fase. Que resistência adicional deve ser inserida no circuito do rotor para que o motor tenha o conjugado máximo na partida?

Resp.:

0,706 $\Omega$

53) [exercício 5.34-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um motor de indução trifásico, 20 HP, 400 V, 60 Hz, 4 pólos, desenvolve plena carga com um escorregamento de 5%. As perdas mecânicas são 400 W. Calcule:

- a) O conjugado eletromagnético.
- b) O conjugado do eixo.
- c) A perda no cobre do rotor.

Resp.:

a) 85,55 Nm b) 83,32 Nm c) 806,3 W

54) [exercício 5.35-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um motor de indução trifásico, 6 pólos, 400 Hz, 150 V, 10 HP, tem um escorregamento de 3% para potência de saída nominal. A perda por atrito e ventilação é 200 W à velocidade nominal. Com o motor operando à tensão e frequência de saída nominais, determine:

- a) A velocidade do rotor.
- b) A frequência da corrente do rotor.
- c) A perda do cobre do rotor.
- d) A potência que atravessa o entreferro.
- e) O conjugado de saída.

Resp.:

a) 7.760 RPM b) 12 Hz c) 236,9 W d) 7.896,3 W e) 9,18 Nm

55) [exercício 5.37-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um motor de indução trifásico, ligação estrela, 12 pólos, tem como condições nominais 500 HP, 2200 V, 60 Hz. A resistência por fase do estator é  $0,4\Omega$ , a resistência por fase do rotor referida para o estator é de  $0,2\Omega$  e a reatância total por fase do rotor e do estator, referida ao estator é  $2\Omega$ . Com tensão e frequência nominais aplicadas, o escorregamento do motor é de  $0,02\Omega$ . Para esta condição, encontre, em base por fase:

- a) A corrente do estator (despreze a corrente de magnetização).
- b) O conjugado desenvolvido.
- c) A potência de entrada do rotor.
- d) A perda do cobre no rotor.

Resp.:

a) 119,94 A b) 2.289,56 Nm c) 143.857,4 W d) 2.877,1 W

56) [exercício 9.10-Máquinas Elétricas, Irving I. Kosow, 1989] A velocidade a plena carga de um motor de indução de anéis, de 60 Hz, 12 pólos é 550RPM. Com rotor bloqueado, a reatância do rotor é  $2\Omega$  e sua resistência  $0,6\Omega$ . Calcule:

- a) O escorregamento e a velocidade para o ponto de torque máximo.
- b) A resistência a ser inserida no rotor para que o torque máximo se dê na partida.
- c) A nova velocidade a plena carga com a resistência adicionada no circuito do rotor.
- d) A regulação em velocidade com a resistência no circuito do rotor.
- e) A relação das velocidades a plena carga e sem resistência externa no circuito do rotor.

Resp.:

a) 3,0% e 420 RPM b)  $1,4\Omega$  c) 434,02 RPM d) 38,24% e) 0,789:1

57) [exercício 9.16-Máquinas Elétricas, Irving I. Kosow, 1989] A potência total suprida a um motor de indução do tipo gaiola, trifásico, é 4.000 W e as perdas correspondentes ao estator são 150 W. Calcule:

- a) A perda de potência no rotor quando o escorregamento é 4%.
- b) A potência eletromagnética desenvolvida.
- c) A potência de saída do motor em HP se as perdas de atrito e ventilação são 80 W.
- d) O rendimento total do motor.

Resp.:

a) 154 W b) 3.696 W c) 4,85 HP d) 90,4%

58) O parâmetros por fase para um motor de indução, 400 V, 60 Hz, trifásico, ligação estrela, 4 pólos, são:

$$R_1=0,2\Omega \quad R'_2=0,1\Omega \quad X_1=0,5\Omega \quad X'_2=0,2\Omega \quad X_m=20\Omega$$

Se as perdas totais mecânicas e no ferro, a 1.755 RPM, são 800 W. Calcular:

- Corrente de entrada.
- Potência de entrada.
- Potência de saída.
- Conjugado de saída.
- Rendimento.
- Corrente e conjugado de partida.

*Resp.:*

a)  $58,58\angle-20,89^\circ A$  b) 37,9 KW c) 33,6 KW d) 182,94 Nm e) 88,71% f) 302,39 A e 145,53 Nm

59) Um motor de indução trifásico, ligação estrela, 12 pólos, 220 V, 60 Hz. A resistência por fase do rotor referida ao estator é  $0,2\Omega$  e a reatância total por fase do rotor é  $2\Omega$ . Com tensão e frequência nominais aplicadas, o escorregamento do motor é 0,04. Determine, por fase:

- Corrente do estator (desprezar a corrente de magnetização).
- Conjugado desenvolvido.
- Potência consumida no rotor.
- Perda no cobre do rotor.

*Resp.:*

a) 22,8 A b) 41,37 Nm c) 2.599,2 W c) 103,97 W

## 7. MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

Os geradores e motores de corrente contínua apresentam basicamente a mesma constituição, diferindo apenas no que diz respeito a aplicação.

As máquinas de C.C., motor ou gerador, compõe-se de um indutor, de pólos salientes, fixo a carcaça (estator) e um induzido rotativo semelhante ao indutor das máquinas síncronas. Esse rotor compõe-se da armadura e do comutador. Na armadura localiza-se o enrolamento induzido distribuído em muitas bobinas parciais, alojadas em ranhuras, cujos terminais de cada bobina são soldados as lâminas do comutador.

A indução magnética varia em cada ponto devido ao seu movimento de rotação submetido a um campo magnético estacionário no espaço e produzido pelo enrolamento do estator excitado em corrente contínua.

Os motores e os geradores de C.C. podem ser divididos em duas partes, uma estacionária e a outra girante. A parte fixa é conhecida como estator e a parte móvel é chamada de rotor.

O estator tem como função a de proporcionar o campo magnético no qual giram os condutores da armadura. Nesta parte além dos pólos propriamente ditos, tem-se também o conjunto de escovas.

O rotor é constituído por um núcleo de aço laminado, no qual existem ranhuras destinadas a receber os enrolamentos (condutores). No mesmo eixo dessa peça, há um conjunto de segmentos de cobre, o comutador ou o coletor, sobre o qual deslizam as escovas que servem de condutores intermediários entre o enrolamento da armadura e o circuito externo.

Embora existam vários tipos de motores de corrente contínua, o motor mostrado na figura 7.1 é apropriado para entender os princípios básicos.

As principais partes de um motor C.C. são :

**Sistema de Campo ou Pólos de Excitação:** parte do motor que fornece o fluxo magnético necessário para criar o torque. Têm a finalidade de gerar o fluxo magnético. São constituídos de condutores enrolados sobre núcleos de chapas de aço laminadas cujas extremidades possuem um formato que se ajusta a armadura e são chamadas de sapatas polares.

Na figura 7.2, o sistema de campo consiste de dois ímãs permanentes e um suporte de ferro, formando a parte do estator.

Já na figura 7.3, os pólos de excitação são montados nos núcleos fixados na carcaça da máquina.

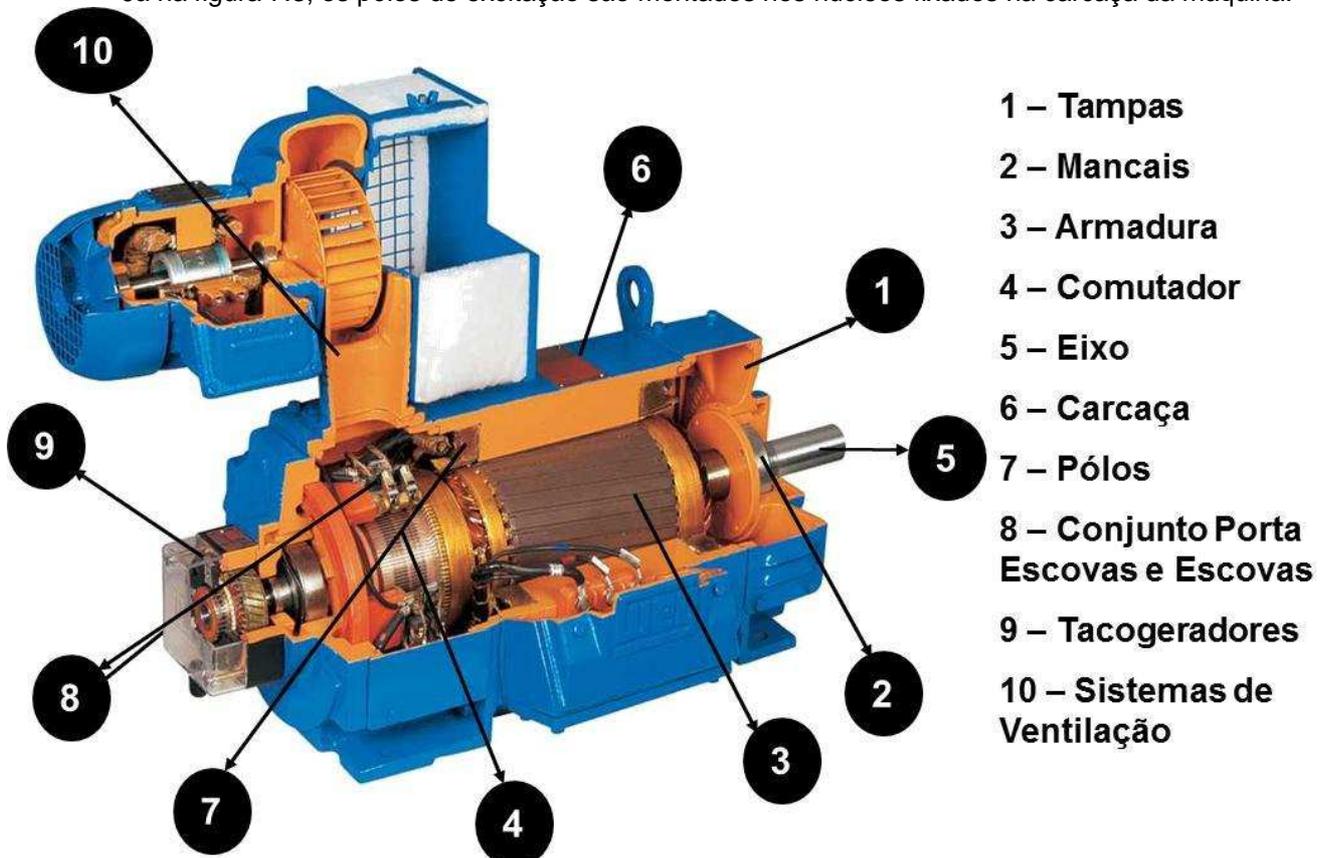
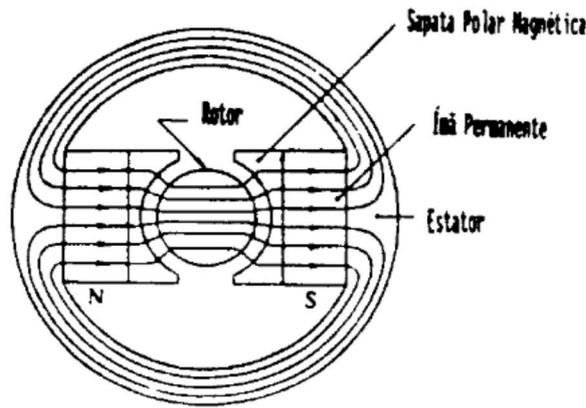


Fig. 7.1 Vista em corte de uma máquina de corrente contínua.  
FONTE: WEG



**Fig.7.2** Campo magnético na máquina de corrente contínua

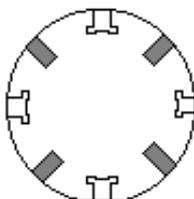
**Carcaça:** É a estrutura suporte do conjunto, também tem a finalidade de conduzir o fluxo magnético, que é gerado pelos pólos de excitação.



**Fig. 7.3** Carcaça de uma máquina de corrente contínua.  
FONTE: WEG

**Interpólos ou Pólos de Comutação:**

As correntes que fluem no enrolamento da armadura criam forças magnomotrizes cujos fluxos magnéticos tendem a se opor à ação do campo principal, alterando e produzindo centelhas nas escovas. Para evitar esta ação indesejável da armadura (conhecida como reação da armadura) são utilizados interpólos ou pólos comutadores, que são bobinas de poucas espiras de fio grosso, enroladas com núcleos laminados estreitos dispostos entre os pólos principais da máquina que são ligados em série com a armadura. Nas máquinas grandes há normalmente tantos interpólos quanto são os pólos principais e nas máquinas pequenas quase sempre usa-se a metade.



**Fig. 7.4** Interpólos

**Pólos de Compensação:** É um enrolamento distribuído na periferia da sapata polar e percorrido pela corrente de armadura. Sua finalidade é também compensar a reação de armadura, mas agora em toda a periferia do rotor, e não somente na região transversal. Evita o aparecimento de faíscas provocadas por uma diferença de potencial entre as espiras devido a distribuição não uniforme da indução no entreferro.

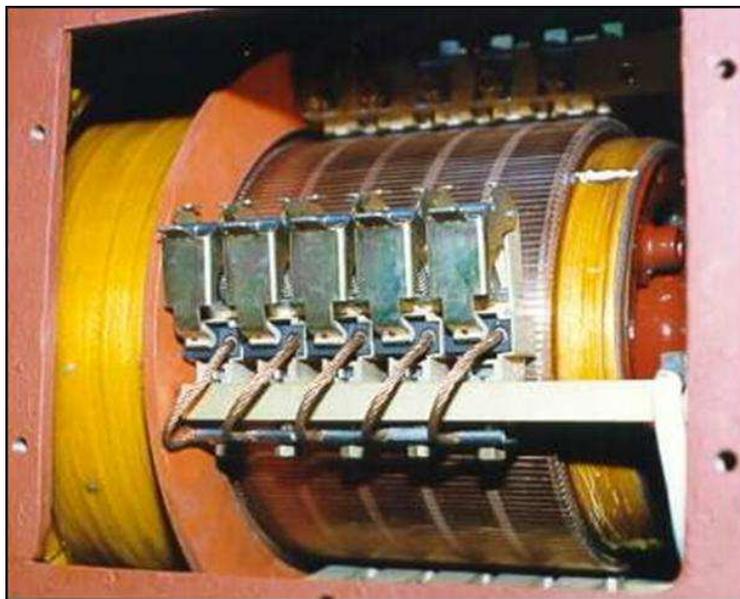


**Fig. 7.5** Pólos de compesação de uma máquina de corrente contínua.  
FONTE: WEG

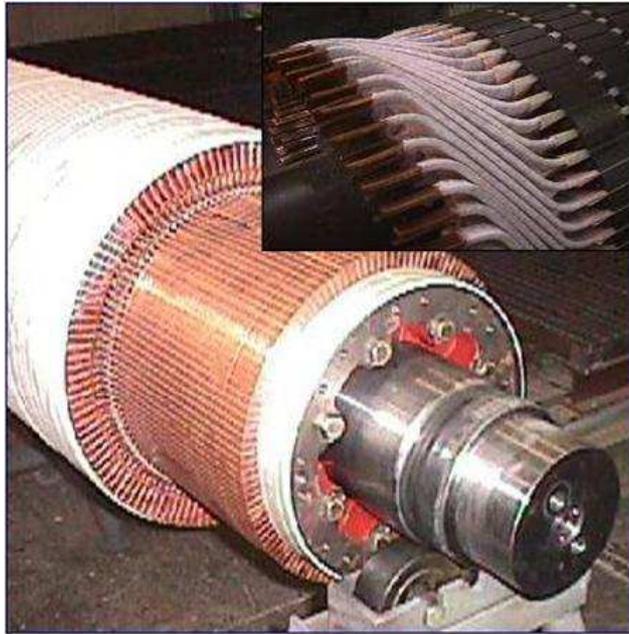
**Armadura :** parte do motor que conduz a corrente que interage com o fluxo de campo para criar torque.

**Escovas:** parte do circuito através do qual a corrente elétrica é alimentada para a armadura através da fonte de alimentação. Escovas são feitas de grafite ou metais preciosos. Um motor C.C. tem um ou mais pares de escovas. Na figura 7.1, em corte do motor, uma escova é conectada no terminal positivo da alimentação, e a outra no negativo.

**Comutador :** é a parte que está em contato com as escovas. A corrente é distribuída apropriadamente nas bobinas da armadura por meio das escovas e comutador. É o conversor mecânico que transfere a energia ao enrolamento do rotor. O comutador é constituído de lâminas de cobre isoladas uma das outras por meio de lâminas de mica.



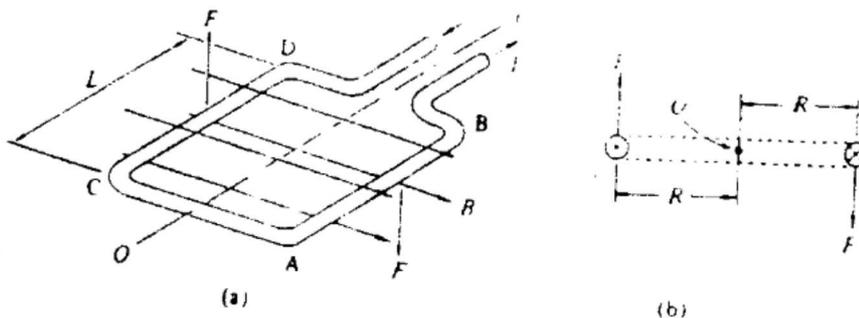
**Fig. 7.6** Comutador e porta escovas de uma máquina de corrente contínua.  
FONTE: WEG



**Fig. 7.7** Comutador de uma máquina de corrente contínua.  
 FONTE: WEG

A figura 7.8 ilustra o torque obtido quando uma bobina é colocada em um campo magnético. Aqui, existem dois condutores presentes, AB e CD. AC e DB são consideradas conexões entre os dois condutores e são chamadas cabeceiras de bobina. As direções de cada força agindo em AB e CD, são opostas. Na figura 7.8(b), o torque sobre o eixo OO' é horário.

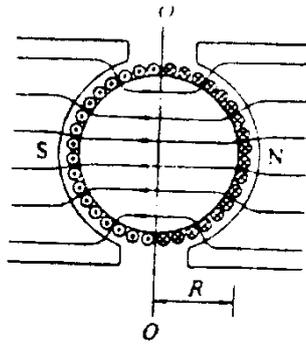
Se a corrente nos condutores à direita do eixo OO' for entrando no plano da figura 7.8, então a corrente nos condutores à esquerda flui saindo do plano da figura. As escovas e os comutadores sempre distribuem a corrente dos terminais para o rotor dessa maneira.



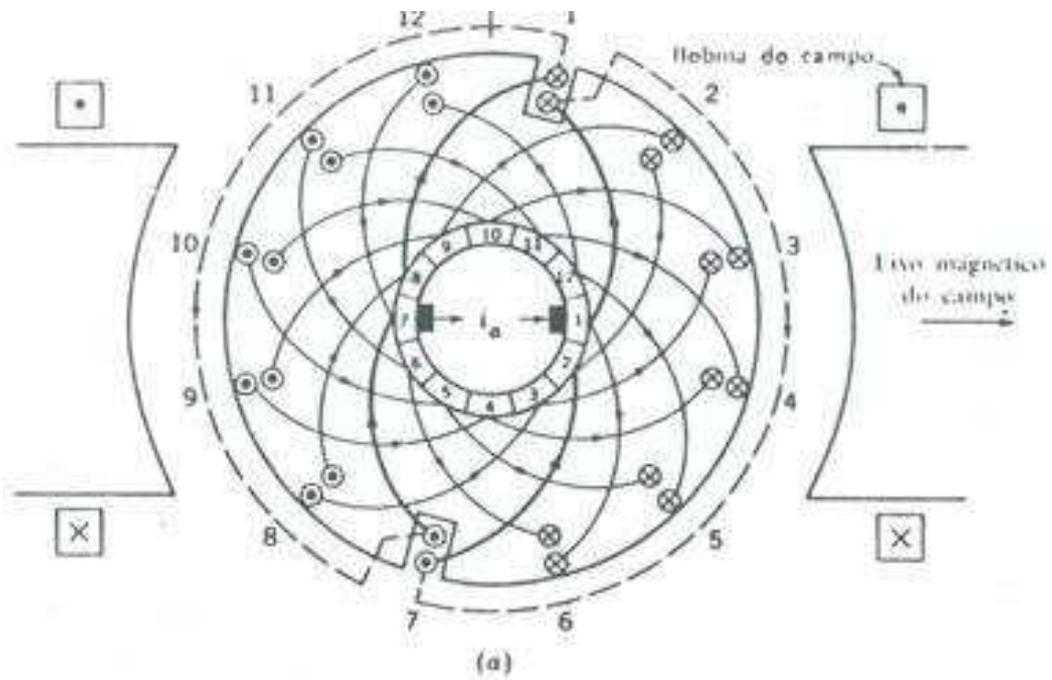
**Fig. 7.8** Bobina colocada em um campo magnético

Na armadura do motor, a distribuição de corrente é ilustrada na figura 7.9 a 7.11.

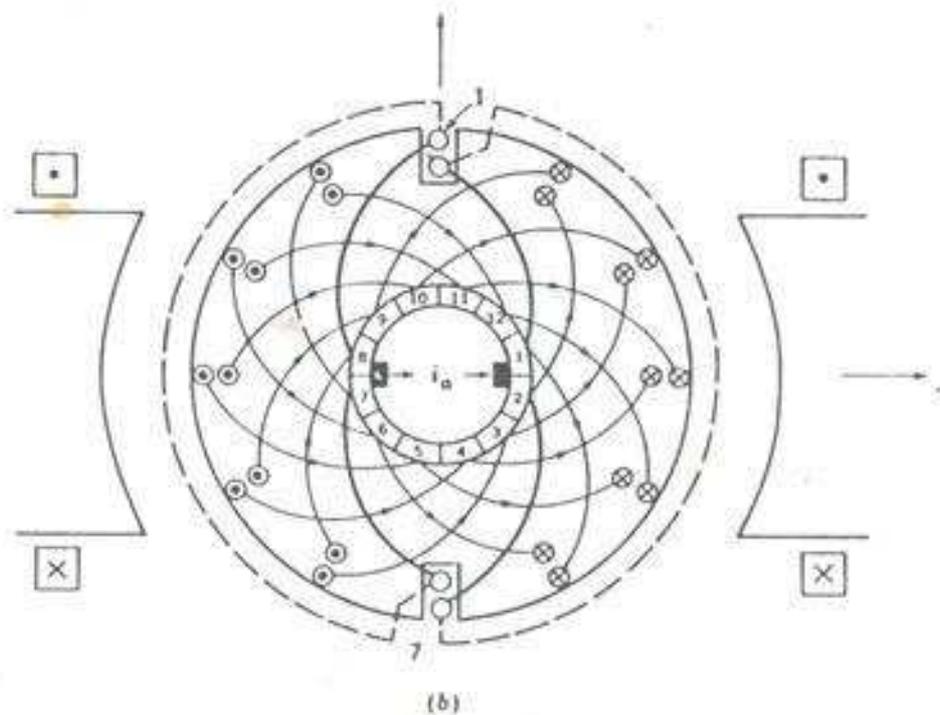
Na figura 7.9, os condutores da metade direita estão sobre o pólo norte e os da esquerda sobre o pólo sul do ímã permanente, gerando dessa maneira o torque.



**Fig. 7.9** Distribuição da corrente na armadura do motor.



**Fig. 7.10** Distribuição da corrente na armadura do motor - A corrente entra na lamela 1 e se divide na ranhura 1 e 6, percorre a armadura e volta a lamela 2.



**Fig. 7.11** Distribuição da corrente na armadura do motor - O motor já rotacionou o equivalente a  $\frac{1}{2}$  lâmina, neste ponto as ranhuras 1 e 7 estão curto-circuitadas e fora do circuito. (zona neutra)

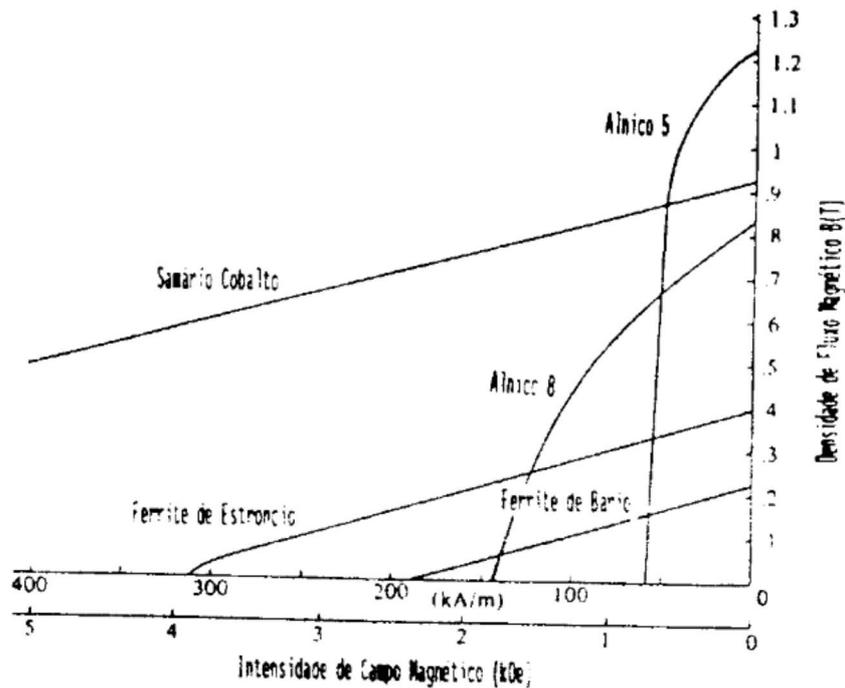
### 7.1 Máquinas de Corrente Contínua - Imã Permanente

Este tipo de máquina é feito para motores ou geradores no qual o campo magnético é obtido através de ímãs permanentes.

Basicamente há três tipos de ímã permanente utilizado nestes motores:

- a) Alnico Simples ou Colunar.
- b) Ferrites de Estrôncio.
- c) Terras Raras como Samari Cobalto e Ferro Neodímio Boro.

As curvas do segundo quadrante destes materiais são apresentadas na figura 7.12 e através delas pode-se destacar :



**Fig. 7.12** Gráfico intensidade de campo magnético x densidade de fluxo magnético

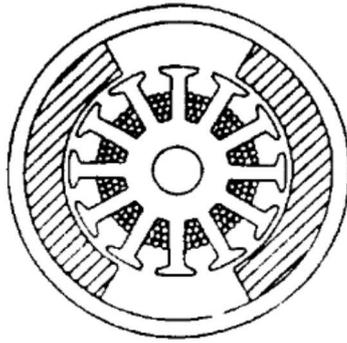
a) Alnico: possui elevado valor de campo residual ( $B_r = 1,25 \text{ Wb/m}^2$ ) e reduzido valor de campo coercitivo ( $H_c = 60 \text{ KA/m}$ ), o que torna vulnerável a efeitos desmagnetizantes produzidos por reação de armadura ou variações de relutância do circuito magnético. Atualmente são empregados em micromotores de corrente contínua tipo “core less”. Neste caso, o enrolamento, como mostra a figura 7.13, é compactado, formando um cilindro oco com o alnico no interior e preso a uma das tampas.

Esta construção de tecnologia bastante recente elimina em relação ao rotor ranhurado, a pulsação do torque de relutância (cogging). Diminui também a indutância da armadura minimizando a constante de tempo elétrica. Torna a comutação otimizada, garantindo menos interferência (ruído eletromagnético) nos circuitos de informática.



**Fig. 7.13** Vista do enrolamento de uma máquina CC em ímã permanente de Alnico

b) Ferrites de Estrôncio : este material possui baixo campo de indução residual ( $B_r = 0,4 \text{ Wb/m}^2$ ), mas campo coercitivo elevado ( $H_c = 350 \text{ KA/m}$ ). Sua vantagem em relação ao anterior é que uma vez sofrido alteração do circuito magnético (montagem e desmontagem após a magnetização) o campo de indução se restabelece ao valor original (através da linha de retorno), quando a relutância do circuito ao valor original. O corte transversal é mostrado na figura 7.14. Este material tem o menor custo comercial e por isso é utilizado em praticamente todo o universo dos motores de corrente contínua a ímã permanente.



**Fig. 7.14** Corte transversal de uma máquina CC em ímã permanente de Ferrite Estrôncio

c) Terras Raras (Smco e FeNeBo) - estes materiais possuem tanto campo residual como coercitivo de elevada intensidade, caracterizando ímãs permanentes de elevada densidade de energia ( $B_r = 1,0 \text{ Wb/m}^2$  e  $H_c = 900 \text{ KA/m}$ ). Em função do elevado custo, normalmente estes ímãs são empregados em servomotores para aplicações específicas nas indústrias de:

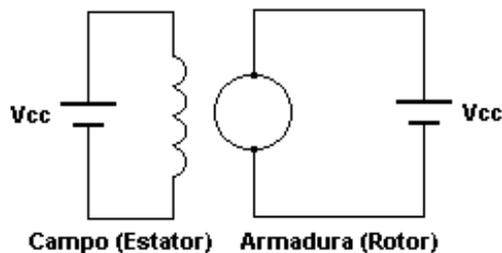
- Aeronáutica e Militar, Máquinas ferramenta, Informática.

Comparando com motores de Ferrite, os motores de Terras Raras apresentam melhores resultados em relação aos primeiros, podendo-se destacar:

- Conjugado Nominal ( $T_n$ ) de 1,5 a 1,7
- Constante de tempo mecânica ( $\tau_m$ ) de 0,4 a 0,6
- Potência máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) de 1,8 a 2,2
- Constante de tempo elétrica ( $\tau_e$ ) de 0,65 a 0,7

## 7.2 Máquina de Corrente Contínua - Excitação Independente

Neste tipo, o campo magnético é alimentado através de uma fonte independente conforme ilustra a figura 7.15 e é usado em casos especiais, no qual pode-se variar um campo magnético independente de variar a armadura.



**Fig. 7.15** Máquina C.C. excitação independente

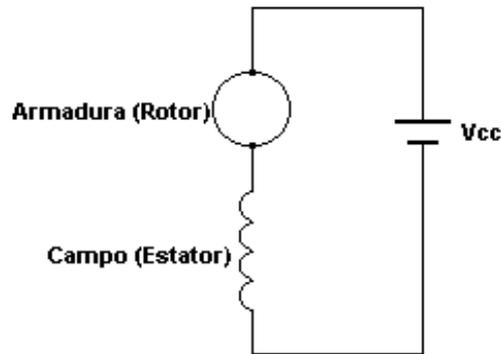
## 7.3 Máquina de Corrente Contínua - Excitação Série

O motor série tem o seu campo ligado em série com a armadura como mostra a figura 7.16. Neste tipo, o enrolamento do campo é feito com poucas espiras de fio grosso, pois terá de suportar toda a corrente elétrica da armadura. A indutância é quase nula, por isso estes motores são mais empregados na tração de carros elétricos, guindastes, enfim em todos os casos em que forem necessárias constantes interrupções de carga.

Mais outra qualidade nestes motores é que no momento de arranque está na razão direta do quadrado da corrente recebida. O limite da velocidade desses motores é aquele em que a força contra eletromotriz gerada é igual a força eletromotriz aplicada. Este limite só pode ser atingido se o motor estiver sem carga de espécie alguma.

Se ele entra em marcha com carga, a corrente sobe instantaneamente produzindo todo momento de arranque. A velocidade do motor série varia inversamente com a carga. Se a carga aumenta, o motor gira vagarosamente, a força eletromotriz gerada diminui, permitindo à força eletromotriz aplicada, forçar uma corrente maior no induzido. Se a carga for retirada completamente, a velocidade irá aumentar perigosamente, podendo até despedaçar o motor, pois a corrente adquirida será muito pequena e o campo muito fraco, de modo que o motor não poderá girar com suficiente velocidade para gerar uma força contra eletromotriz capaz de restabelecer o equilíbrio. Os motores tipo série nunca devem funcionar sem carga.

Em consequência, esses se destinam a trabalhar conjugado à carga, ou quando se tem certeza que ela nunca faltará.



**Fig. 7.16** Máquina C.C. excitação série

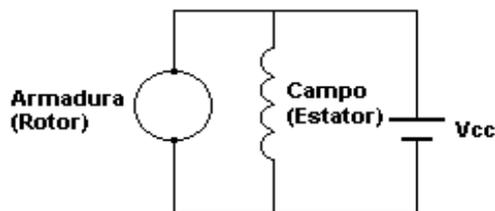
#### 7.4. Máquina de Corrente Contínua - Excitação Paralela (shunt)

O enrolamento dos pólos nesse tipo está em paralelo com o induzido. O enrolamento nesses casos é constituído de fio muito fino com muitas espiras e por consequência tem muita resistência elétrica, pois deverá suportar toda a força eletromotriz gerada quando se tratar de um gerador, ou então toda a força eletromotriz da rede de alimentação no caso de ser um motor.

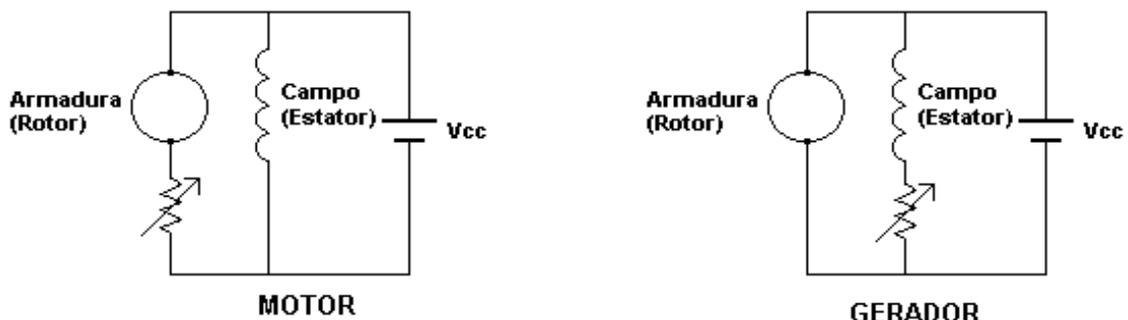
Nestas máquinas deve-se observar as diferenças para seu funcionamento, quando se trata de um motor deverá ter uma resistência de partida em série com o conjunto conforme a figura 7.17b. Quando a máquina funciona como gerador elimina-se a resistência de partida e coloca-se um reostato em série com o campo.

Para o funcionamento como motor é necessário certos dispositivos de segurança para se evitar a perda do campo magnético no motor.

A variação de velocidade nesses motores quando sem carga é apenas de  $\pm 10\%$ . Por esta razão os motores shunt são considerados como motores de velocidade constante.



**Fig. 7.17a** Máquina C.C. excitação paralela



**Fig. 7.17b** Máquina C.C. excitação paralela (motor e gerador)

#### 7.5 Máquina de Corrente Contínua - Excitação Combinada (série-paralela, mista, compound, composta)

Este motor é uma combinação do motor série e do motor shunt. O campo consiste de dois enrolamentos separados de acordo com figura 7.18. Um deles com muitas espiras de fio fino e ligado em paralelo com o induzido, o outro consiste o campo série e é enrolado com poucas espiras de fio grosso. Esses motores têm algumas características recebidas pelo enrolamento série que são forte momento de

arranque e aceleração rápida. Tem também uma velocidade razoavelmente constante e um bom rendimento com cargas pesadas, sendo por estas características o mais empregado.

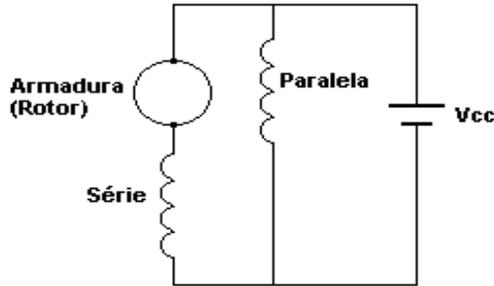


Fig. 7.18 Máquina C.C. excitação composta

## 7.6. Modelamento das máquinas de corrente contínua

### Princípio de Funcionamento:

Alimentando com uma fonte de tensão externa de tensão  $V_a$  as duas escovas. Com isso obtém-se a corrente no enrolamento da armadura. A interação entre essas correntes e o campo magnético (estator) faz surgir uma força em cada condutor, tangencial ao cilindro, de acordo com a equação 7.1. Esta força produz um conjugado que imprime sobre o rotor um movimento de rotação acelerado.

$$\vec{F} = (\hat{i} \wedge \hat{B}) l \quad [7.1]$$

Impondo-se um movimento de rotação tem-se que cada condutor movimentar-se perpendicularmente ao campo magnético, surgindo então em cada condutor uma f.e.m, conforme a equação 7.2.

$$\vec{E} = (\vec{v} \wedge \vec{B}) l \quad [7.2]$$

Em qualquer instante co-existirão simultaneamente a corrente e a f.e.m. no condutor. A f.e.m. gerada é proporcional a velocidade de rotação e atua em oposição a tensão externa  $V_a$ . Então, a corrente de alimentação  $I_a$  é dada pela equação 7.3.

$$I_a = \frac{V_a - E}{R_a} \quad [7.3]$$

A velocidade do rotor deverá se estabilizar em uma condição tal que  $E = V_a$  resultando  $I_a = 0$  e portanto conjugado nulo de aceleração. Nesta situação pode-se citar que o rotor “flutua” sobre a fonte de tensão  $V_a$ . A partir desta condição de flutuação pode-se analisar duas condições de funcionamento.

a) Aplicado conjugado externo sobre o eixo, em oposição ao movimento, a velocidade do rotor cai ligeiramente, resultando em redução do valor  $E$ . Aparecerá uma corrente  $I_a$ , conforme a equação 7.3.

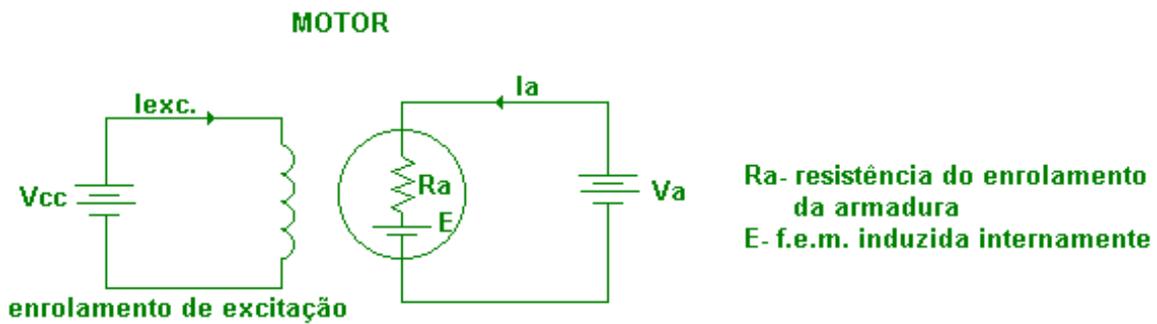
A velocidade se equilibra em um novo valor, tal que o conjugado resultante produzido por  $I_a$  se equilibra com o conjugado aplicado ao eixo. A máquina funciona como **motor**.

b) A partir da condição de flutuação é aplicado conjugado externo no eixo no sentido de aumentar a velocidade. O valor de  $E$  fica superior a  $V_a$  e a corrente  $I_a$  circula da máquina para a fonte, de acordo com a equação 7.4.

$$I_a = \frac{E - V_a}{R_a} \quad [7.4]$$

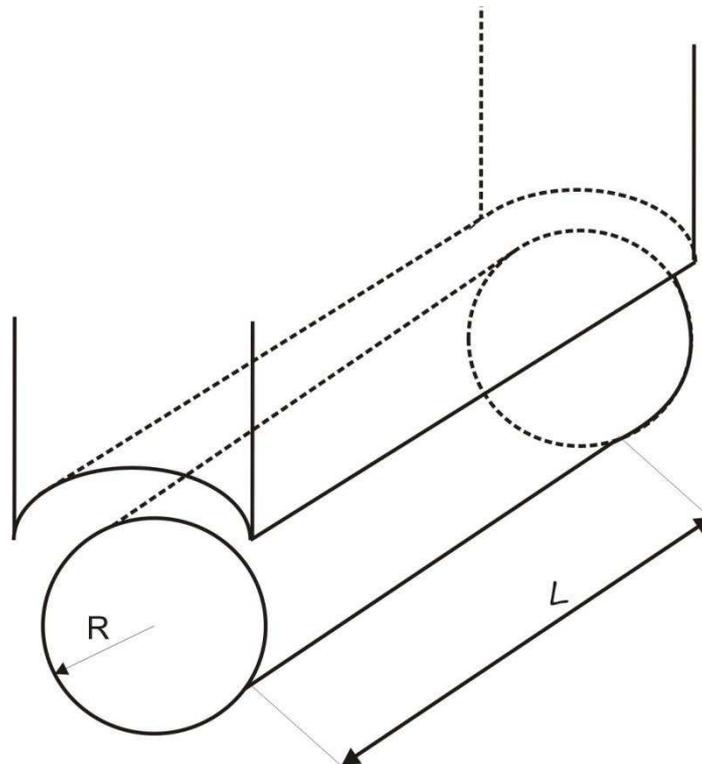
A velocidade se estabiliza em um valor onde o conjugado interno produzido por  $I_a$  se equilibra com o conjugado externo no eixo. A máquina funciona como **gerador**.

Esquemáticamente tem-se a figura 7.19 do circuito equivalente do motor C.C. de excitação independente.



**Fig. 7.19** Circuito equivalente do motor CC de excitação independente

**Equacionamento e Modelamento da Máquina de Corrente Contínua:**



**Fig. 7.20** Esquemático do enrolamento da armadura de raio R e comprimento L.

***i** - A expressão da força eletromotriz induzida em cada condutor é apresentada na equação 7.5.*

$$e = B_{médio} \cdot l \cdot v \tag{7.5}$$

Sendo:

$$B_{médio} = P \cdot \frac{\phi}{S_{entreferro}} \tag{7.6}$$

Onde :

P - nº de pólos

$\phi$  - fluxo magnético por pólo

$S = 2 \pi R l$

p - pares de pólos

v - velocidade escalar  $\Rightarrow v = 2 \pi R n$  ou  $v = w R$

w - velocidade angular

n - rotação por segundo (RPS)

Substituindo a equação 7.6 em 7.5, tem-se:

$$e = \frac{2p\phi}{2\pi Rl} l\omega R \Rightarrow e = \frac{p\phi\omega}{\pi} \quad [7.7]$$

**ii - Número de condutores em série na armadura (N):**

$$N = \frac{Z}{2a} \quad [7.8]$$

Onde:

Z - nº total de condutores

a - pares de circuitos em paralelo, depende do tipo do enrolamento; enrolamento imbricado a = p;

enrolamento ondulado a = 1.

**iii - A tensão total (E) fica:**

$$E = N e \quad [7.9]$$

$$E = \frac{Z}{2a} \frac{p\phi\omega}{\pi} \quad [7.10]$$

Sabendo que:

$$k = \frac{Zp}{2\pi a} \quad [7.11]$$

Então:

$$E = k\phi\omega \quad [7.12]$$

Os pares de circuitos paralelos (a) dependem do tipo do enrolamento.

Há dois tipos básicos de enrolamentos:

**a) enrolamento imbricado:**

Tem-se tantos circuitos em paralelo quantos forem os pólos da armadura.

$$2p = 2a \Rightarrow a = p$$

Exemplo : 4 pólos

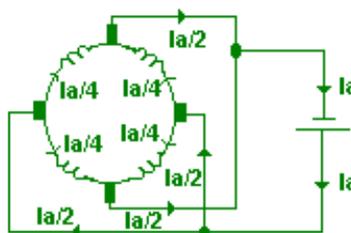


Fig. 7.21 Circuito equivalente da armadura de enrolamento imbricado

**b) enrolamento ondulado:**

Sempre a corrente tem apenas dois caminhos :  $2a = 2 \Rightarrow a = 1$

**iv - A expressão da força eletromagnética desenvolvida em cada condutor é apresentada na equação 7.13.**

$$\begin{aligned}
 f &= B i l \\
 f &= 2 p \frac{\phi}{S} i l \\
 f &= 2 p \frac{\phi}{2 \pi R l} i l \\
 f &= \frac{p \phi i}{\pi R} \text{ (N)}
 \end{aligned}
 \tag{7.13}$$

**v - A força eletromagnética total desenvolvida (F), fica:**

$$\begin{aligned}
 F &= N . f \\
 F &= N . \frac{p \phi i}{\pi R} \\
 F &= \frac{Z}{2 a} \frac{p \phi i}{\pi R} \\
 F &= \frac{k \phi i}{R} \text{ (N)}
 \end{aligned}
 \tag{7.14}$$

**vi - A expressão do conjugado eletromagnético desenvolvido em cada condutor é apresentada na equação 7.15.**

$$\begin{aligned}
 c &= f . R \\
 c &= \frac{p \phi i}{\pi R} . R \\
 c &= \frac{p \phi i}{\pi} \text{ (Nm)}
 \end{aligned}
 \tag{7.15}$$

**vii - O conjugado eletromagnético total desenvolvida ( $C_{Eletro.}$ ), fica:**

$$\begin{aligned}
 C_{Eletro} &= N . c \\
 C_{Eletro} &= \frac{Z}{2 a} \frac{p \phi i}{\pi} \\
 C_{Eletro} &= k \phi i \text{ (Nm)}
 \end{aligned}
 \tag{7.16}$$

O conjugado eletromagnético desenvolvido é proporcional ao fluxo por pólo e a corrente de armadura. O conjugado também pode ser obtido por:

$$C_{Eletro} = \frac{P_{Eletro}}{w} \Rightarrow C_{Eletro} = \frac{EI_a}{w}$$

$$C_{Eletro} = \frac{k\phi w I_a}{w}$$

[7.17]

$$C_{Eletro} = k\phi I_a$$

## 7.7 Exercícios

1) [exercício 4.10-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um gerador com excitação em derivação, 100 KW, tem resistência de armadura igual a  $0,05 \Omega$ , resistência do enrolamento de campo igual a  $57,5 \Omega$ . Se o gerador opera a tensão nominal de 230 V, calcular a tensão induzida a:

- a) Plena carga
- b) Meia carga

Resp.:

a) 251,94 V b) 241,07 V

2) [exercício 4.13-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] O gerador do exercício 1 tem 4 pólos, a armadura é imbricada com 326 condutores e gira a 650 RPM a plena carga. Se o diâmetro da máquina é de 42 cm, seu comprimento de 28 cm e cada pólo corresponde a um ângulo de  $60^\circ$ , determinar a densidade de fluxo no entreferro.

Resp.:

1,16 T

3) [exercício 4.15 e 4.16-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] O gerador do exercício 1 tem uma perda total mecânica e no ferro de 1,8 KW, calcule:

- a) O rendimento do gerador
- b) Para que carga o rendimento é máximo
- c) Qual é o rendimento máximo

Resp.:

a) 89,01% b) 52,72% c) 90,65%

4) Determinar o fluxo magnético necessário para que um motor de CC gire com 1800 RPM se ele tem 246 condutores, 4 pólos, enrolamento ondulado, gira em vazio a 1800 RPM e tem uma alimentação de 250 V.

Resp.:

16,94 mWb

5) Repetir o exercício 4 para o enrolamento imbricado.

Resp.:

33,88 mWb

6) [exercício 4.8-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Uma armadura de 4 pólos, enrolamento imbricado tem 144 ranhuras com dois lados de bobina por ranhura, cada bobina tendo duas espiras. Se o fluxo por pólo é 20 mWb e a armadura gira a 720 RPM, qual a tensão induzida?

Resp.:

138,24 V

7) [exercício 4.14-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um gerador CC com excitação independente, tem uma perda constante de  $P_c$  (W) e opera a uma tensão  $V_a$  e uma corrente  $I_a$  de armadura. A resistência da armadura é  $R_a$ . Para que valor de  $I_a$  o rendimento do gerador é máximo?

8) [exercício 4.22-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um motor de derivação de 20 HP, 250 V, tem uma resistência de armadura de  $0,22 \Omega$  e uma resistência de campo de  $170 \Omega$ . A vazio, sob tensão nominal, a velocidade é de 1200 RPM e a corrente da armadura é de 3 A. A plena carga e tensão nominal, a corrente de linha é 55 A, e o fluxo é reduzido de 6% (devido os efeitos de reação de armadura) do seu valor a vazio. Qual a velocidade a plena carga?

Resp.:  
1220 RPM

9) [exercício 4.24-Máquinas Elétricas, Syed A. Nasar, 1984] Um motor de derivação de 10 HP, 230 V, consome uma corrente de linha a plena carga de 40 A. As resistências de armadura e de campo são  $0,25 \Omega$  e  $230 \Omega$  respectivamente. A queda total de contato de escovas é de 2 V e as perdas por atrito e no núcleo são 380 W. Determinar o rendimento do motor admitindo que as perdas suplementares são 1% de saída.

Resp.:  
86,72%

10) Dado um motor de excitação independente de 150 kW, 440 V, rendimento de 93%, 1800 RPM,  $R_a=0,045 \Omega$ . Determinar a curva característica natural  $w \times T$  do motor. Suponha que o motor aciona uma bomba de recalque cuja característica  $w \times T$  é quadrática do tipo:

$$T = T_n (w/w_n)^2$$

Com  $T_n=650 \text{ Nm}$ ;  $w_n=188,5 \text{ rad/s}$ .

- Determinar o ponto de operação para o motor alimentado na tensão nominal e com 50% desta.
- Nestas condições determinar a corrente absorvida pelo barramento.
- Esboce os gráficos da curva característica natural  $w \times T$  do motor e da carga.

Resp.:  
a) (189,5 rad/s; 657,32 Nm) e (96,0 rad/s; 168,86 Nm) b) 304,5 A e 87,4 A

11) Um gerador de corrente contínua com excitação shunt, 4 pólos, enrolamento imbricado com 360 condutores, girando num campo de 13 mWb; alimenta uma carga de 12,5 kW a 125 V. A resistência do campo é  $25 \Omega$  e a resistência da armadura é  $0,1 \Omega$ . A queda de tensão total devido ao contato das escovas e da reação da armadura para esta carga é de 3,5 V.

Calcule:

- A tensão induzida na armadura.
- A velocidade em RPM da armadura.
- O rendimento do gerador.

Resp.:  
a) 139 V b) 1782 RPM c) 85%

12) Quais são as modificações construtivas que devem ser feitas nos motores universais em relação aos motores de corrente contínua série?

13) Um motor de corrente contínua com excitação independente, 4 pólos, enrolamento imbricado com 800 condutores, 15 HP, 230 V, 1150 RPM, apresenta uma corrente de armadura de 55 A e uma corrente de campo de 0,63 A. A resistência da armadura é  $0,188 \Omega$ .

Calcule:

- O fluxo magnético produzido.
- O torque das perdas rotacionais.
- O rendimento do motor.

Resp.:  
a) 14,3 mWb b) 7,22 Nm c) 88,46%

- 14) Um motor de corrente contínua com excitação shunt, 4 pólos, enrolamento imbricado com 882 condutores, 20 HP, 230 V, 1150 RPM, apresenta uma corrente de armadura de 73 A e uma corrente de campo de 1,6 A. A resistência da armadura é 0,188  $\Omega$ . Calcule:
- O fluxo magnético produzido.
  - O torque das perdas rotacionais.
  - O rendimento do motor.
  - A corrente do motor para que se tenha o máximo rendimento, qual é o rendimento máximo.

Resp.:

- a) 12,8 mWb b) 7,29 Nm c) 86,96% d) armadura: 81,4 A

- 15) Explique a razão dos principais cuidados que se deve ter com o motor de corrente contínua excitação série e com o motor de corrente contínua excitação independente.

- 16) Seja um gerador composto de corrente contínua, 100 kW, 600 V, com resistência do campo-série de 0,02  $\Omega$ , resistência do campo-shunt de 200  $\Omega$  e resistência da armadura de 0,04  $\Omega$ . Quando a corrente nominal é entregue com velocidade nominal de 1200 RPM, a queda de tensão total nas escovas da armadura vale 5V, calcule:

- Corrente na armadura
- Tensão induzida na armadura
- Rendimento do gerador, sabendo que as perdas no ferro e rotacionais valem 2200 W

Resp.:

- a) 169,67 A b) 615,18 V c) 93,83%

- 17) Um motor de corrente contínua em derivação, 230 V, tem uma resistência do circuito da armadura de 0,5  $\Omega$ . A plena carga, o enrolamento de armadura solicita 40 A e a velocidade é medida como sendo de 1100 RPM, correspondendo a uma resistência do reostato do circuito do campo de 115  $\Omega$ .

- Calcule o torque desenvolvido, em Newton-metros.
- O reostato do circuito do campo é aumentado para 144  $\Omega$ . Calcule a nova velocidade de operação, considerando que o torque desenvolvido permanece constante, atendendo aos requisitos da carga.
- Calcule o rendimento para o caso do item (b). Considere que as perdas rotacionais e no ferro valem 600 W.

Resp.:

- a) 72,92 Nm b) 1342,3 RPM c) 81,32%

- 18) Um motor de corrente contínua em derivação de 250 V, 50 HP, 1000 RPM, aciona uma carga que requer um torque constante, independente da velocidade de operação. A resistência do circuito de armadura é de 0,04  $\Omega$ . Quando esse motor entrega a potência nominal, a corrente de armadura é de 160 A.

- Se o fluxo for reduzido a 70% do seu valor original, calcule o novo valor da corrente de armadura.
- Qual é a nova velocidade

Resp.:

- a) 228,57 A b) 1410,2 RPM

- 19) Uma carga mecânica tem a seguinte característica de conjugado  $C_r = 0,05 (n^2 + 1)$ ; onde:

$C_r$  - dado em Nm

$n$  - dado em RPS

Essa carga deve ser acionada por um motor de excitação independente de seguintes características:

$n = 3000$  RPM

$P_{nom.} = 32$  KW

$V_a = 230$ V

$\eta = 91\%$

$R_a = 0,025\Omega$

Calcular:

- Através da resolução gráfica, o ponto de operação do motor e a corrente da rede, para alimentação nominal.
- Através da resolução gráfica, o ponto de operação do motor e a corrente da rede, para alimentação reduzida a 50% do valor nominal.

Resp.:

a) (312 rad/s; 123,75 Nm) e 183,28 A b) (158,0 rad/s; 30,0 Nm) e 53,07 A

20) Um motor de corrente contínua em derivação de 20 HP, 230 V, 1150 RPM, quatro pólos, enrolamento ondulado, tem um total de 620 condutores produzindo uma resistência de circuito de armadura de  $0,2 \Omega$  e de  $74,8 \Omega$  no campo. Quando entrega a potência nominal, na velocidade nominal, o motor solicita uma corrente da rede de 74,8 A e uma corrente de campo de 3 A. Calcule:

- Fluxo magnético por pólo.
- O torque eletromagnético desenvolvido
- As perdas rotacionais
- As perdas totais em porcentagem.

Resp.:

a) 9,07 mWb b) 128,57 Nm c) 579,75 W d) 15,31%

21) Um motor de corrente contínua de excitação independente, 75 HP, 230V, 450 RPM, apresenta uma resistência dos enrolamentos da armadura de  $0,043 \Omega$  e uma resistência do enrolamento do campo de  $42 \Omega$ .

Para a condição nominal o motor apresenta um rendimento de 90%.

Este motor será utilizado para acionar um elevador que solicita um torque de 1000 Nm.

Determine:

- Ponto de operação do motor, quando uma resistência de  $0,2 \Omega$  é inserida em série com o enrolamento da armadura para acionar a carga (elevador) mais suavemente.
- Para a condição do item (a), qual a potência mecânica solicitada do motor e qual a corrente elétrica solicitada do barramento da rede.
- Ponto de operação do motor, quando a resistência de  $0,2 \Omega$  (do item a) é retirada.
- Para a condição do item (c), qual a potência mecânica solicitada do motor e qual a corrente elétrica solicitada do barramento da rede.

Resp.:

a) (36,84 rad/s; 1000 Nm) b) 36.840 W; 244,42 A c) (47,41 rad/s; 1000 Nm) d) 47.410 W; 244,42 A

22) Seja um motor de excitação independente que a 1050 RPM, consome uma corrente no induzido de 100A a 220V, com uma corrente no indutor constante. A resistência da armadura é de  $0,1\Omega$ . Para uma outra determinada carga a tensão na armadura é mantida constante bem como a corrente no indutor também, e o motor gira com uma velocidade de 1090 RPM. Determinar:

- A corrente consumida pelo motor
- O conjugado eletromagnético desenvolvido.

Resp.:

a) 20 A b) 38,2 Nm

23) Um motor de derivação de 30 CV, 250 V, tem uma resistência do circuito de armadura de  $0,25 \Omega$  e uma resistência de campo de  $200 \Omega$ . Quando opera em vazio e com tensão nominal, a velocidade é de 1200 RPM e a corrente consumida é de 5 A, suas perdas rotacionais são de 400 W. Quando esse motor recebe uma determinada carga mecânica a sua velocidade cai para 1100 RPM. Para essa condição de carga, calcular:

- A corrente que o motor consome.
- O torque da carga.
- O rendimento do motor.

Resp.:

a) 86,77 A b) 168,33 Nm c) 88,12%

24) Um gerador de corrente contínua com excitação independente tem os seguintes dados: resistência do induzido de  $0,05 \Omega$ ; resistência do indutor de  $150 \Omega$ ; perdas mecânicas e no núcleo valem  $900 \text{ W}$ ; tensão no indutor de  $150 \text{ V}$ . O gerador alimenta uma carga com tensão terminal de  $220 \text{ V}$ . Calcule:

- A corrente no induzido para a qual o gerador deverá operar com máximo rendimento.
- O valor do máximo rendimento.
- Para a condição de rendimento máximo, calcule tensão induzida e a constante de fluxo magnético ( $K\phi$ ), sabendo que o induzido gira com  $1725 \text{ RPM}$ .

Resp.:

a) 144,91 A b) 93,82% c) 1,26 V/rad/s

25) Uma máquina de CC de  $5 \text{ KW}$  funcionando como motor, gira em vazio a  $1780 \text{ RPM}$ , absorvendo  $5 \text{ A}$  para suprir suas perdas em vazio, ligada a uma rede com tensão igual a  $120 \text{ V}$ . A excitação é feita por uma fonte independente da fonte  $V_a$ . A resistência de armadura é  $0,35 \Omega$ . Calcule a rotação dessa máquina, operando como motor em plena carga, sabendo-se que o efeito desmagnetizante da reação da armadura reduz o fluxo por pólo a  $94\%$  do valor em vazio. Suponha que o rendimento do motor em plena carga seja  $90\%$ .

Resp.:

1662,2 RPM

26) Um motor de CC excitado em derivação possui resistência de armadura de  $0,15 \Omega$ . A resistência do circuito de excitação de  $110 \Omega$ . Quando em carga, alimentado sob  $120 \text{ V}$  absorve  $60 \text{ A}$  e gira a  $1800 \text{ RPM}$ . Se a tensão aplicada for reduzida para  $110 \text{ V}$  e o conjugado resistente oferecido ao seu eixo for mantido constante (elevador), qual será a sua nova rotação. Considerar o torque de perdas rotacionais de  $2 \text{ Nm}$ .

Resp.:

1774,98 RPM

27) Um gerador de corrente contínua com excitação Compound tem as seguintes resistências ôhmicas das bobinas: resistência do induzido de  $0,25 \Omega$ , resistência do campo série de  $0,05 \Omega$  e resistência do campo shunt de  $450 \Omega$ . O gerador opera à vazio com uma tensão de  $440 \text{ V}$ , velocidade de  $1760 \text{ RPM}$  e uma corrente de armadura de  $3,0 \text{ A}$ . Com carga a tensão induzida na armadura aumenta  $15\%$  em relação a condição à vazio para garantir tensão nominal na carga. As perdas rotacionais e no núcleo valem  $2000 \text{ W}$ . Determinar:

- A corrente consumida por essa carga.
- O rendimento do gerador para essa carga.
- Qual o rendimento máximo desse gerador.

Resp.:

a) 222,47 A b) 84,9% c) 88,96%

28) Um motor de corrente contínua com excitação shunt alimenta uma determinada carga que faz consumir uma corrente no induzido de  $90 \text{ A}$  a uma tensão de  $220 \text{ V}$ . Sabendo que esse motor tem 6 pólos, enrolamento imbricado com 600 condutores, resistência de armadura de  $0,16 \Omega$  e resistência de campo de  $250 \Omega$ , fluxo magnético de  $30 \text{ mWb}$  e suas perdas mecânicas e no ferro valem  $450 \text{ W}$ . Calcular:

- A velocidade do motor em RPM
- O rendimento do motor.

Resp.:

a) 685,33 RPM b) 90,3%

29) Um motor de corrente contínua com excitação independente de 120 KW, tensão na armadura de 700 V, 1800 RPM, rendimento de 92% e resistência da armadura de 0,10  $\Omega$ , aciona uma bomba cuja curva característica é  $T_{\text{carga}} = w^2 * 0,0156250$ .

- Construa a curva característica do motor e da bomba (W x T). E de posse desse gráfico encontre o ponto de operação do motor.
- Determinar a corrente consumida pelo motor para essa carga.
- Determine o rendimento do motor.

Resp.:

a) (560 Nm; 189,3 rad/s) b) 165,13 A c) 91,71%

30) O rendimento de um motor de corrente contínua com excitação independente de 125 HP é de 96,8%, a velocidade nominal de 1250 RPM e tensão nominal de armadura de 440 V. Considere a resistência do enrolamento da armadura de 0,013  $\Omega$ . Determinar:

- A curva característica natural W x T do motor para as tensões de 440 V, 220 V e 150 V.
- Os três pontos de operação do motor (440 V, 220 V e 150 V) quando o mesmo aciona um elevador de peso de 500 Nm.
- As correntes no barramento para os três pontos de operação do motor.
- Os rendimentos do motor para os três pontos de operação.

Resp.:

b) (500 Nm; 131,53 rad/s); (500 Nm; 65,46 rad/s); (500 Nm; 44,44 rad/s) c) 156,02 A c) 95,79%; 95,36% e 94,96%

31) Um gerador de corrente contínua de excitação paralela de 6 pólos, com resistência do induzido de 0,20  $\Omega$  e resistência do indutor de 20  $\Omega$ . O enrolamento do induzido apresenta 600 condutores e é do tipo imbricado.

Quando em vazio, a velocidade necessária para gerar 220 V era de  $W_0$ .

Qual o acréscimo percentual de velocidade necessária para garantir 220 V quando o gerador alimenta uma carga nominal de 20 KW?

Resp.:

8%

32) Um motor de corrente contínua de excitação shunt de 40 HP, 440 V, tem resistência do enrolamento do campo de 220  $\Omega$  e resistência do enrolamento da armadura de 0,30  $\Omega$ . Esse motor opera a vazio com uma velocidade de 3600 RPM, consumindo uma corrente de armadura de 5 A. Quando uma determinada carga é inserida no eixo do motor sua velocidade cai para 3550 RPM. Sabendo que as perdas rotacionais e no núcleo são 500 W. Calcular:

- A corrente fornecida para esse motor.
- O rendimento do motor
- O rendimento máximo e o fator de carga (K) para que o motor opere com o máximo rendimento.

Resp.:

a) 27,3 A b) 86,91% c) 91,02%; 0,937

33) Um motor de corrente contínua com excitação independente de 100 KW, tensão na armadura de 440 V, 1800 RPM, rendimento de 96% e resistência da armadura de 0,05  $\Omega$ , aciona um laminador cuja curva característica é  $T_{\text{carga}} = T_{\text{inicial}} + K * w$ . Onde:  $T_{\text{inicial}} = 15 \text{ Nm}$  e  $K = 2,4$ .

- Construa a curva característica do motor e do laminador (W x T). E de posse desse gráfico encontre o ponto de operação do motor.
- Determinar a corrente consumida pelo motor para essa carga.
- Determine o rendimento do motor.

Resp.:

a) (460 Nm; 189,3 rad/s) b) 205,8 A c) 96,14%

34) Um motor de excitação shunt gira a 1100 RPM a 230 V e consome uma corrente de 40 A. A potência útil é de 10,8 HP. As várias perdas são: perdas no Ferro, 200 W; perdas por atrito e ventilação, 180 W; perdas devido ao contacto das escovas, 37 W; perdas suplementares, 37 W. As resistências do induzido e indutor são respectivamente 0,25  $\Omega$  e 230  $\Omega$ . Calcule:

- O rendimento do motor.
- A velocidade para metade da potência útil.

Resp.:

a) 88,3% b) 1124 RPM

35) Um motor de excitação série, com uma resistência de induzido de 0,1 $\Omega$ , e uma resistência de indutor de 0,15 $\Omega$ , consome 48 A a 230 V e 720 RPM. As perdas totais no núcleo e por atrito são 650 W. Desprezando as perdas suplementares e de contacto das escovas, calcule:

- O torque eletromagnético desenvolvido.
- A potência útil.
- O rendimento do motor.

Resp.:

a) 138,78 Nm b) 9.814 W c) 88,89%

36) Um gerador cc com excitação independente tem os seguintes dados: resistência do induzido de 0,04  $\Omega$ ; resistência do indutor de 110  $\Omega$ ; perdas mecânicas e no núcleo são 960 W, tensão no indutor de 230 V. O gerador alimenta uma carga com tensão terminal de 230 V. Calcule:

- A corrente no induzido para a qual o gerador tem rendimento máximo.
- O valor máximo do rendimento do gerador.
- A tensão induzida e a constante de fluxo magnético( $K\phi$ ), sendo que o induzido gira a 1725RPM.

Resp.:

a) 190,1 A b) 93,8% c) 237,6 V e 1,315 V/rad/s

37) Um motor de corrente contínua com excitação independente de 50 KW, tensão na armadura de 220V, 1200RPM, rendimento de 94% e resistência da armadura de 0,02 $\Omega$ , aciona uma calandra cuja curva característica é  $T_{carga} = T_{inicial} + K * w$ . Onde:  $T_{inicial} = 10$  Nm e  $K = 2$ .

- Construa a curva característica do motor e da calandra (W x T). E de posse desse gráfico encontre o ponto de operação do motor.
- Determinar a corrente consumida pelo motor para essa carga.
- Determine o rendimento do motor.

Resp.:

a) (260 Nm; 125 rad/s) b) 161,27 A c) 91,6%

38) Um gerador de corrente contínua de excitação paralela alimenta uma carga de 15 KW a 220 V. Essa máquina tem 4 pólos, resistência do induzido de 0,15  $\Omega$  e resistência do indutor de 20  $\Omega$ . O enrolamento do induzido apresenta 500 condutores e é do tipo imbricado. O fluxo magnético é de 15 mWb e as perdas mecânicas e no núcleo foram medidas e valem 150 W. Qual deve ser a velocidade da armadura para poder alimentar a referida carga?

Resp.:

1855 RPM

39) Para o exercício 38, qual o rendimento do gerador?

Resp.:

81,04%

40) Um motor de excitação shunt de 250 V, 10 HP, tem uma resistência de induzido de  $0,5 \Omega$  e uma resistência de indutor de  $250 \Omega$ . O motor consome 5 A em vazio e 37,1 A à carga nominal. Determine o seu rendimento nominal.

Resp.:  
80,43%

41) Um motor CC série de 10 HP, 240 V, tem uma corrente de linha de 38 A e uma velocidade nominal de 600 RPM. O circuito da armadura e a resistência do campo série, respectivamente, são  $0,4 \Omega$  e  $0,2 \Omega$ . A queda de tensão nas escovas vale 5 V e pode ser considerada aproximadamente constante. Presuma que o motor está operando na porção linear da sua curva de saturação com corrente da armadura menor que a nominal. Calcule a velocidade quando a corrente de carga cai para 20 A.

Resp.:  
1198 RPM

42) Um gerador de excitação independente tem uma característica de tensão sem carga de 125 V, com uma corrente de campo de 2,1 A quando gira na velocidade de 1600 RPM. Supondo que está operando na porção reta de sua curva de saturação, calcule:

- A tensão gerada quando a corrente de campo é aumentada para 2,6 A .
- A tensão gerada quando a velocidade é reduzida para 1450 RPM e a corrente de campo é aumentada para 2,8 A.

Resp.:  
a) 154,76 V b) 151,03 V

43) [exemplo 7.3-Eletromecânica, Falconi, Aurio Gilberto, 1984] Uma máquina de CC de 3,73 KW funcionando como motor, gira em vazio a 1750 RPM, absorvendo 4 A para suprir suas perdas em vazio, ligada a uma rede com tensão igual a 115 V. A excitação é feita por uma fonte independente da fonte Va. A resistência de armadura é  $0,35 \Omega$ . Calcule a rotação dessa máquina, operando como motor em plena carga, sabendo-se que o efeito desmagnetizante da reação da armadura reduz o fluxo por pólo a 94% do valor em vazio. Suponha que o rendimento do motor em plena carga seja 85%.

Resp.:  
1665,8 RPM

44) [exercício 5-Eletromecânica, Falconi, Aurio Gilberto, 1984] Um motor de CC excitado em derivação possui resistência de armadura de  $0,12 \Omega$ . A resistência do circuito de excitação de 100  $\Omega$ . Quando em carga, alimentado sob 110 V absorve 60 A e gira a 1800 RPM. Se a tensão aplicada for reduzida para 100 V e o conjugado resistente oferecido ao seu eixo for mantido constante, qual será a sua nova rotação. Despreze as perdas rotacionais.

Resp.:  
1774,25 RPM

45) Um motor em derivação de 10HP, 220V, tem uma resistência do circuito de armadura de  $0,45 \Omega$  e uma resistência de campo de  $110 \Omega$ . Em vazio e com tensão nominal, a velocidade é de 1200RPM e a corrente de armadura é 2,5A. Se for aplicada uma carga, a velocidade cai para 1130RPM. Para esta condição de carga, determinar:

- A corrente de armadura e a corrente da rede.
- O torque eletromagnético desenvolvido.
- O rendimento, considerando as perdas rotacionais e no núcleo de 450W. Despreze a reação da armadura.

Resp.:

a) 30,87 A; 32,87 A b) 53,76 Nm c) 81,76%

46) Um gerador CC com excitação independente tem os seguintes dados: resistência do induzido de  $0,08 \Omega$ ; resistência do indutor de  $100 \Omega$ ; perdas mecânicas e no núcleo são  $980 \text{ W}$ , tensão no indutor de  $220 \text{ V}$ . O gerador alimenta uma carga com tensão terminal de  $220 \text{ V}$ . Calcule:

- A corrente no induzido para a qual o gerador terá rendimento máximo. E o respectivo rendimento máximo.
- A tensão induzida e a constante de fluxo magnético ( $K\phi$ ), sendo que o induzido gira a  $1725 \text{ RPM}$ .

Resp.:

a) 135,28 A; 91,04% b) 230,82 V; 1,278 V/rad/s

47) Um motor de excitação independente de  $20 \text{ HP}$ ,  $220 \text{ V}$ , rendimento de  $96,5\%$ ,  $1200 \text{ RPM}$ ,  $R_a = 0,08 \Omega$ .

- Determinar a curva característica natural  $W \times T$  do motor.
- Determinar o ponto de operação do motor alimentado na tensão nominal, quando aciona uma bomba de conjugado parabólico cuja característica é  $W_{bomba} = 15 * \sqrt{T_{bomba}}$ .
- Nesta condição determinar a corrente absorvida pelo barramento e o rendimento do motor.

Resp.:

b) (71,64 Nm; 126,96 rad/s) c) 42,68 A; 96,88%

48) Um gerador de excitação independente tem uma característica de tensão sem carga de  $120 \text{ V}$ , com uma corrente de campo de  $1,9 \text{ A}$  quando gira na velocidade de  $1600 \text{ RPM}$ . Supondo que esta operando na porção reta de sua curva de saturação, calcule:

- A tensão gerada quando a corrente de campo é aumentada para  $2,5 \text{ A}$  e a velocidade permanece constante.
- A tensão gerada quando a velocidade é reduzida para  $1460 \text{ RPM}$  e a corrente de campo é aumentada para  $2,8 \text{ A}$ .

Resp.:

a) 157,89 V b) 161,32 V

49) Um motor shunt CC,  $220 \text{ V}$  possui uma queda de tensão nas escovas de  $5 \text{ V}$ , uma resistência na armadura de  $0,25 \Omega$ , uma resistência de campo de  $220 \Omega$  e uma corrente nominal para a armadura de  $45 \text{ A}$ . Calcule:

- A tensão gerada na armadura sob estas condições de carga aplicada ao eixo.
- Potência desenvolvida pela armadura.
- O rendimento.

Resp.:

a) 203,75 V b) 9.168,75 W c) 90,6%

50) Um motor de excitação independente de  $50 \text{ HP}$ , tensão nominal de  $220 \text{ V}$ , rendimento de  $97,5\%$ , velocidade nominal de  $3600 \text{ RPM}$ ,  $R_a = 0,025 \Omega$ .

- Determinar a curva característica natural  $W \times T$  do motor.
- Determinar o ponto de operação do motor alimentado na tensão nominal, quando aciona uma bomba de conjugado parabólico cuja característica é  $W_{bomba} = 40 * \sqrt{T_{bomba}}$ .
- Nesta condição determinar a corrente absorvida pelo barramento e o rendimento do motor.

Resp.:

b) (89,18 Nm; 377,74 rad/s) c) 156,84 A; 97,63%

51) Um gerador de corrente contínua com excitação shunt opera em vazio com uma tensão terminal de 220 V a uma velocidade de 1800 RPM. Quando insere uma determinada carga, a corrente de campo é acrescida de 10% para poder garantir uma tensão terminal constante de 220 V à mesma velocidade de 1800 RPM. Considerando a resistência da armadura igual a 0,05  $\Omega$ , determinar a corrente de armadura para essa carga.

*Resp.:*  
400 A

52) A potência de saída de gerador de corrente contínua de excitação composta é de 50KW com uma tensão de saída de 440V. As resistências dos enrolamentos valem:

Resistência da armadura = 0,02 $\Omega$

Resistência do campo série = 0,015 $\Omega$

Resistência do campo paralelo = 530 $\Omega$

E as perdas mecânicas e no núcleo valem 390W.

a) Determinar o rendimento para essa carga.

b) Determinar o rendimento máximo.

*Resp.:*

a) 97,63% b) 97,72%

53) Um motor de corrente contínua com excitação composta apresenta uma resistência de armadura igual a 0,025  $\Omega$ , resistência do campo série igual a 0,015  $\Omega$  e resistência do campo paralelo igual a 250  $\Omega$ . Em vazio o motor desenvolve uma velocidade de 1830 RPM com uma corrente de linha de 5 A quando aplica-se uma tensão de 220 V. Após acionar o motor em vazio, uma carga mecânica é então acoplada ao eixo do motor e mede-se a corrente de linha igual a 85 A, a velocidade do motor cai para 1805 RPM e a tensão aplicada é mantida constante. Determinar o torque mecânico que o motor está entregando para essa carga.

*Resp.:*

91,68 Nm

54) Um gerador de corrente contínua com excitação shunt opera em duas condições distintas de carga. A carga 1 solicita uma corrente de 35 A com uma tensão de saída de 220 V, a velocidade do gerador vale 3550 RPM. Já a carga 2 solicita a mesma tensão de saída de 220 V, mas a velocidade do gerador vai para 3500 RPM, para compensar a corrente do campo tem que ser aumentada em 5% a fim de garantir a tensão nominal constante. Considerando a resistência do induzido igual a 0,1  $\Omega$  e a resistência do indutor igual a 270  $\Omega$ , determinar a corrente da carga 2.

*Resp.:*

112,1 A

55) Um motor de excitação independente consome uma corrente na armadura de 100 A e desenvolve uma velocidade de 1070 RPM quando 120 V são alimentados no rotor. Para uma determinada carga a tensão no rotor e a corrente de campo permanecem constantes e o motor gira com uma velocidade de 1090 RPM, para essa condição de carga, determine os itens abaixo considerando a resistência de armadura igual a 0,05  $\Omega$ :

a) Corrente absorvida da rede

b) Conjugado desenvolvido

*Resp.:*

a) 57 A b) 58,49 Nm

56) Um motor de derivação opera com um fluxo de 35 mWb por pólo, tem enrolamento imbricado, 4 pólos e 360 condutores. A resistência da armadura é de 0,15  $\Omega$  e o motor é projetado para operar a 440 V, consumindo a plena carga 70 A na armadura.

a) Determine o valor da resistência externa a ser inserida no circuito da armadura tal que, na partida, a corrente de armadura não exceda ao dobro do valor a plena carga.

- b) Quando o motor alcança uma velocidade de 1500 RPM, a resistência externa é reduzida para 50%. Qual é então a corrente na armadura, a esta velocidade?  
 c) Calcule o conjugado desenvolvido pelo motor nos itens a e b.

Resp.:

a) 2,992 Ω b) 76,43 A c) 280 Nm; 152,87 Nm

57) Um motor de excitação independente de 50 HP, 440 V, rendimento de 95%, 1800 RPM,  $R_a=0,04 \Omega$ .

- a) Determinar a curva característica natural  $W \times T$  do motor.  
 b) Determinar o ponto de operação do motor alimentado na tensão nominal, quando aciona um elevador cuja característica é  $T_{carga} = 180 \text{ Nm}$ .  
 c) Nesta condição determinar a corrente absorvida pelo barramento e o rendimento do motor.

Resp.:

b) 180 Nm; 188,63 rad/s) c) 81,51 A; 94,67%

58) [exemplo 7.2-Eletromecânica, Falconi, Aurio Gilberto, 1984] Um tacômetro constituído de um pequeno gerador de corrente contínua, bipolar, de ímã permanente é ligado a um voltímetro indicador. O número de ranhuras é 30 e o número de condutores para cada ranhura é 50. O enrolamento da armadura apresenta uma resistência de  $R_a = 500 \Omega$ . O fluxo por pólo no entreferro é 0,32 mWb. A resistência do voltímetro é  $R_v = 25000 \Omega$ . A sua construção é tal que o efeito desmagnetizante indireto da reação da armadura (um efeito não linear e portanto indesejável nos tacômetros) é tão pequeno que pode ser desprezado. Determine a constante  $n/V_a$  (RPM/V) lido no instrumento.

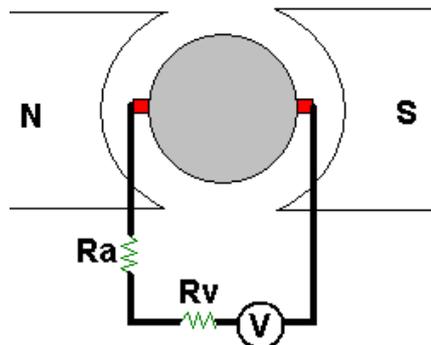


Fig. 7.22

Resp.:

125 RPM/V

59) Um motor de derivação opera com um fluxo de 25 mWb por pólo, tem enrolamento imbricado, 2 pólos e 360 condutores. A resistência da armadura é de  $0,12 \Omega$  e o motor é projetado para operar a 115 V, consumindo a plena carga 60 A na armadura.

- a) Determine o valor da resistência externa a ser inserida no circuito da armadura tal que, na partida, a corrente de armadura não exceda ao dobro do valor a plena carga.  
 b) Quando o motor alcança uma velocidade de 400 RPM, a resistência externa é reduzida para 50%. Qual é então a corrente na armadura, a esta velocidade?  
 c) A resistência externa é completamente eliminada quando o motor alcança a sua velocidade final, a corrente de armadura atinge então o seu valor de plena carga. Calcule a velocidade do motor.  
 d) Calcule o conjugado desenvolvido pelo motor nos itens a, b e c.

Resp.:

a) 0,838 Ω b) 102 A c) 718,67 RPM d) 171,84 Nm; 146,12 Nm; 85,92 Nm

- 60) Um gerador cc com excitação independente tem os seguintes dados: resistência do induzido de  $0,04 \Omega$ ; resistência do indutor de  $110 \Omega$ ; perdas mecânicas e no núcleo são  $960 \text{ W}$ , tensão no indutor de  $230 \text{ V}$ . O gerador alimenta uma carga com tensão terminal de  $230 \text{ V}$ . Calcule:
- A corrente no induzido para a qual o gerador tem rendimento máximo
  - O valor máximo do rendimento do gerador
  - A tensão induzida e a constante de fluxo magnético( $K\phi$ ), sendo que o induzido gira a  $1725 \text{ RPM}$

Resp.:

- a)  $189,8 \text{ A}$  b)  $93,8\%$  c)  $237,6 \text{ V}$ ;  $1,32 \text{ V/rad/s}$

- 61) Um gerador com excitação shunt tem os seguintes dados: resistência de armadura de  $0,15 \Omega$ ; resistência do campo de  $50 \Omega$ ; perdas mecânicas e no núcleo são  $1000 \text{ W}$ . O gerador alimenta uma carga de  $15 \text{ KW}$  com tensão terminal de  $220 \text{ V}$ . Calcule:

- A tensão induzida na armadura, considerando a queda de tensão total nas escovas de  $2 \text{ V}$ .
- O rendimento do gerador.
- A velocidade com que a armadura gira. Sendo  $K\phi = 1,78 \text{ V/(rad/s)}$
- A nova velocidade que a armadura deverá girar se a carga for reduzida pela metade, mas com tensão terminal nominal. Desprezar a queda de tensão nas escovas para essa condição.

Resp.:

- a)  $232,89 \text{ V}$  b)  $83,78\%$  c)  $1249,39 \text{ RPM}$  d)  $1211,2 \text{ RPM}$

- 62) Um motor de excitação "shunt";  $120 \text{ V}$ ; enrolamento ondulado; 2 pólos; 360 condutores na armadura; resistência de campo de  $120 \Omega$  e resistência de armadura de  $0,15 \Omega$ ;  $0,30 \text{ Wb/pólo}$ ; consome uma corrente de armadura a plena carga de  $60 \text{ A}$ .

- Calcule o conjugado desenvolvido pelo motor.
- Calcule o rendimento do motor, considerando perdas no núcleo e rotacionais de  $750 \text{ W}$ .

Resp.:

- a)  $10131,32 \text{ Nm}$  b)  $80,74\%$

- 63) Seja um motor de excitação independente que a  $1064 \text{ RPM}$ , consome uma corrente na armadura de  $90 \text{ A}$  a  $130 \text{ V}$ , com uma corrente de campo constante. A resistência da armadura é  $0,1 \Omega$ . Para uma determinada carga a tensão  $V_a$  é mantida constante bem como a corrente de campo e o motor gira a  $1081 \text{ RPM}$ , determinar:

- Corrente absorvida da rede
- Conjugado desenvolvido

Resp.:

- a)  $70,63 \text{ A}$  b)  $76,7 \text{ Nm}$

- 64) Um motor derivação,  $230 \text{ V}$ , tendo uma resistência da armadura de  $0,05 \Omega$  e uma resistência do campo de  $75 \Omega$ , quando ligado em vazio, solicita uma corrente da linha de  $7 \text{ A}$  e gira a  $1120 \text{ RPM}$ . A corrente de linha a uma certa carga é de  $46 \text{ A}$ . Determine:

- Velocidade do motor para esta carga.
- Rendimento do motor.
- Perdas totais mecânicas e no núcleo.

Resp.:

- a)  $1110,5 \text{ RPM}$  b)  $83,91\%$  c)  $903,11 \text{ W}$

- 65) Seja um gerador CC de excitação paralela apresentando os seguintes dados: resistência de armadura de  $0,15 \Omega$ ; resistência do campo de  $200 \Omega$ , 4 pólos, 600 condutores na armadura, enrolamento imbricado. O gerador opera a uma velocidade de  $1788 \text{ RPM}$  para atender uma carga que solicita  $45 \text{ A}$  a  $210 \text{ V}$ , para está condição determinar o fluxo magnético por pólo.

Resp.:

- $12,13 \text{ mWb}$

66) Um motor de excitação independente de 50 kW, 230 V, rendimento de 94,5%, 1200 RPM,  $R_a=0,04 \Omega$ . Determinar a curva característica natural  $W \times T$  do motor. Suponha que o motor aciona um elevador, cujo torque nominal é de 350 Nm.

- a) Determinar o ponto de operação para o motor alimentado na tensão nominal.
- b) Nestas condições determinar a corrente absorvida pelo barramento.
- c) Esboce os gráficos da curva característica natural  $W \times T$  do motor e da carga.

*Resp.:*

a) (350 Nm; 126,3 rad/s) b) 202,8 A

## 8. MOTOR UNIVERSAL

O motor universal é um motor com enrolamento série, o qual pode operar tanto em corrente contínua como em corrente alternada, apresentando aproximadamente a mesma velocidade e resposta. Estas condições devem ser encontradas quando tensão contínua e tensão alternada são aproximadamente iguais em valores eficazes e médios e a frequência da tensão alternada não ultrapassar 60 ciclos por segundo.

A operação em corrente contínua é idêntica ao de um motor CC série. O princípio de desenvolvimento de torque pode ser obtido referindo-se à figura 8.1, onde mostra um motor série de dois pólos.

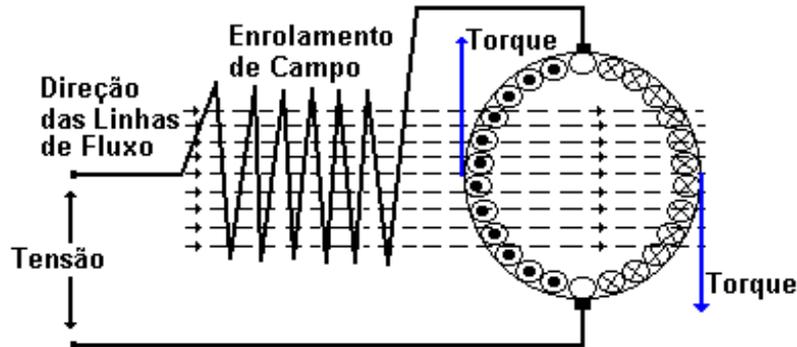


Fig. 8.1 Esquema elétrico de um motor universal

O motor também irá funcionar se uma corrente alternada é aplicada. A corrente no circuito da armadura inverte 120 vezes por segundo (para 60 ciclos), mas a excitação de campo e o fluxo do estator também invertem 120 vezes por segundo, e estas reversões acontecem em fase com a corrente de armadura. Em corrente alternada, o torque varia instantaneamente 120 vezes por segundo, mas o torque desenvolvido é sempre unidirecional. Contudo, há alguns efeitos presentes na operação AC que não estão presentes na CC.

- Construção de estator laminado - devido ao fato de que o fluxo do estator é alternado, é necessário usar uma estrutura laminada para reduzir as perdas histeréticas.
- Tensão reativa - em um circuito CC, a corrente é limitada pela resistência. Em um circuito AC, a corrente é limitada pela impedância e não somente pela resistência ôhmica. A impedância é composta de duas componentes, resistência e reatância. A reatância está presente no circuito AC quando um circuito magnético é criado pelo fluxo de corrente no circuito elétrico. Esta tensão de reatância, o qual está presente durante a operação AC mas não durante a CC, absorve uma quantidade de tensão de linha, reduzindo a tensão aplicada à armadura, de modo que a velocidade do motor, para uma dada corrente, tende a ser menor em AC do que em CC. Em outras palavras, a tensão efetiva na armadura, para uma dada corrente é menor na operação AC do que na CC.
- Efeito da saturação - foi visto que a tensão reativa tende a fazer a velocidade em AC ser menor que em CC. Há outro efeito o qual dá uma tendência oposta. Este efeito é simplesmente de que uma dada raiz quadrada de valor médio de corrente alternada irá produzir menos fluxo alternado efetivo do que na corrente contínua de mesmo valor devido ao efeito de saturação do ferro. Em correntes baixas e altas velocidades, a tensão reativa não é tão importante.
- Comutação e vida útil das escovas - a comutação em corrente alternada é substancialmente mais fraca do que em corrente contínua e a duração é também menor. A principal razão para uma fraca comutação em corrente alternada é devido a tensão induzida nas bobinas curto-circuitadas submetendo-se a comutação pela ação transformadora do campo principal alternado.

Tomando as equações dos motores de ímã permanente, tem-se:

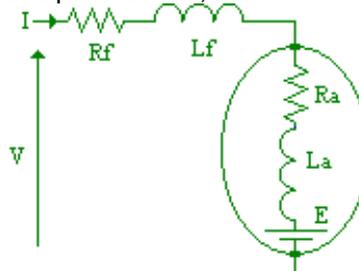


Fig. 8.2 Circuito elétrico equivalente de um motor universal

Para o motor em regime permanente alimentado em corrente contínua e desprezando a saturação, tem-se :

$$V = k \Phi \omega + R I \quad [8.1]$$

$$R = R_a + R_f \quad [8.2]$$

$$T = k \Phi I \quad [8.3]$$

Por se tratar do motor série e não levando em conta o efeito da saturação, tem-se :

$$k \Phi = k_r I \quad [8.4]$$

$$V = k_r I \omega + R I \quad [8.5]$$

$$T = k_r I^2 \quad [8.6]$$

$$I = \sqrt{\frac{T}{k_r}} \quad [8.7]$$

Resultando a curva característica onde a velocidade é inversa com a raiz quadrada do conjugado :

$$\omega = \frac{V}{\sqrt{k_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{T}} - \frac{R}{k_r} = \frac{A}{\sqrt{T}} - B \quad [8.8]$$

Para o motor em regime permanente alimentado em corrente alternada, as equações precisam levar em conta as indutâncias dos circuitos do estator e do rotor:

$$V(t) = k \phi(t) \omega + R I(t) + L \frac{d I(t)}{dt} \quad [8.10]$$

$$R = R_a + R_f \quad [8.11]$$

$$L = L_a + L_f \quad [8.12]$$

$$T(t) = k \Phi(t) I(t) \quad [8.13]$$

Primeiramente será demonstrado que o torque tem valor médio diferente de zero e uma componente pulsante com frequência duas vezes a da rede :

$$I(t) = I \cos(\omega t - \varphi) \quad [8.14]$$

$$k \Phi(t) = k_r I(t) \quad [8.15]$$

$$T(t) = k_r I^2 \cos^2(\omega t - \varphi) = k_r (I^2 / 2) - k_r (I^2 / 2) \cdot \cos(2\omega t - 2\varphi) = T_m - T_p(t) \quad [8.16]$$

Por se tratar de regime permanente senoidal, pode-se escrever as equações no domínio da frequência :

$$V = k \Phi \omega + R I + j X I \quad [8.17]$$

$$T_m = k_r \Phi I \quad [8.18]$$

Resultando :

$$V = k_r I \omega + R I + j X I = (k_r \omega + R + j X) I \quad [8.19]$$

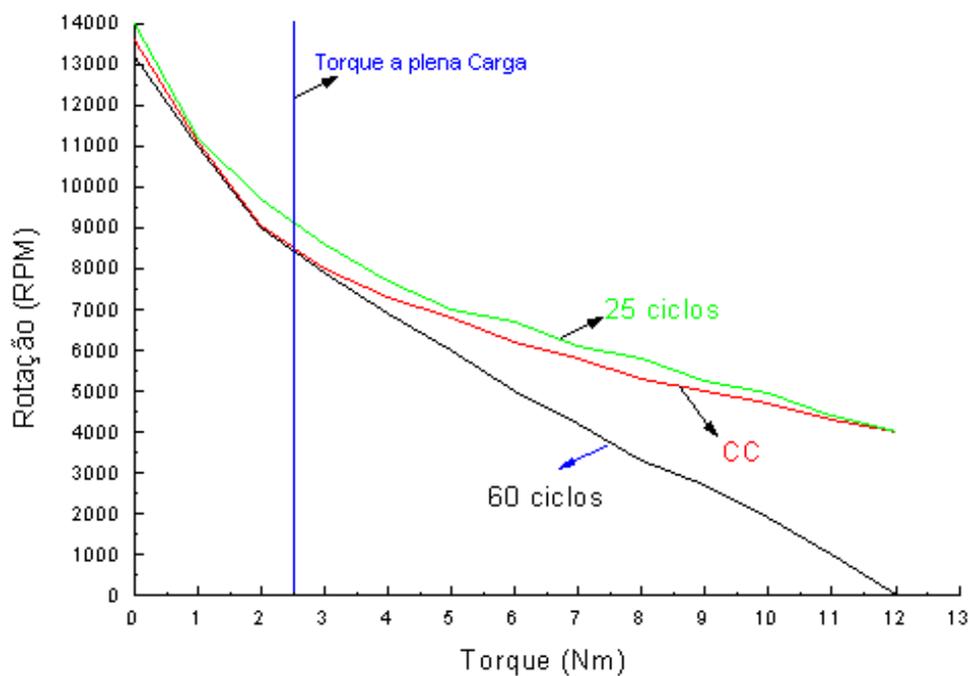
$$I = \frac{V}{(k_r \omega + R) + j X} \quad [8.20]$$

$$T_m = \frac{k_r \cdot V^2}{(k_r \omega + R)^2 + X^2} \quad [8.21]$$

$$(k_r \omega + R)^2 + X^2 = \frac{k_r \cdot V^2}{T} \quad [8.22]$$

$$k_r \omega + R = \sqrt{\frac{k_r \cdot V^2}{T} - X^2} \quad [8.23]$$

$$\boxed{\omega = \sqrt{\frac{V^2}{T k_r} - X^2} - \frac{R}{k_r} = \sqrt{\frac{A^2}{T} - X^2} - B} \quad [8.25]$$



**Fig. 8.3** Curva característica de um motor universal

## 9. MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUÇÃO

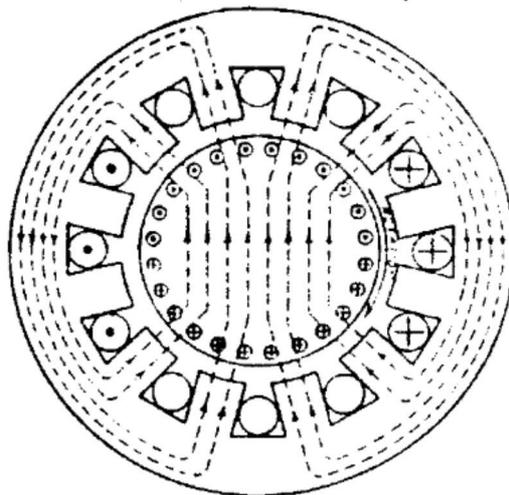
De modo geral os motores elétricos de indução monofásicos são a alternativa natural aos motores de indução polifásica, como residências, escritórios, oficinas em zonas rurais.

Entre os vários tipos de motores elétricos monofásicos, os motores com rotor tipo gaiola se destacam pela simplicidade de fabricação e, principalmente, pela robustez, confiabilidade e longa vida sem necessidade de manutenção.

### 9.1 Tipos de motores

Os motores monofásicos, por terem somente uma fase de alimentação, não possuem campo girante como os motores polifásicos, e sim um campo magnético pulsante. Isto impede que os mesmos tenham conjugado para a partida, tendo em vista que no rotor se induzem campos magnéticos alinhados com o campo do estator. Para solucionar o problema da partida utilizam-se enrolamentos auxiliares, que são dimensionados e posicionados de forma a criar uma segunda fase fictícia, permitindo a formação do campo girante necessário para a partida.

Supondo que o enrolamento do estator é excitado por corrente alternada. Em um instante particular tem-se as correntes e os campos magnéticos indicados na figura 9.1. Desprezando o efeito do rotor, este campo irá ser estacionário no espaço, porém pulsante em amplitude. Como o campo criado pelo enrolamento do estator não gira, não há torque de rotor bloqueado inerente. Fica patente a necessidade de arranjos especiais para que o motor monofásico possa efetuar sua partida através de recursos próprios.



**Fig. 9.1** Campo magnético do motor monofásico

Existe basicamente cinco tipos de motores de indução monofásicos com rotor de gaiola, classificados de acordo com o arranjo auxiliar de partida empregado: motor de capacitor permanente, motor com dois capacitores, e motor de campo distorcido (ou pólos sombreados).

### 9.2 Motor de fase dividida (split-phase)

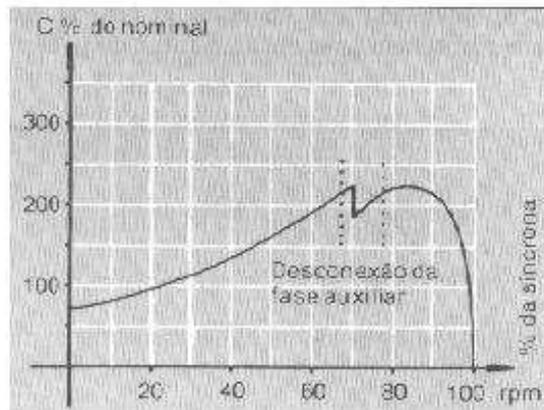
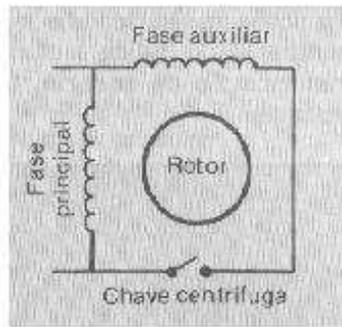
Este motor possui um enrolamento principal e um auxiliar (para a partida), ambos defasados no espaço de 90 graus elétricos. O enrolamento auxiliar cria um deslocamento de fase que produz o conjugado necessário para a rotação inicial e a aceleração.

Quando o motor atinge uma rotação predeterminada, o enrolamento auxiliar é desconectado da rede através de uma chave que normalmente é atuada por uma força centrífuga (chave ou disjuntor centrífugo) ou em casos específicos, por relé de corrente, chave manual ou outros dispositivos especiais (figura 9.2).

Como o enrolamento auxiliar é dimensionado para atuação somente na partida, seu não desligamento provocará a sua queima.

O ângulo de defasagem que se pode obter entre as correntes do enrolamento principal e do enrolamento auxiliar é pequeno e, por isso, estes motores tem conjugado de partida igual ou pouco superior ao nominal, o que limita sua aplicação a potências fracionárias e a cargas que exigem reduzido ou

moderado conjugado de partida, ventiladores e exaustores, pequenos polidores, compressores herméticos, bombas centrífugas, etc...

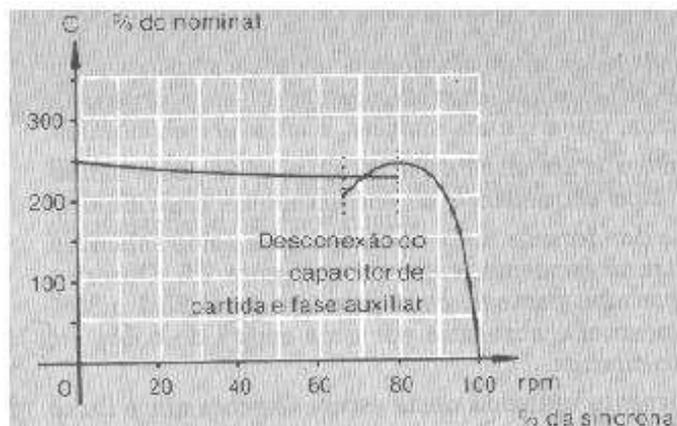
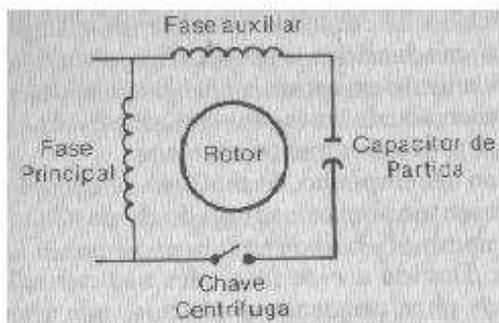


**Fig. 9.2** Esquema básico e característica conjugado x velocidade.

### 9.3 Motor de capacitor de partida (capacitor-start)

É um motor semelhante ao de fase dividida. A principal diferença reside na indução de um capacitor eletrolítico em série com o enrolamento auxiliar de partida. O capacitor permite um maior ângulo de defasagem entre as correntes do enrolamento principal e auxiliar, proporcionando assim, elevados conjugados de partida. Como no motor de fase dividida, o circuito auxiliar é desconectado quando o motor atinge entre 75% a 80% da velocidade síncrona. Neste intervalo de velocidades, o enrolamento principal sozinho desenvolve quase o mesmo conjugado que os enrolamentos combinados. Para velocidades maiores, entre 80% e 90% da velocidade síncrona, a curva de conjugado com os enrolamentos combinados cruza a curva de conjugado do enrolamento principal de maneira que, para velocidades acima deste ponto, o motor desenvolve menor conjugado, para qualquer escorregamento, com o circuito auxiliar ligado do que sem ele. Devido ao fato de o cruzamento das curvas não ocorrer sempre no mesmo ponto e, ainda, o disjuntor centrífugo não abrir sempre na mesma velocidade, é prática comum fazer com que a abertura aconteça, na média, um pouco antes do cruzamento das curvas. Após a desconexão do circuito auxiliar o seu funcionamento é idêntico ao do motor de fase dividida.

Com o seu elevado conjugado de partida (entre 200% e 350% do conjugado nominal), o motor de capacitor de partida pode ser utilizado em uma grande variedade de aplicações e é fabricado em potências que vão de 1/4cv a 15cv.



**Fig. 9.3** Esquema básico e característica conjugado x velocidade

#### 9.4 Motor de capacitor permanente (permanent-split capacitor)

Neste tipo de motor, o enrolamento auxiliar e o capacitor ficam permanentemente energizados, sendo o capacitor do tipo eletrostático. O efeito deste capacitor é de criar condições de fluxo muito semelhantes as encontradas nos motores polifásicos, aumentando, com isso, o conjugado máximo, o rendimento e o fator de potência, além de reduzir sensivelmente o ruído.

Construtivamente são menores e isentos de manutenção pois não utilizam contatos e partes móveis, como nos motores anteriores. Porém seu conjugado de partida, normalmente é inferior ao do motor de fase dividida (50% a 100% do conjugado nominal), o que limita sua aplicação a equipamentos que não requirem elevado conjugado de partida, tais como: máquinas de escritórios, ventiladores, exaustores, sopradores, bombas centrífugas, esmeris, pequenas serras, furadeiras, condicionadores de ar, pulverizadores, etc. São fabricados normalmente para potências de 1/50 a 1,5cv.

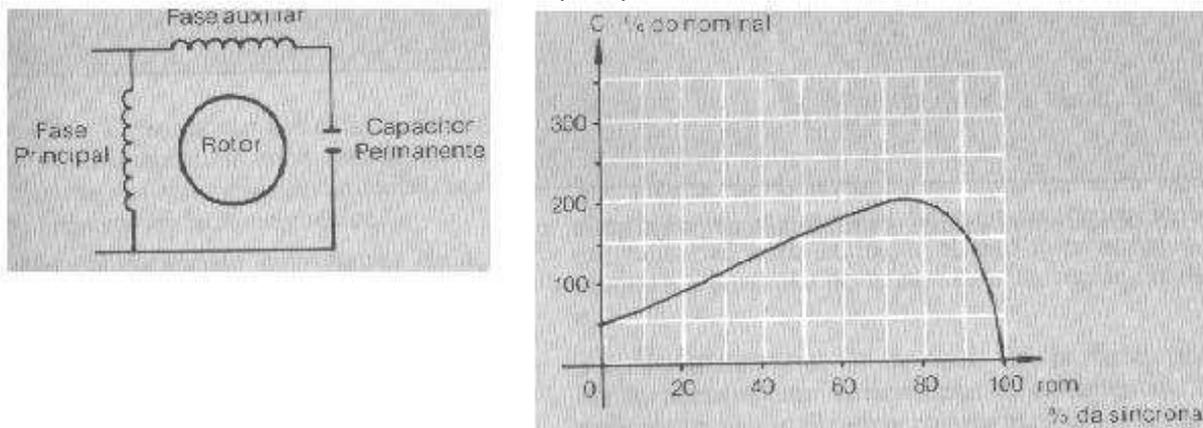


Fig. 9.4 Esquema básico e característica conjugado x velocidade

#### 9.5 Motor com dois capacitores (two-value capacitor)

É um motor que utiliza as vantagens dos dois anteriores: partida como a do motor de capacitor de partida e funcionamento em regime como a do motor de capacitor permanente (figura 9.5). Porém, devido ao seu alto custo, normalmente são fabricados em potências superiores a 1cv.

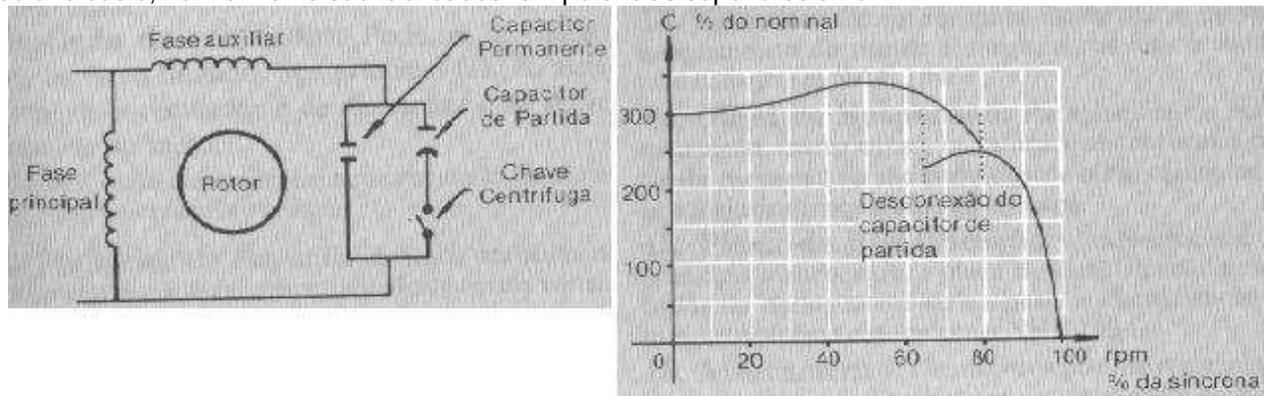


Fig. 9.5 Esquema básico e característica conjugado x velocidade

#### 9.6 Motor de campo distorcido ou pólos sombreados (shaded-pole)

O motor de campo distorcido se destaca entre os motores de indução monofásicos, por seu processo de partida, que é o mais simples, confiável e econômico.

Construtivamente existe três tipos: de pólos salientes, tipo esqueleto e de enrolamento distribuídos.

Uma das formas mais comuns é a de pólos salientes, ilustrada esquematicamente na figura 9.6. Observa-se que uma parte de cada pólo (em geral 25% a 35% do mesmo) é abraçada por uma espira de cobre em curto-circuito.

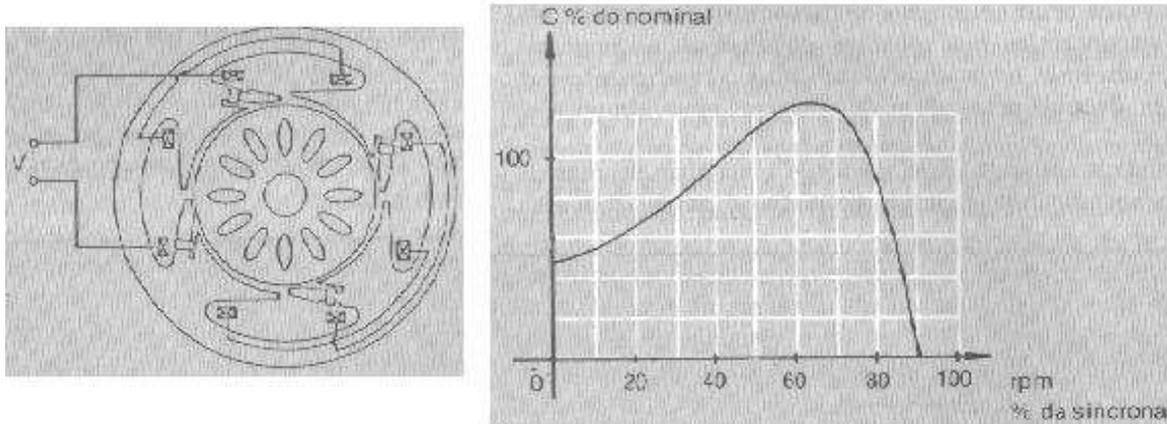
A corrente induzida nesta espira faz com que o fluxo que a atravessa sofra um atraso em relação ao fluxo da parte não abraçada pela mesma. O resultado disto é semelhante a um campo girante que se

move na direção da parte não abraçada para a parte abraçada do pólo, produzindo conjugado que fará o motor partir e atingir a rotação nominal.

O sentido de rotação, portanto, depende do lado em que se situa a parte abraçada do pólo. Conseqüentemente, o motor de campo distorcido apresenta um único sentido de rotação. Este geralmente pode ser invertido, mudando-se a posição da ponta de eixo do rotor em relação ao estator. Outros métodos para se obter inversão de rotação são possíveis, porém, tornam-se proibitivamente onerosos.

Quanto ao desempenho, os motores de campo distorcido apresentam baixo conjugado de partida (15% a 50% do nominal), baixo rendimento e baixo fator de potência. Devido a esse fato, eles são normalmente fabricados para pequenas potências, que vão de alguns milésimos de c.v. até 1/4cv.

Pela sua simplicidade, robustez e baixo custo, são idéias em aplicações tais como: movimentação de ar (ventiladores, exaustores, purificadores de ambiente, unidades de refrigeração, secadores de roupas e de cabelo), pequenas bombas e compressores, projetores de slides, toca-discos e aplicações domésticas.



**Fig. 9.6** Esquema básico e característica conjugado x velocidade

## 9.7 Exercícios

1) Um motor de indução monofásico de quatro pólos, 110 V, 60 Hz, tem perdas rotacionais de 15 W em velocidades normais. Os parâmetros do circuito equivalente são os seguintes:

$$R_1 = 1,3 \, \Omega \quad R'_2 = 3,2 \, \Omega \quad X_1 = 2,5 \, \Omega \quad X'_2 = 2,2 \, \Omega \quad X_m = 48 \, \Omega$$

Calcule o desempenho deste motor, quando opera com escorregamento de 4%, ou seja:

- Corrente de Entrada
- Potência de Entrada
- Potência Desenvolvida e Potência de Saída (mecânica)
- Conjugado Desenvolvido e Conjugado Mecânico

2) Um motor de indução monofásico de quatro pólos, 230 V, 60 Hz, apresenta os seguintes parâmetros do circuito equivalente:

$$R_1 = 8 \, \Omega \quad R'_2 = 8 \, \Omega \quad X_1 = 12 \, \Omega \quad X'_2 = 12 \, \Omega \quad X_m = 200 \, \Omega$$

Calcule o desempenho deste motor, quando opera com escorregamento de 4%, ou seja:

- Corrente de Entrada e Potência de Entrada.
- Potência Desenvolvida e Potência de Saída (mecânica).
- Conjugado Desenvolvido e Conjugado Mecânico.
- Rendimento do motor.

3) Um motor de indução monofásico de quatro pólos, 110 V, 60 Hz, tem perdas rotacionais de 10 W em velocidades normais e uma perda no núcleo de 25 W. Os parâmetros do circuito equivalente são os seguintes:

$$R_1 = 2 \, \Omega \quad R'_2 = 2 \, \Omega \quad X_1 = 2 \, \Omega \quad X'_2 = 2 \, \Omega \quad X_m = 50 \, \Omega$$

Calcule o desempenho deste motor, quando opera com escorregamento de 10%, ou seja:

- Corrente de Entrada e Potência de Entrada.
- Potência Desenvolvida e Potência de Saída (mecânica).
- Conjugado Desenvolvido e Conjugado Mecânico.
- Rendimento do motor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Members of the Staff Department of Electrical Engineering Massachusetts Institute of Thechonology. **Magnetic Circuits and Transformers**. Vol I e II. John Wiley & Sons; Inc. 1944.
2. KOSTENKO, M., PIOTROVSKY, L. **Eletrical machines**. Peace Publishers, 1949.
3. CHILIKIN, M. **Accionamentos electricos**. Mir, 1949.
4. SLEMON, GORDON R. **Equipamentos magnetelétricos: transdutores, transformadores e máquinas**. LTC. 1974
5. FITZGERALD, A. E., et al. **Máquinas elétricas**. Coleção Schaum McGraw-Hill, 1975.
6. FITZGERALD, A. E., et al. **Máquinas elétricas**. Bookman, 2006.
7. FALCONI, AURIO GILBERTO. **Eletromecânica**. Edgard Blücher, 1979.
8. NASAR, SYED A. **Máquinas elétricas**. Coleção Schaum, 1984.
9. BARBI, IVO. **Teoria fundamental do motor de indução**. Ed. UFSC/Eletróbrás, 1985.
10. KOSOW, IRVING I. **Máquinas elétricas e transformadores**. Globo, 1986.
11. TORO, VINCENT DEL. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Prentice Hall, 1994.
12. MORAES, CICERO C. **Máquinas elétricas**. Sorocaba, 1995. 84p. Apostila Faculdade de Engenharia de Sorocaba (FACENS).
13. SIMONE, GILIO ALUISIO. **Transformadores**. Erica, 1998.
14. SIMONE, GILIO ALUISIO. **Máquinas de indução trifásicas** . Erica, 2000.
15. SIMONE, GILIO ALUISIO. **Máquinas de corrente contínua**. Erica, 2000.
16. SIMONE, GILIO ALUISIO. **Centrais de aproveitamentos hidrelétricos**. Erica, 2000.
17. JORDÃO, RUBENS GUEDES. **Transformadores**. Edgard Blücher, 2002.
18. BIM, EDSON. **Máquinas elétricas e acionamentos**. Elsevier. 2009.
19. PINTO, JOEL ROCHA. **Conversão eletromecânica de energia**. Biblioteca24horas, 2011.

