

IX Motores Elétricos

Um motor elétrico é uma máquina capaz de transformar energia elétrica em energia mecânica, utilizando normalmente o princípio da reação entre dois campos magnéticos.

Os motores por suas características de construção e funcionais, podem ser classificados genericamente como: (a) de corrente contínua, (b) de indução ou assíncronos e (c) síncronos. Este texto apresentará em detalhes apenas os motores de indução trifásicos e monofásicos. Do motor síncrono será dada apenas uma descrição, sendo que os motores de corrente contínua não serão abordados.

IX.1 Motores de Indução Trifásicos (MIT)

Um motor de indução é composto basicamente de duas partes: um *Estator* e um *Rotor*. O estator constitui a parte estática de um motor e o rotor sua parte móvel.

O estator é composto de chapas finas de aço magnético tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas por correntes parasitas e histerese. Estas chapas têm o formato de um anel com ranhuras internas (vista frontal) de tal maneira que possam ser alojados enrolamentos que deverão criar um campo magnético no estator.

O rotor, composto de chapas finas de aço magnético tratadas termicamente como o estator, tem também o formato de um anel (vista frontal), com os enrolamentos alojados longitudinalmente.

O motor de indução é o motor de construção mais simples. Estator e rotor são montados solidários, com um eixo comum aos “anéis” que os compõem. A aplicação de uma tensão nos enrolamentos do estator irá fazer com que apareça uma tensão nos enrolamentos do rotor. Assim o estator pode ser considerado como o primário de um transformador e o rotor como seu secundário. O espaço entre o estator e o rotor é denominado entreferro. A figura 1 apresenta esquematicamente um MIT.

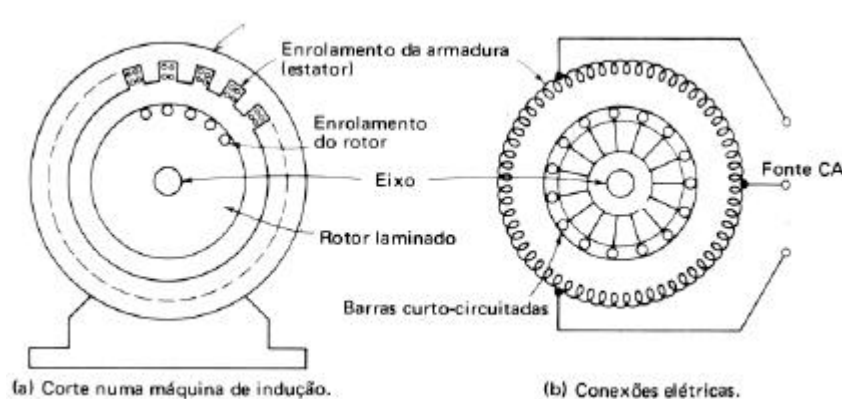


Figura 1 – Máquina de indução

Conforme se pode observar na figura 1b, no estator de uma MIT os enrolamentos, ou bobinas, são em número de três. Estas bobinas, alojadas nas ranhuras do estator, podem ser ligadas em estrela ou triângulo.

No rotor os enrolamentos, enrolados longitudinalmente a seu eixo, podem ser realizados de duas maneiras, o que dá origem a dois tipos de rotor:

- *Rotor Gaiola de Esquilo*: tipo mais comum, tem no rotor os condutores das bobinas curto-circuitados em cada terminal por anéis terminais contínuos (figura 2.a).
- *Rotor Bobinado*: neste tipo de rotor, condutores de cobre que formam uma bobina são colocados em diversas ranhuras (usualmente isolados do núcleo) e podem, no caso de existirem três bobinas, ser ligados em estrela ou triângulo. Neste caso, cada terminal do enrolamento trifásico é ligado a anéis coletores que são isolados do eixo do rotor. Usualmente um resistor trifásico equilibrado variável é ligado aos anéis coletores através de escovas a fim de variar a corrente na partida. (figura 2.b).

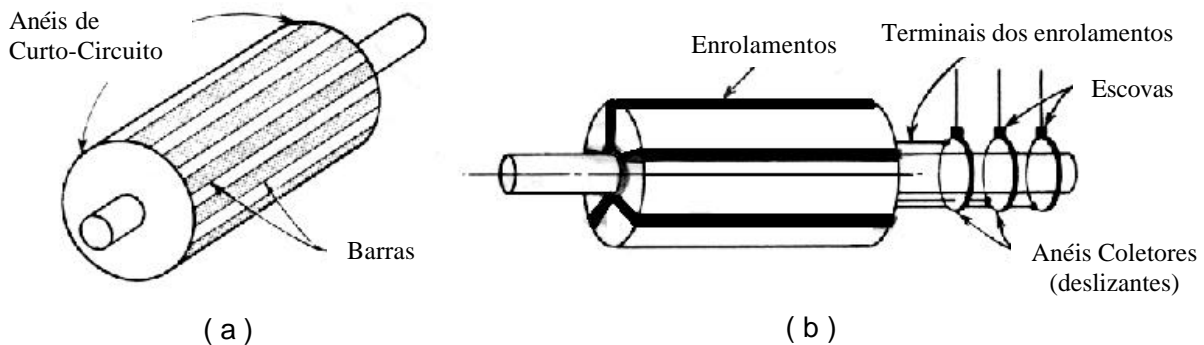


Figura 2 – Rotor gaiola de esquilo e bobinado

Algumas vezes a máquina tipo gaiola é chamada de máquina sem escovas e a máquina com rotor bobinado é chamada de máquina de anéis.

IX.1.1 Campo Magnético Girante

Um campo magnético girante está na base do princípio de funcionamento da máquina de indução. Este campo é produzido da seguinte maneira: coloca-se nas ranhuras do estator um conjunto de três bobinas independentes, defasadas de 120° no espaço, e faz-se circular por estas bobinas correntes trifásicas defasadas de 120° no tempo. Estas correntes trifásicas, aplicadas às bobinas do estator podem ser representadas por:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= I \cdot \text{sen}(\omega t) \text{ A} \\ i_b(t) &= I \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \text{ A} \\ i_c(t) &= I \cdot \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \text{ A} \end{aligned}$$

Toda bobina quando percorrida por uma corrente produz um campo magnético cuja fmm é dada por $\mathfrak{S}(t) = N \cdot i(t)$. A fmm produzida pelas correntes trifásicas é dada então por:

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}_a(t) &= N \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t) \text{ A} \\ \mathfrak{S}_b(t) &= N \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \text{ A} \\ \mathfrak{S}_c(t) &= N \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \text{ A} \end{aligned}$$

Se as três bobinas estiverem orientadas segundo um eixo comum a força resultante será nula ($\mathfrak{S}_a(t) + \mathfrak{S}_b(t) + \mathfrak{S}_c(t) = 0$). Como as três bobinas estão defasadas no espaço de 120° , adotando-se a bobina percorrida por $i_a(t)$ (\hat{a}) na referência tem-se:

$$\mathfrak{I}(t) = \mathfrak{I}_a \cdot \cos(0^\circ) + \mathfrak{I}_b \cdot \cos(120^\circ) + \mathfrak{I}_c \cdot \cos(240^\circ)$$

$$\mathfrak{I}(t) = N \cdot I \cdot [\text{sen}(wt) \cdot \cos(0^\circ) + \text{sen}(wt - 120^\circ) \cdot \cos(120^\circ) + \text{sen}(wt + 120^\circ) \cdot \cos(240^\circ)]$$

Após o desenvolvimento trigonométrico tem-se:

$$\mathfrak{I}(t) = 1,5 \cdot N \cdot I \cdot \text{sen}(wt)$$

Ou seja, a fmm total produzirá um campo magnético girante com velocidade e intensidade constantes, com a velocidade dependendo das correntes aplicadas às bobinas.

As figuras 3.a e 3.b apresentam as correntes trifásicas que circulam pelas bobinas, em suas representações fasorial e no domínio do tempo. A figura 3.c apresenta esquematicamente a ligação do conjunto de três bobinas aa', bb' e cc' (ponto 4 da figura 3.b: corrente nas bobinas bb' e cc' é positiva – corrente saindo do papel - e a corrente na bobina aa' é negativa – entrando no papel) por onde circulam as correntes trifásicas.

Nas figuras 3.d, 3.e e 3.f pode-se observar a força resultante $\mathfrak{I}(t)$ para as situações 1, 2 e 3 da figura 3.b. A regra da mão direita indica então o sentido das forças magnéticas provocadas por cada corrente trifásica e consequentemente do fluxo. A soma fasorial destas forças apresenta a força $\mathfrak{I}(t)$ responsável pelo campo girante.

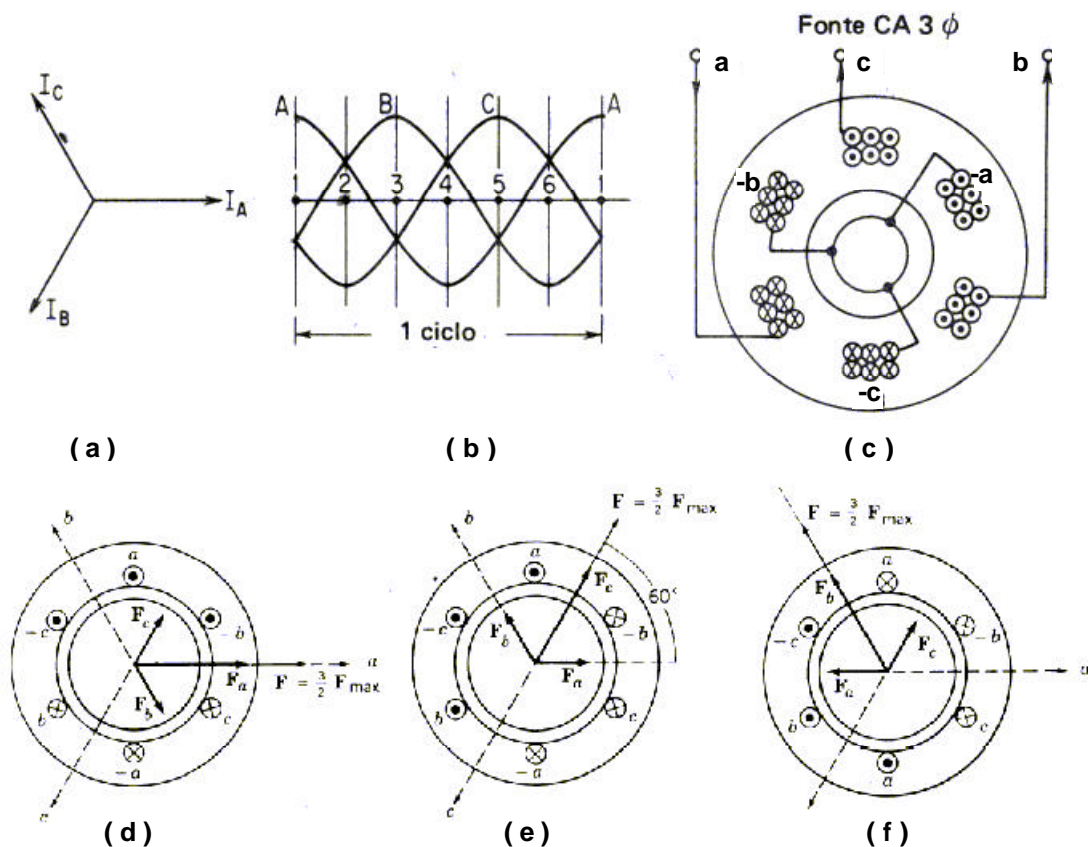


Figura 3 – Campo Girantes em Máquinas de Indução

Logo, o fato de aplicar três correntes trifásicas (cf. figura 3.b) às bobinas do estator, resulta num campo magnético girante constante, cujo deslocamento no espaço corresponde exatamente aos deslocamentos tempo-fásico da frequência da fonte. Esquemáticamente se pode representar esse fato utilizando a figura 3. Assim, enquanto na figura 3.b a corrente foi da posição 1 a 3 ($\omega t = 120^\circ$), nas figuras 3.d, 3.e e 3.f se pode ver um deslocamento do campo resultante de 120° .

Características ligadas ao número de bobinas colocadas nas ranhuras do estator determinam o número de pólos que a máquina irá possuir (conforme pode ser observado na figura 3, com três conjuntos de bobinas tem-se a formação de dois pólos na máquina) e este número de pólos irá determinar a velocidade do campo girante. As razões que fazem com que as ranhuras e o número de pólos se relacionem com a velocidade do campo não serão apresentadas em detalhes neste texto.

Na figura 4, para ilustrar o conceito de pólos, apresenta-se esquematicamente duas máquinas de indução, a da esquerda de dois pólos e a da direita de 4 pólos.

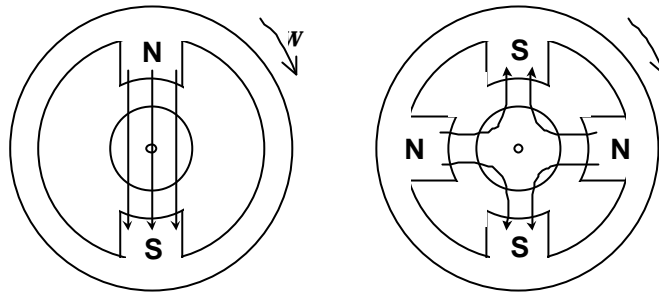


Figura 4 – Campos Girantes (2 e 4 pólos)

A velocidade de rotação do campo girante criado pela força $\mathfrak{S}(t)$ é denominada *Velocidade Síncrona* (n_s) sendo dada por:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \text{ onde: } n_s : \text{rotação síncrona em rpm}$$

f: frequência da rede em hertz

p: número de pólos

IX.1.2 Princípio de Funcionamento do Motor de Indução

O dispositivo apresentado na figura 4 será utilizado para demonstrar o princípio de funcionamento de um motor de indução. Este dispositivo consiste de um ímã suspenso por um fio. Sob o ímã um disco de cobre ou alumínio está apoiado sob um mancal que está por sua vez apoiado em uma placa de ferro. Neste dispositivo o campo do ímã permanente completa-se através do conjunto disco-placa de ferro.

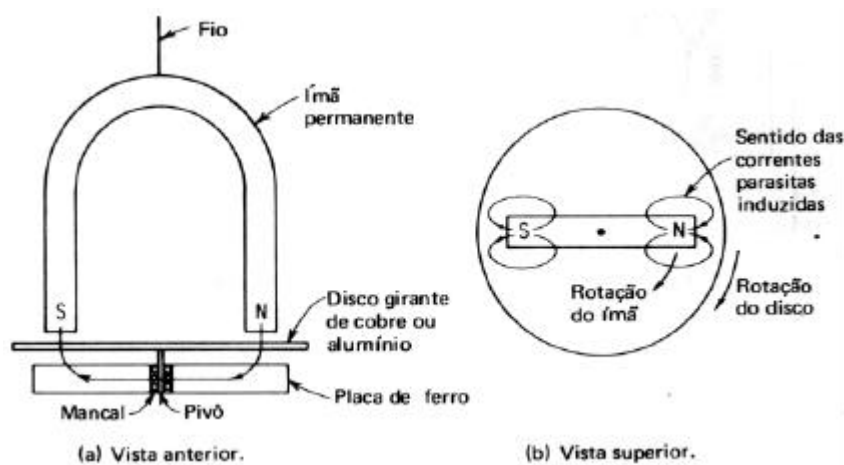


Figura 5 - Princípio de Funcionamento do Motor de Indução

A medida que o ímã girar o disco irá acompanhá-lo. Este fato se deve às correntes parasitas (cf. figura 5.b) que aparecerão no disco devido a seu movimento relativo em relação ao campo magnético. A Lei de Lenz¹ explica o sentido contrário da tensão induzida (e conseqüentes correntes parasitas) que irá produzir o campo que tenderá a se opor a força, ou seja, ao movimento que produziu a tensão induzida. Estas correntes parasitas tenderão a criar sob o polo N do ímã um polo S no disco e sob o polo S do ímã um polo N no disco. Enquanto durar o movimento, que produz as correntes parasitas, estes pólos serão criados no disco. O disco desta maneira irá girar no mesmo sentido do ímã pela atração existente entre estes pares de pólos que tenderão a alinhar-se.

Um fato extremamente importante é que o disco irá girar a uma velocidade menor que a do ímã, pois caso contrário não existiria movimento relativo entre o ímã e o disco e como conseqüência não existiriam as correntes parasitas nem os pólos, nem o movimento do disco e nem o torque. Desta forma, o disco deve *escorregar* em velocidade para que se produza torque.

A diferença de velocidade que existe entre a velocidade síncrona do campo magnético girante e a velocidade um pouco menor na qual gira o disco é chamada de *escorregamento* (s), e é normalmente expressa em porcentagem.

$$s = \frac{\text{velocidade de escorregamento}}{\text{velocidade síncrona}} = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

n_s : velocidade síncrona do campo girante (rpm)

n_r : velocidade do rotor (rpm)

Exemplo 1: Um motor de indução trifásico tem no estator 3 ranhuras por pólo e por fase. Sendo 60 Hz a frequência da rede, pede-se:

- o número de pólos produzidos e o número total de ranhuras do estator.
- a velocidade do campo magnético girante.
- a velocidade do rotor para um escorregamento de 3 %.

Solução:

- $p = 2 \times n^\circ$ de ranhuras por polo = 6 pólos

Total de ranhuras = (3 ranhuras por polo e por fase) x (6 pólos) x (3 fases) = 54 ranhuras

- $n_s = \frac{120 f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$

- $n_r = n_s \cdot (1 - s) = 1200 \cdot (1 - 0,03) = 1164 \text{ rpm}$

IX.1.3 Corrente Solicitada pelo Motor

A potência mecânica no eixo de um motor é expressa em HP ou CV. A potência elétrica de entrada, maior que a potência mecânica, é igual a potência do motor dividida pelo rendimento (em torno de 80% para a maioria dos motores). A corrente nominal do motor, em amperes, pode ser obtida então da seguinte expressão:

¹ Em todos os casos de indução eletromagnética, uma fem induzida fará com que a corrente circule em um circuito fechado, num sentido tal que seu efeito magnético se oponha à variação que a produziu:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$I = \frac{HP \times 746}{K \times V \times FP \times h} \text{ ou } I = \frac{CV \times 736}{K \times V \times FP \times h}$$

onde:

V: tensão entre fases;

h: rendimento

FP: fator de potência;

K: constante igual a $\sqrt{3}$ para motor trifásico.

Exemplo 2: Determine a corrente nominal para um motor de 15 HP, trifásico, 220 V entre fases, fator de potência 0,9 indutivo e rendimento de 82 %.

$$I = \frac{15 \times 746}{\sqrt{3} \times 220 \times 0,9 \times 0,82} = 39,79 \text{ A}$$

IX.1.4 Força Eletromotriz Induzida e Torque no Motor de Indução

Seja um motor de indução comercial tipo gaiola de esquilo com o rotor composto de condutores de cobre embutidos num núcleo de ferro laminado. A figura 6.a mostra três destes condutores do rotor (A, B e C) e sua relação com um campo magnético multipolar produzido por um enrolamento trifásico.

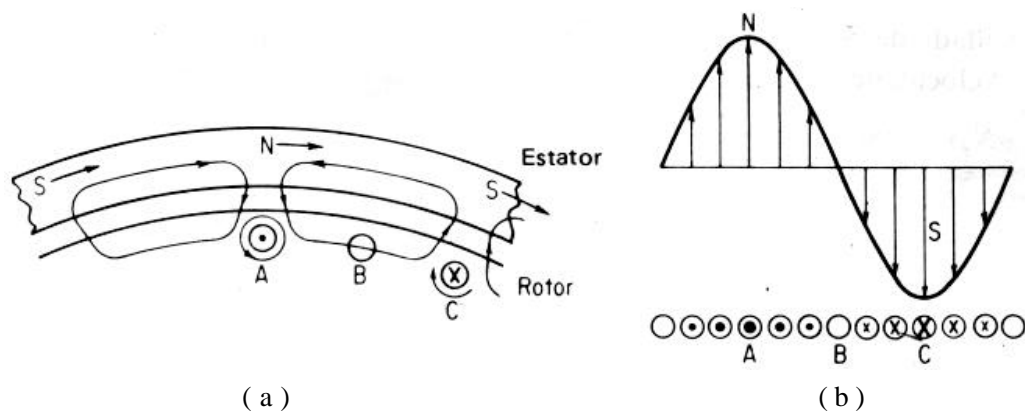


Figura 6 – (a) FEM induzidas produzidas nos condutores do rotor;
(b) Relação entre o campo e as FEM do rotor

Imaginemos que o rotor está parado (num bloqueio) e que devido ao campo girante se tem um fluxo magnético girando à velocidade síncrona no sentido horário em relação ao condutor A do rotor, situado diretamente sob um pólo N, o mesmo acontecendo para C em relação a um pólo S (observar o campo criado entre os pólos N e S conforme figura 4). Como o rotor está parado, o movimento relativo dos condutores em relação ao campo é para a esquerda. A determinação do sentido da força eletromotriz induzida pode ser feita através da regra de Fleming da mão direita com o polegar indicando o movimento, o indicador o campo e o dedo médio a fem. A corrente associada às forças, para o condutor A é uma corrente saindo do papel e para o condutor C uma corrente entrando. Conseqüentemente nestes pontos aparecerão fluxos magnéticos, no sentido anti-horário para o condutor A e horário para o condutor C

Pelas interações entre os campos produzidos pelas correntes induzidas e os campos multipolares do estator, tem-se repulsão à esquerda e atração à direita dos condutores A e C (cf. figura 7), ou seja, um movimento no mesmo sentido do campo magnético. O condutor B, no instante mostrado, como está numa região interpolar não é sede de fem induzida.

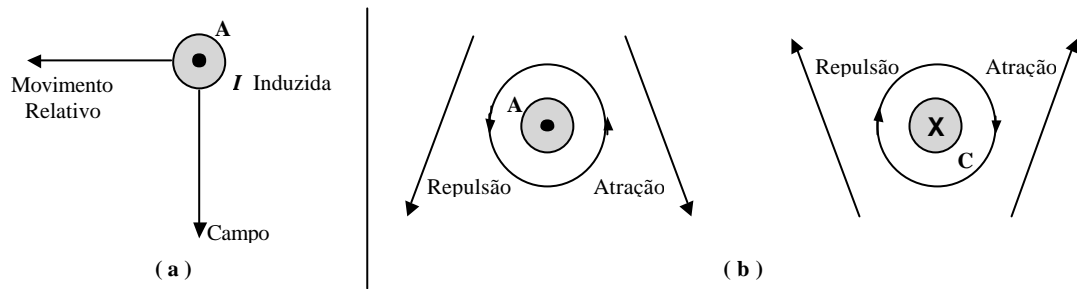


Figura 7 – (a) correntes induzidas (b) interação entre campos

Em repouso, a frequência da fem induzida no rotor é igual à frequência do campo magnético girante. Por outro lado, se o rotor fosse capaz de girar à mesma velocidade do campo magnético girante, não haveria tensão induzida (isto corresponde ao condutor A ficar sob o pólo norte e permanecer sob este pólo). Logo a frequência das tensões induzidas no rotor varia inversamente com a velocidade do rotor, desde um máximo (frequência da linha) com o rotor em repouso, até a frequência nula na velocidade síncrona. Assim, a frequência da tensão (ou corrente) induzida no rotor é dada por:

$$f_r = s.f \quad \text{onde: } f: \text{ frequência da tensão aplicada ao estator (frequência da linha).}$$

Desta maneira, o motor de indução de rotor bobinado pode ser usado como dispositivo de conversão de frequência quando seu rotor é acionado a uma dada velocidade (potência mecânica é fornecida ao seu eixo) e se retira a fem através dos anéis coletores. Neste caso tem-se um gerador de indução.

Os condutores do rotor do motor de indução têm uma resistência R_r e uma reatância X_r que depende da frequência do rotor (a indutância das barras (L_r) é fixa). É usual determinar-se a reatância do rotor, através do ensaio a rotor bloqueado, para então se utilizar este valor como um padrão de referência. Uma vez que a frequência do rotor aumenta com o escorregamento ($f_r = s.f$) e a reatância varia com a frequência ($X_r = 2 \cdot \mathbf{p} \cdot f \cdot L_r$), a reatância do rotor é dada por:

$$X_r = s.X_{rb}, \quad \text{onde: } s = \text{escorregamento (em decimais);}$$

$$X_{rb} = \text{reatância a rotor bloqueado.}$$

Do mesmo modo, a tensão induzida no rotor (E_r) é função do fluxo e conseqüentemente da frequência, sendo dada por:

$$E_r = s.E_{rb}, \quad \text{onde: } E_{rb} = \text{tensão induzida a rotor bloqueado}$$

Assim, a tensão induzida no rotor, a reatância e sua frequência variam todas em função do escorregamento desde um máximo ($s = 1$) para rotor bloqueado, até zero se a velocidade do rotor for igual à velocidade síncrona. ($s = 0$).

Exemplo 3: Um MIT de 4 pólos opera a 60 Hz. Se o escorregamento vale 5% a plena carga, calcule a frequência da tensão induzida no rotor: a) no instante da partida, b) a plena carga.

$$\text{a) } s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = 1 \text{ pois } n_r = 0, \text{ logo } f_r = s.f = 60 \text{ Hz}$$

b) a plena carga $s = 0,05$

$$\text{logo } f_r = s.f = 0,05 \cdot 60 = 3 \text{ Hz}$$

IX.1.5 Circuito Equivalente para o Motor de Indução

Conforme visto anteriormente, o motor de indução pode ser analisado como um transformador contendo um entreferro e tendo uma resistência variável no secundário. Assim, o primário do transformador corresponde ao estator do motor de indução, enquanto que o secundário corresponde ao rotor. A figura 12 mostra o circuito equivalente, em termos monofásicos, onde:

R_1 : resistência por fase efetiva do estator

X_1 : reatância de dispersão por fase do estator

R_2 : resistência por fase efetiva do rotor

X_2 : reatância de dispersão por fase do rotor

V_1 : tensão de fase aplicada no motor

E_1 : fcm gerada pelo fluxo de entreferro resultante

I_1 : corrente no estator

E_2 : tensão induzida no rotor

I_2 : corrente no rotor

R_2/s : representa o efeito combinado de carga no eixo e resistência do rotor

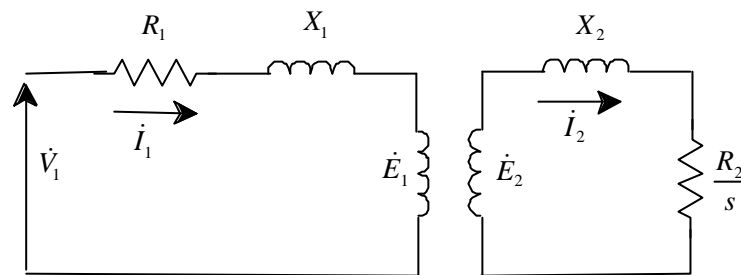


Figura 12: Circuito equivalente por fase do MIT

Para desenvolver melhor este circuito, é conveniente expressar as quantidades do rotor referidas ao estator. Para este propósito, deve-se conhecer a razão de transformação, como num transformador. Esta razão de tensão num motor de indução, que será denominada “a”, deve incluir os efeitos das distribuições dos enrolamentos do estator e rotor. Assim:

$$R_2' = a^2 R_2$$

$$X_2' = a^2 X_2 \text{ onde}$$

R_2' : resistência por fase do rotor referida ao estator

X_2' : reatância de dispersão por fase do rotor referida ao estator

X_m : reatância que considera a magnetização do núcleo

R_m : resistência que considera a perda no núcleo

I_m : corrente devido à magnetização e perdas do núcleo

Considerando as similaridades entre um motor de indução e um transformador, pode-se referir as quantidades do rotor para o estator, obtendo-se o circuito equivalente por fase mostrado na figura 13.a.

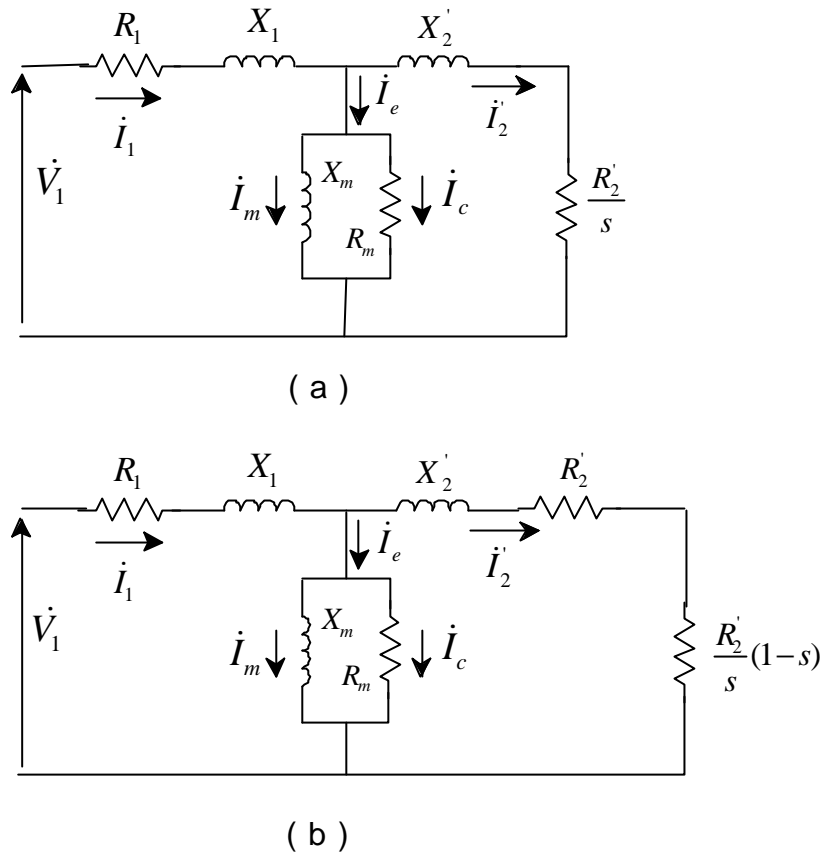


Figura 13 Circuito equivalente modificado

O valor de R_2'/s pode ser separado em duas parcelas, ou seja: $\frac{R_2'}{s} = R_2' + \frac{R_2'}{s}(1-s)$.

O valor de R_2' representa a resistência por fase do rotor parado referida ao estator e $R_2'(1-s)/s$ a resistência dinâmica por fase que depende da velocidade do rotor, valor correspondente à carga no motor. Este desmembramento é mostrado na figura 13.b.

A maior utilidade do circuito equivalente para um MIT é sua aplicação no cálculo do desempenho da máquina. Todos os cálculos são feitos em termos monofásicos, admitindo-se uma operação balanceada da máquina.

A figura 14 mostra a distribuição de potências e as várias perdas por fase da máquina, sendo que:

P_i : potência de entrada

P_e : potência devido a perda no estator (enrolamento mais núcleo)

P_{e_c} : potência devido a perda no cobre da bobina do estator

P_{n_e} : potência devido a perda do núcleo, onde a maior parte está no estator.

P_g : potência que atravessa o entreferro

P_r : potência perdida no rotor (condutores)

P_d : potência eletromagnética desenvolvida

P_{mec} : potência correspondente a perda rotacional (mecânica)

P_o : potência de saída no eixo

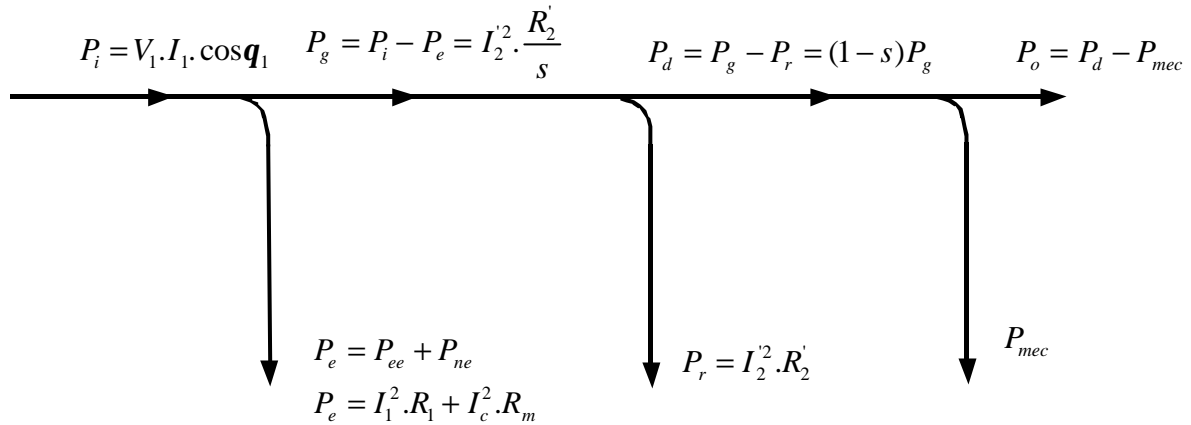


Figura 14: Distribuição de potência num motor de indução

O *Rendimento de um Motor* é definido como sendo a razão entre a potência de saída no eixo e a potência de entrada, ou seja: $\eta = P_o / P_i$.

Exemplo 4: O rotor de um motor de indução trifásico 60 Hz, 4 pólos consome 120 kW a 3 Hz. Determine:

- a-) a velocidade do rotor
- b-) as perdas no cobre do rotor

Solução:

a-) como foram dadas as frequências tem-se:

$$f_r = s f \quad \text{ou seja, } 3 = s \cdot 60, \text{ logo } s = 0,05$$

$$n_s = \frac{120 f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

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

b-) a potência que atravessa o entreferro é dada por $P_g = P_i - P_e$. Como as perdas no estator não foram dadas serão desprezadas. Tem-se então:

$$P_g = P_i = 120 \text{ kW, mas } P_g = I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s} \text{ e como a potência devido as perdas no cobre do rotor é dada por } P_r = I_2'^2 R_2' \text{ tem-se: } P_r = s \cdot P_g = 0,05 \cdot 120 = 6 \text{ kW}$$

Exemplo 5: O motor similar ao do problema anterior (60 Hz, 4 pólos, sendo 120 W a potência que atravessa o entreferro $P_r = 6 \text{ kW}$, com $f_r = 3 \text{ Hz}$) tem uma perda no cobre do estator de 3 kW, uma perda mecânica de 2 kW e uma perda no núcleo do estator de 1,7 kW. Calcule a potência de saída no eixo do rotor e o rendimento.

Solução:

Tem-se que: $P_g = 120 \text{ kW}$ e $P_r = 6 \text{ kW}$

As outras potências dadas são:

$$P_{ee} = 3 \text{ kW} \quad P_{mec} = 2 \text{ kW} \quad \text{e} \quad P_{ne} = 1,7 \text{ kW}$$

A potência de saída é dada por:

$$P_0 = P_d - P_{mec} = P_g - P_r - P_{mec} = 120 - 6 - 2 = 112 \text{ kW}$$

Para o cálculo do rendimento temos:

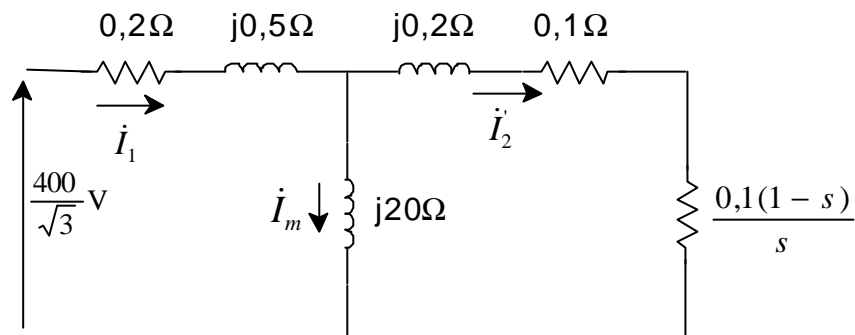
$$\text{Potência de entrada: } P_i = P_g + P_e = 120 + 3 + 1,7 = 124,7 \text{ kW}$$

$$h = \frac{P_0}{P_i} = \frac{112}{124,7} = 0,897 \text{ ou } 89,7 \%$$

Exemplo 6: Os parâmetros por fase do circuito equivalente visto na figura abaixo, para um motor de indução de 400 V (linha), 60 Hz, trifásico, ligação estrela, 4 pólos, são: $R_1 = 0,2 \Omega$, $R_2' = 0,1 \Omega$, $X_1 = 0,5 \Omega$, $X_2' = 0,2 \Omega$ e $X_m = 20 \Omega$. Se as perdas totais mecânicas, a 1755 rpm são 800 W, calcule para esta rotação:

- | | |
|------------------------------|--------------------|
| a) corrente de entrada | d) torque de saída |
| b) potência total de entrada | e) rendimento |
| c) potência total de saída | |

O circuito equivalente é dado por:



a-) Inicialmente deve-se calcular a impedância equivalente. Para isto deve-se calcular o valor do escorregamento para 1755 rpm:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1800 - 1755}{1800} = 0,025$$

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

Logo $R_2' (1-s) / s = 3,9$ e a impedância equivalente fica:

$$Z_e = 0,2 + j0,5 + \frac{j20(4 + j0,2)}{4 + j20 + j0,2} = 0,2 + j0,5 + 3,77 + j0,944$$

$$Z_e = 4,22 \angle 20^\circ \Omega$$

Para o cálculo da corrente tem-se:

$$\dot{V}_1 = \frac{400}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 231 \angle 0^\circ \text{ V e então: } \dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{Z_e} = 54,7 \angle -20^\circ \text{ A}$$

b-) Como a potência total de entrada é três vezes a potência monofásica temos:

$$P_{i3f} = 3 (V_1 I_1 \cos \theta) = 3 \cdot 231 \cdot 54,7 \cdot \cos 20^\circ = 35,6 \text{ kW}$$

c-) Para a potência total de saída tem-se:

$$P_O = P_d - P_{mec}$$

$$P_d = (1 - s) P_g$$

A potência total que atravessa o entreferro P_g para o circuito equivalente, como R_m é nula pode ser calculada por:

$$P_g = P_{i3f} - 3 \cdot P_e = P_{i3f} - 3 \cdot P_{ee} = 35,6 - 3 \cdot 0,254,7^2 = 33,80 \text{ kW}$$

$$\text{Logo } P_d = (1 - s) P_g = 0,975 \cdot 33,80 = 32,96 \text{ kW}$$

$$\text{Finalmente, } P_O = 32,96 - 0,80 = 32,16 \text{ kW}$$

d-) Cálculo do torque de saída (T): $P = T \cdot \omega$

$$T = \frac{P_o}{\omega_o} \quad \omega_o = 2 \pi \frac{1755}{60} = 183 \text{ rad/s} \Rightarrow T = \frac{32160}{183} = 175,74 \text{ N.m}$$

e-) Cálculo do rendimento:

$$h = \frac{P_o}{P_i} = \frac{32,16}{35,6} = 0,90 \text{ ou } 90 \%$$

IX.1.6 Torque no Motor de Indução

O **Torque Desenvolvido** (T) em cada um dos condutores individuais do rotor (ex.: condutor A da figura 6) na situação de motor parado pode ser expresso por:

$$T = K_t \cdot f \cdot I_r \cdot \cos \mathbf{q}_r \quad \text{onde:}$$

K_t : constante de torque para o número de pólos, enrolamento, unidades empregadas, etc.

f : fluxo produzido por cada pólo unitário do campo magnético girante que concatena o condutor do rotor.

$I_r \cdot \cos \mathbf{q}_r$: componente da corrente do rotor em fase com f

Os valores apresentados abaixo são utilizados na determinação da equação para o **Torque na Partida** (T_p) do motor de indução.

- R_r : resistência efetiva do motor (para a posição bloqueada) de todos os condutores do rotor combinados.
- X_{rb} : reatância a rotor bloqueado de todos os condutores do rotor combinados.
- Z_{rb} : impedância para o rotor bloqueado, dada por $Z_{rb} = R_r + X_{rb}$, com $\cos \mathbf{q}_r = \frac{R_r}{Z_{rb}}$.
- I_{rb} : corrente no rotor bloqueado, dada por $I_{rb} = \frac{E_{rb}}{\sqrt{R_r^2 + X_{rb}^2}}$.

Substituindo-se todos os valores na equação de torque desenvolvido, na situação de rotor bloqueado, tem-se o Torque de Partida:

$$T_p = \frac{K_t \cdot f \cdot E_{rb}}{\sqrt{R_r^2 + X_{rb}^2}} \cdot \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + X_{rb}^2}} \Rightarrow T_p = \frac{K_t \cdot f \cdot E_{rb} \cdot R_r}{R_r^2 + X_{rb}^2}$$

Como o fluxo é proporcional à tensão de alimentação E_f e como E_{rb} (por ação de transformador) é proporcional a E_f , a equação acima pode ser simplificada para:

$$T_p = \frac{K_0 \cdot E_f^2 \cdot R_r}{R_r^2 + X_{rb}^2} \Rightarrow T_p = K \cdot E_f^2$$

Como a resistência efetiva do rotor e a reatância a rotor bloqueado são constantes para uma dada tensão aplicada, a uma frequência constante, pode-se observar que o torque na partida é diretamente proporcional ao quadrado da tensão aplicada ao enrolamento do estator.

Para calcular o **Torque Máximo** desenvolvido em um motor de indução deve-se primeiramente calcular a corrente do rotor. Para qualquer escorregamento dado, tem-se que a corrente do rotor é dada por:

$I_r = \frac{s \cdot E_{rb}}{\sqrt{R_r^2 + (s \cdot X_{rb})^2}}$, e como $\cos \theta_r = \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + (s \cdot X_{rb})^2}}$, tem-se que o torque para qualquer escorregamento é dado por:

$$T = \frac{K_t \cdot f \cdot s \cdot E_{rb} \cdot R_r}{R_r^2 + (s \cdot X_{rb})^2}$$

Como E_{rb} é diretamente proporcional ao fluxo, tem-se: $T = \frac{K_t \cdot f^2 \cdot s \cdot R_r}{R_r^2 + (s \cdot X_{rb})^2}$.

Para se obter o Torque Máximo, deve-se diferenciar a expressão anterior em relação a resistência do rotor e igualar este valor a zero. Desta maneira obtém-se $R_r = s_{T_{\max}} \cdot X_{rb}$.

Como resultado, tem-se para o torque máximo: $T_{\max} = \frac{K \cdot E_f^2}{2 \cdot (s_{T_{\max}} \cdot X_{rb})^2}$.

Exemplo 7: Um motor de indução de rotor de gaiola de 8 pólos, 60 Hz é carregado ao ponto onde ocorre o seu torque máximo. A resistência do rotor, por fase é de $0,3 \Omega$ e o motor desacelera por ter atingido o torque máximo a 650 rpm. Calcule:

- O escorregamento correspondente ao torque máximo
- A reatância a rotor bloqueado
- A frequência do rotor correspondente ao ponto do torque máximo

Solução:

$$a-) \quad n_s = \frac{120 f}{P} = \frac{120 \cdot 60}{8} = 900 \text{ rpm}$$

$$s_{T_{\max}} = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{900 - 650}{900} = 0,278$$

$$b-) \quad X_{rb} = \frac{R_r}{s_{T_{\max}}} = \frac{0,3}{0,278} = 1,08 \Omega$$

$$c-) \quad f_r = s_{T_{\max}} \cdot f = 0,278 \cdot 60 = 16,7 \text{ Hz}$$

IX.1.7 Características Operacionais de um Motor de Indução

Estando o motor desligado, ao aplicar-se a ele sua tensão nominal ele desenvolverá seu torque de partida de tal modo que sua velocidade começa a crescer. Com o motor em movimento, o escorregamento diminui pois o rotor está aumentando sua velocidade e o torque aumenta até a condição de torque máximo. Desta maneira a velocidade do motor irá aumentar ainda mais, reduzindo o escorregamento e simultaneamente o torque desenvolvido pelo motor. A velocidade do motor continuará a aumentar até um valor de escorregamento onde o torque desenvolvido torna-se igual ao torque aplicado. Neste ponto de equilíbrio o motor continuará a girar na velocidade estabelecida até que o torque aplicado aumente ou diminua.

A figura 8 mostra a relação entre os valores dos torques de partida, máximo e de plena carga desenvolvidos pelo motor em função da sua velocidade e escorregamento. A figura mostra também a corrente no rotor do instante da partida (ponto a) até as condições de funcionamento em regime permanente, limitadas pelas posições a plena carga e a vazio (pontos c e d).

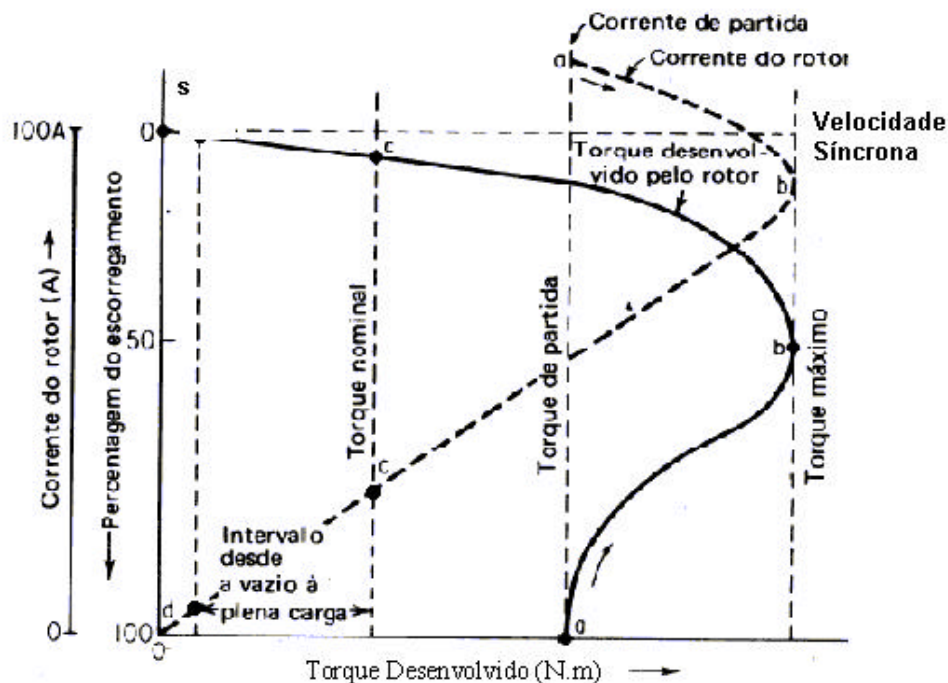


Figura 8 – Torque desenvolvido e corrente no rotor

IX.1.8 Partida do Motor de Indução

Embora haja algumas exceções, de uma maneira geral, um motor de indução requer aproximadamente seis vezes a sua corrente nominal para partida a tensão nominal. Na maioria das utilizações, residenciais ou industriais, pequenos motores de indução do tipo gaiola, de baixa potência, podem partir com ligação direta à rede, sem que se verifiquem quedas na tensão de suprimento e sem que se verifique no motor um grande aumento do período de aceleração, desde o repouso, até sua velocidade nominal.

Pelos elevados valores das correntes de partida as concessionárias de energia responsáveis pelo fornecimento de energia residencial e comercial estabelecem limites de potência para a partida a plena carga de grandes motores. Deve-se portanto utilizar sistemas de partida visando a diminuição da corrente de partida. No meio industrial, a adoção de um sistema de partida eficiente envolve

considerações quanto à capacidade da instalação, requisitos da carga a ser considerada, além da capacidade do sistema gerador. As próximas seções apresentam os principais métodos de partida utilizados com MITs.

IX.1.8.1 Partida com Tensão Reduzida com Autotransformador

Motores de indução trifásicos de tipo gaiola podem arrancar com tensão reduzida usando um único autotransformador (ou autocompensador) trifásico ou três transformadores trifásicos como mostra a figura 9. Os taps do autotransformador variam de 50 a 80% da tensão nominal. A chave tripolar de duas posições é colocada na posição de “partida” e deixada lá até que o motor tenha acelerado a carga até aproximadamente a velocidade nominal, sendo então imediatamente levada à posição “funcionamento”, aplicando-se a tensão total da rede.

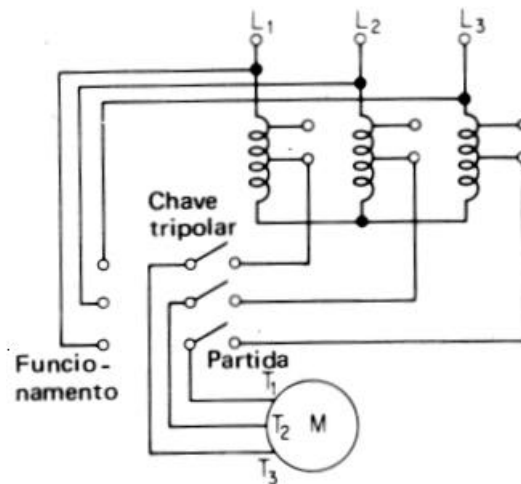


Figura 9 – Partida com tensão reduzida através de autotransformador

Exemplo 5: Um motor de indução trifásico, 220V, 15HP, rotor em gaiola, tem uma corrente nominal de 45 A e um corrente de partida de 270 A a tensão nominal. À tensão nominal, o torque de partida é de 165 N.m. Um autotransformador é usado na ligação do motor, utilizando-se na partida taps de 60%. Pede-se que se calcule:

- A corrente de partida do motor a tensão reduzida.
- A corrente de linha do motor, desprezando-se a corrente de excitação do transformador e as perdas.
- O torque de partida do motor a tensão reduzida.
- A corrente de linha na partida a tensão reduzida como porcentagem da corrente a tensão nominal.
- O torque na partida a tensão reduzida como porcentagem do torque a tensão nominal.

Solução:

a-) $I_p = 0,6 \cdot 270 = 162 \text{ A}$ (no motor)

b-) $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1} = 0,6 \Rightarrow I_1 = 0,6 \cdot I_2 \Rightarrow I_l = 0,6 \cdot 162 = 97,2 \text{ A}$ (na linha por efeito do autotransformador)

- c-) O torque na partida é diretamente proporcional ao quadrado da tensão aplicada:
 $T_{p1} = K.V_1^2 = K.220^2$. O torque de partida a tensão reduzida é proporcional ao quadrado da tensão reduzida: $T_{p2} = K.V_2^2 = K.(0,6.220)^2$.

$$\text{Então: } \frac{T_{P2}}{T_{P1}} = 0,6^2 \Rightarrow T_{P2} = 0,6^2 \cdot T_{P1} \Rightarrow T_{P2} = 0,6^2 \cdot 165 = 59,4 \text{ N.m}$$

d-) $\frac{97,2}{270} \cdot 100 \% = 36 \% .$

e-) $\frac{59,4}{165} \cdot 100 \% = 36 \% \quad (\text{mesmo valor$

do item anterior)

Como mostra o exemplo acima, uma redução na tensão aplicada na partida a 60 % da tensão nominal resulta numa redução da corrente de linha e do torque a valores correspondentes a 36 % dos valores nominais. Assim, um tap de 70 % causaria aproximadamente a redução à metade dos valores nominais, valor este, muito utilizado na prática.

IX.1.8.2 Partida Estrela-Triângulo

Em termos de simplicidade e custo, esta é a maneira mais conhecida de partida de um motor de indução. Para que se possa aplicar este método é necessário que o motor permita o acesso a seus terminais das bobinas do estator, de tal forma que seja possível efetuar-se a conexão estrela durante a partida, e delta na operação. Quando ligadas em estrela, a tensão imposta à cada bobina é de $E_L/\sqrt{3}$, ou seja, 57,7 % da tensão da linha. Assim, por meio de chaves como mostra a figura 10, é possível fazer partir um motor de indução em estrela, com pouco mais da metade da tensão nominal aplicada à cada bobina e posteriormente funcionar em delta com toda a tensão de linha. A corrente de linha para a partida fica reduzida a 1/3 da corrente nominal. O chaveamento da posição estrela para a posição delta deve ser feito tão rapidamente quanto possível para eliminar grandes correntes transitórias devidas a perda momentânea de potência.

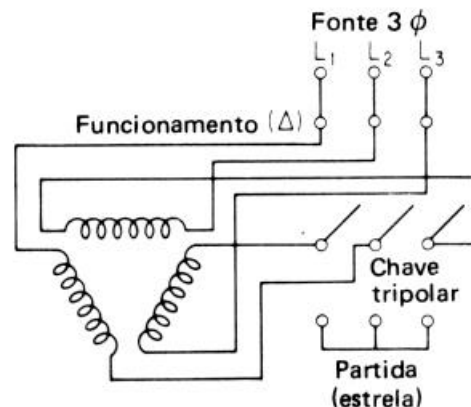


Figura 10 – Chave para partida estrela-triângulo

IX.1.8.3 Partida de Motor de Indução de Rotor Bobinado

O torque de partida do motor de indução de rotor bobinado pode ser ajustado por meio de resistências externas associadas ao circuito do rotor, ou seja através da conexão de resistores variáveis em série com cada bobina do rotor. Limitando-se a corrente no circuito do rotor, com torque adequado no instante da partida, a corrente de linha no estator é consideravelmente reduzida. A figura 11 mostra um esquema de tal motor, sem os anéis coletores e com os detalhes do sistema de controle composto de resistências.

Na posição “desligado”, mesmo com o motor energizado, o rotor não gira devido ao circuito do rotor estar aberto. O motor arranca ao primeiro contato da chave com a posição de máxima resistência. O motor irá acelerar na medida em que a manopla move-se no sentido horário, diminuindo-

se a resistência do rotor. Na posição final, o rotor é completamente curto-circuitado. Se o dispositivo for projetado de tal modo que as resistências permaneçam no circuito, o dispositivo de partida pode servir também como controlador de velocidade.

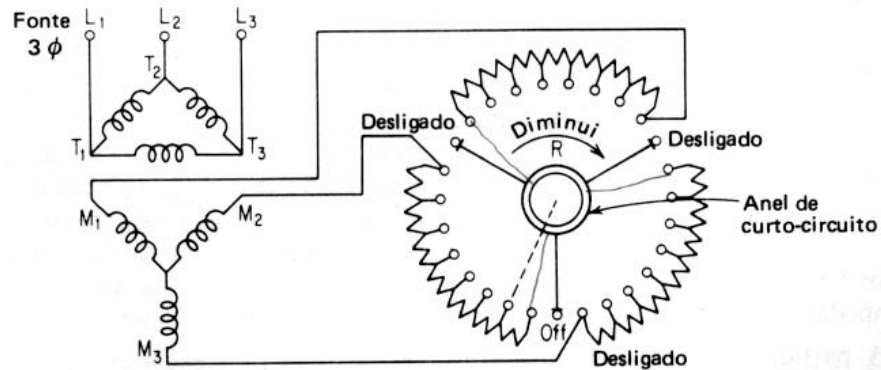


Figura 11 – Resistências para partida do MIT a rotor bobinado

IX.2 Motores de Indução Monofásicos (MIM)

Muitas vezes se tem instalações industriais e residenciais para as quais a alimentação é feita com duas fases ou fase-neutro, necessitando-se de motores monofásicos.

Os princípios básicos dos motores monofásicos são similares aos dos MIT já apresentados. Como só existem duas fases ou uma fase e um neutro, várias técnicas são utilizadas para produzir o campo magnético girante necessário para a partida dos motores de indução monofásicos. Este texto apresenta algumas delas e mostra também que uma vez que o rotor de um MIM começa a girar, acionado pelo campo girante, continuará a funcionar com a alimentação monofásica.

O rotor de um MIM normalmente é do tipo gaiola e não há, como no MIT, ligação física entre o rotor e o estator, havendo sim um entreferro uniforme entre eles. As ranhuras do estator são normalmente distribuídas e como um enrolamento monofásico simples não produz campo girante, nem torque de partida, este enrolamento é dividido em duas partes, sendo cada uma delas deslocada no espaço e no tempo e normalmente com características diferentes. Tem-se assim duas bobinas em paralelo, ambas ligadas à mesma fonte CA.

IX.2.1 Torque no MIM

Seja um MIM com rotor em gaiola e um enrolamento distribuído ao longo do estator. Considerando o rotor parado, a figura 15.a mostra o campo magnético resultante, num instante em que se tem o sentido instantâneo da esquerda para a direita. Os sentidos das correntes induzidas no rotor, por ação transformadora também são mostradas. Devido a lei de Lenz, estas correntes estão num sentido tal que se opõem ao campo que as produziu. Isto é verificado através do sentido do campo devido à corrente induzida nos condutores A e B.

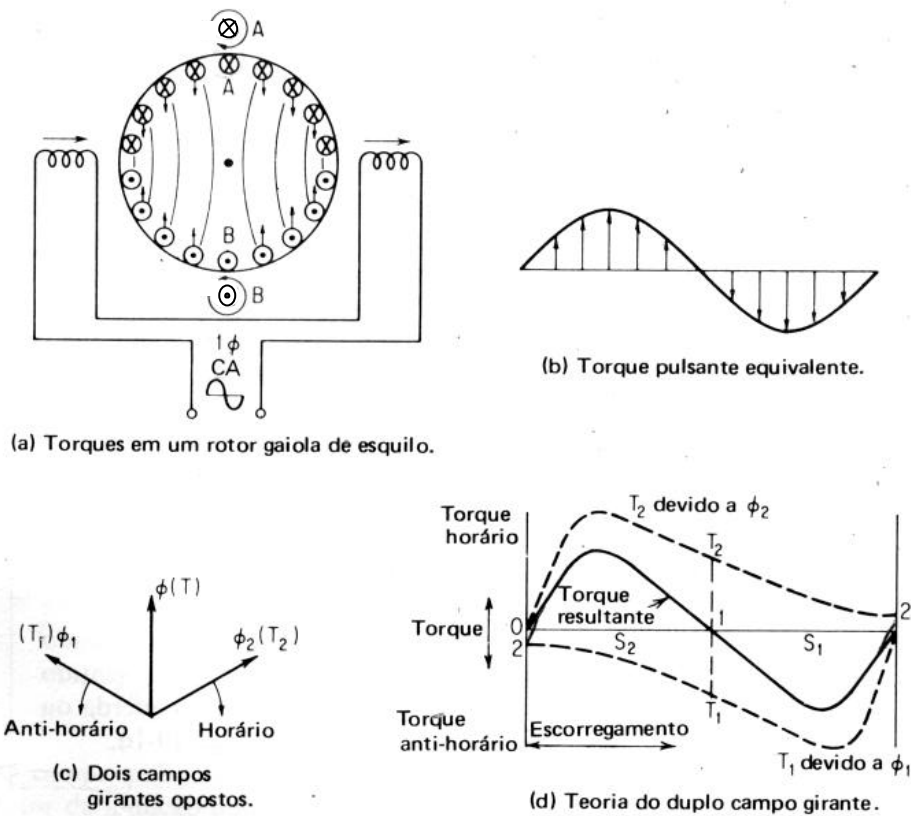


Figura 15 – Torque equilibrado no rotor de um MIM

O sentido do torque produzido pela interação entre a corrente induzida e o campo magnético em cada condutor do rotor é mostrado pela seta em cada condutor (regra da mão esquerda: polegar-força, indicador-campo, médio-corrente). O torque no sentido horário produzido pelos condutores da metade direita superior do rotor é equilibrado pelo torque anti-horário, associado aos condutores da mesma metade inferior, o mesmo acontecendo com a metade esquerda. O torque líquido é nulo. Quando muda o sentido da tensão CA, inverte-se tudo e da mesma maneira o torque líquido continua nulo.

A figura 15.b mostra o torque pulsante para um ciclo de tensão aplicada pela fonte CA em um condutor do rotor, cujo valor médio é nulo.

Qualquer torque pulsante pode também ser representado como consistindo de dois torques girando em oposição e tendo campos de igual magnitude e velocidade angular, como mostra a figura 15.c. Na figura 15.d são apresentados, em linha tracejada, os torques devidos a f_1 e f_2 . Cada um destes torques equivale ao torque resultante devido ao campo girante de um MIT, girando no sentido apropriado. A composição dos dois torques representa o torque efetivo aplicado ao MIM (linha cheia da figura 15.d). Conforme pode-se observar nesta figura, o torque resultante será nulo apenas quando o motor girar a velocidade síncrona em qualquer sentido ou quando o motor estiver parado, de tal modo que uma vez que o motor começa a girar num dado sentido, ele continuará a girar até que a alimentação seja retirada.

IX.2.2 Tipos de MIM em Função da Partida

IX.2.2.1 Motor de Indução de Fase Dividida (Partida à Resistência)

Neste tipo de motor, o estator é constituído por 2 enrolamentos deslocados de 90° no espaço, com características diferentes a fim de provocar um defasamento entre as correntes que circulam nestes enrolamentos. A figura 16 apresenta as diferenças entre os enrolamentos.

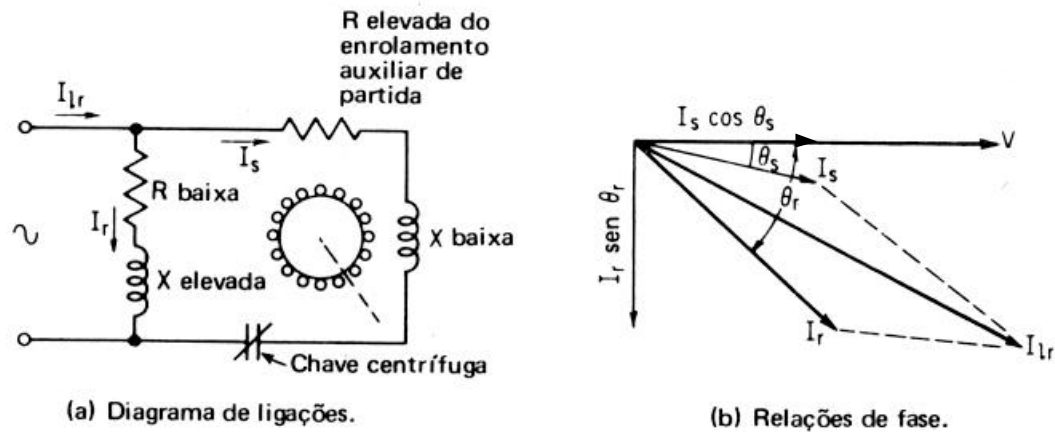


Figura 16 – Diagrama de ligações e relações de fase para o MIM de fase dividida

O enrolamento de partida tem menos espiras e é enrolado com fio de cobre de menor diâmetro que o enrolamento de funcionamento. Assim, este enrolamento de partida tem uma resistência elevada (fio fino: mais dificuldade a passagem da corrente) e uma baixa reatância. Inversamente, o enrolamento de funcionamento tem baixa resistência e elevada reatância.

As relações de fase das correntes de rotor bloqueado no instante da partida são vistas na figura 16.b. Se os enrolamentos estão deslocados de 90° no espaço e se as componentes das correntes em quadratura, que estão deslocadas de 90° no tempo, são praticamente iguais ($I_s \cos \theta_s = I_r \cos \theta_r$) um campo girante bifásico equivalente é produzido na partida. Este campo produz então um torque de partida suficiente para acelerar o rotor no sentido do campo bifásico equivalente girante.

Em funcionamento, a chave centrífuga abre a um escorregamento de cerca de 25% (correspondente ao torque máximo), e o motor acelera até atingir seu escorregamento nominal (a não abertura da chave implicará na queima do motor).

O MIM de fase dividida é, por suas características de construção, um motor não reversível, de baixo torque de partida, de difícil controle de velocidade e barulhento que é fabricado com potências menores que $3/4$ HP, e que pode ser usado em máquinas ferramentas, esmeris, máquinas de lavar, ventiladores, exaustores, compressores, etc.

IX.2.2.2 Motor de Fase Dividida a Capacitor

A fim de melhorar o torque de partida relativamente baixo do motor anterior, adiciona-se um capacitor ao enrolamento auxiliar, para produzir um defasamento mais próximo de 90° entre as correntes de partida e de funcionamento, conforme mostram as figuras 17.a e 17.b.

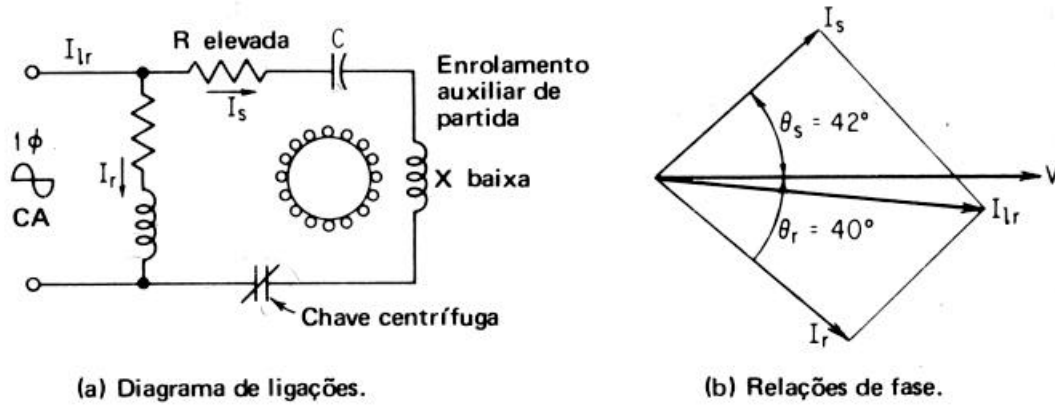


Figura 17 – Diagrama de ligações e relações de fase para o MIM a capacitor

Estes motores são reversíveis através da inversão da polaridade do enrolamento auxiliar em relação à do enrolamento principal, estabelecendo-se um campo rotacional bifásico no sentido oposto ao da rotação do rotor. Isto ocorre pois a defasagem entre as correntes dos enrolamentos é cerca de 82° , e uma vez efetuado a inversão, se tem um torque elevado no sentido oposto, fazendo o motor parar e inverter a rotação enquanto que nos motores da fase dividida com partida a resistência isto não ocorre pois a defasagem é de apenas cerca de 25° .

O MIM de fase dividida a capacitor é, por suas características de construção, um motor reversível, com corrente de partida reduzida e torque de partida cerca de 2,31 maior que o do motor de fase dividida simples. Estes motores são fabricados até a potência de 7,5 HP, sendo usados para acionar bombas, compressores, condicionadores de ar, máquinas de lavar de porte maior, etc.

IX.2.2.3 Motor de Fase Dividida com Capacitor Permanente

Este tipo de motor possui dois enrolamentos permanentes idênticos, sem chave centrífuga, tendo um capacitor a óleo conectado em um deles. O valor do capacitor é baseado nas condições reais de funcionamento do motor e não nas condições de partida. Como consequência este tipo de motor apresenta torques de partida e de funcionamento muito baixos, sendo também mais sensível às variações de tensão. A figura 18 mostra o diagrama de ligações (a), as relações de fase (b), e a característica de ajuste de velocidade (c).

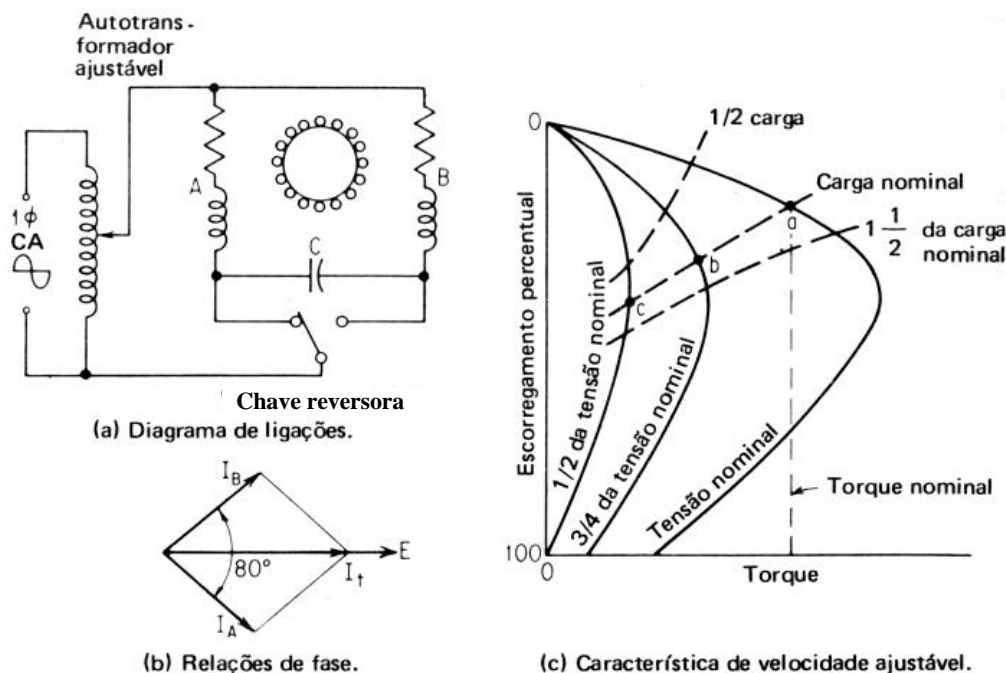


Figura 18 – Diagrama de ligações, relações de fase e velocidade x torque

O MIM de fase dividida com capacitor permanente é, por suas características de construção, um motor facilmente reversível (devido ao baixo torque de funcionamento), de operação silenciosa, com possibilidade de controle de velocidade, usado em ventiladores e exaustores, máquinas de escritório e unidades de aquecimento.

IX.2.2.4 Motor de Indução de Pólo Ranhurado

Este tipo de motor apresenta peças polares especiais, não necessitando de chave centrífuga, nem de enrolamento auxiliar. A figura 19.a apresenta a construção geral de um motor bipolar de pólos ranhurados salientes. As peças polares especiais consistem das laminações e de uma bobina em curto-circuito colocada numa ranhura, e enrolada em torno do segmento menor da peça polar.

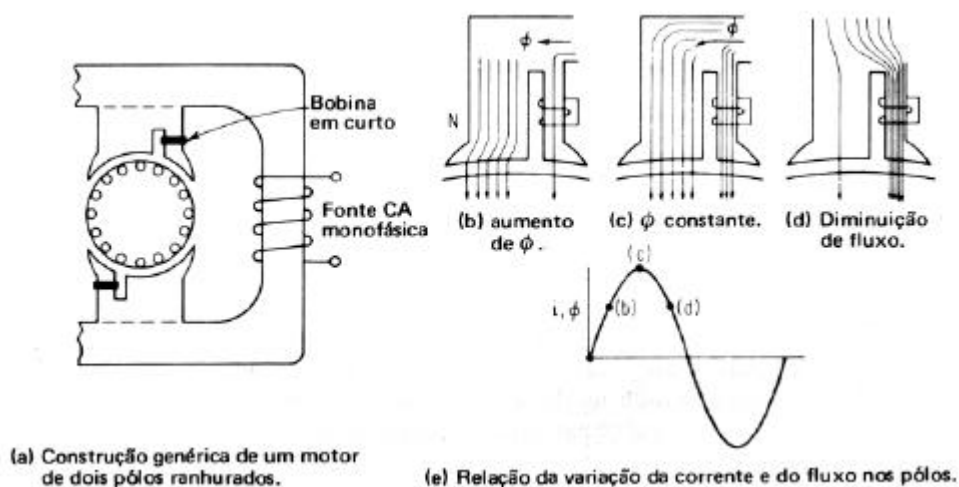


Figura 19 – Construção genérica e princípio do MIM de pólo ranhurado

Como mostra a figura 19.b, quando o fluxo nos campos polares tende a aumentar, é induzida uma corrente na bobina curto-circuitada, que pela Lei de Lenz, se opõe à força e ao fluxo que a

produziu. Assim, conforme o fluxo aumenta em cada pólo, haverá uma diminuição no segmento correspondente a bobina. Logo a bobina provoca uma divisão no fluxo de tal modo que quando este diminui (item d da figura), o fluxo se concentra no segmento da bobina. No ponto c, como se vê na figura 19.e não há tensão induzida na bobina pois não há variação no fluxo. O resultado é que o fluxo ora diminui, ora se concentra no segmento de pólo ranhurado, estando sempre atrasado no tempo em relação ao fluxo na parte principal. Desta maneira tem-se um campo magnético girante, provocando um desequilíbrio nos torques devido aos condutores do rotor de modo tal que o torque no sentido horário excede o torque no sentido anti-horário ou vice-versa, provocando a rotação do rotor no sentido do campo girante. Para o motor visto na figura 19, a rotação se dá no sentido horário, uma vez que o fluxo no segmento ranhurado se atrasa em relação ao fluxo principal.

O MIM de polo ranhurado é, por suas características de construção e funcionamento utilizado em toca-discos, projetores cinematográficos, máquinas para cortar frios, pequenos ventiladores, etc.

IX.2.2.5 Motor Universal

Sempre houve necessidade de um motor que pudesse ser utilizado em aplicações portáteis e que pudesse funcionar em quaisquer frequências, a partir de fontes de energia diferentes, ou seja níveis de tensão diferentes.

O motor universal é projetado para frequências comerciais variando de 0 até 60 Hz e para tensões de 1,5 a 250 V. A figura 20.a apresenta o esquema do motor, que tem o rotor em série com a bobina do estator, sendo a corrente conduzida ao rotor por meio de escovas, de modo que quando se inverte a polaridade da fonte, invertem-se também a polaridade do campo e o sentido das correntes na armadura (rotor), continuando a ser produzido torque no mesmo sentido como se vê nos itens (b) e (c) da figura.

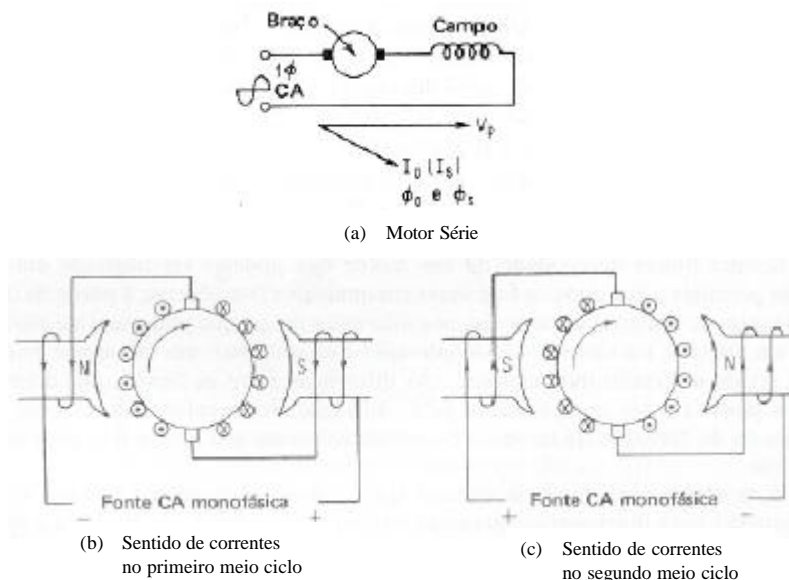


Figura 20 – Operação do motor série ou universal

O motor universal é, por suas características de construção, um motor fabricado até a potência de 3/4 HP, podem a vazio apresentar uma velocidade elevada, necessitando de um sistema de engrenagens apropriado para que isto não ocorra. Podem ainda operar em qualquer frequência, em vários níveis de tensão, sendo usados em barbeadores elétricos, máquinas de costura, furadeiras, secadores de cabelo, aspiradores de pó, etc.

IX.3 Máquina Síncrona

A máquina síncrona, de acordo com a localização do campo, pode ser de dois tipos. Na de “campo fixo” o estator é constituído por uma estrutura cilíndrica de aço ou ferro fundido ou laminado, permitindo o retorno do fluxo para o circuito magnético criado pelos enrolamentos de campo, consistindo de espiras enroladas nas sapatas polares e alimentadas por corrente contínua. O enrolamento da armadura colocado no rotor é levado a anéis coletores conforme mostra a figura 21 (a), alimentada por CA caso a máquina seja utilizada como motor. A figura 21 (b) mostra um conversor síncrono, que é utilizado para converter corrente contínua em alternada e vice versa. Se corrente contínua é aplicada às escovas e potência mecânica ao seu eixo, a máquina funciona como gerador CA.

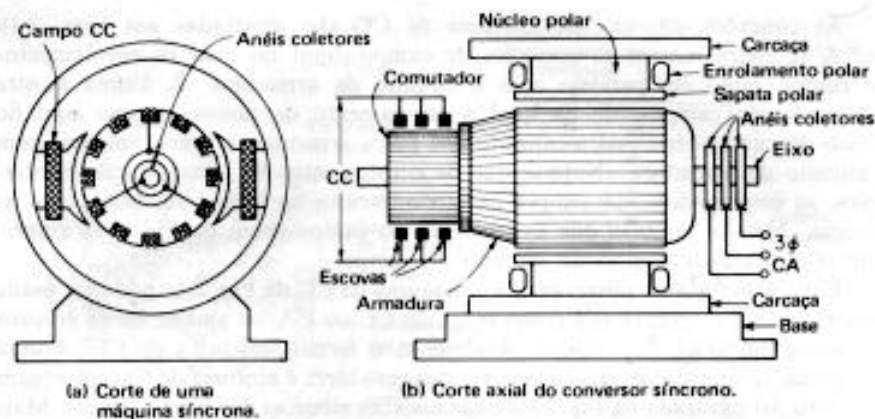


Figura 21 – Máquina síncrona de campo fixo

Na máquina síncrona de “campo móvel”, figura 22, o enrolamento de campo é colocado no rotor e alimentado por uma fonte de CC através de dois anéis coletores e a armadura é idêntica ao estator do MIT, alimentada por fonte CA trifásica, no caso de funcionamento como motor ou à carga, quando potência mecânica é fornecida ao seu eixo, no caso de funcionamento como gerador. Na figura 22 temos dois tipos de rotor: o de pólos salientes (a) e o de pólos não salientes (b), neste caso, de 4 pólos, sendo mostradas as conexões da armadura.

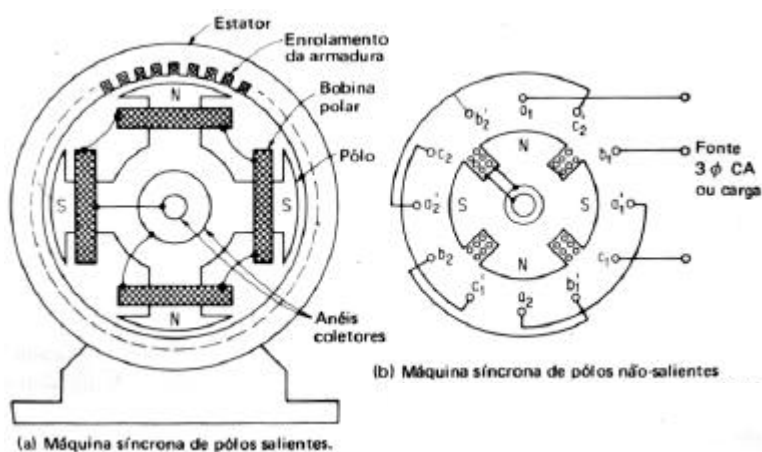


Figura 22 – Máquina síncrona de campo móvel

IX.3.1 Motor Síncrono (MS)

O motor síncrono possui o estator idêntico ao do motor de indução trifásico, que ao ser alimentado por tensão alternada trifásica produz o campo girante constante, girando na velocidade síncrona. Existe um outro campo no rotor, criado pela alimentação das bobinas das sapatas polares por tensão contínua através dos anéis coletores. Conforme veremos a seguir, o MS por si só não tem

torque de partida, devendo ser acelerado por algum meio auxiliar. Uma maneira é utilizar o enrolamento amortecedor ou de compensação ou ainda em gaiola de esquilo para a partida, que consiste de barras sólidas embutidas na superfície da face polar e curto-circuitadas em cada extremidade por meio de anéis conforme mostra a figura 23.

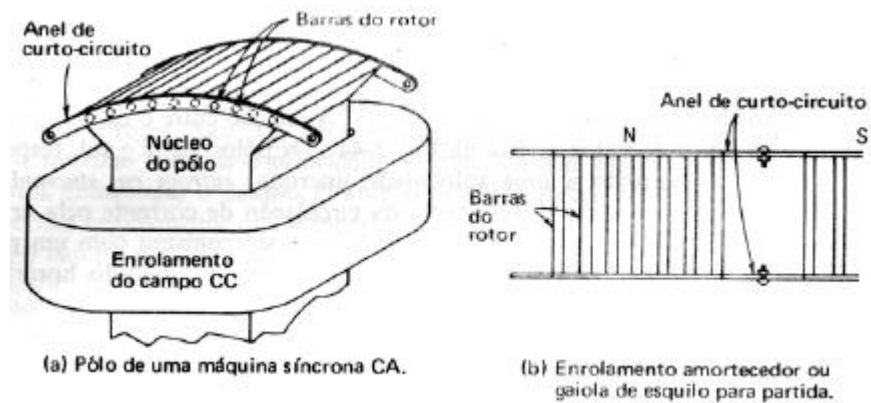


Figura 23 – Pólo de um MS mostrando o enrolamento de compensação

IX.3.1.1 Operação do Motor Síncrono

Seja uma tensão trifásica aplicada ao estator de um motor síncrono, num instante em que as correntes em cada bobina são mostradas na figura 24 (a), com a corrente na bobina a-a' na posição 1 da figura 24 (b).

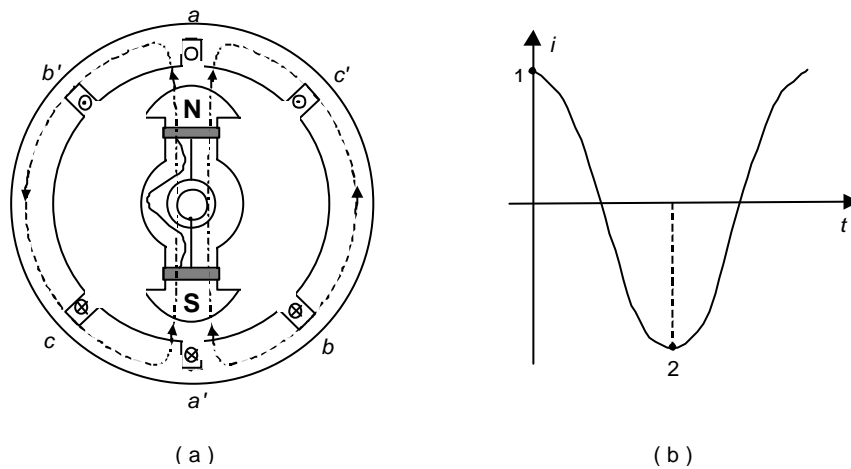


Figura 24 – Rotor parado e corrente na bobina a-a'

Devido aos pólos criados pelo campo (motor de 2 pólos) um condutor se encontra sobre o pólo N e outro sob o pólo S. Da interação entre a corrente no condutores (superior e inferior) e os campos, como o condutor é fixo, a face polar superior fica sujeito a um torque para a direita, enquanto que a face polar inferior fica sujeito a um torque para a esquerda, como mostra a figura 25.a. Portanto, o rotor fica sujeito a um torque que tenderia a move-lo no sentido horário. Para a corrente na posição 2 da figura 24.b se tem a inversão da corrente e o rotor fica sujeito a um torque que tenderia a move-lo no sentido anti-horário, em consequência das interações mostradas na figura 25.b.

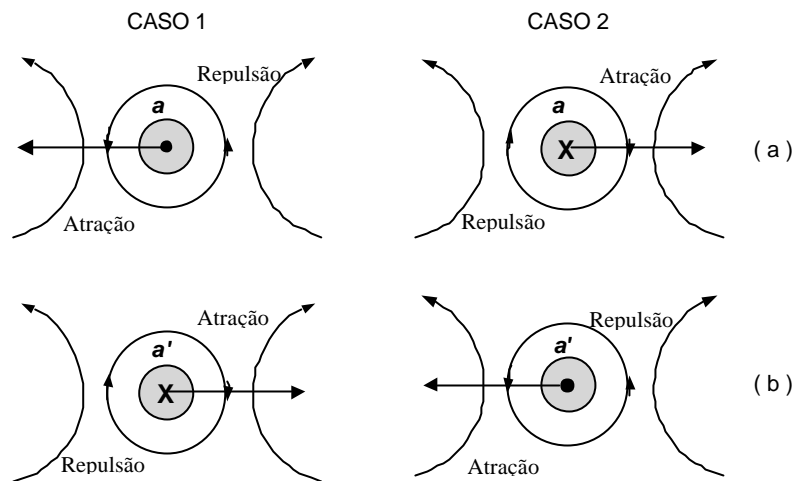


Figura 25 – Interações entre linhas de campo

Devido à inércia do rotor, o torque produzido em um segundo é nulo pois o rotor foi efetivamente atraído alternativamente, nos sentidos horário e anti-horário, 60 vezes naquele segundo, para a frequência de 60 Hz.

Se o rotor for levado até a velocidade síncrona, no momento em que se inverte o sentido da corrente, inverte-se o campo, o que fará com que se tenha um torque líquido. Os pólos N e S do rotor, girando a uma velocidade síncrona, entram em sincronismo com o campo magnético girante. Se for adicionada uma carga ao eixo da máquina, o contra-torque criado por ela fará com que o rotor se atrase momentaneamente, porém se uma carga excessiva for adicionada a ponto do rotor sair do sincronismo, o motor pára de funcionar. Logo um motor síncrono ou funciona à velocidade síncrona ou não funciona.

IX.3.1.2 Partida de Motores Síncronos

É evidente, então, que se deve trazer o rotor a uma velocidade suficiente próxima da síncrona, para ocorrer o sincronismo com o campo girante. Alguns dos meios para que isto aconteça são:

- utilizar um motor acoplado ao eixo do MS, que se for de indução deve ter, no mínimo, um par de pólos a menos que os do motor síncrono.
- a utilização dos enrolamentos de compensação.

Na partida com enrolamentos de compensação deve-se curto-circuitar o enrolamento de CC enquanto se aplica CA ao estator, trazendo o motor até sua velocidade a vazio como um motor de indução. Em seguida remove-se o curto-circuito do campo e aplica-se tensão CC à este enrolamento, ajustando-se a corrente (pode-se variar o nível de tensão CC ou o valor da resistência de campo) para que ela seja mínima.

Na partida sob carga, a melhor técnica é utilizar um rotor bobinado em lugar do enrolamento em gaiola nas faces polares, ou seja, o chamado enrolamento de compensação tipo rotor bobinado. A figura 26 mostra um diagrama esquemático, onde se utiliza acoplado ao enrolamento de campo, uma resistência trifásica. O motor parte com toda a resistência externa por fase e com o enrolamento de campo curto-circuitado. A medida que se diminui a resistência, o rotor se aproxima da velocidade síncrona e após ela ser atingida, aplica-se uma tensão contínua ao campo.

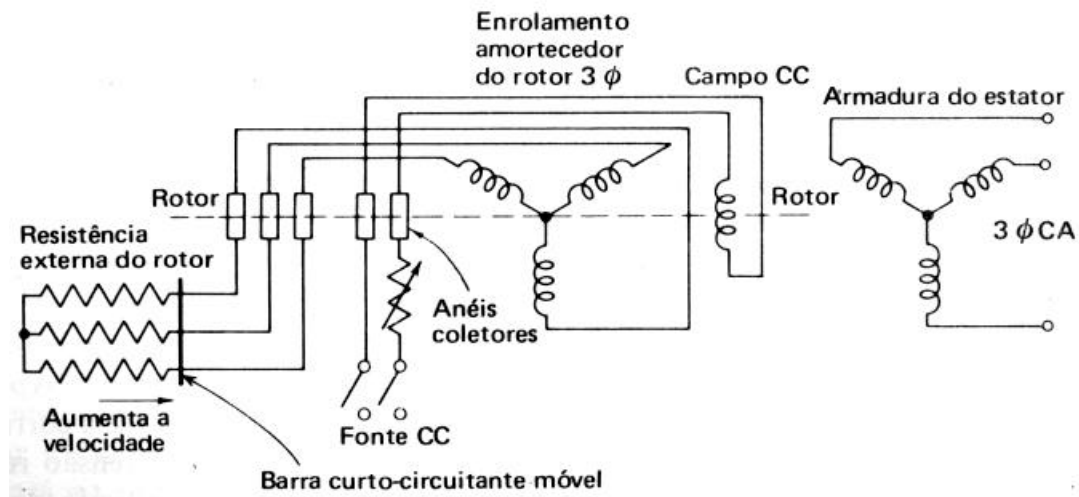


Figura 26 – Diagrama para partida do motor síncrono bobinado sob carga

IX.3.1.3 Características de Funcionamento

O MS tem duas fontes de excitação possíveis: a da fonte trifásica CA na armadura e a de CC no enrolamento de campo. Se a corrente de campo é exatamente suficiente para produzir a fmm necessária, não se necessitando de corrente de magnetização ou potência reativa, o motor funciona com fator de potência unitário. Se a corrente de campo é menor que a suficiente (se diz que o motor está subexcitado) a deficiência em fmm precisa ser suprida pela armadura, o motor funciona com fator de potência atrasado. Se a corrente de campo é maior que o necessário (se diz que o motor esta sobreexcitado) o excesso de fmm deve ser contrabalanceado na armadura e uma componente de corrente adiantada está presente, o motor funciona com fator de potência adiantado.

O motor síncrono quando funcionando na condição de sobreexcitado e a vazio recebe o nome de condensador síncrono e desempenha a mesma função de um banco de capacitores, sendo mais econômico que os capacitores estáticos.