

2 – MOTORES TRIFÁSICOS DE CORRENTE ALTERNADA

2.1 – TIPOS DE MOTORES DE CORRENTE ALTERNADA

Como a maior parte da energia elétrica produzida é de corrente alternada, muitos são os tipos de motores projetados para trabalharem com este tipo de corrente. Os motores CA, em sua maioria, têm características de funcionamento semelhantes às dos motores CC, embora o seu funcionamento esteja menos sujeito a defeitos. Isto porque os motores CC apresentam problemas na comutação que envolve as escovas, os porta-escovas, o plano neutro etc. Muitos tipos de motores CA nem mesmo usam anéis coletores, e assim *podem proporcionar um funcionamento livre de defeitos durante períodos bastante longos*. Contudo, os motores CA só trabalham bem dentro de uma faixa estreita de velocidades.

Os motores CA apresentam características excelentes para a operação a velocidades constantes, porque a velocidade é determinada pela frequência da rede de alimentação e o número de pólos do motor. Existem também motores CA cuja velocidade pode ser variada dentro de certos limites.

Os motores CA podem ser trifásicos ou monofásicos. O princípio de funcionamento é o mesmo em todos os casos, isto é, o de um campo magnético girante que provoca a rotação do rotor da máquina.

Os motores CA são classificados geralmente em dois tipos principais: (1) *motores de indução* e (2) *motores síncronos*. O motor síncrono é um alternador funcionando como motor; aplica-se CA ao estator e CC ao rotor. O motor de indução difere do motor síncrono por não ter o seu rotor ligado a qualquer fonte de alimentação, sendo o seu rotor alimentado por indução magnética.

O motor série de CA, amplamente usado em alguns eletrodomésticos e pequenas ferramentas, é uma versão modificada do motor série de CC. Apresenta a vantagem da velocidade ajustável e também pode ser empregado em aplicações nas quais se usa o motor série de CC.

Dos dois tipos básicos de motores CA citados, *o motor de indução é o de maior aplicação*.

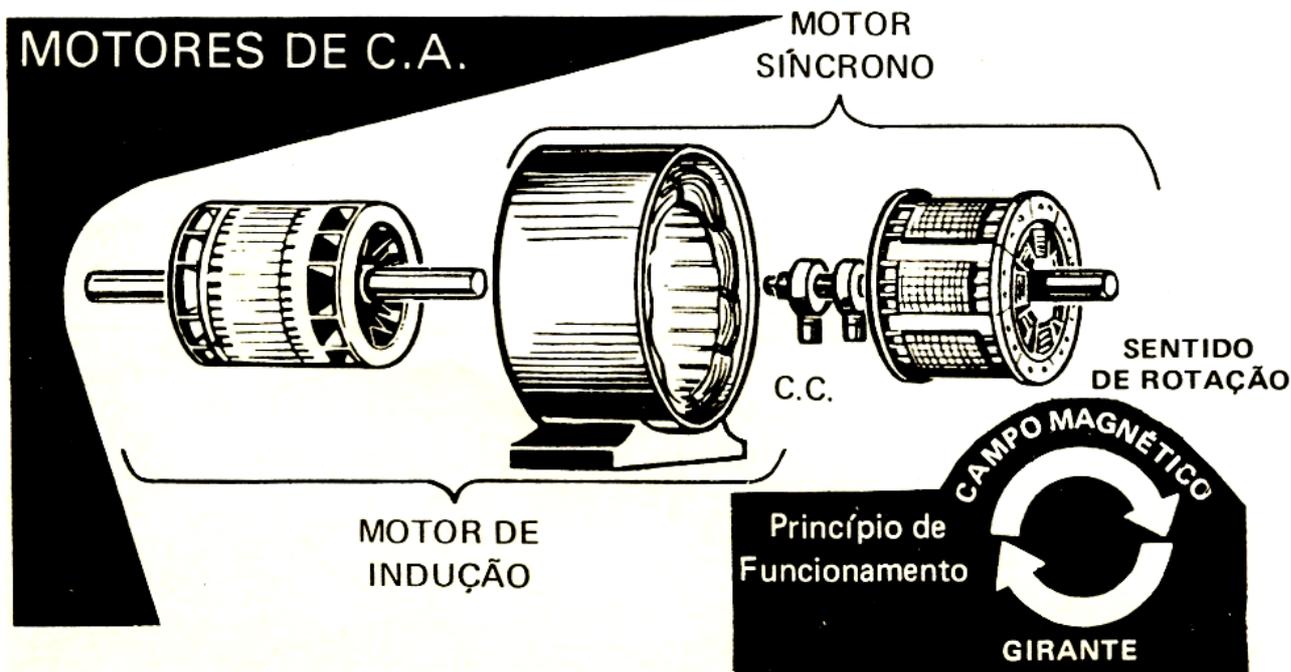


Fig. 2-1 : Principais tipos de motores de corrente alternada (indução e síncrono).

2.2 – PRODUÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE NO ESTATOR

Antes de aprender como um campo magnético girante obriga o rotor energizado a girar, você deve compreender como é produzido um campo magnético girante. Isto é mais fácil de ser conseguido com um sistema trifásico, de modo que iniciaremos com ele. A Fig. 2-2 apresenta um estator trifásico, alimentado por uma fonte CA trifásica. Os enrolamentos estão ligados em triângulo. As duas bobinas de cada fase estão enroladas no mesmo sentido.

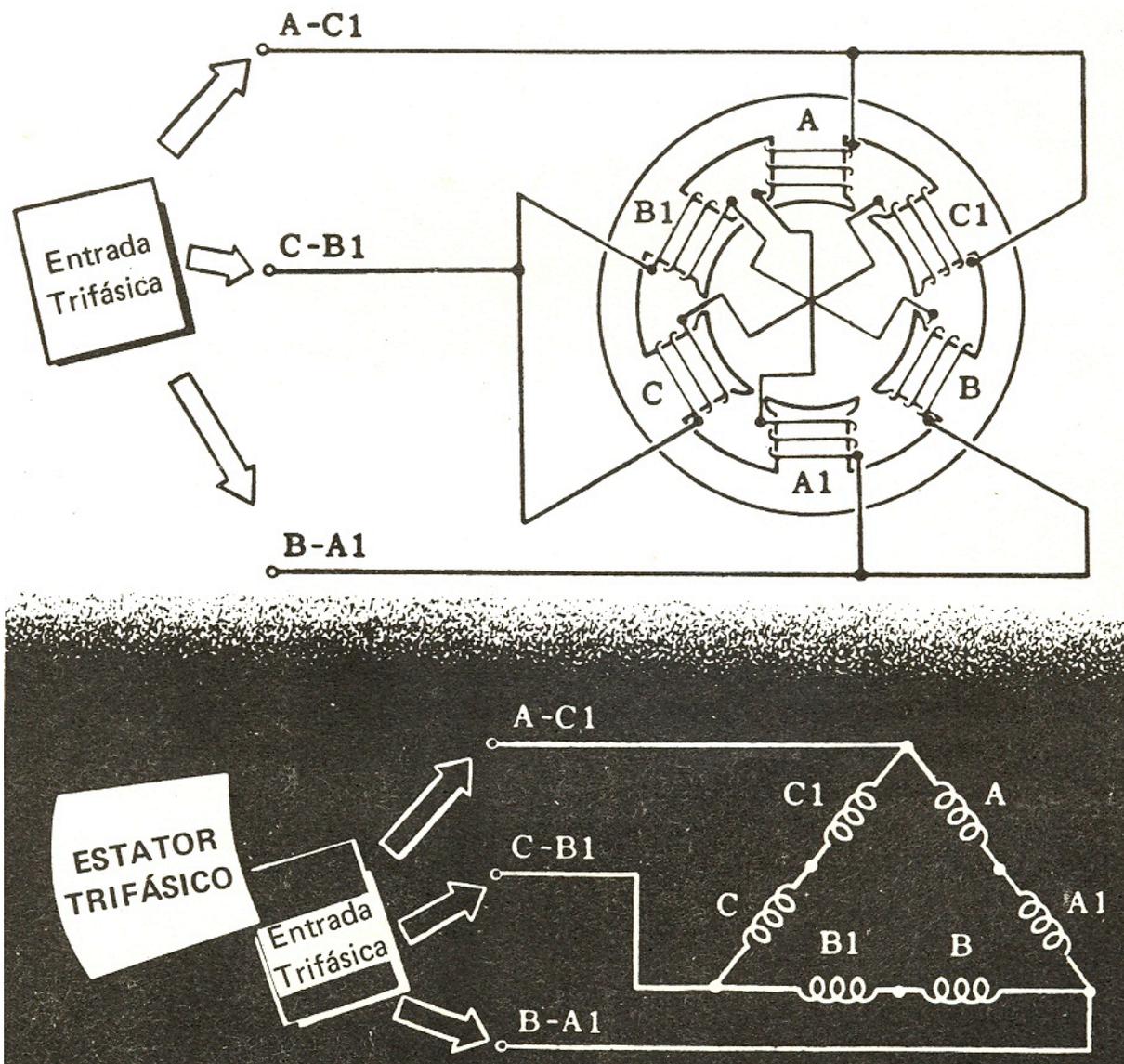


Fig. 2-2 : Estator trifásico de um motor CA com os enrolamentos ligados em triângulo.

O campo magnético gerado por uma bobina depende da corrente que passa por ela naquele instante. Se a corrente for nula não haverá campo magnético. Se a corrente for máxima, o campo também será máximo. Como as correntes nos três enrolamentos estão defasadas de 120° elétricos, os campos magnéticos que produzem apresentam a mesma defasagem. Os três campos combinam-se em um único campo que atua sobre o rotor. Observe na Fig. 2-3 que os campos se combinam produzindo um campo único, cuja posição varia com o tempo. Ao fim de um ciclo da corrente alternada, o campo terá girado 360° , ou uma rotação completa.

A Fig. 2-3 mostra as formas de onda das três correntes aplicadas ao estator. As correntes estão defasadas de 120° elétricos no tempo. As formas de ondas podem representar tanto as correntes como os campos magnéticos gerados pelas três fases ou correntes das fases. As formas de ondas foram designadas com as mesmas letras das fases correspondentes.

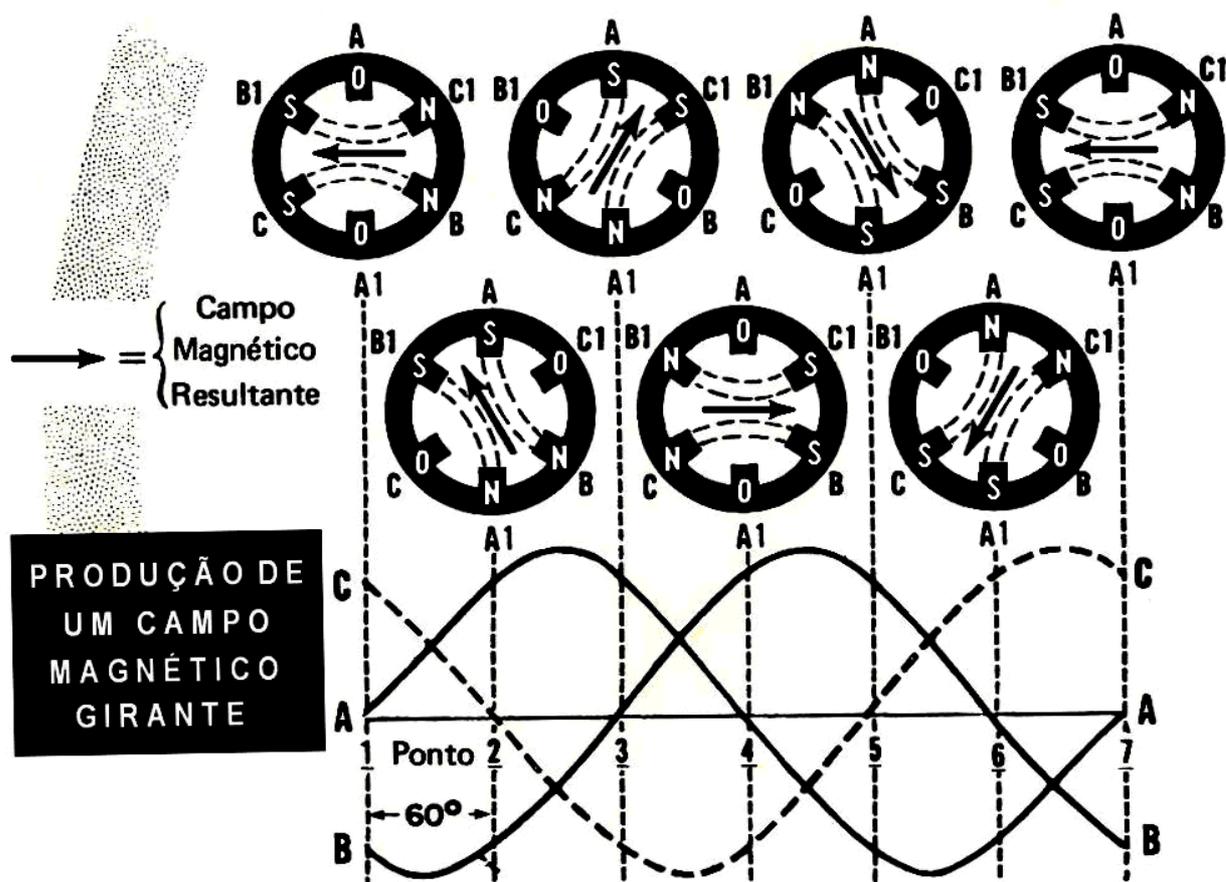


Fig. 2-3 : Produção do campo magnético girante no estator de um motor CA trifásico.

Usando as formas de ondas, podemos combinar os campos magnéticos gerados, em cada $1/6$ de ciclo (60° elétricos), para determinar o sentido do campo magnético resultante. No ponto 1, C é positiva e B é negativa. Isto significa que há correntes em sentidos opostos nas fases B e C . Deste modo, fica estabelecida a polaridade magnética nos enrolamentos das fases B e C . A polaridade é mostrada no diagrama simplificado acima do ponto 1 (na Fig. 2-3). Observe que $B1$ é um pólo sul e B um pólo norte; C é um pólo sul e $C1$ um pólo norte.

Como no ponto 1 não há corrente através da fase A , seu campo magnético é nulo. Os campos magnéticos dos pólos $C1$ e B dirigem-se aos pólos sul mais próximos, respectivamente $B1$ e C . Os campos magnéticos de B e C têm amplitudes iguais, e o campo magnético resultante fica entre os dois campos, com o sentido indicado pela seta horizontal, apontando da direita para a esquerda.

No ponto 2, 60° elétricos após, as correntes aplicadas às fases A e B são iguais e opostas, e a corrente na fase C é nula. Podemos verificar que o campo magnético resultante girou 60° geométricos. No ponto 3, a fase B tem o valor zero, e o campo resultante tornou a girar 60° . Dos pontos 1 a 7 (correspondendo a um ciclo de CA), podemos verificar que o campo magnético resultante gira 360° , o que ocorrerá sempre que for aplicado no estator um ciclo completo da tensão alternada.

Conclui-se que um campo magnético girante é produzido sempre que se aplica uma tensão alternada trifásica aos três enrolamentos simetricamente dispostos no estator.

Podemos aplicar raciocínio semelhante e mostrar que um sistema bifásico também produzirá um campo magnético girante. Na realidade, qualquer número de fases produzirá um campo girante. Com um sistema monofásico, contudo, não haverá partida, conforme estudaremos mais adiante. Portanto, nos motores monofásicos serão necessários arranjos especiais para fazê-los operar (partir) adequadamente.

2.3 – MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO (OU MOTOR ASSÍNCRONO)

O motor de indução é o motor CA mais usado, por causa de sua simplicidade, construção robusta, baixo custo de fabricação e boas características de funcionamento. Estas características do motor de indução resultam do fato de ser o rotor uma unidade auto-suficiente que não necessita de conexões externas. O nome do motor de indução é derivado do fato de serem *induzidas* correntes alternadas no circuito do rotor, pelo campo magnético girante produzido nas bobinas do estator.

2.3.1 – Tipos de Rotores Utilizados nos Motores de Indução Trifásicos

A construção do estator do motor de indução é praticamente igual à do estator do motor síncrono, mas os seus rotores são completamente diferentes. O rotor do motor de indução é um cilindro laminado, com ranhuras na superfície. Os enrolamentos colocados nessas ranhuras podem ser de dois tipos. O tipo mais comum é o de *rotor de gaiola*; consiste de barras de cobre, de grande seção, unidas em cada extremidade por um anel de cobre ou de bronze. Não há necessidade de isolamento entre o núcleo do rotor e as barras, porque as tensões induzidas nas barras do rotor são muito baixas. O entreferro entre o rotor e o estator é muito pequeno, para se obter a máxima intensidade de campo. O outro tipo de rotor apresenta bobinas colocadas nas ranhuras e é conhecido como *rotor bobinado* (ou rotor enrolado).

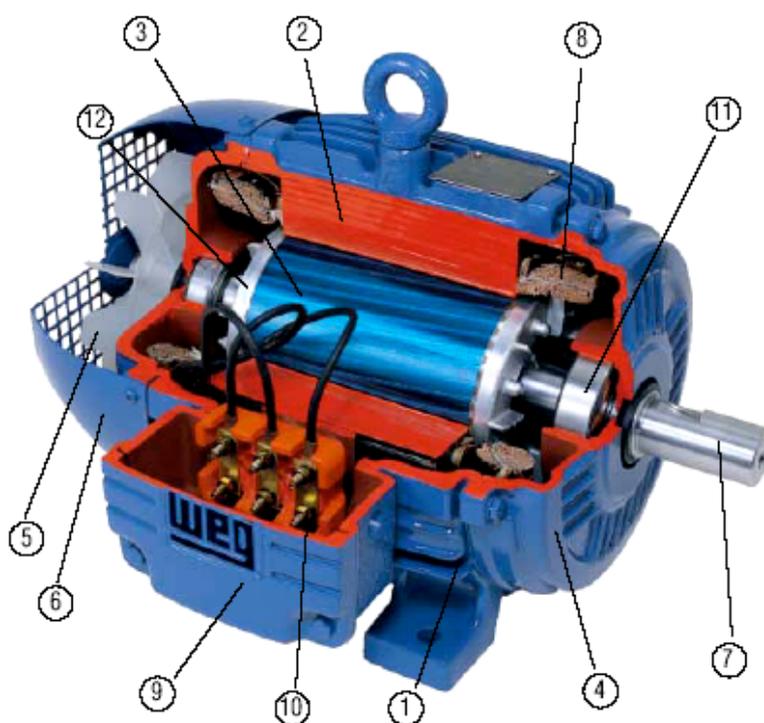


(a) Rotor tipo gaiola.



(b) Rotor tipo bobinado (ou enrolado).

Fig. 2-4 : Os dois tipos de rotores utilizados nos motores de indução.



Estator:

- (1) Carcaça;
- (2) Núcleo magnético;
- (8) Enrolamento trifásico.

Rotor:

- (7) Eixo;
- (3) Núcleo magnético;
- (12) Barras e anéis de curto-circuito.

Outras partes do motor:

- (4) Tampa dianteira;
 - (5) Ventilador;
 - (6) Tampa defletora;
 - (9) Caixa de ligação;
 - (10) Terminais de ligação;
 - (11) Rolamentos (mancais).
- * Não esquecer do entreferro.

Fig. 2-5 : Vista em corte de um motor de indução trifásico com rotor de gaiola.

O rotor de um motor de rotor de gaiola tem um núcleo de lâminas de aço com os condutores dispostos paralelamente ao eixo e entranhados nas fendas em volta do perímetro do núcleo. Os condutores do rotor não são isolados do núcleo. Os condutores do rotor são todos curto-circuitados através de anéis terminais contínuos situados nas extremidades do rotor. Se o núcleo magnético não estivesse presente, os condutores do rotor e os seus anéis terminais de curto-circuito se pareceriam com uma gaiola giratória.

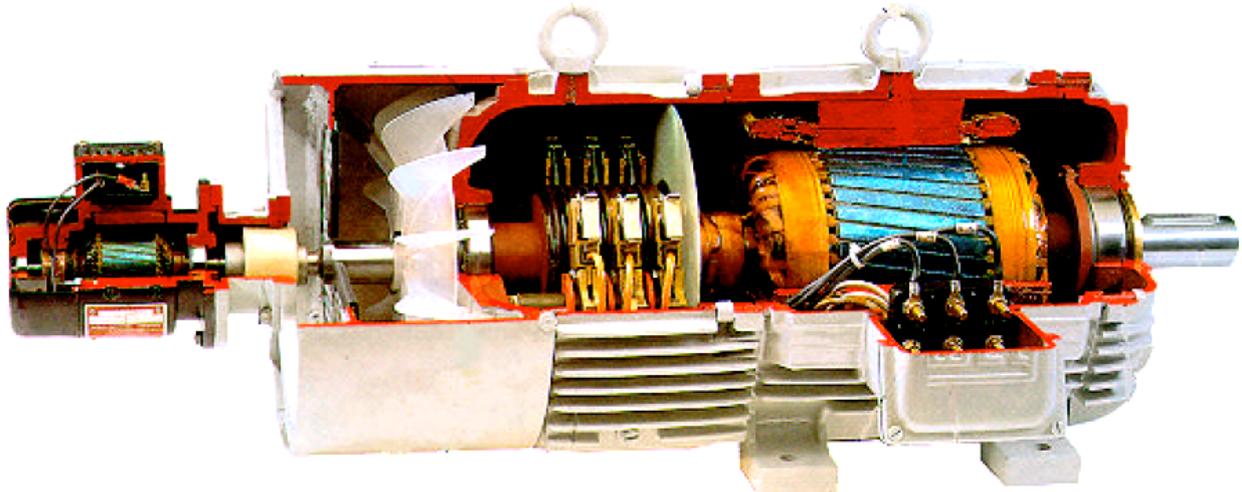
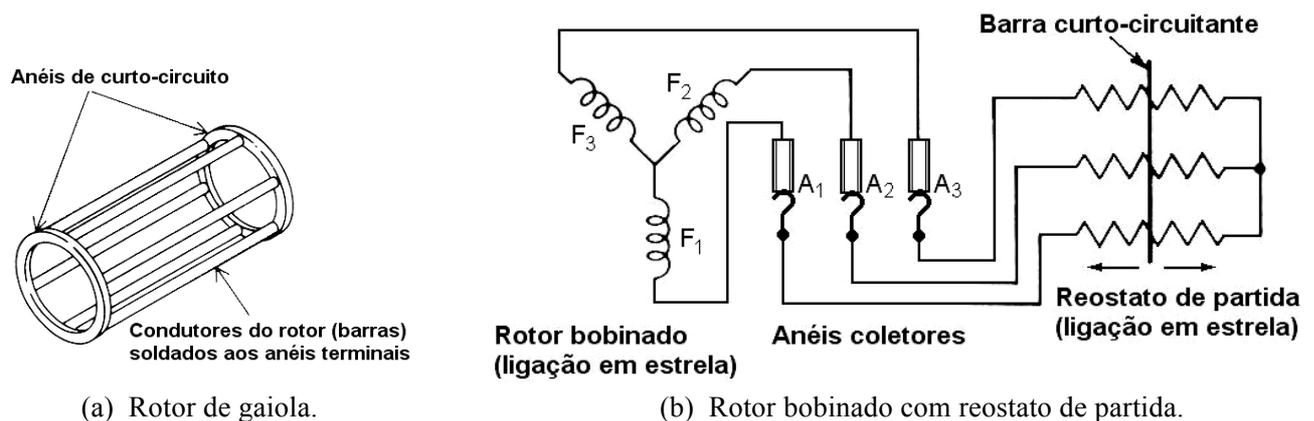


Fig. 2-6 : Vista em corte de um motor de indução trifásico com rotor bobinado (ou motor de anéis).

O rotor de um motor com rotor bobinado é envolvido por um enrolamento isolado semelhante ao enrolamento do estator. Os enrolamentos de fase do rotor (trifásico) são trazidos para o exterior através de três anéis coletores montados sobre o eixo do motor (Fig. 2-6). O enrolamento do rotor não está ligado a nenhuma fonte de alimentação. Os anéis coletores e as escovas constituem simplesmente uma forma de se ligar resistências variáveis externas, em série, com o circuito do rotor. As resistências variáveis (uma para cada anel coletor) proporcionam um meio para aumentar a resistência do rotor durante a partida, a fim de melhorar suas características de partida. Quando o motor atinge sua velocidade normal, os enrolamentos são curto-circuitados e o funcionamento passa a ser semelhante ao de um rotor de gaiola. As resistências variáveis, também permitem controlar a corrente no rotor e a velocidade do motor.



(a) Rotor de gaiola.

(b) Rotor bobinado com reostato de partida.

Fig. 2-7 : Representação do circuito elétrico dos dois tipos de rotores do motor de indução.

2.3.2 – Tipos de Porta-Escovas Utilizados nos Motores de Rotor Bobinado

A) Porta-Escovas Fixo:

No porta-escovas do tipo fixo as escovas permanecem em contato com o coletor permanentemente, pressionadas por molas do tipo pressão constante. Neste tipo de porta-escovas as escovas têm sua vida útil limitada em função de um contato permanente com os anéis coletores. Fatores que influenciam na vida útil das escovas são: percentual da carga que o motor trabalha, tipo ou qualidade das escovas, ambiente da instalação e outros. Para esta configuração todo o conjunto, coletor, escovas e porta-escovas são dimensionados para suportar as condições de partida e as de regime contínuo.

B) Porta-Escovas com Sistema Motorizado de Levantamento das Escovas:

As características mecânicas são similares ao porta-escovas do tipo fixo, sendo que o levantamento das escovas é realizado por um dispositivo motorizado (ou manual), o qual permite o levantamento das mesmas e o curto-circuito dos anéis, através de um controle remoto e/ou local. A seqüência de atuação do dispositivo de levantamento das escovas é o seguinte: o motor é acionado, e este através de um redutor aciona um anel que coloca as três fases em curto-circuito. Somente após essa operação todas as escovas são levantadas ou afastadas em relação ao coletor. Para baixar as escovas e colocar novamente o reostato em contato com o rotor, a seqüência de operação é a inversa da informada acima. A operação de um motor com rotor bobinado curto-circuitado é igual a de um motor com rotor de gaiola. A manutenção é bastante reduzida porque não há o desgaste das escovas. Para esta configuração o conjunto, coletor, escovas e porta-escova são dimensionados para suportar as condições de partida. Um motor que possui um dispositivo motorizado de levantamento de escovas não pode operar continuamente com as escovas baixadas, a não ser que esta condição tenha sido informada inicialmente antes da construção. A utilização desse dispositivo é recomendada somente quando a aplicação requerer poucas partidas por dia, ou em torno de duas (02) partidas por dia.



(a) Porta-escovas fixo.



(b) Dispositivo de levantamento automático.

Fig. 2-8 : Tipos de porta-escovas utilizados nos motores de rotor bobinado.**2.3.3 – Princípio de Funcionamento do Motor de Indução Trifásico**

O motor de indução é o tipo de motor CA mais comumente usado pela sua construção bastante simples, por ser muito resistente e por possuir boas características de funcionamento. Ele é constituído basicamente por duas partes: o estator e o rotor. O estator está ligado à fonte de alimentação CA. O rotor não está ligado eletricamente a nenhuma fonte de alimentação. O tipo mais importante de motor de indução é o motor trifásico. Quando o enrolamento do estator é energizado através de uma alimentação trifásica, cria-se um campo magnético girante. À medida que o campo varre os condutores do rotor, é induzida uma *fem* nesses condutores ocasionando o aparecimento de uma corrente elétrica nos condutores. Os condutores do rotor, percorridos por corrente elétrica, interagem com o campo magnético girante do estator para produzir um torque eletromagnético que atua sobre os condutores do rotor fazendo-o girar.

Quando se aplica tensão CA aos enrolamentos do estator, ***produz-se um campo magnético girante***. Este campo girante corta os condutores do rotor e induz corrente nos mesmos. Esta corrente induzida gera um campo magnético em torno dos condutores do rotor, e este campo tende a se alinhar com o campo do estator. Entretanto, como o campo do estator gira continuamente, o rotor não consegue se alinhar com ele. ***A velocidade do rotor é sempre menor que a velocidade síncrona*** (velocidade do campo girante).

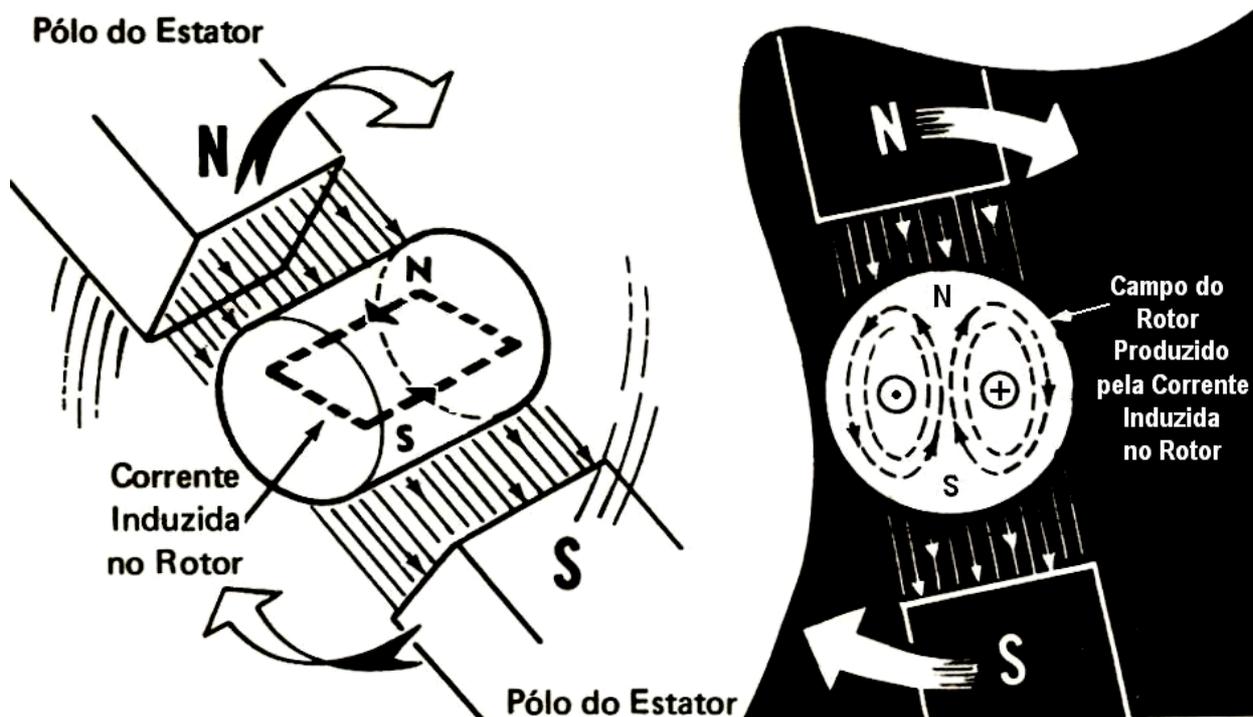


Fig. 2-9 : Campo magnético do rotor produzido pela corrente induzida.

Como você sabe, de acordo com a *Lei de Lenz*, qualquer corrente induzida tende a se opor às variações do campo que a produziu. No caso de um motor de indução, a variação é a rotação do campo do estator, e a força exercida sobre o rotor pela reação entre o rotor e o campo do estator é tal que tenta cancelar o movimento contínuo do campo do estator. Esta é a razão pela qual o rotor acompanha o campo do estator, tão próximo quanto permitam o seu peso e a carga. Os motores CC, motores série CA e os motores síncronos recebem a corrente do rotor por *condução através de escovas*. O motor de indução tem corrente no rotor por *indução*, e é semelhante a um transformador com secundário girante.

É impossível para o rotor de um motor de indução girar com a mesma velocidade do campo magnético girante. Se as velocidades fossem iguais, não haveria movimento relativo entre eles e, em consequência, não haveria *fem* induzida no rotor. Sem tensão induzida não há conjugado (torque) agindo sobre o rotor. A velocidade do rotor deve ser inferior à do campo magnético girante, para existir movimento relativo entre os dois. O motor de indução também é conhecido por motor assíncrono, exatamente por não poder funcionar na velocidade síncrona. A diferença percentual entre as velocidades do campo girante e do rotor é chamada de *deslizamento* (*S* de “*slip*”, ver Fig. 2-10). O deslizamento também é comumente chamado de *escorregamento*. Quanto menor for o escorregamento, mais se aproximam as velocidades do rotor e do campo girante (velocidade síncrona).

A velocidade do rotor depende do torque requerido pela carga. Quanto maior for a carga (mecânica), maior a força de torção necessária para girar o rotor. Esta força só pode aumentar se a *fem* induzida no rotor aumentar, e esta *fem* só pode aumentar se o campo magnético cortar o rotor com maior rapidez. A velocidade relativa entre o campo girante e o rotor aumenta quando o rotor gira mais devagar, ou seja, quando o escorregamento aumenta.

Portanto, a velocidade do motor de indução cai, com cargas pesadas. Realmente, apenas pequenas variações de velocidade são necessárias para produzir as variações na corrente induzida para atender às alterações normais de carga. A razão disto é a resistência muito baixa do enrolamento do rotor (barras de cobre). Por este motivo, os motores de indução são considerados *motores de velocidade constante*.

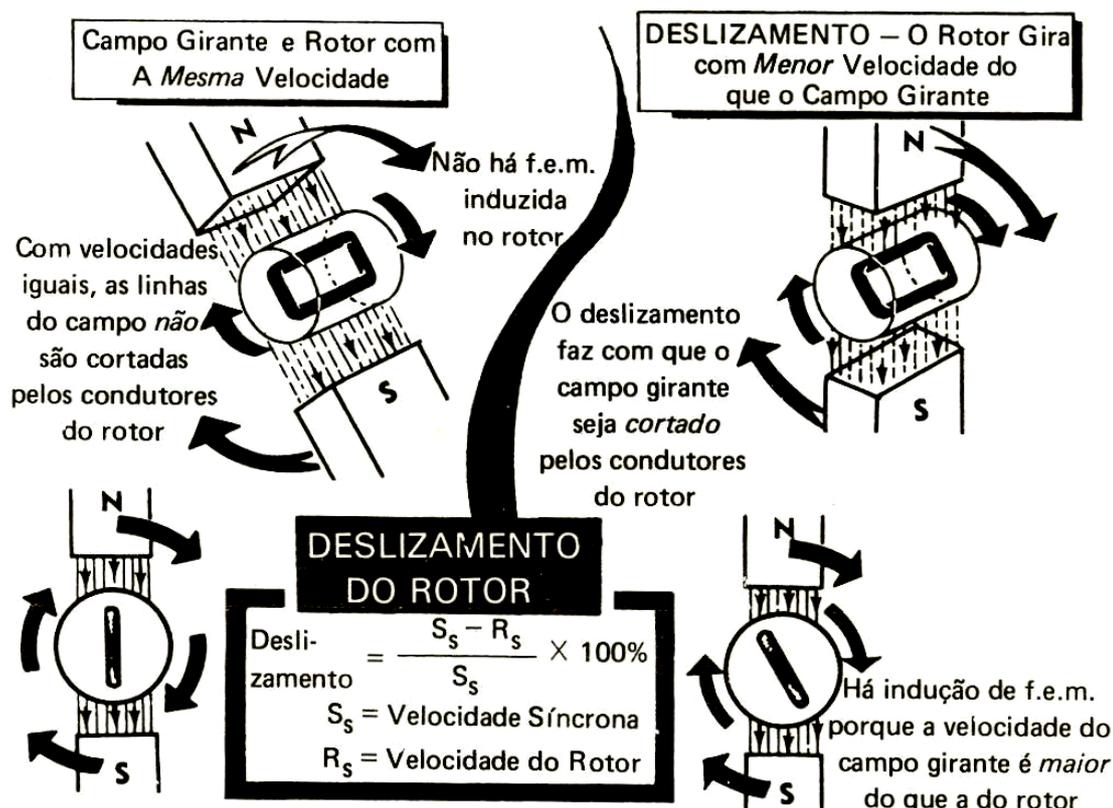


Fig. 2-10 : Relação entre a velocidade do campo magnético girante e a velocidade do rotor.

2.3.4 – Velocidade Síncrona e Escorregamento

A velocidade do campo magnético girante é chamada de velocidade síncrona do motor.

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

onde: n_s → velocidade síncrona ou velocidade do campo magnético girante, rpm;
 f → frequência da corrente do estator ou frequência da rede (alimentação), Hz;
 p → número total de pólos.

Deve-se notar que existe a mesma relação entre a frequência (da tensão da rede), o número de pólos e a velocidade síncrona (campo girante) de um motor (Eq. (2.1)) que existe entre a frequência (da tensão gerada), o número de pólos e a velocidade de rotação (rotor) de um gerador CA (Eq. (1.1)).

Um motor de indução não pode funcionar com a velocidade síncrona, pois neste caso o rotor estaria estacionário com relação ao campo girante e não seria induzida nenhuma *fem* no rotor. Por isso, os motores de indução também são classificados como motores *assíncronos* ou *não síncronos*. A velocidade do rotor deve ser ligeiramente menor do que a velocidade síncrona, a fim de que seja induzida uma corrente elétrica no rotor e, conseqüentemente, seja produzido um torque que fará o rotor girar. A diferença entre a velocidade do rotor e a velocidade síncrona é chamada de *escorregamento* e é expressa como uma porcentagem da velocidade síncrona. O escorregamento no motor de indução é sempre maior que zero. No instante da partida (quando o rotor está parado) o valor do escorregamento é igual a 1.

$$S_{(\%)} = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100\% \quad (2.2)$$

onde: $S_{(\%)}$ → escorregamento percentual, %;
 n_s → velocidade síncrona (ou velocidade do campo girante), rpm;
 n → velocidade de funcionamento do motor (ou velocidade do rotor), rpm.

2.3.5 – Frequência do Rotor

Para qualquer valor do escorregamento, a frequência do rotor é igual à frequência do estator multiplicada pelo escorregamento.

$$f_R = S \cdot f \quad (2.3)$$

onde: f_R → frequência do rotor (ou da corrente induzida), Hz;
 f → frequência do estator (ou da tensão da rede de alimentação), Hz;
 S → escorregamento percentual (escrito na forma decimal).

2.3.6 – Equação do Torque do Motor

O torque de um motor de indução (motor assíncrono) depende, basicamente, da intensidade da interação entre os campos do rotor e do estator, representados pela corrente do rotor e a tensão do estator.

$$T = k \cdot \phi \cdot I_R \cdot \cos\theta_R \quad (2.4)$$

onde: T → torque do rotor, kg·m;
 k → constante que depende dos aspectos construtivos da máquina;
 ϕ → fluxo do campo girante do estator, linhas de fluxo, Wb;
 I_R → corrente do rotor, A;
 $\cos\theta_R$ → fator de potência do rotor.

2.3.7 – Conjugado do Motor (ou Torque do Motor)

O conjugado (também chamado de torque, momento ou binário) é a medida do esforço necessário para girar um eixo. Como sabemos, para medir o "esforço" necessário para fazer girar o eixo, não basta definir a força empregada, é preciso também dizer a que distância do eixo a força é aplicada. O "esforço" é medido pelo conjugado, que é o produto da força pela distância.

$$C = F \cdot d \quad (2.5)$$

onde: C → conjugado (ou Torque), N·m;
 F → força, N;
 d → distância da aplicação da força, m.

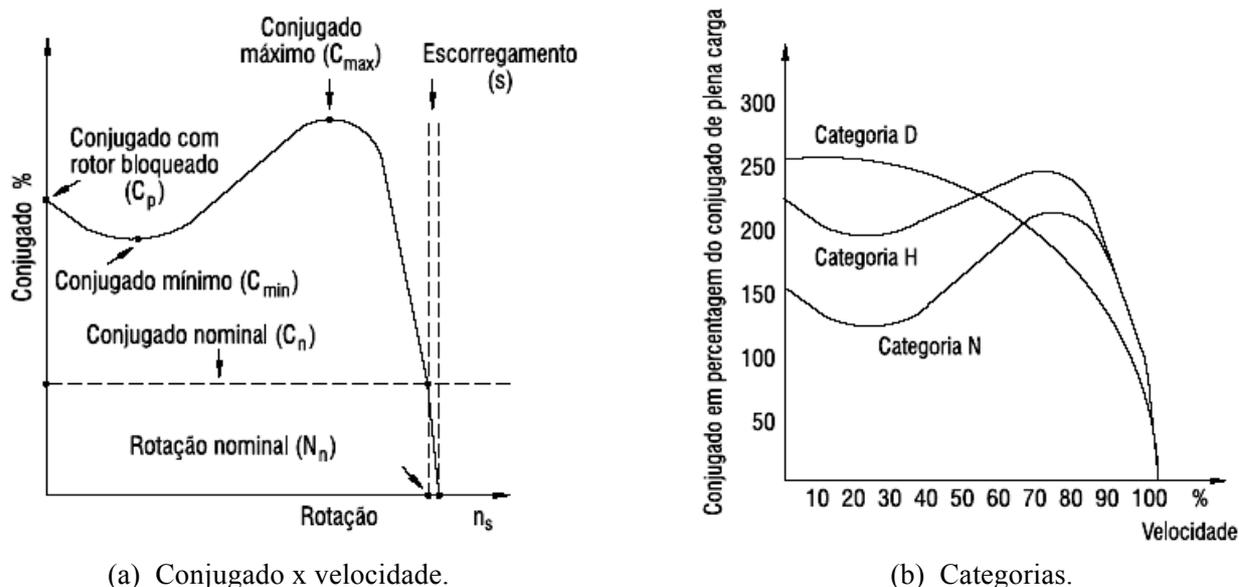


Fig. 2-11 : Curvas características de conjugado x velocidade para motores de indução com rotor gaiola.

O motor de indução tem conjugado igual a zero à velocidade síncrona. À medida que a carga vai aumentando, a rotação do motor vai caindo gradativamente, até um ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver em rotação normal. Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o rotor (parar). Representando num gráfico a variação do conjugado com a velocidade para um motor normal, vamos obter uma curva com o aspecto representado na Fig. 2-11 (a).

Conforme as suas características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola, são classificados em categorias, cada uma adequada a um tipo de carga. Estas categorias são definidas em norma (NBR 7094), ver Fig. 2-11 (b).

Categoria N: Conjugado de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes, ventiladores etc.

Categoria H: Conjugado de partida alto, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado na partida, como peneiras, transportadores carregadores, cargas de alta inércia, britadores, alguns tipos de ventiladores etc.

Categoria D: Conjugado de partida alto, corrente de partida normal e alto escorregamento (> 5%). Usados em excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos. Usados também em elevadores e cargas que necessitam de conjugado de partida muito alto e corrente de partida limitada.

A) Conjugado de Partida:

Conjugado requerido para vencer a inércia estática da máquina e produzir movimento. Para que uma carga, partindo da velocidade zero, atinja a sua velocidade nominal, é necessário que o conjugado do motor seja sempre superior ao conjugado da carga.

B) Conjugado de Aceleração:

Conjugado necessário para acelerar a carga à velocidade nominal. O conjugado do motor deve ser sempre maior que o conjugado resistente da carga, em todos os pontos entre zero e a rotação nominal. No ponto de interseção das duas curvas, o conjugado de aceleração é nulo, ou seja, é atingido o ponto de equilíbrio a partir do qual a velocidade permanece constante. Este ponto de interseção entre as duas curvas só deve acontecer quando for alcançada a velocidade nominal do motor, ver Fig. 2-12.

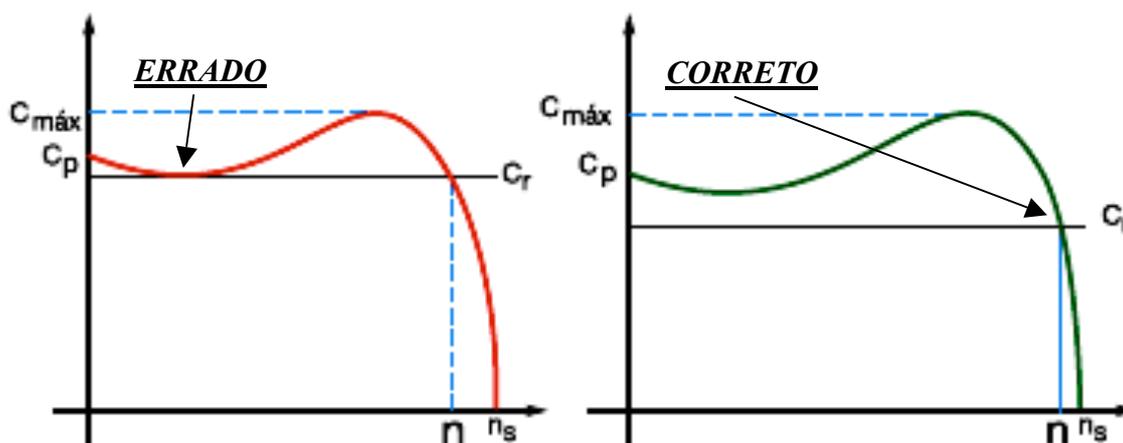


Fig. 2-12 : Seleção do motor considerando o conjugado resistente da carga.

$C_{máx}$: Conjugado máximo - é o maior conjugado desenvolvido pelo motor, sob tensão e frequência nominais, sem queda brusca de velocidade.

C_{min} : Conjugado mínimo - é o menor conjugado desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo. (**OBSERVAÇÃO:** $C_{min} > C_r$)

C) Conjugado Nominal:

Conjugado necessário para mover a carga em condições de funcionamento à velocidade específica. O conjugado requerido para funcionamento normal de uma máquina pode ser constante ou variar entre amplos limites. Para conjugados variáveis, o conjugado máximo deve ser suficiente para suportar picos momentâneos de carga. As características de funcionamento de uma máquina, quanto ao conjugado, podem dividir-se em três classes: conjugado constante, conjugado variável e potência constante.

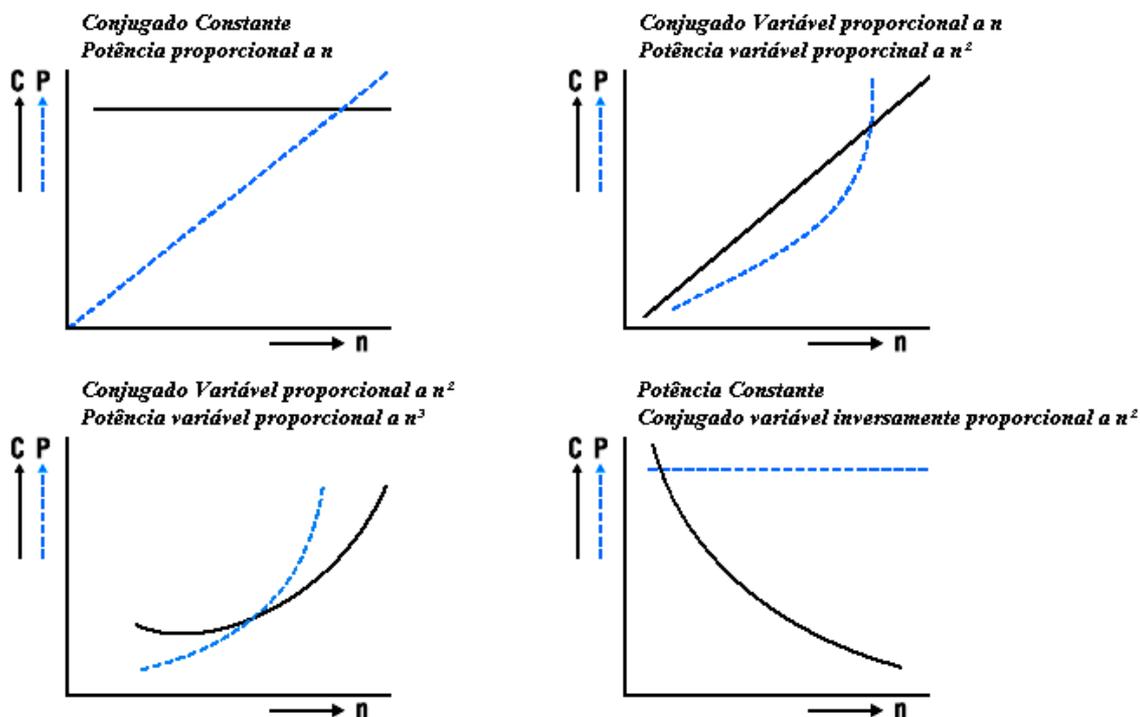


Fig. 2-13 : As possibilidades de funcionamento de uma máquina quanto ao seu conjugado.

2.3.8 – Velocidade Nominal do Motor (Velocidade do Rotor)

É a velocidade do motor (rotor) funcionando à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. A velocidade do motor depende do escorregamento e da velocidade síncrona. Já a velocidade síncrona, depende do número de pólos do motor e da frequência da tensão de alimentação.

$$n = (1 - S) \cdot n_s = \left(1 - \frac{S(\%)}{100}\right) \cdot n_s \quad (2.6)$$

onde: S → escorregamento (escrito na forma decimal).

2.3.9 – Potência Nominal (para Motores Trifásicos)

É a energia elétrica que o motor absorve da rede de alimentação, transformando-a em energia mecânica na ponta do eixo. No caso de motores de indução, por ser uma carga indutiva e resistiva, este absorverá uma potência "aparente", isto é, uma parcela de corrente fornecerá potência útil (kW) e a outra parcela serve para magnetização, chamada potência reativa (kvar). Sendo a potência dada pelas fórmulas:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta \quad (2.7)$$

onde: P → potência fornecida na ponta do eixo (ou potência útil), W;
 V_L → tensão de linha da rede de alimentação (estator), V;
 I → corrente solicitada da rede de alimentação (estator), A;
 $\cos \varphi$ → fator de potência do motor;
 η → rendimento do motor.

2.3.10 – Corrente Nominal do Motor (Corrente do Estator para Motores Trifásicos)

É a corrente que o motor absorve da rede quando funciona à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. O valor da corrente nominal depende do rendimento (η), do fator de potência ($\cos\varphi$), da potência e da tensão do motor, como segue:

$$I = \frac{P(kW) \times 1000}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{P(cv) \times 736}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{P(HP) \times 746}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi \cdot \eta} \quad (2.8)$$

onde: $P(kW)$ → potência nominal dada em kW;
 $P(cv)$ → potência nominal dada em cv;
 $P(HP)$ → potência nominal dada em HP.

2.3.11 – Seleção e Aplicação dos Motores Elétricos de Indução Trifásicos

Na engenharia de aplicação de motores é comum e, em muitos casos práticos, comparar as exigências da carga com as características do motor. Existem muitas aplicações que podem ser corretamente acionadas por mais de um tipo de motor, e a seleção de um determinado tipo, nem sempre exclui o uso de outros tipos. Com o advento do computador, o cálculo pode ser aprimorado, obtendo-se resultados precisos que resultam em máquinas dimensionadas de maneira mais econômica.

Os motores de indução, de gaiola ou de anel, de baixa e média tensão, encontram vasto campo de aplicação, tornando-se cada vez mais importante a seleção do tipo adequado para cada aplicação. A seleção do tipo adequado de motor, com respeito ao conjugado, fator de potência, rendimento e elevação de temperatura, isolamento, tensão e grau de proteção mecânica, somente pode ser feita, após uma análise cuidadosa, considerando parâmetros como: custo inicial, capacidade da rede, necessidade da correção do fator de potência, conjugados requeridos, efeito da inércia da carga, necessidade ou não de regulação de velocidade, exposição da máquina em ambientes úmidos, poluídos e/ou agressivos.

O motor assíncrono de gaiola é o mais empregado em qualquer aplicação industrial, devido à sua construção robusta e simples, além de ser a solução mais econômica, tanto em termos de motores como de comando e proteção. Embora de custo mais elevado que o motor de gaiola, a aplicação de motores de anéis se faz necessária para partidas pesadas (elevada inércia), acionamento de velocidade ajustável ou quando é preciso limitar a corrente na partida mantendo um alto conjugado de partida.

Tabela 2-1 : Comparação entre diferentes tipos de máquinas.

TIPO	Motor de Indução de Gaiola	Motor de Indução de Anéis
PROJETO	Rotor Não Bobinado	Rotor Bobinado
Corrente de Partida – I_p / I_n	Alta	Baixa
Conjugado de Partida	Baixo	Alto
Conjugado Máximo	> 160% do conjugado nominal	> 160% do conjugado nominal
Rendimento	Alto	Alto
Equipamento de Partida	Simple para partida direta	Relativamente simples
Equipamento de Proteção	Simple	Simple
Espaço Requerido	Pequeno	Reostato requer um espaço grande
Manutenção	Pequena	Nos anéis – freqüente
Custo	Baixo	Alto

O meio mais adequado, na atualidade, para reduzir os gastos de energia é utilizar motores de Alto Rendimento. Está comprovado, por testes, que estes motores especiais têm até 30% a menos de perdas, o que significa uma real economia. Estes motores são projetados e construídos com a mais alta tecnologia, com o objetivo de reduzir perdas e incrementar o rendimento. Isto proporciona baixo consumo de energia e menor despesa. São os mais adequados nas aplicações com variação de tensão.

2.4 – MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO

Os motores síncronos estão sendo utilizados com maior frequência pelas indústrias, devido ao fato de possuírem características especiais de funcionamento. O *alto rendimento* e o fato de poderem trabalhar como compensador síncrono para *corrigir o fator de potência* da rede, se destacam como os principais motivos que resultam na escolha dos motores síncronos para acionamento de diversos tipos de cargas. Altos torques, velocidade constante nas variações de carga e baixo custo de manutenção, também são características especiais de funcionamento que proporcionam inúmeras vantagens econômicas e operacionais ao usuário.

O motor síncrono recebeu este nome porque o seu rotor gira com a mesma velocidade do campo magnético girante produzido no enrolamento trifásico do estator (velocidade síncrona), dada pela Eq. (2.1). Sua construção é essencialmente a mesma do alternador de pólos salientes (gerador síncrono CA).

2.4.1 – Princípio de Funcionamento do Motor Síncrono

Sabemos que a aplicação de uma tensão CA trifásica nos enrolamentos do estator produz um campo magnético girante e este atua sobre o rotor. Quando o rotor do motor síncrono é energizado com uma tensão CC ele, se comportando como um ímã suspenso em um campo magnético que se move, procura se alinhar com o campo magnético girante do estator. Quando o campo magnético gira, o rotor gira em sincronismo com o campo. Quando o campo magnético girante é forte, ele exerce uma intensa força de torção sobre o rotor (torque ou conjugado), e este, portanto, se torna capaz de acionar uma carga.

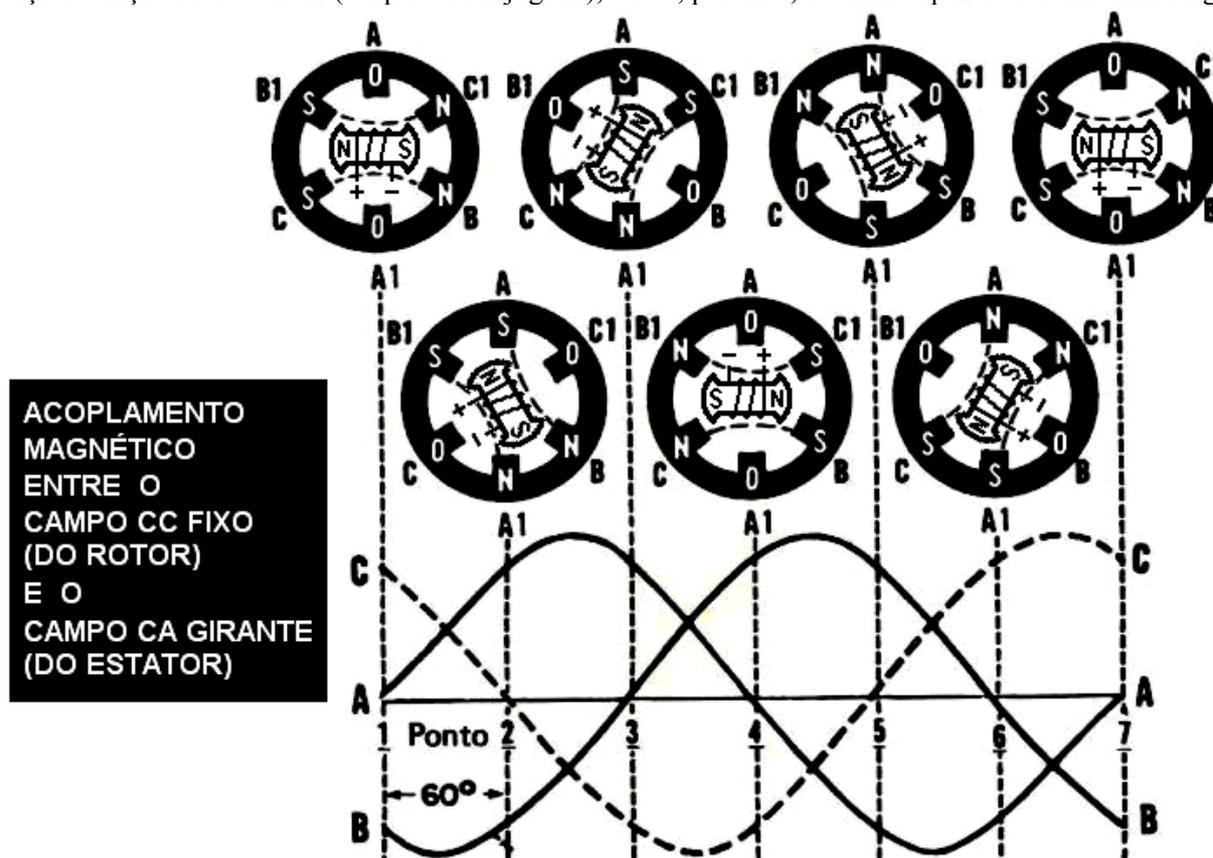


Fig. 2-14 : Acoplamento magnético entre o campo CC fixo do rotor e o campo CA girante do estator.

Como os motores de indução, os motores síncronos têm enrolamentos no estator que produzem um campo magnético girante. Mas, ao contrário do motor de indução, o circuito do rotor de um motor síncrono é alimentado por uma fonte CC. O rotor engata na mesma rotação do campo magnético girante do estator e o acompanha com a mesma velocidade, ou seja, ocorre um acoplamento magnético entre os campos do rotor e do estator. Se o rotor sair do sincronismo (se desacoplar magneticamente) não se desenvolve nenhum torque e o motor pára. Assim, *ou o motor síncrono funciona à velocidade síncrona ou não funciona*.

Como você sabe, a velocidade do campo magnético girante depende da frequência da rede CA. Como a frequência da rede é constante, os motores síncronos são, na prática, motores de uma única velocidade. Eles são utilizados em aplicações que requerem velocidade constante desde a condição em vazio até a condição de plena carga. Observe que em um motor síncrono, operando a velocidade síncrona, não há *fem* induzida no rotor, pois não há movimento relativo entre o campo girante e o rotor. No motor síncrono não há variação na quantidade das linhas de fluxo que cortam os condutores do rotor ($S = 0$).

2.4.2 – Tipos de Excitação do Campo CC do Rotor

Os motores síncronos necessitam de uma fonte de corrente contínua para alimentar o enrolamento de campo (enrolamento do rotor), que usualmente é suprido através de anéis coletores e escovas (*excitatriz estática*) ou através de uma excitatriz girante sem escovas (*brushless*).

A) Excitatriz Estática (com escovas):

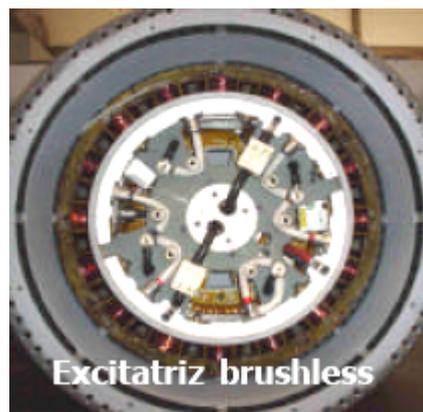
Motores síncronos com *excitatriz do tipo estática* são constituídos de anéis coletores e escovas que possibilitam a alimentação de corrente dos pólos do rotor através de contatos deslizantes. A corrente contínua para alimentação dos pólos deve ser proveniente de um conversor e controlador estático CA/CC. A excitatriz estática atualmente está sendo muito utilizada em aplicações com variação de velocidade através de inversores de frequência.

B) Excitatriz Brushless (sem escovas):

Motores síncronos com sistema de *excitação brushless* possuem uma excitatriz girante, normalmente localizada em um compartimento na parte traseira do motor. A excitatriz funciona como um gerador de corrente alternada onde o rotor, que fica localizado no eixo do motor, possui um enrolamento trifásico e o estator é formado por pólos alternados norte e sul alimentados por uma fonte de corrente contínua externa. O enrolamento trifásico do rotor é conectado a uma ponte de diodos retificadores. A tensão gerada no rotor e depois retificada é utilizada para a alimentação do enrolamento de campo CC do motor. A amplitude desta corrente de campo pode ser controlada através do retificador que alimenta o campo do estator da excitatriz. Os motores síncronos com excitação *brushless* possuem um custo de manutenção reduzido devido ao fato de não possuírem escovas. Por não possuírem contatos elétricos deslizantes, eliminando a possibilidade de faiscamento, os motores síncronos com excitação do tipo *brushless* são recomendados para aplicações em áreas especiais com atmosfera explosiva.



(a) Excitatriz estática com escovas.



(b) Excitatriz *brushless* sem escovas.

Fig. 2-15 : Os dois tipos de excitatriz utilizadas para aplicação de tensão CC no rotor.

2.4.3 – Partida dos Motores Síncronos

Uma das desvantagens do *motor síncrono puro* é que ele não pode partir de uma posição de repouso apenas com a aplicação da tensão CA trifásica ao estator. Como o motor síncrono desenvolve um torque somente quando gira na velocidade síncrona, ele não tem partida própria e conseqüentemente precisa de algum dispositivo que faça o rotor girar até atingir a velocidade síncrona.

No instante em que a tensão CA trifásica é aplicada ao estator, é produzido um campo magnético girante de alta velocidade. Este campo girante passa diante dos pólos do rotor tão rapidamente que o rotor não tem oportunidade de partir (se acoplar magneticamente). Inicialmente o pólo NORTE do rotor é repellido em um *sentido* – pelo pólo NORTE do campo girante que se *aproxima*, e logo em seguida é repellido no *sentido contrário* – pelo mesmo pólo NORTE do campo girante que passou muito rapidamente e já se *afasta*.

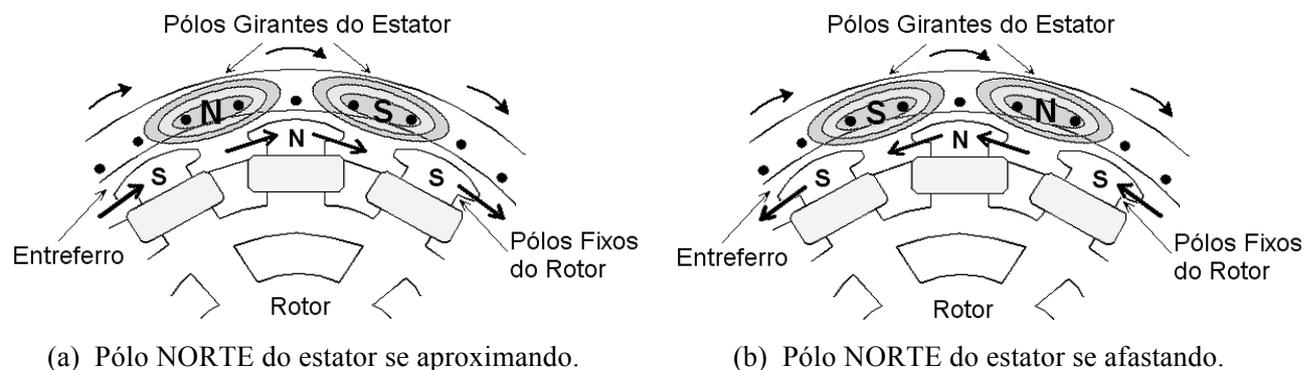


Fig. 2-16 : Torque resultante nulo na partida do motor síncrono, quando o rotor está parado.

No processo de partida de um motor síncrono o seu rotor deve ser levado até uma velocidade suficientemente próxima da síncrona, para que ele possa se acoplar magneticamente com o campo girante e entrar em sincronismo. Alguns meios pelos quais o rotor pode ser levado próximo a velocidade síncrona: (1) um motor CC acoplado ao eixo do motor síncrono; (2) a utilização da excitatriz como motor CC, durante a partida; (3) um pequeno motor de indução com, no mínimo, um par de pólos a menos que o motor síncrono; e (4) a utilização dos enrolamentos amortecedores, para que a partida se dê como a de um motor de indução do tipo gaiola de esquilo ou do tipo rotor bobinado (com 5 anéis, ver Fig. 2-18).

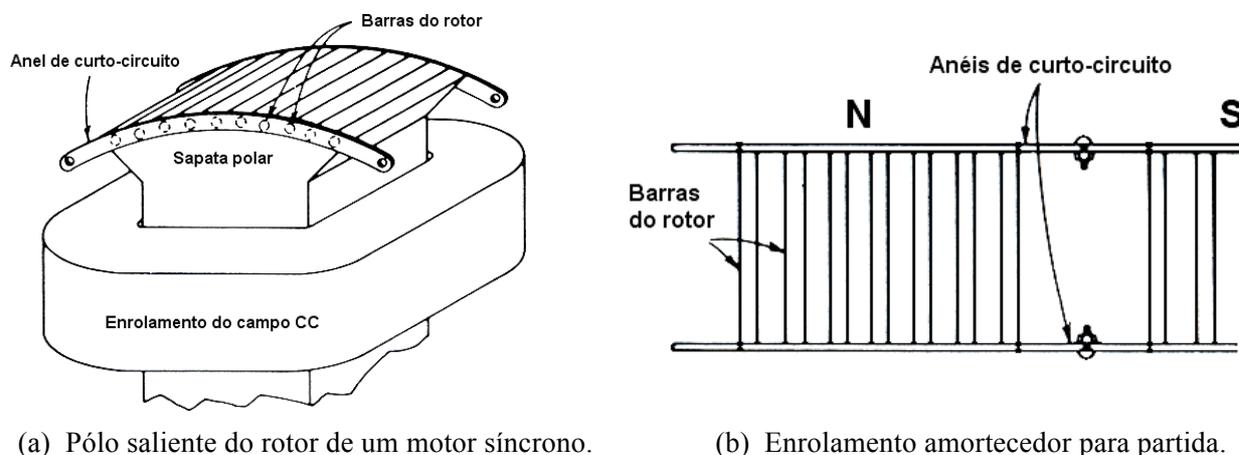


Fig. 2-17 : Enrolamento amortecedor de um motor síncrono, para partida como rotor de gaiola.

O motor síncrono parte como um motor de indução, acelera a carga até o ponto onde o conjugado do motor iguala o conjugado resistente da carga. Usualmente este ponto ocorre com 95% da velocidade síncrona, ou acima, e nesta situação a tensão CC de excitação é aplicada no rotor que sincroniza, ou seja, irá acelerar a inércia combinada do rotor mais a da carga até a velocidade síncrona precisa. As características das cargas a serem acionadas determinam as condições de aceleração e sincronismo.

Para a partida do motor síncrono com carga, a melhor técnica é utilizar um rotor bobinado de motor de indução, em lugar do enrolamento em gaiola nas faces polares, o chamado enrolamento amortecedor tipo rotor bobinado. Reconhece-se imediatamente este rotor, pois utiliza cinco anéis coletores: dois para o enrolamento do campo CC e três para o enrolamento bobinado do rotor ligado em estrela. O desempenho na partida deste motor é semelhante ao de um motor de indução de rotor bobinado, uma vez que se utiliza uma resistência externa para melhorar o torque de partida.

O motor parte com toda a resistência externa por fase, como mostra a Fig. 2-18, e com o enrolamento de campo CC curto-circuitado. Ele se aproxima da velocidade síncrona à medida que se reduz a resistência e, quando se aplica uma tensão CC ao enrolamento de campo, o motor entra em sincronismo. Combinando o torque de partida elevado do motor de indução de rotor bobinado (até três vezes o torque nominal de plena carga) com as características de funcionamento de velocidade constante e correção do fator de potência inerentes ao motor síncrono, este tipo de motor síncrono encontrou muitas aplicações nos casos em que se requer partida sob carga, além de velocidade constante.

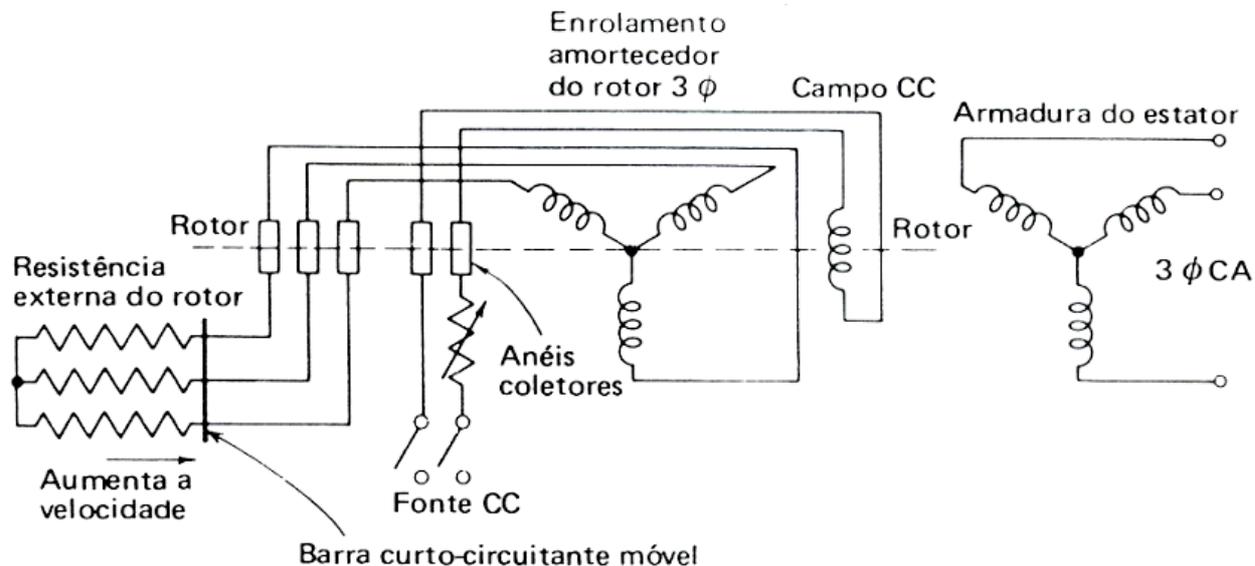


Fig. 2-18 : Diagrama esquemático de um motor síncrono com enrolamento amortecedor bobinado.

Decididamente, o método de partida mais comum para motores síncronos é o que usa os enrolamentos amortecedores para que a partida se dê como se o motor fosse de indução. Este método é o mais simples e não requer máquinas auxiliares especiais.

O principal método utilizado para partida dos motores síncronos é a partida assíncrona através da gaiola de esquilo com o enrolamento do rotor curto-circuitado ou conectado a uma resistência usualmente chamada resistência de partida ou resistência de descarga. Através da partida assíncrona, o rotor acelera a uma velocidade muito próxima da velocidade síncrona, com um pequeno escorregamento em relação ao campo girante. Neste momento, aplica-se uma corrente contínua no enrolamento do rotor, levando o motor ao sincronismo. Nas máquinas com escovas, utiliza-se um relé de aplicação de campo, enquanto nos motores *brushless*, utiliza-se um circuito eletrônico de disparo instalado junto de um disco girante. A função deste circuito eletrônico e do relé de aplicação de campo é gerenciar a seqüência de partida do motor síncrono, desde o fechamento (curto-circuito) do rotor até a aplicação da corrente no campo.

2.4.4 – Partes Construtivas dos Motores Síncronos

A) Estator:

A1) Carcaça – Sua função principal é apoiar e proteger o motor, alojando também o pacote de chapas e o enrolamento do estator. Podem ser construídas nos tipos horizontais e verticais e com grau de proteção de acordo com as necessidades do ambiente. A carcaça é construída em chapas e perfis de aço soldados, com as junções feitas através de solda tipo MIG, formando um conjunto sólido e robusto que é a base estrutural da máquina. Tal construção proporciona excelente rigidez estrutural de maneira a suportar esforços mecânicos proveniente de eventual curto-circuito e baixas vibrações, capacitando o motor a atender as mais severas solicitações. Internamente a carcaça é constituída por longarinas dispostas na periferia para fixação do pacote de chapas com seu respectivo enrolamento. Normalmente a carcaça é apoiada sobre uma base metálica rígida (chapa de aço), e esta por sua vez apoiada sobre a base de concreto. A fixação da base metálica ao concreto é feita através de chumbadores.

A2) Estator bobinado – É constituído de partes magnéticas estacionárias, incluindo o pacote laminado de chapas de aço silício e o enrolamento do estator, que opera com alimentação de potência em corrente alternada para gerar o campo magnético girante.

A3) Pacote de chapas – O núcleo magnético do estator é formado por lâminas de aço silício com baixas perdas, prensadas, e o conjunto é fixado através de viga metálica ou sistema de longarinas.



(a) Carcaça.



(b) Estator bobinado.



(c) Colocação do bobinado.

Fig. 2-19 : Partes construtivas do estator de um motor síncrono.

B) Rotor:

O rotor pode ser construído com pólos lisos ou salientes dependendo das características construtivas do motor e da aplicação. Consiste nas partes ativas giratórias compostas da coroa do rotor, o enrolamento de campo e o enrolamento amortecedor. Os pólos de campo são magnetizados através da corrente direta da excitatriz ou diretamente por anéis coletores e escovas; eles engrenam magneticamente com o campo girante do estator e giram em sincronismo, ao longo do entreferro.

B1) Pólos salientes – O rotor do motor síncrono de pólos salientes compreende: eixo, roda polar e pólos. Os pólos são fabricados com chapas de aço laminado que são fixadas através de barras de aço que são soldadas nas extremidades. As bobinas de campo são feitas de fios de cobre esmaltados ou barras de cobre planas. Depois de bobinados e impregnados, os pólos são fixados ao eixo ou a roda polar, através de parafusos, por cima ou por baixo do pólo, ou conectados por meio de rabo de andorinha. O enrolamento amortecedor está alojado nos pólos e é feito de barras de cobre ou outro material dependendo do projeto do motor. Após montagem final e impregnação, o rotor completo é balanceado dinamicamente em 2 planos.

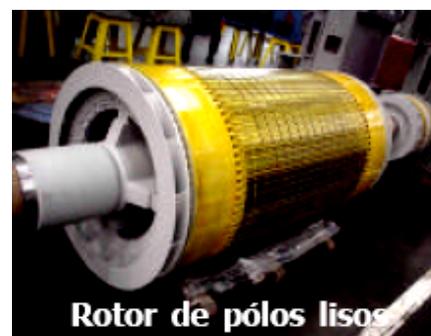
B2) Pólos lisos – O rotor do motor síncrono de pólos lisos compreende em eixo, pacote de chapas laminado e enrolamento dos pólos. O enrolamento é alojado nas ranhuras do rotor formando os pólos.



(a) Pólos salientes.



(b) Enrolamento amortecedor.



(c) Pólos lisos.

Fig. 2-20 : Partes construtivas do rotor de um motor síncrono.

B3) Eixo – Os eixos são fabricados de aço forjado ou laminado e usinados exatamente conforme as especificações. A ponta de eixo normalmente é cilíndrica ou flangeada.

B4) Enrolamento amortecedor – Está alojado em ranhuras localizadas nas sapatas polares do rotor de pólos salientes ou a superfície externa do rotor de pólos lisos. É constituído de barras que atravessam a ranhura e são curto-circuitadas nas extremidades formando uma gaiola. *O enrolamento amortecedor atua na partida do motor síncrono, como também garante estabilidade na velocidade perante variações bruscas de carga.*

C) Mancais:

Em função da aplicação, os motores síncronos podem ser fornecidos com mancais de rolamentos lubrificados a graxa ou mancais de deslizamento com lubrificação a óleo. Os mancais de deslizamento podem ter lubrificação natural (auto lubrificáveis) ou lubrificação forçada (lubrificação externa).

C1) Mancais de rolamentos – Lubrificados a graxa, estes mancais são constituídos de rolamento de esferas ou de rolos cilíndricos, dependendo da rotação e dos esforços axiais e radiais a que são submetidos. Em algumas aplicações podem ser utilizados rolamentos especiais.

C2) Mancais de deslizamento com lubrificação natural – Quando o rotor gira, o óleo lubrificante é recolhido pelo anel pescador interno e transferido diretamente à superfície do eixo, criando uma camada de óleo entre o eixo e a superfície dos casquilhos do mancal. O aquecimento de fricção é dissipado somente por radiação ou convecção, entretanto, a temperatura ambiente deve ser informada quando da especificação do motor, para que seja garantida a refrigeração natural.

C3) Mancais de deslizamento com lubrificação forçada – O óleo lubrificante circula no mancal através de um sistema de alimentação externa de óleo e, se necessário é resfriado em uma unidade hidráulica separada. Este sistema torna-se necessário quando a lubrificação natural do mancal, proveniente do anel pescador interno de lubrificação, é insuficiente devido à rotação específica requerida ou altas perdas por atrito.



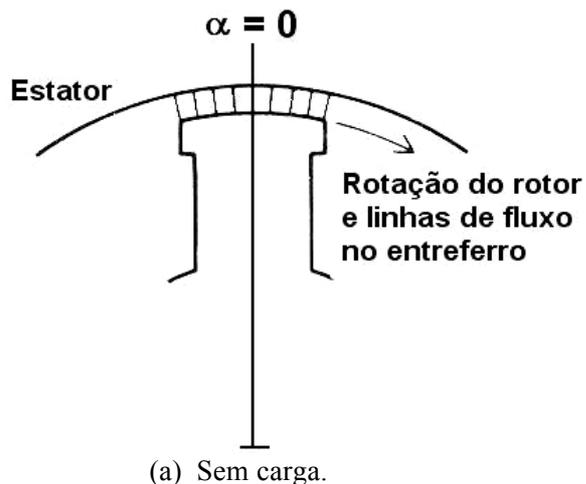
Fig. 2-21 : Tipos de mancais utilizados nos motores síncronos.

2.4.5 – Efeito da Carga Sobre os Motores Síncronos

No motor síncrono, o rotor engata-se magneticamente para acompanhar o campo magnético giratório e deve continuar a girar em sincronismo qualquer que seja a carga. Sem carga, as linhas centrais de um pólo do campo magnético girante e de um pólo do campo CC do rotor coincidem (Fig. 2-22(a)). Quando se aplica uma carga ao motor, há um pequeno deslocamento para trás do pólo do rotor em relação ao pólo do estator (Fig. 2-22(b)). Não há variação na velocidade. O deslocamento angular entre os pólos do rotor e do estator é chamado de ângulo de torque ou ângulo de carga α .

Quando um motor síncrono funciona sem carga (o ângulo de torque é praticamente 0°), a força contra-eletromotriz induzida (no estator pelo campo CC do rotor) V_g é igual à tensão aplicada pela rede ou à tensão nos terminais V_t (desprezando as perdas do motor) (Fig. 2-23(a)).

Ângulo de torque ou Ângulo de carga



Ângulo de torque ou Ângulo de carga

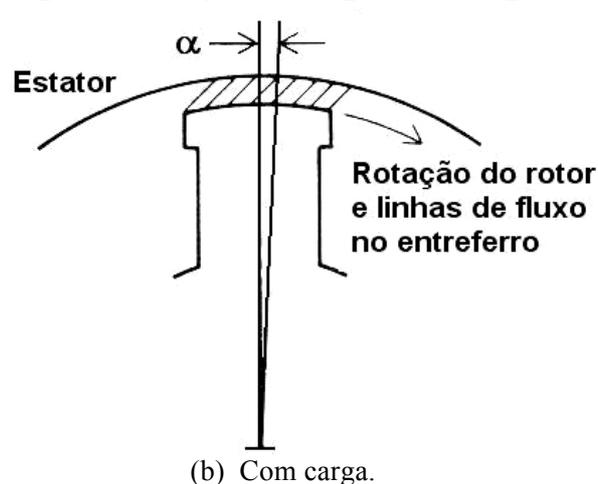


Fig. 2-22 : Posições relativas do pólo do estator e do pólo do rotor (campo CC).

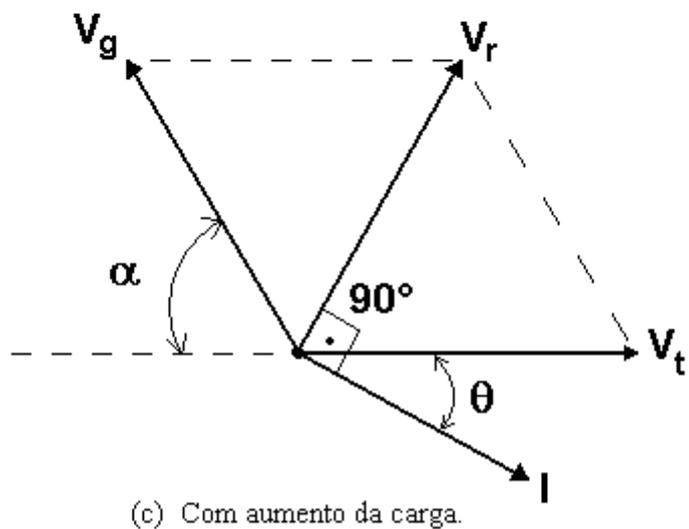
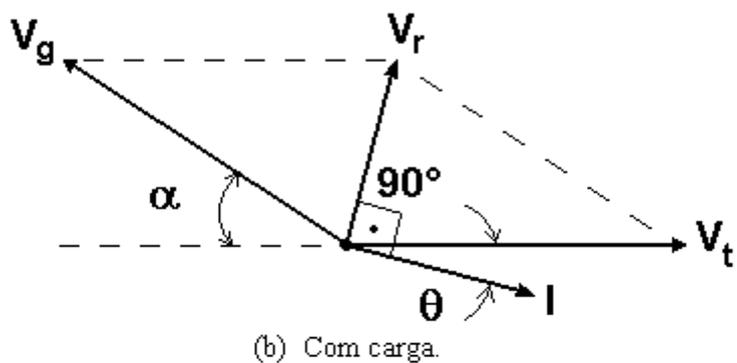
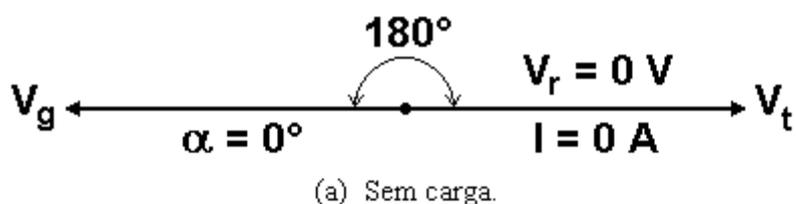


Fig. 2-23 : Diagramas de fasores para condições de cargas diferentes e excitação de campo CC constante.

Definições das grandezas apresentadas nos diagramas fasoriais das Figs. 2-23 e 2-24:

- V_t → tensão aplicada nos terminais do estator ou tensão da rede elétrica, V;
- V_g → tensão induzida nos enrolamentos do estator ou força contra-eletromotriz, V;
- V_r → tensão resultante nos enrolamentos do estator ($V_t + V_g$), V;
- I → corrente nos enrolamentos do estator ou corrente solicitada à rede pela carga, A;
- α → defasagem entre os pólos do estator e os pólos do rotor ou ângulo de carga, °;
- θ → defasagem entre a tensão V_t e a corrente I solicitadas da rede ou ângulo do fator de potência, °.

Aumentando-se a carga e, conseqüentemente, o ângulo de torque, a posição da fase de V_g varia com relação a V_t , o que permite um fluxo de corrente maior no estator para suportar a carga adicional (Fig. 2-23(b)). As tensões V_t e V_g não estão mais em sentidos opostos (180°). A sua tensão resultante V_r faz com que uma corrente I circule nos enrolamentos do estator. A corrente I no estator segue V_r com uma defasagem de aproximadamente 90° , devido à alta indutância dos enrolamentos do estator. O fator de potência do motor síncrono é determinado por θ que é o ângulo de fase entre V_t e I . Um aumento na carga resulta em um grande ângulo de torque α , que produz um aumento de V_r e I (Fig. 2-23(c)).

Se a carga mecânica for muito alta, o rotor sai de sincronismo e causa a parada do motor. O valor máximo do torque que um motor síncrono pode desenvolver sem perder o seu sincronismo é chamado de torque de *perda de sincronismo*. Se isto acontecer e o motor síncrono tiver um enrolamento em gaiola (enrolamento amortecedor), ele continuará a funcionar como um motor de indução.

2.4.6 – Excitação de Campo Usada para Alterar o Fator de Potência do Motor Síncrono

Para uma carga mecânica constante, pode-se variar o fator de potência de um motor síncrono desde um valor indutivo até um valor capacitivo ajustando-se a sua excitação de campo CC (Fig. 2-25). A excitação de campo é ajustada de modo que $FP=1,0$ (Fig. 2-25(b)). Para a mesma carga, quando se aumenta a excitação de campo, a força contra-eletromotriz V_g aumenta. Isto provoca uma variação na fase entre a corrente I no estator e a tensão nos terminais V_t , de modo que o motor funciona com um *fator de potência capacitivo* (Fig. 2-25(c)). Se a excitação do campo CC for reduzida abaixo do valor representado na Fig. 2-25(b), o motor funciona com um *fator de potência indutivo* (Fig. 2-25(a)). Um exemplo de curva V para um motor síncrono, obtida de um fabricante, mostra como a corrente do estator varia, para uma carga constante, com a excitação do campo CC do rotor (Fig. 2-24). O fator de potência também pode ser lido quando se varia a corrente de campo.

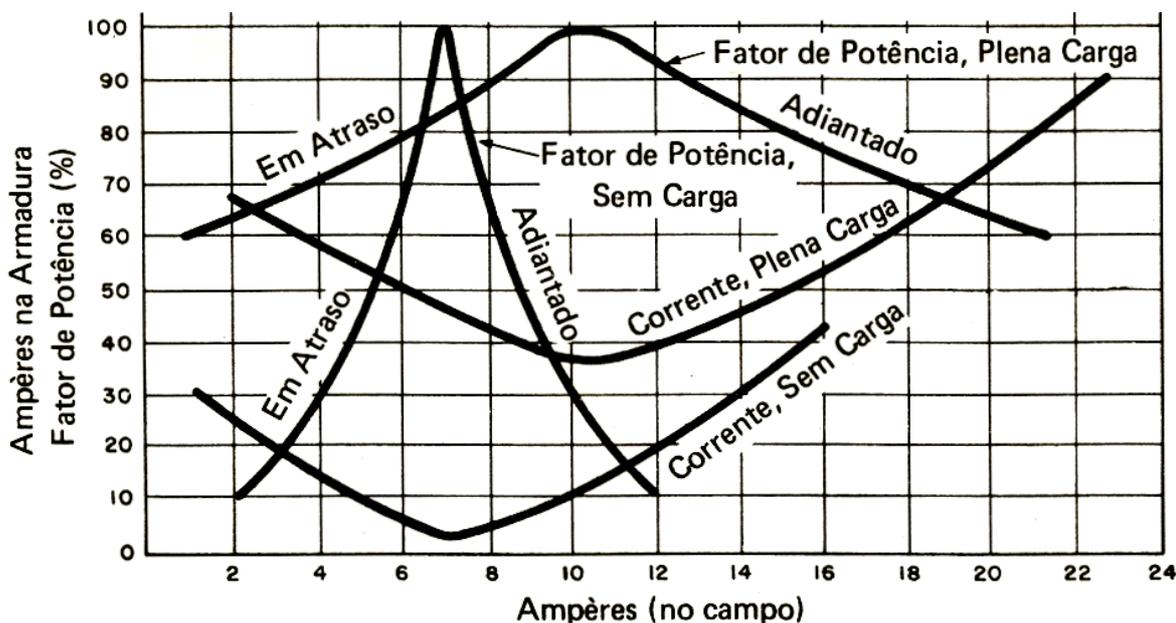


Fig. 2-24 : Curvas V para um motor síncrono de 15 kVA.

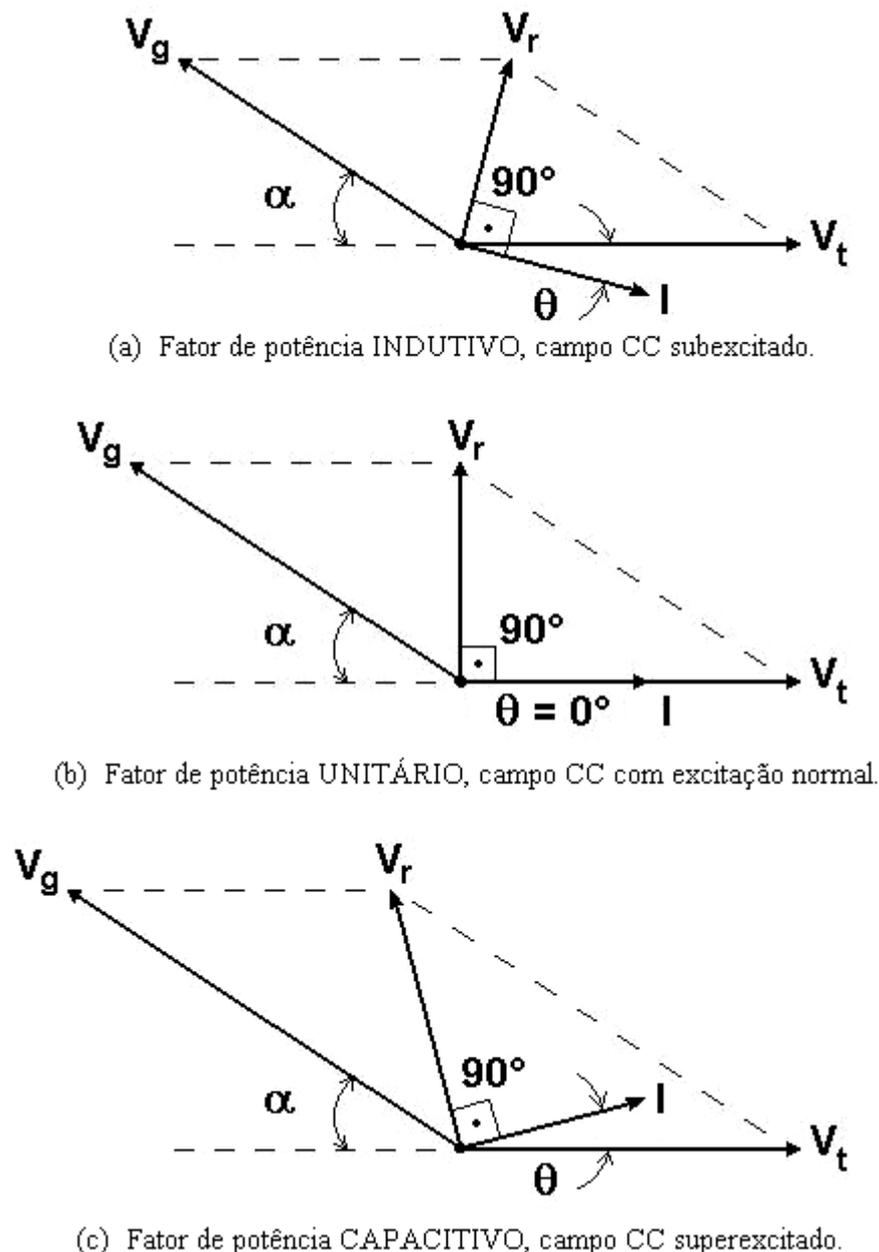


Fig. 2-25 : Diagramas de fasores para condições de carga constante e excitação de campo CC variando.

2.4.7 – Correção do Fator de Potência com a Utilização de Motores Síncronos

Os sistemas de potência de energia elétrica são baseados não somente em potência ativa (kW) gerada, mas também no fator de potência na qual ela é fornecida. Penalidades podem ser aplicadas ao consumidor, quando o fator de potência da carga está abaixo de valores especificados (0,92). Estas penalidades (multas) ocorrem devido ao fato de que baixo fator de potência representa um aumento da potência reativa (kvar) requerida e conseqüentemente, um aumento da capacidade dos equipamentos de geração e transmissão de energia elétrica. Nas indústrias, geralmente predominam as cargas reativas indutivas, que são os motores de indução de pequeno porte ou de rotação baixa, as quais requerem considerável quantidade de potência reativa (kvar), consumida para produzir o campo magnético dos motores. Para suprir a necessidade do consumo de potência reativa, além da possibilidade de utilização de bancos de capacitores, os motores síncronos são freqüentemente utilizados com esta finalidade.

O fator de potência dos motores síncronos pode ser facilmente controlado devido ao fato de possuírem uma fonte separada de excitação CC. Desta forma, podem tanto aumentar a potência ativa sem consumo de potência reativa (motor com fator de potência unitário), quanto gerar um excedente de potência reativa necessária a outras cargas (por exemplo: motor com fator de potência $0,8$ capacitivo). Desta forma, o motor síncrono, dependendo da aplicação, pode fornecer a potência útil de acionamento mecânico com redução benéfica da potência total do sistema, o que significa um menor valor da conta de energia.

Uma vantagem incrível do motor síncrono é que ele pode funcionar com um fator de potência unitário ($\cos \theta = 1,0$). Variando-se a intensidade do campo CC, o fator de potência total de um motor síncrono pode ser ajustado ao longo de uma faixa considerável. Assim, o motor síncrono pode simular uma carga capacitiva através da linha. Inúmeros motores síncronos são construídos sem qualquer extensão dos eixos, ostensivamente projetados tão-somente para correção do fator de potência e para serem operados *sem* qualquer carga mecânica. Qualquer motor síncrono superexcitado, funcionando sem carga, pode ser classificado como *compensador síncrono* ou *capacitor síncrono*. Se um sistema elétrico estiver funcionando com um fator de potência indutivo, os motores síncronos ligados através da linha e ajustados para um fator de potência capacitivo podem melhorar (isto é, aumentar) o fator de potência do sistema. Qualquer melhora no fator de potência aumenta a capacidade de fornecimento de carga, aumenta a eficiência e, em geral, melhora as características de funcionamento do sistema.

Tabela 2-2 : Comparação entre os motores trifásicos de indução e síncrono.

TIPO	Motor de Indução	Motor Síncrono
PROJETO	Rotor Gaiola ou Bobinado	Rotor Bobinado
Alimentação do Estator	Rede trifásica CA.	Rede trifásica CA.
Alimentação do Rotor	CA sempre por indução.	Excitação CC pelo sistema brushless, sem a utilização de escovas. Excitação CC por excitatriz estática, com a utilização de escovas.
Velocidade	Próxima da velocidade síncrona, quase constante variando com a carga.	Sempre igual à velocidade síncrona, constante independentemente da carga.
Escorregamento	Geralmente a plena carga $\leq 5\%$.	Sempre = 0.
Fator de Potência	Sempre indutivo.	Unitário, se excitação normal. Indutivo, se subexcitado. Capacitivo, se superexcitado.
Rendimento	Bom.	Ótimo com o FP = 1,0.
Corrente de Partida I_p / I_n	Alta para rotor gaiola. Baixa para rotor bobinado.	Alta para enrolamento amortecedor tipo rotor gaiola. Baixa para enrolamento amortecedor tipo rotor bobinado.
Conjugado de Partida	Baixo para rotor gaiola. Alto para rotor bobinado.	Baixo para enrolamento amortecedor tipo rotor gaiola. Alto para enrolamento amortecedor tipo rotor bobinado.
Equipamento de Partida	Se rotor gaiola, não precisa. Se rotor bobinado, reostato trifásico.	Enrolamento amortecedor tipo gaiola. Enrolamento amortecedor tipo rotor bobinado e reostato trifásico.
Manutenção	Se rotor gaiola, pequena. Se rotor bobinado, freqüente nos anéis.	Se enrolamento amortecedor gaiola e excitação sem escovas, pequena. Se enrolamento amortecedor tipo rotor bobinado e excitação com escovas, freqüente nos anéis.
Custo	Baixo com rotor gaiola. Alto com rotor bobinado.	Alto com enrolamento amortecedor tipo rotor gaiola. Muito alto com enrolamento amortecedor tipo rotor bobinado.