

INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
RIO GRANDE DO NORTE
Campus Mossoró

DIRETORIA DE EDUCAÇÃO E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ELETROTÉCNICA

MOTORES TRIFÁSICOS DE CA

Disciplina: Máquinas e Automação Elétrica

Prof.: Hélio Henrique

INTRODUÇÃO

MOTORES TRIFÁSICOS CA

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.

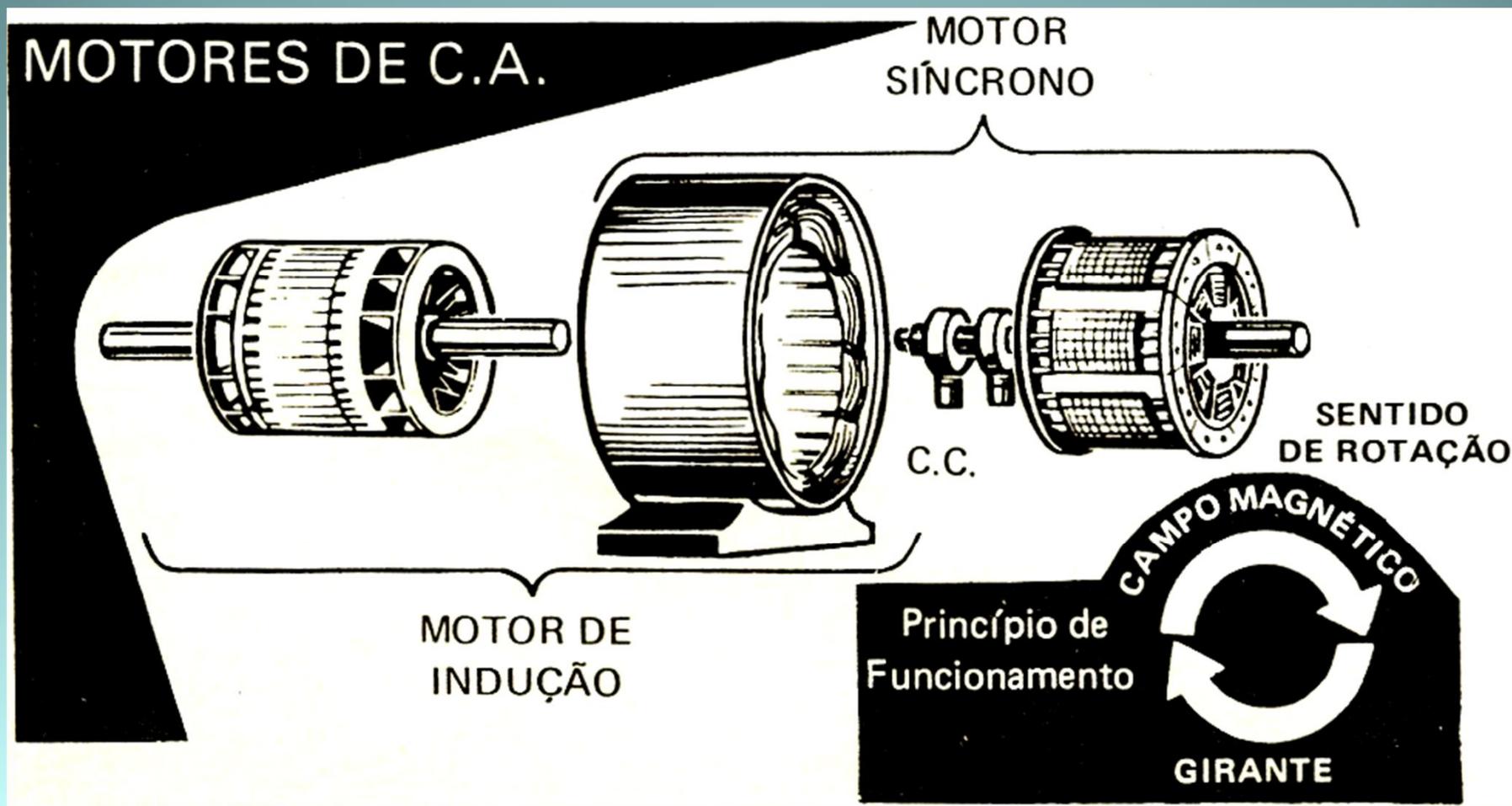
Os motores CA apresentam características excelentes para a operação a **velocidades constantes**, porque a velocidade é determinada pela frequência da rede de alimentação e o número de pólos do motor.

MOTORES TRIFÁSICOS CA

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.

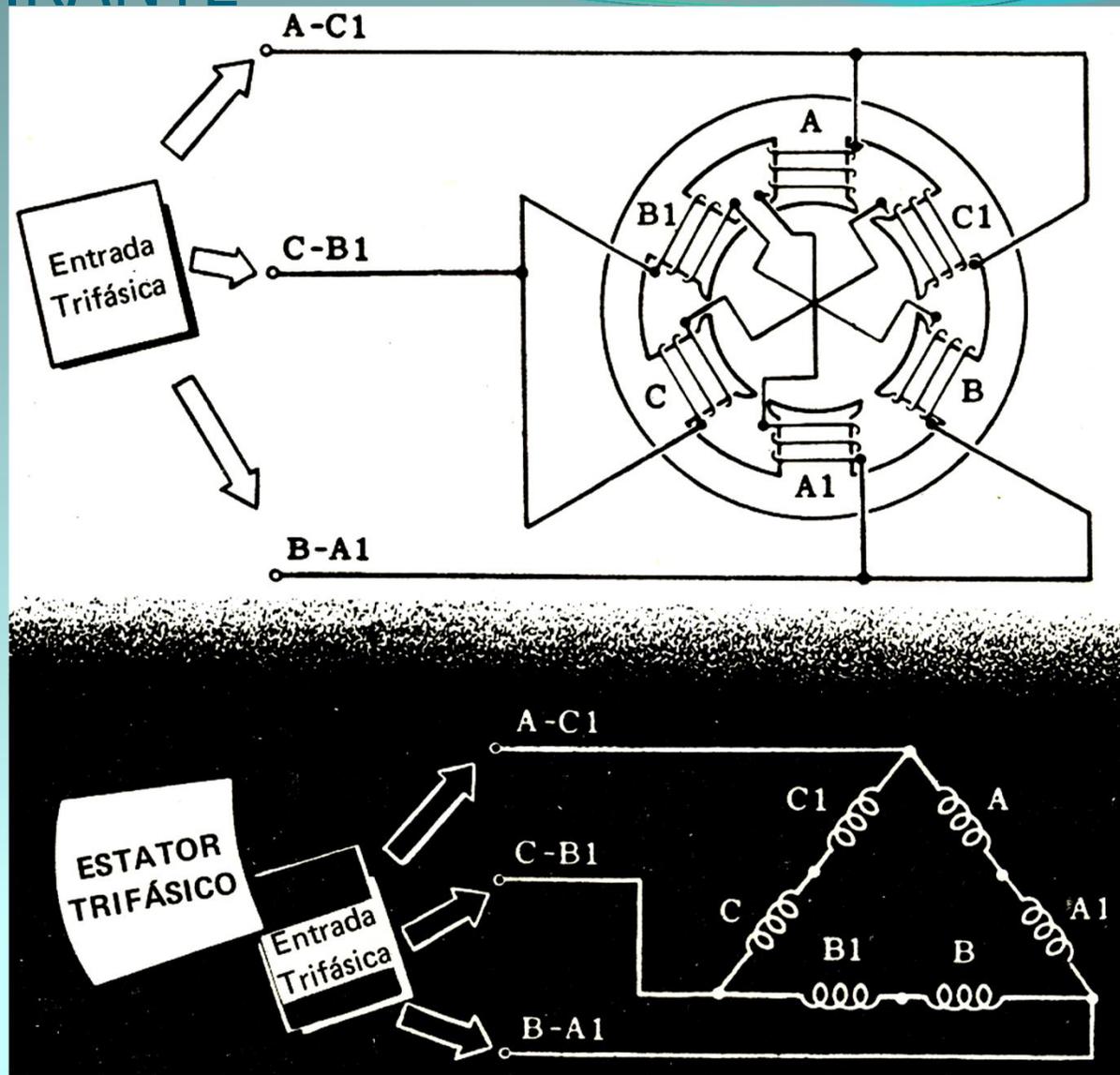
MOTORES TRIFÁSICOS - TIPOS



Principais tipos de motores de corrente alternada (indução e síncrono).

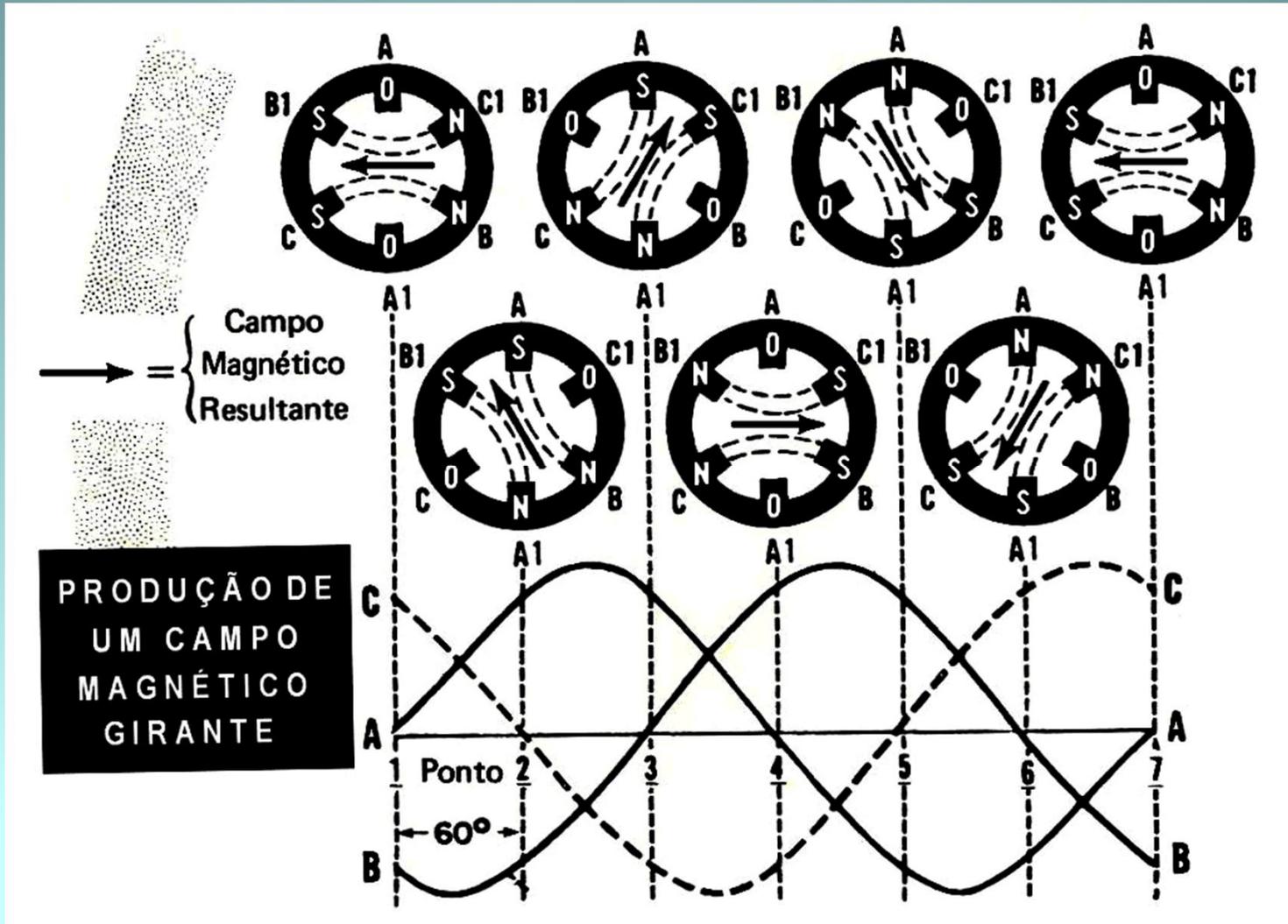
CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE

CAMPO GIRANTE

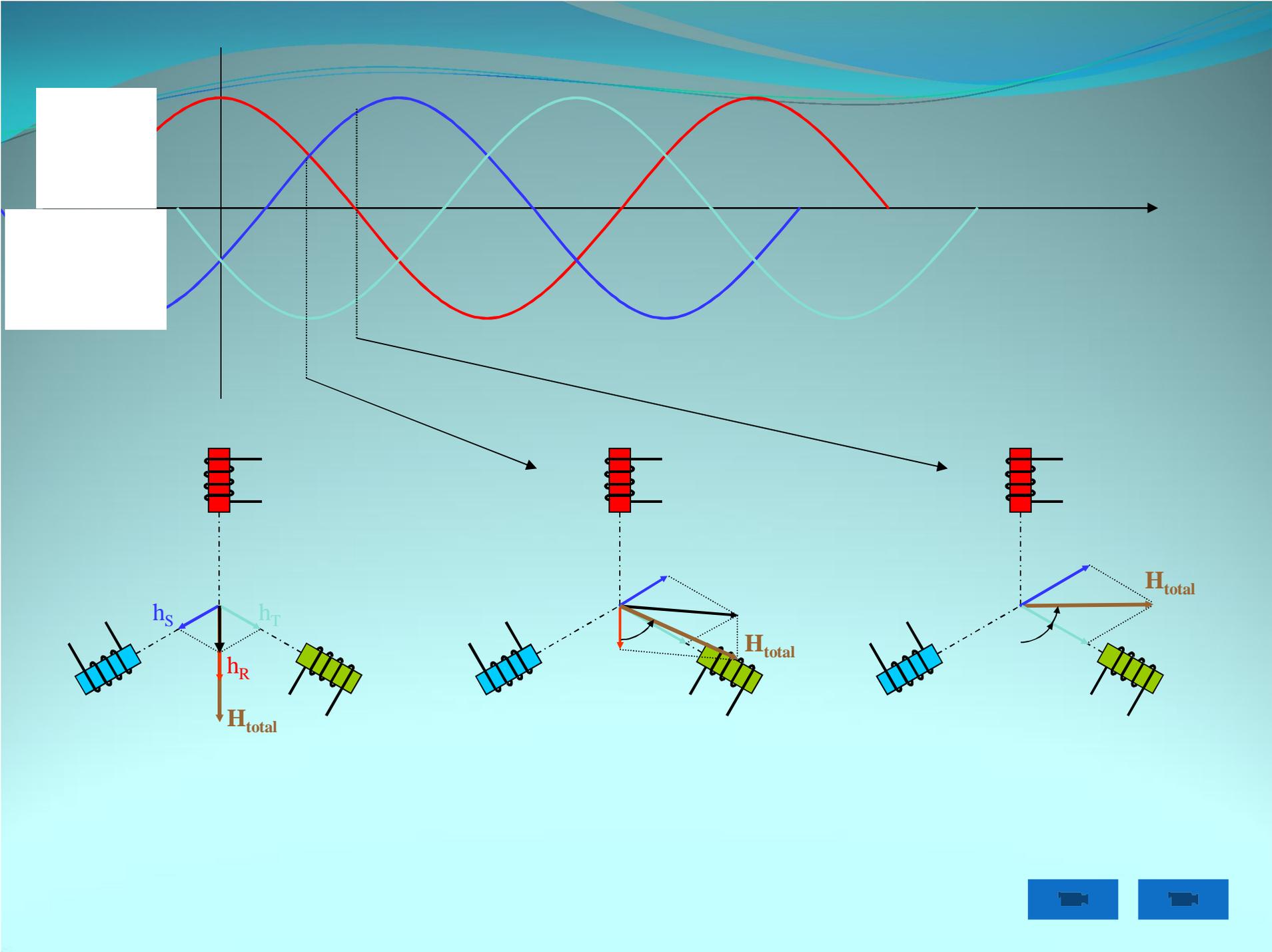


Estator trifásico de um motor CA com os enrolamentos ligados em triângulo.

CAMPO GIRANTE



Produção do campo magnético girante no estator de um motor CA trifásico.



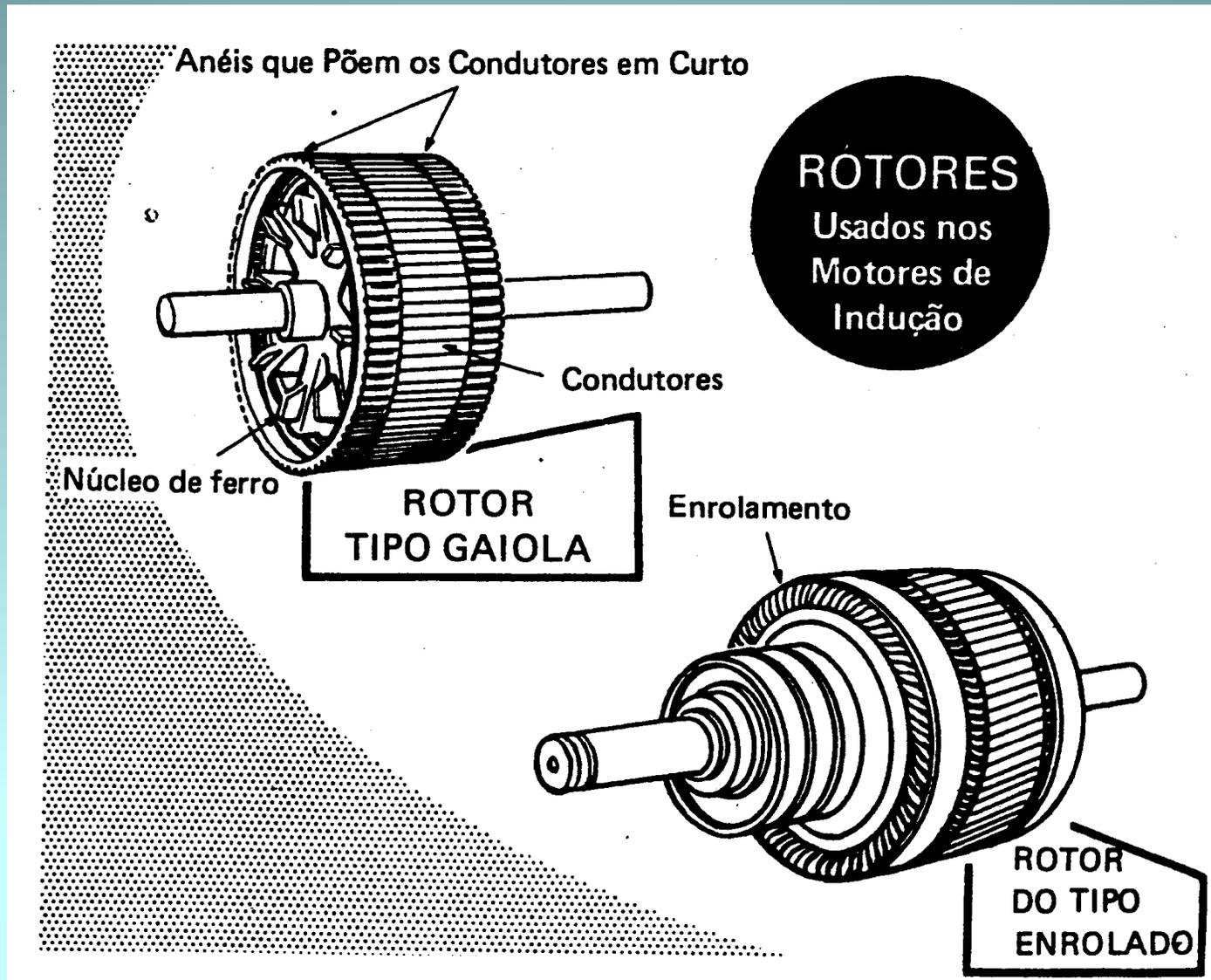
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO (OU MOTOR ASSÍNCRONO)

MOTORES DE INDUÇÃO

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.

MOTORES DE INDUÇÃO – TIPOS DE ROTORES



MOTORES DE INDUÇÃO – TIPOS DE ROTORES

A construção do estator do motor de indução é praticamente igual à do estator do motor síncrono, mas os seus rotores são completamente diferentes.

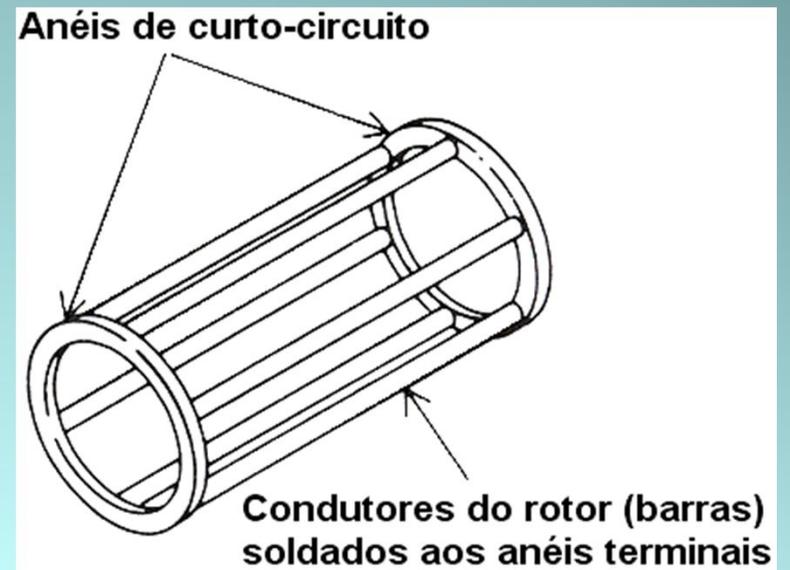
O rotor do motor de indução é um cilindro laminado, com ranhuras na superfície.

Os enrolamentos colocados nessas ranhuras podem ser de dois tipos: O tipo *rotor de gaiola* e *rotor bobinado* (ou *rotor enrolado*).

Rotor de gaiola

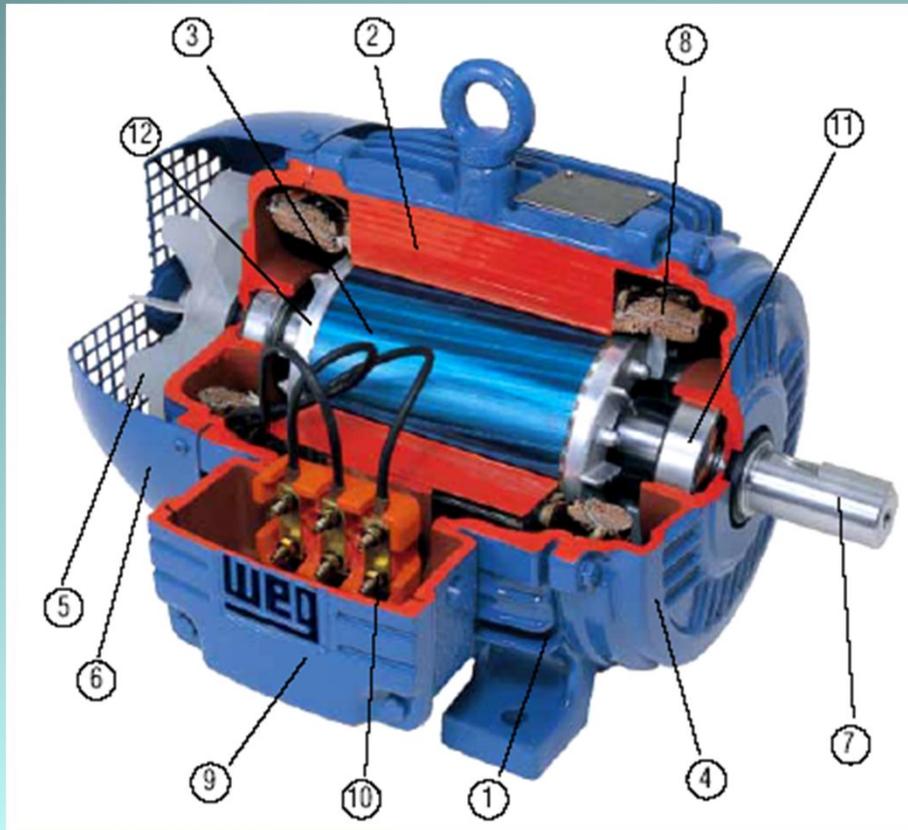
Consiste de barras de cobre, de grande seção, unidas em cada extremidade por um anel de cobre ou de bronze. Não há necessidade de isolamento entre o núcleo do rotor e as barras, porque as tensões induzidas nas barras do rotor são muito baixas. O entreferro entre o rotor e o estator é muito pequeno, para se obter a máxima intensidade de campo.

MOTORES DE INDUÇÃO – TIPOS DE ROTORES



Rotor de gaiola.

MOTORES DE INDUÇÃO – TIPOS DE ROTORES



Vista em corte de um motor de indução trifásico em rotor de gaiola

- **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:**

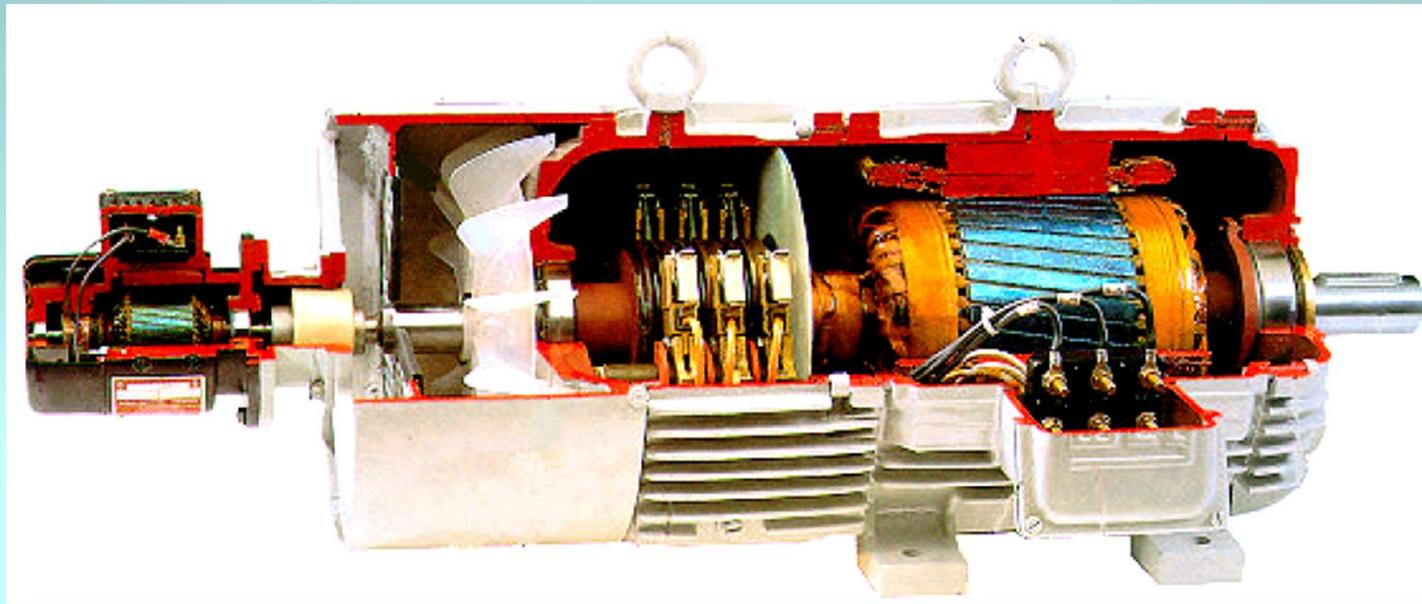
- (4) Tampa dianteira;
- (5) Ventilador;
- (6) Tampa defletora;
- (9) Caixa de ligação;
- (10) Terminais de ligação;
- (11) Rolamentos (mancais).

MOTORES DE INDUÇÃO – TIPOS DE ROTORES

Rotor Bobinado

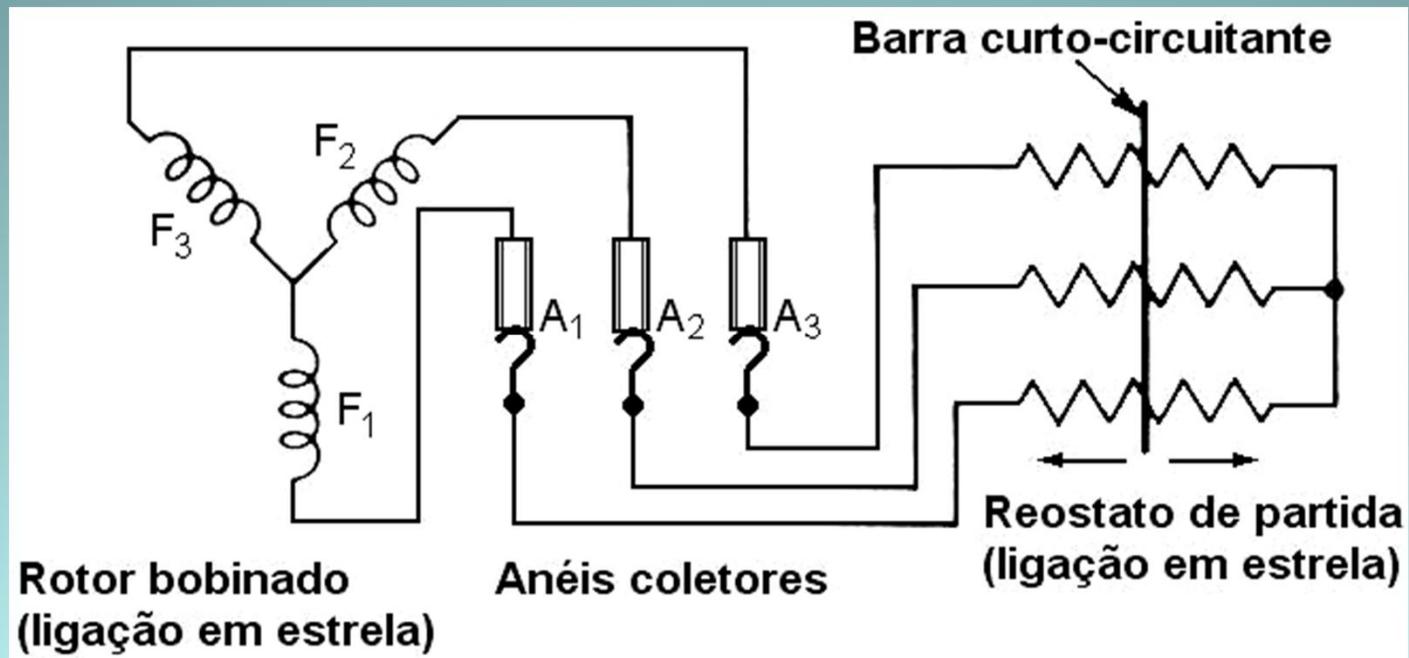
É envolvido por um enrolamento isolado semelhante ao enrolamento do estator. Os enrolamentos de fase do rotor (trifásico) são trazidos para o exterior através de três anéis coletores montados sobre o eixo do motor. O enrolamento do rotor não está ligado a nenhuma fonte de alimentação. Os anéis coletores 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.

MOTORES DE INDUÇÃO – TIPOS DE ROTORES



Motores com Rotor bobinado

MOTORES DE INDUÇÃO – TIPOS DE ROTORES



Rotor bobinado com reostato de partida.

Tipos de porta-escovas utilizados nos motores de rotor bobinado



(a) Porta-escovas fixo.



(b) Dispositivo de levantamento automático.

A) Porta-escovas fixo:

- Contato com o coletor permanentemente;
- Vida útil limitada;
- Conjunto é dimensionados para suportar as condições de partida e regime contínuo.

B) Porta-escovas com sistema motorizado de levantamento das escovas

- Levantamento é feito por um dispositivo motorizado (ou manual);
- Seqüência de atuação do dispositivo de levantamento;
- Manutenção reduzida;
- O conjunto é dimensionado para suportar condições de partida.
- Recomendado para motores com frequência baixa de partida.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O estator está ligado à fonte de alimentação CA. O rotor não está ligado eletricamente a nenhuma fonte de alimentação.

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.

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).

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

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. O motor de indução tem corrente no rotor por *indução*, e é semelhante a um transformador com secundário girante.

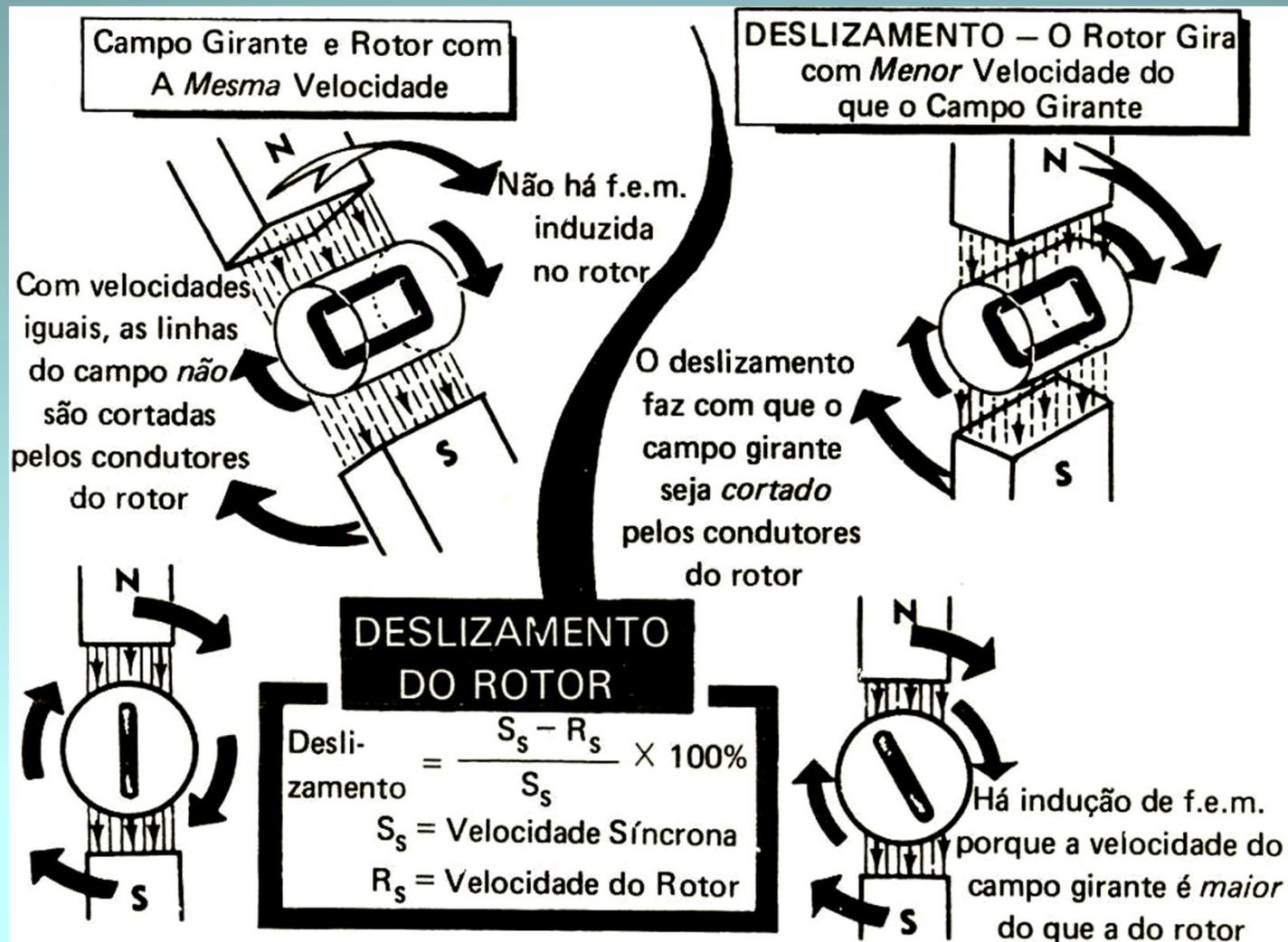
É impossível para o rotor de um motor de indução girar com a mesma velocidade do campo magnético girante. Se as velocidades fossem iguais, não haveria movimento relativo entre eles e, em consequência, não haveria *fem* induzida no rotor. Sem tensão induzida não há conjugado (torque) agindo sobre o rotor.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

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).

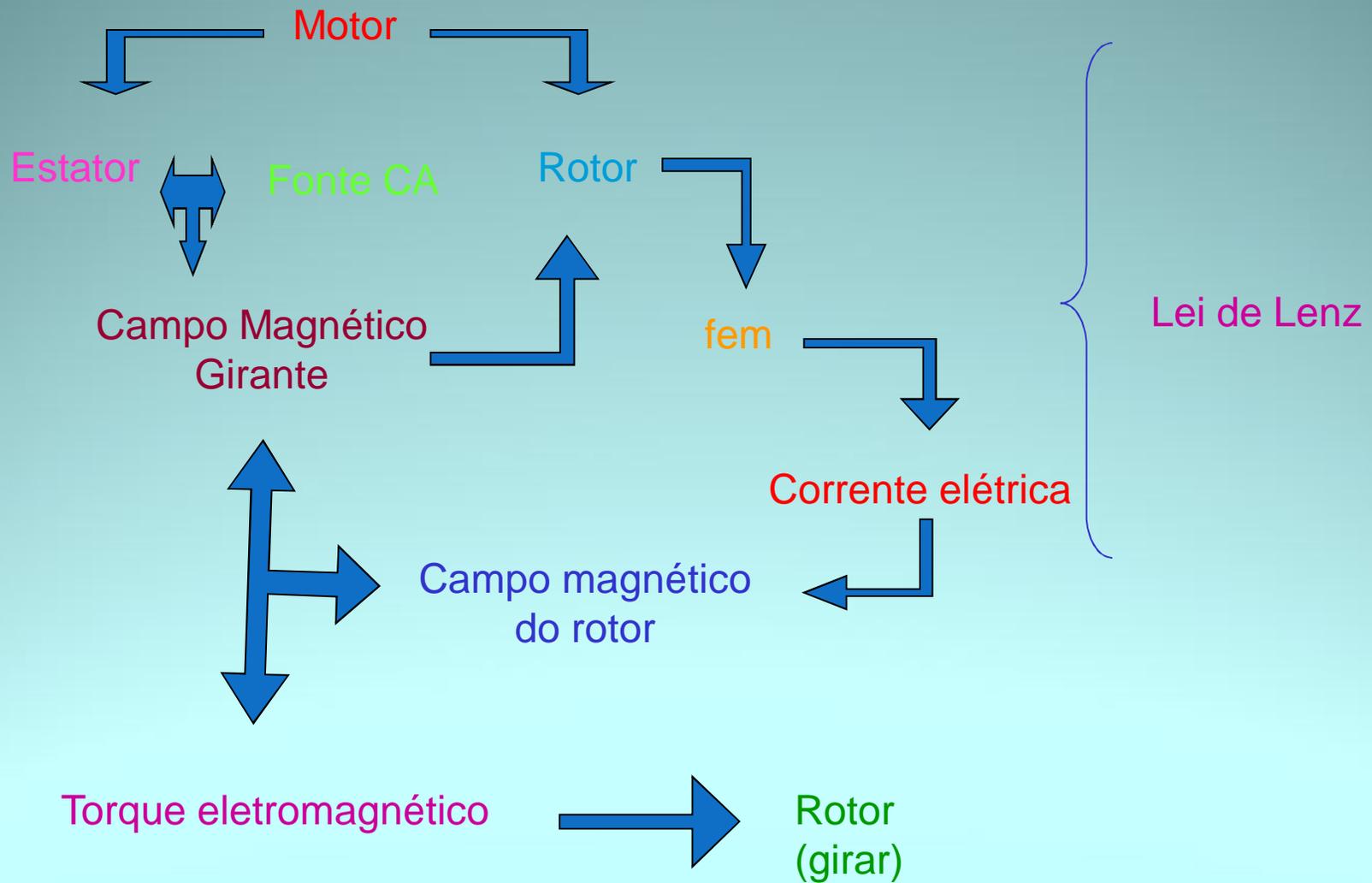
A velocidade do motor de indução cai, com cargas pesadas. Realmente, apenas pequenas variações de velocidade são necessárias para produzir as variações na corrente induzida para atender às alterações normais de carga. A razão disto é a resistência muito baixa do enrolamento do rotor (barras de cobre).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

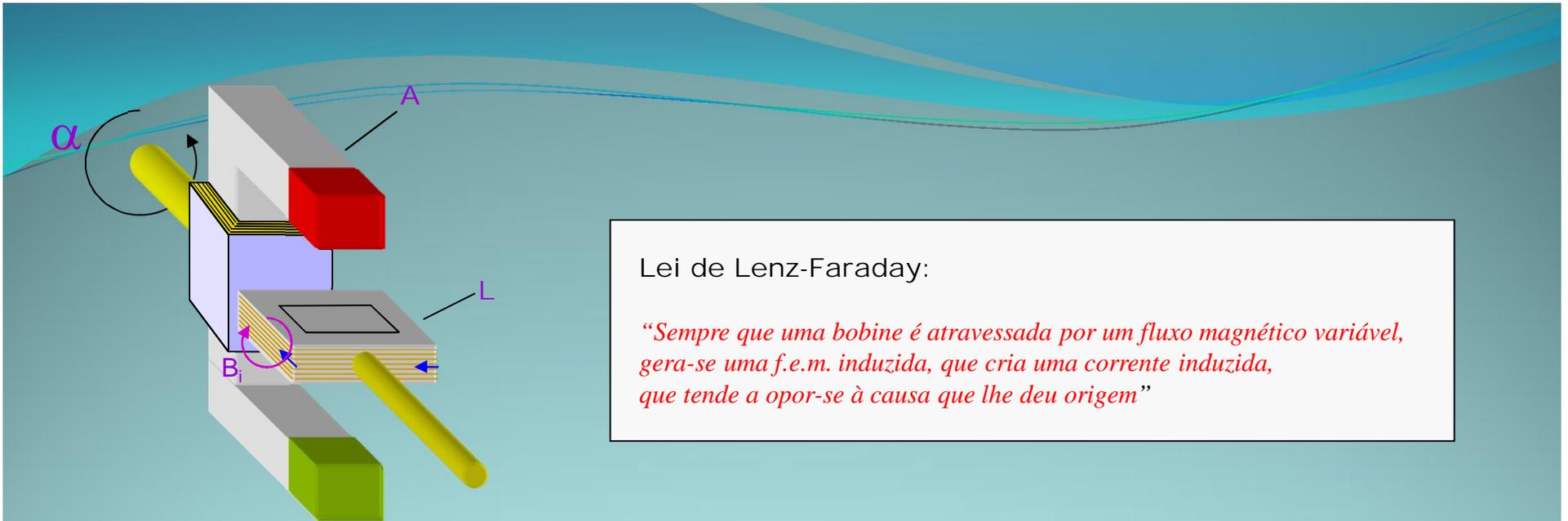
PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO



Relação entre a velocidade do campo magnético girante e a velocidade do rotor.

Princípio de funcionamento do motor de indução trifásico





Lei de Lenz-Faraday:

“Sempre que uma bobine é atravessada por um fluxo magnético variável, gera-se uma f.e.m. induzida, que cria uma corrente induzida, que tende a opor-se à causa que lhe deu origem”

Rotação do corpo A (que cria o campo magnético)



ϕ variável, que atravessa a bobine L [$\phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha$ c/ α variável]



$f.e.m._i \neq 0$

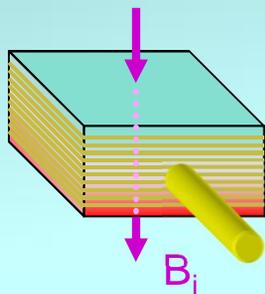
$$fem_i = -N \frac{d\phi}{dt}$$



$I_i \neq 0$ - a bobine L, é um fio com as extremidades curto circuitadas z

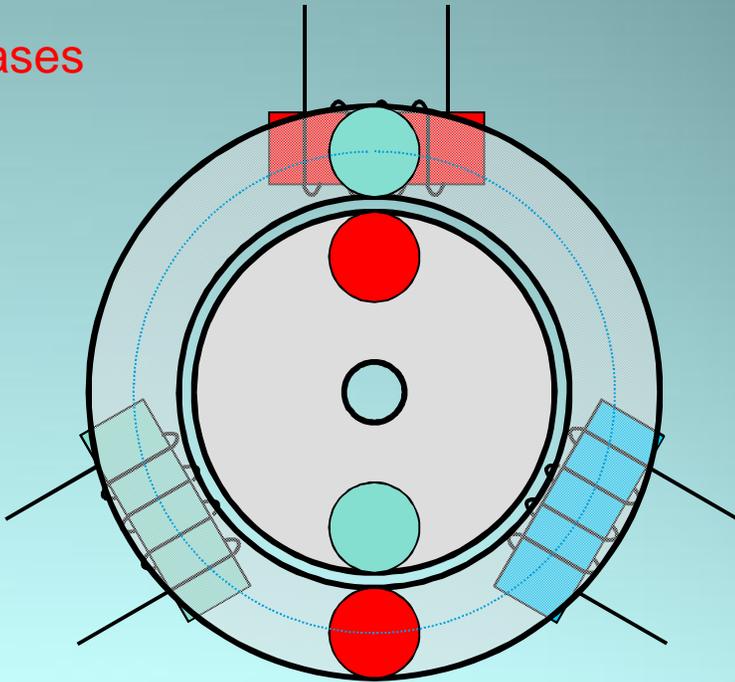
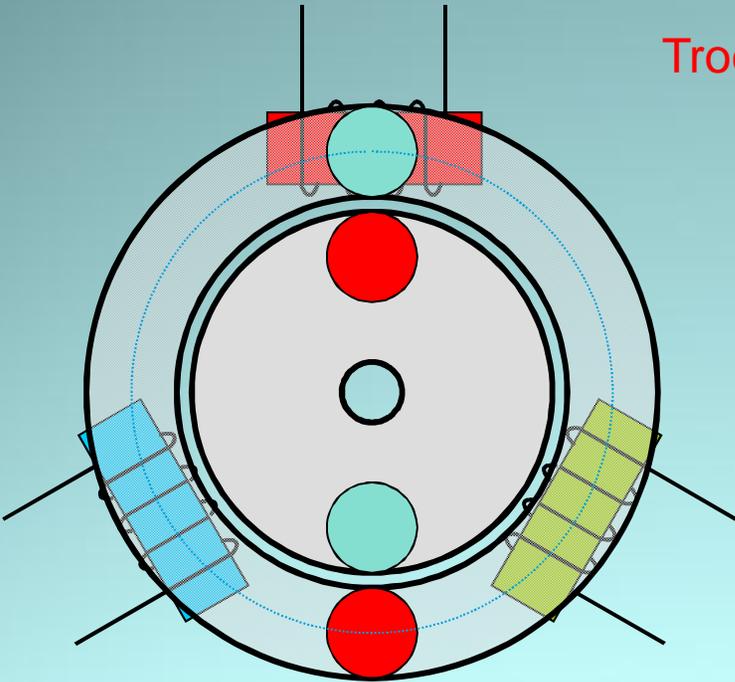


$\vec{B}_i \neq 0$



Velocidade do rotor é sempre menor que a velocidade do campo girante

Trocando 2 fases



VELOCIDADE SÍNCRONA E ESCORREGAMENTO

VELOCIDADE SÍNCRONA E ESCORREGAMENTO

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

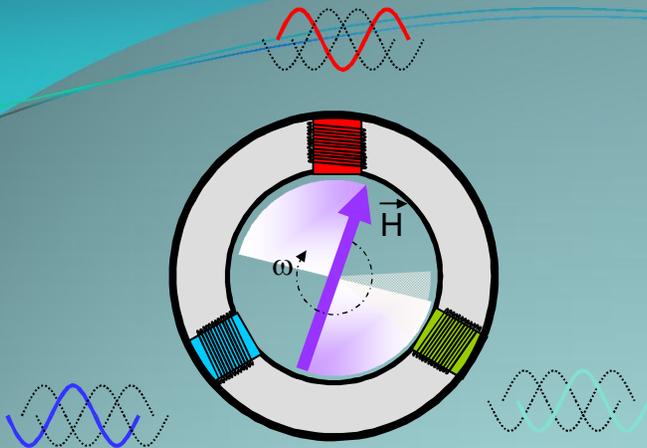
$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

onde:

n_s → velocidade síncrona ou velocidade do campo magnético girante, (rpm);

f → frequência da corrente do estator ou frequência da rede (alimentação), Hz;

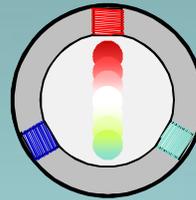
p → número total de pólos.



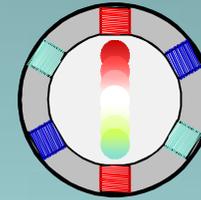
$$n = \frac{f \cdot 60}{2P}$$

1 pólo N + 1 pólo S

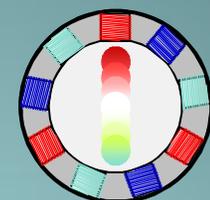
1 par de pólos



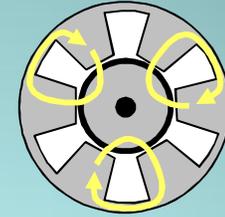
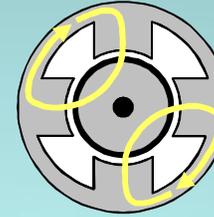
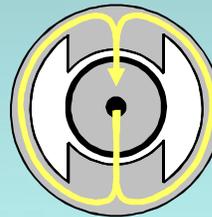
$2P = 1$
 $n = 3.000 \text{ rpm}$



$2P = 2$
 $n = 1.500 \text{ rpm}$



$2P = 3$
 $n = 1.000 \text{ rpm}$



1 conjunto de enrolamentos (3 fases):
Campo girante perfaz uma rotação de 360°
correntes cumprem 1 ciclo (de frequência f)

2 conjuntos de enrolamentos:
Campo girante perfaz uma rotação de 180°
correntes cumprem 1 ciclo (de frequência f)

VELOCIDADE SÍNCRONA E ESCORREGAMENTO

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

onde:

$S(\%)$ → escorregamento percentual, %;

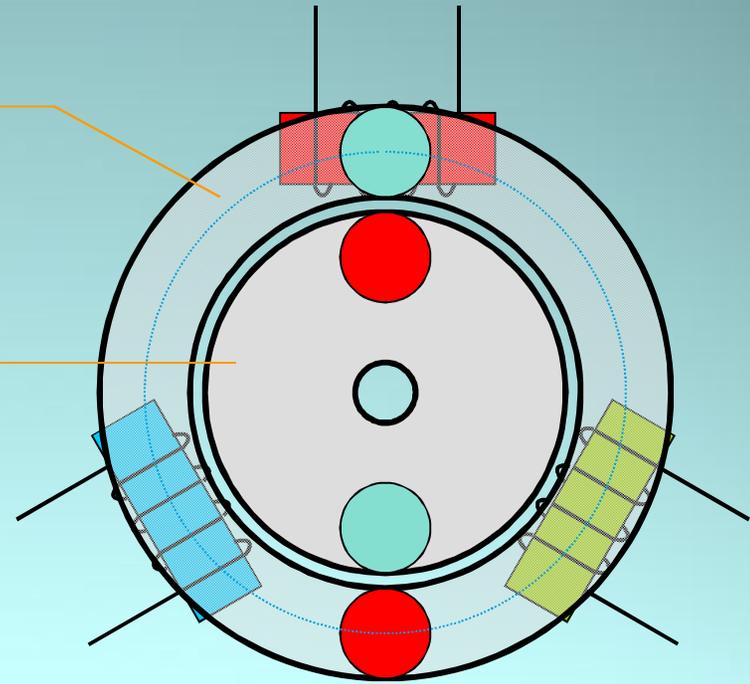
n_s → velocidade síncrona (ou velocidade do campo girante), rpm;

n → velocidade de funcionamento do motor (ou velocidade do rotor), rpm.

Deslocamento ou escorregamento

Velocidade síncrona – n_s
(campo girante)

Velocidade assíncrona – n
(rotor)



FREQUÊNCIA DO ROTOR

FREQÜÊNCIA DO ROTOR

$$f_R = S \cdot f$$

onde:

$f_r \rightarrow$ frequência do rotor (ou da corrente induzida), Hz;

$f \rightarrow$ frequência do estator (ou da tensão da rede de alimentação), Hz;

$S \rightarrow$ escorregamento percentual (escrito na forma decimal).

EQUAÇÃO DO TORQUE

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.

$$T = k \cdot \phi \cdot I_R \cdot \cos\theta_R$$

onde:

- $T \rightarrow$ torque do rotor, N·m;
- $k \rightarrow$ constante que depende dos aspectos construtivos da máquina;
- $\phi \rightarrow$ fluxo do campo girante do estator, linhas de fluxo, Wb;
- $I_R \rightarrow$ corrente do rotor, A;
- $\cos\theta_R \rightarrow$ fator de potência do rotor.

CONJUGADO DO MOTOR

CONJUGADO DO MOTOR (OU TORQUE)

O conjugado (também chamado de torque, momento ou binário) é a medida do esforço necessário para girar um eixo.

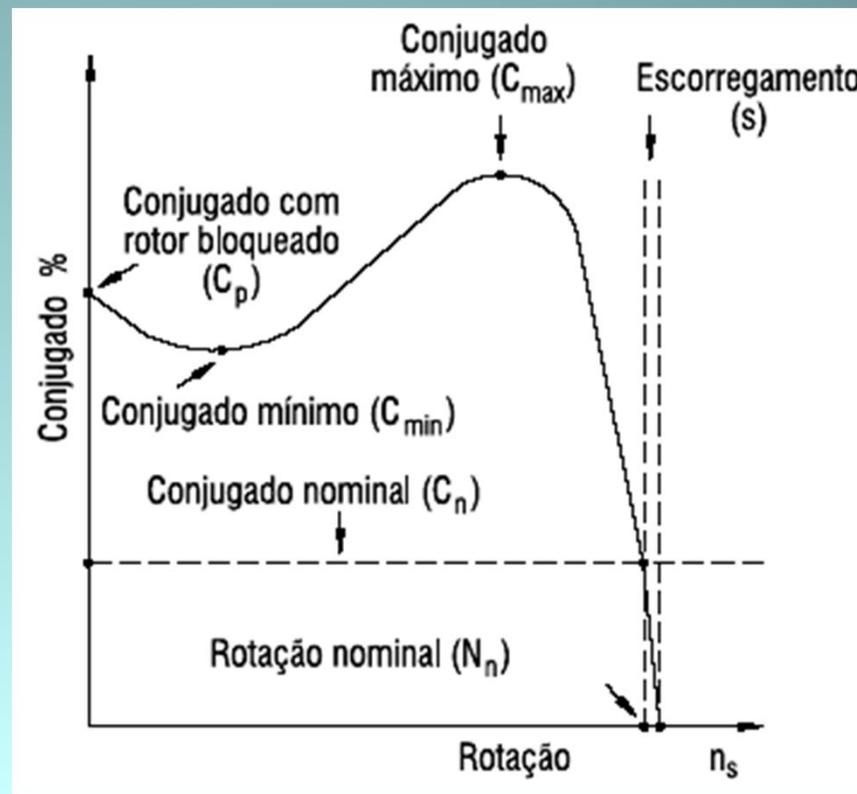
$$C = F \cdot d$$

onde:

$C \rightarrow$ conjugado (ou Torque), N·m;

$F \rightarrow$ força, N;

$d \rightarrow$ distância da aplicação da força, m.



VELOCIDADE NOMINAL

VELOCIDADE NOMINAL DO MOTOR (VELOCIDADE DO ROTOR)

É a velocidade do motor (rotor) funcionando à potência nominal, sob tensão e frequência nominais.

Depende do escorregamento e da velocidade síncrona.

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

onde:

$S \rightarrow$ escorregamento (escrito na forma decimal).

POTENCIA NOMINAL

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).

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta$$

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.

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.

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

onde:

$P(kW)$ → potência nominal dada em kW;

$P(cv)$ → potência nominal dada em cv;

$P(HP)$ → potência nominal dada em HP.

SELEÇÃO E APLICAÇÃO DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

SELEÇÃO E APLICAÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

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	Simples para partida direta	Relativamente simples
Equipamento de Proteção	Simples	Simples
Espaço Requerido	Pequeno	Reostato requer um espaço grande
Manutenção	Pequena	Nos anéis – freqüente
Custo	Baixo	Alto

MOTORES TRIFÁSICOS SÍNCRONOS

MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO

Os motores síncronos possuem características especiais:

- *O alto rendimento*
- *Correção do fator de potência* da rede;
- Altos torques;
- Velocidade constante nas variações de carga
- Baixo custo de manutenção.

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).

MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO - Princípio de Funcionamento

O estator é energizado com uma tensão CA trifásica onde se produz um campo magnético girante e este atua sobre o rotor.

O rotor do motor síncrono é energizado com uma tensão CC, se comportando como um ímã suspenso em um campo magnético que se move, procurando 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.

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.*

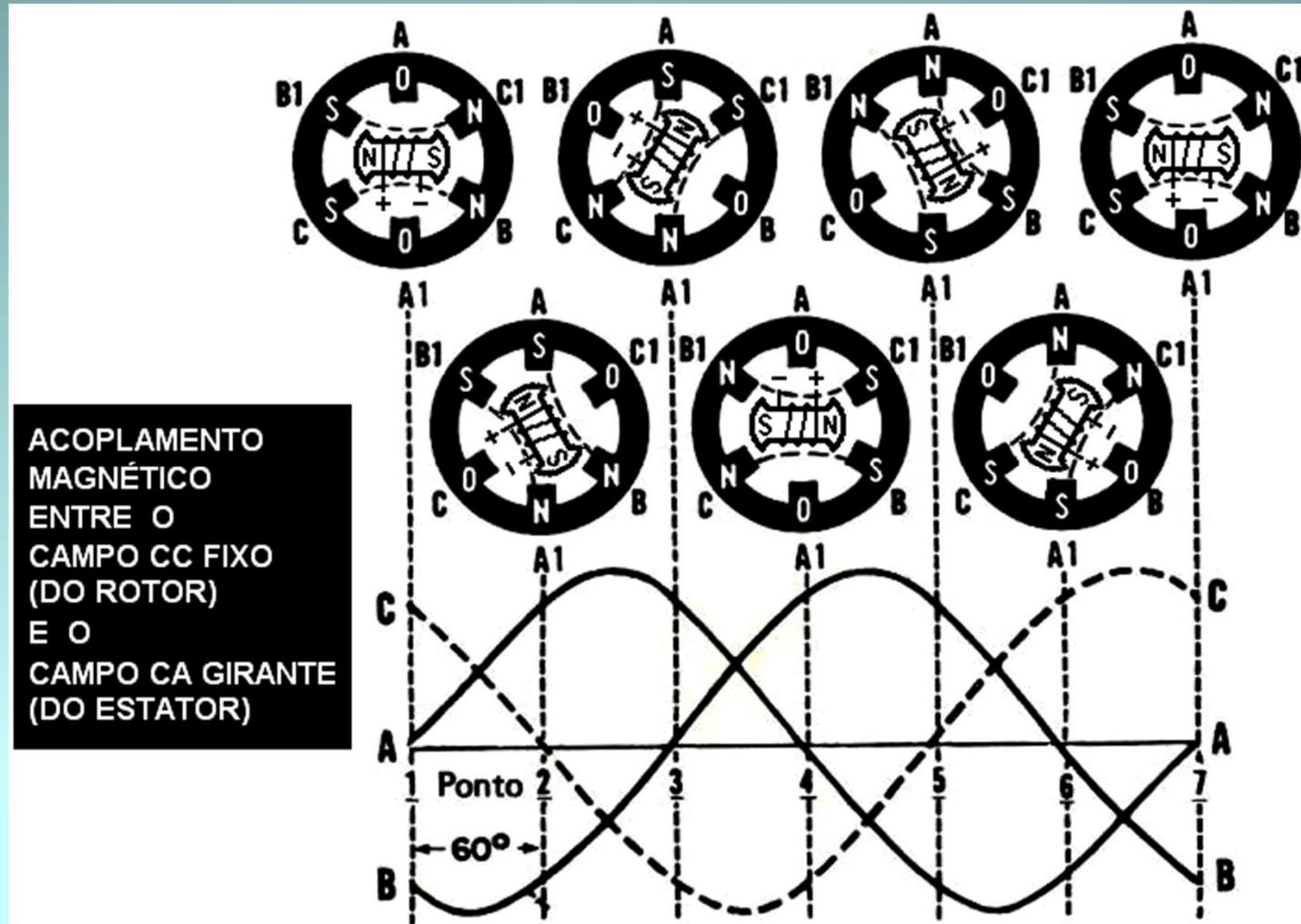
MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO - Princípio de Funcionamento

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 ($S = 0$).

MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO - Princípio de Funcionamento



Acoplamento magnético entre o campo CC fixo do rotor e o campo CA girante do estator.

MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO - Tipo de Excitação do Campo CC do Rotor

- Excitatriz Estática (com escovas)
- Excitatriz Brushless (sem escovas)

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.

MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO - Tipo de Excitação do Campo CC do Rotor

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.

MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO - Tipo de Excitação do Campo CC do Rotor

Excitariz Brushless (sem escovas)

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.

MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO - Tipo de Excitação do Campo CC do Rotor



(a) Excitatriz estática com escovas.

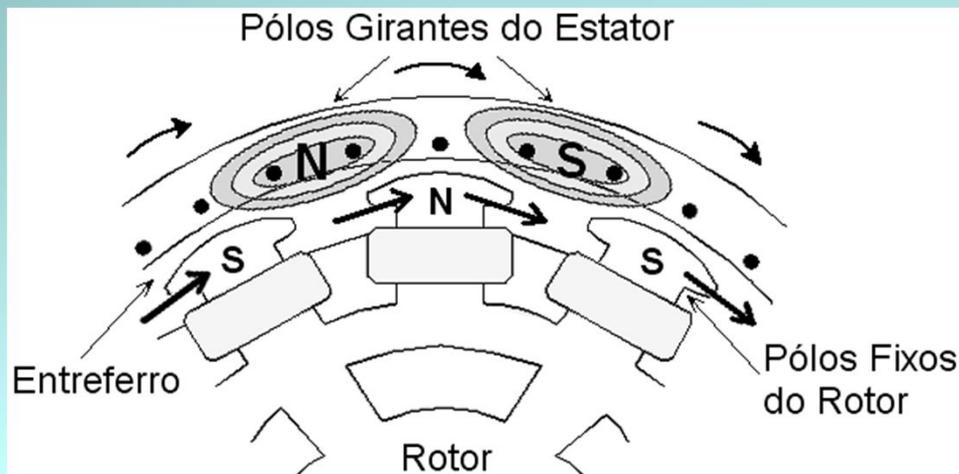


(b) Excitatriz *brushless* sem escovas.

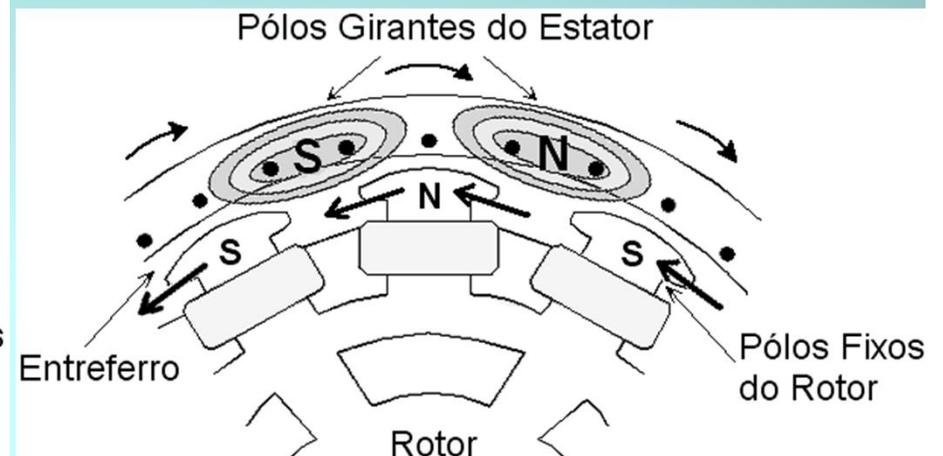
Os dois tipos de excitatriz utilizadas para aplicação de tensão CC no rotor.

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.



(a) Pólo NORTE do estator se aproximando.



(b) Pólo NORTE do estator se afastando.

Torque resultante nulo na partida do motor síncrono, quando o rotor está parado.

PARTIDA DOS MOTORES SÍNCRONOS

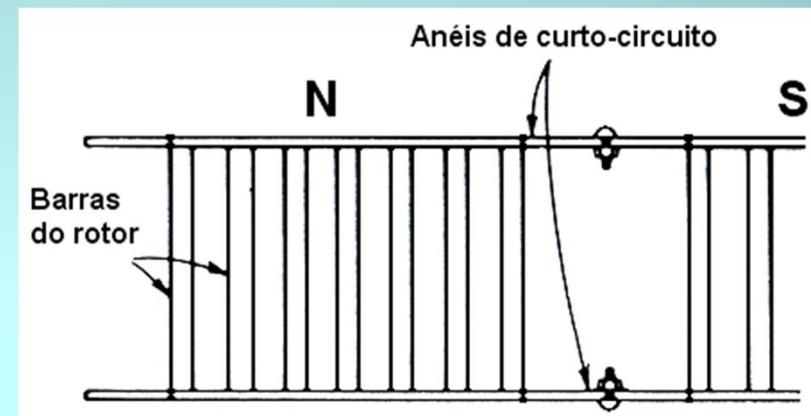
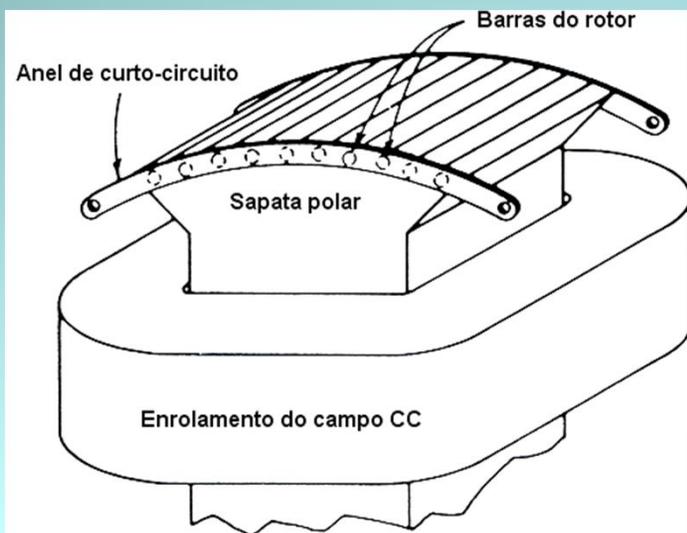
No processo de partida de um motor síncrono o seu rotor deve ser levado até uma velocidade suficientemente próxima da síncrona, para que ele possa se acoplar magneticamente com o campo girante e entrar em sincronismo.

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;
- (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.

PARTIDA DOS MOTORES SÍNCRONOS

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.



(a) Pólo saliente do rotor de um motor síncrono. (b) Enrolamento amortecedor para partida de um motor síncrono, para partida como rotor de gaiola.

PARTIDA DOS MOTORES SÍNCRONOS

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.

PARTIDA DOS MOTORES SÍNCRONOS

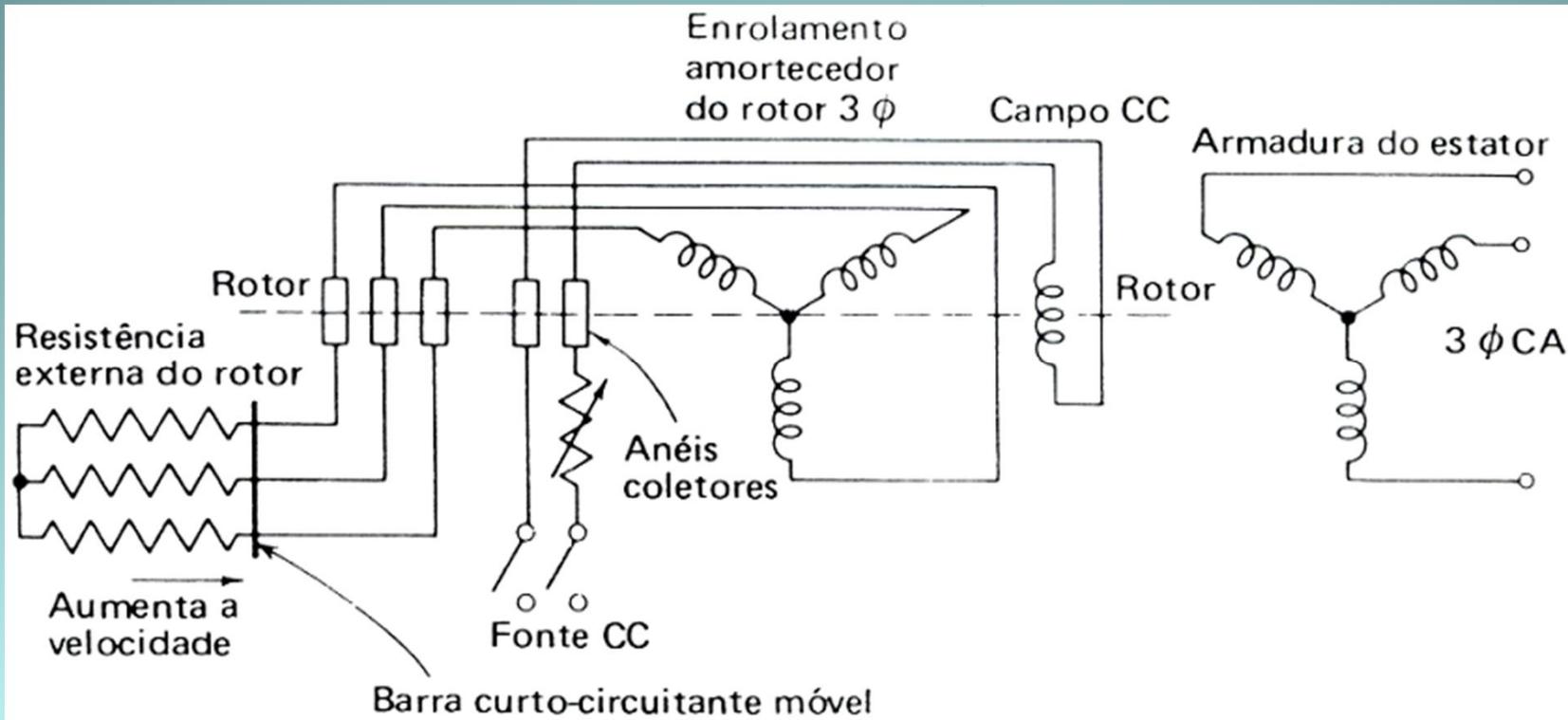


Diagrama esquemático de um motor síncrono com enrolamento amortecedor bobinado.

PARTES CONSTRUTIVAS DOS MOTORES SÍNCRONOS - ESTATOR



(a) Carcaça.



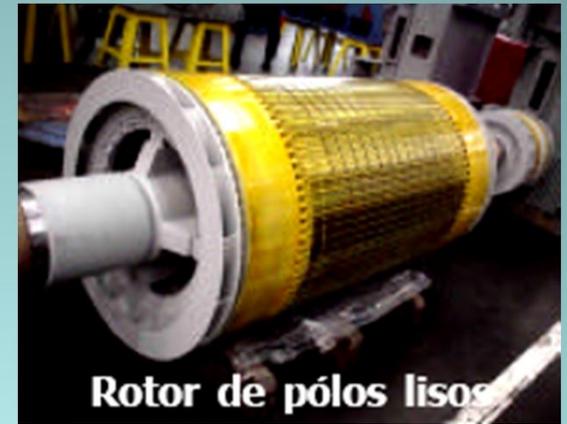
(b) Estator bobinado.



(c) Colocação do bobinado.

Partes construtivas do estator de um motor síncrono.

PARTES CONSTRUTIVAS DOS MOTORES SÍNCRONOS - ROTOR



(a) Pólos salientes.

(b) Enrolamento amortecedor.

(c) Pólos lisos.

Partes construtivas do rotor de um motor síncrono.

PARTES CONSTRUTIVAS DOS MOTORES SÍNCRONOS - MANCAIS



(a) Rolamentos.



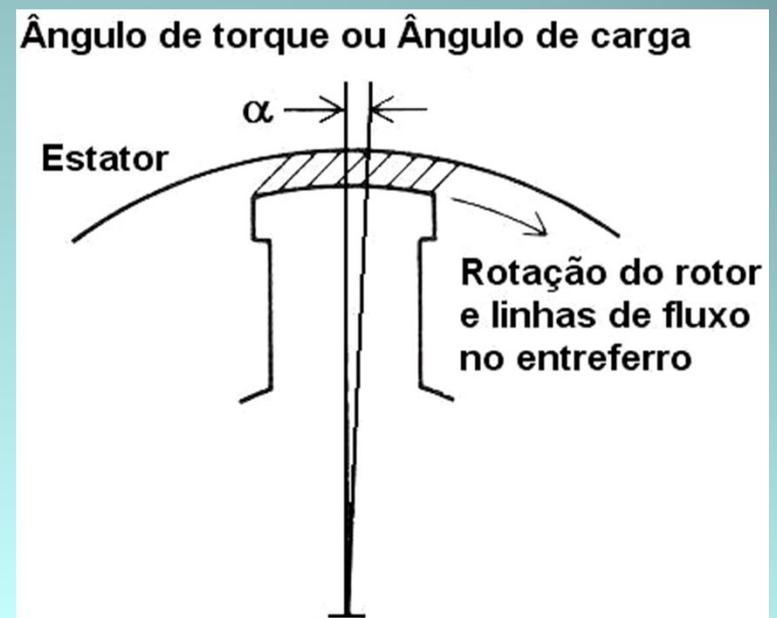
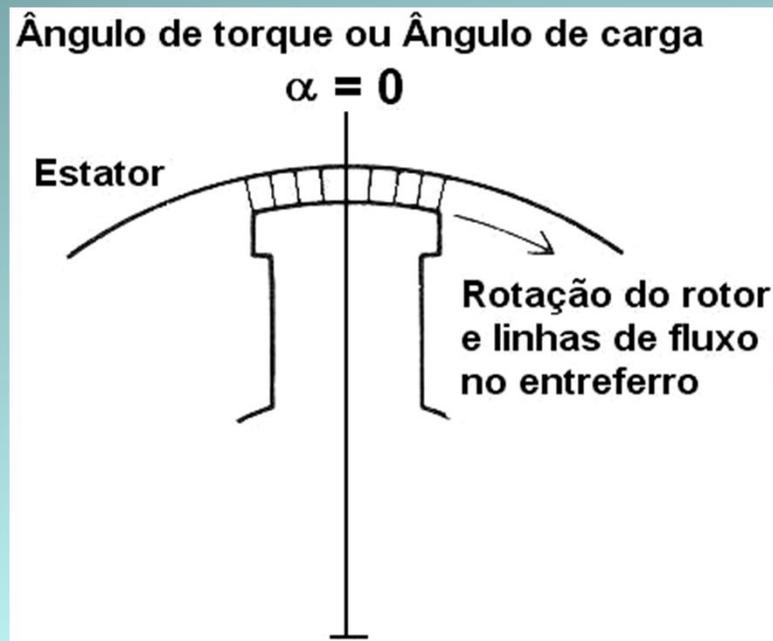
(b) Lubrificação natural.



(c) Lubrificação forçada.

Tipos de mancais utilizados nos motores síncronos.

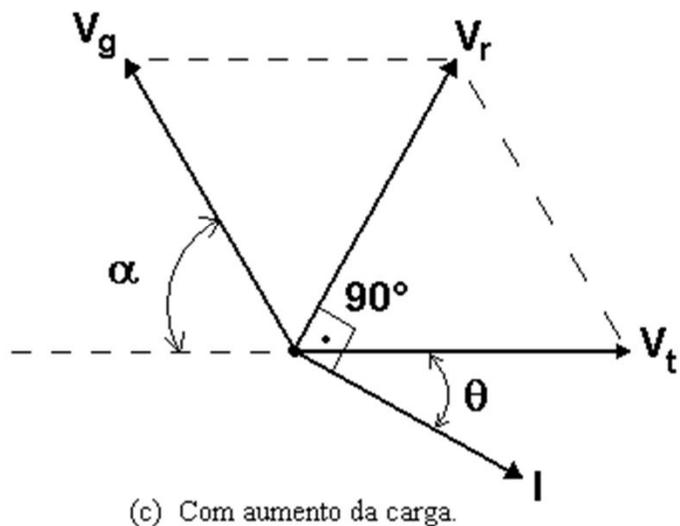
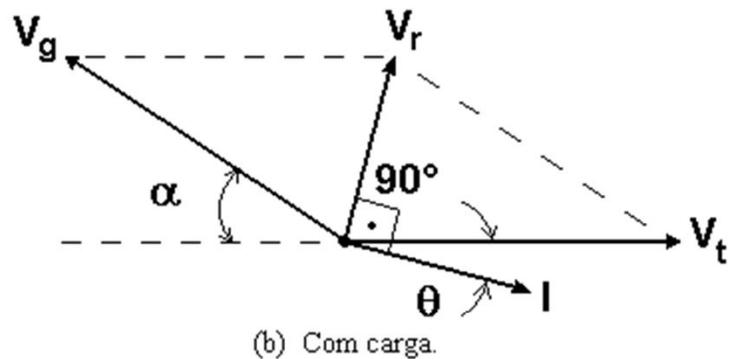
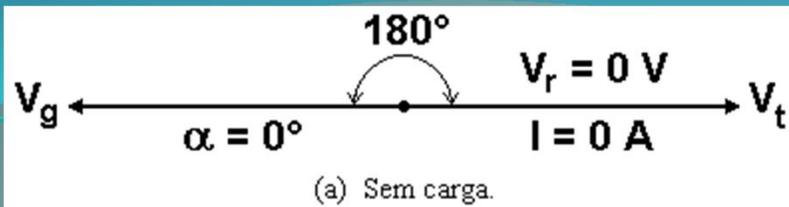
EFEITO DA CARGA SOBRE OS MOTORES SÍNCRONOS



(a) Sem carga.

(b) Com carga.

Posições relativas do pólo do estator e do pólo do rotor (campo CC).



Diagramas de fasores para condições de cargas diferentes e excitação de campo CC constante.

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;

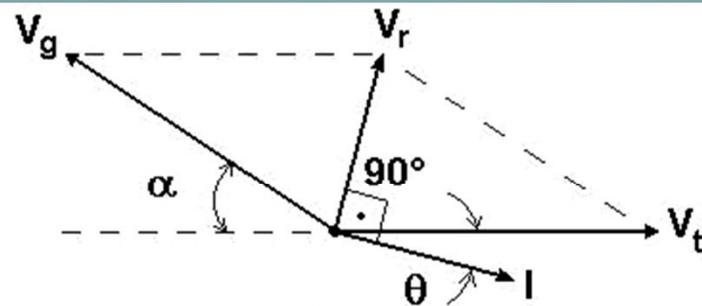
V_r → tensão resultante nos enrolamentos do estator ($V_t + V_g$), V;

I → corrente nos enrolamentos do estator ou corrente solicitada à rede pela carga, A;

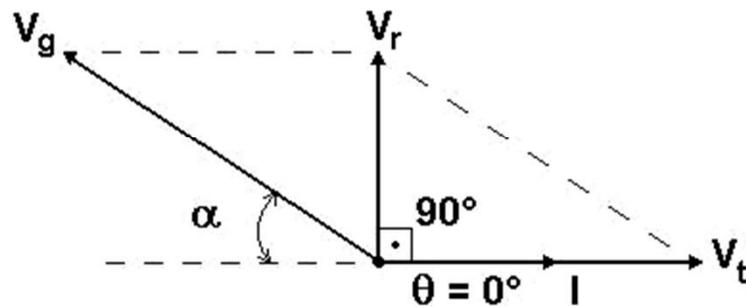
α → defasagem entre os pólos do estator e os pólos do rotor ou ângulo de carga, $^\circ$;

θ → defasagem entre a tensão V_t e a corrente I solicitadas da rede ou ângulo do fator de potência, $^\circ$.

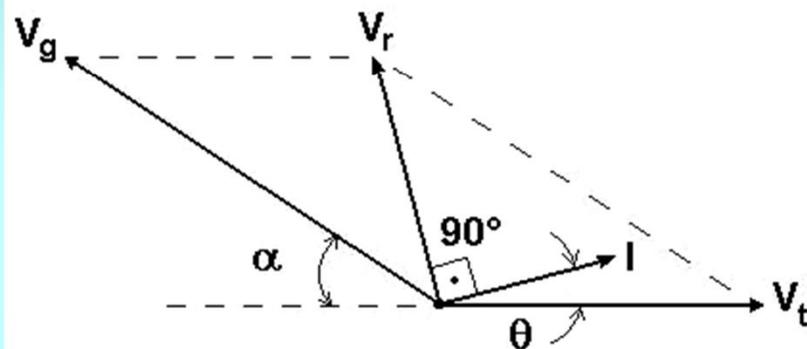
EXCITAÇÃO DE CAMPO USADA PARA ALTERAR O FATOR DE POTÊNCIA DO MOTOR SÍNCRONO



(a) Fator de potência INDUTIVO, campo CC subexcitado.



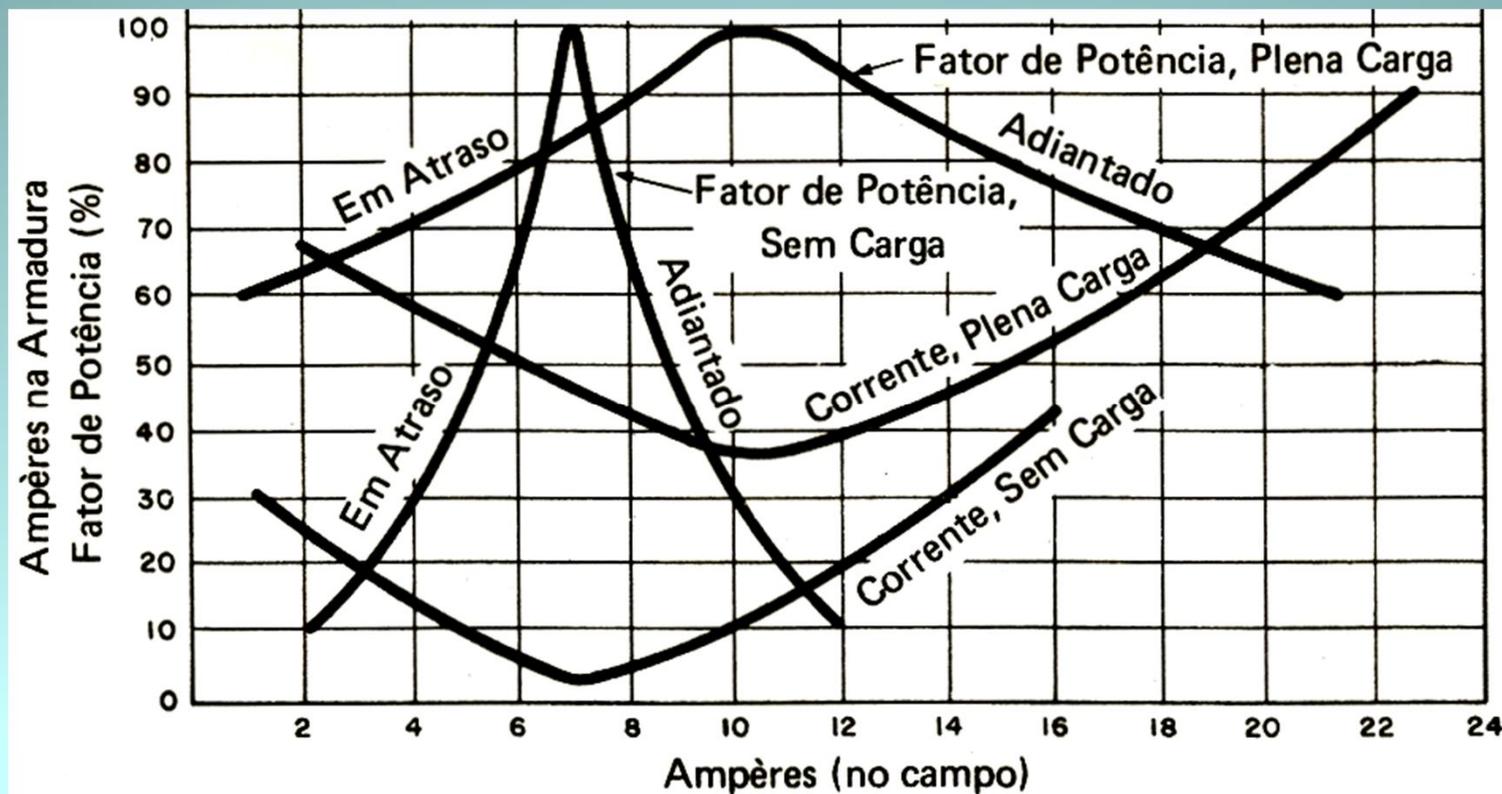
(b) Fator de potência UNITÁRIO, campo CC com excitação normal.



(c) Fator de potência CAPACITIVO, campo CC superexcitado.

Diagramas de fasores para condições de carga constante e excitação de campo CC variando.

EXCITAÇÃO DE CAMPO USADA PARA ALTERAR O FATOR DE POTÊNCIA DO MOTOR SÍNCRONO



Curvas V para um motor síncrono de 15 kVA.

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.