

1. Introdução à Máquina Síncrona

As máquinas de corrente contínua e as máquinas de indução (assíncronas), as máquinas síncronas podem ser utilizadas tanto como motores como geradores. Devido a razões construtivas e ao seu custo maior em relação às máquinas de indução, elas são entretanto mais utilizadas como geradores. Como motores elas são em geral utilizadas em altas potências (acima de 600 CV), onde apresentam vantagens importantes em relação aos motores de indução. Por outro lado, máquinas síncronas a imãs permanentes vem tendo uma utilização cada vez maior em baixas e médias potências especialmente quando se necessita de velocidade variável, alto rendimento e respostas dinâmicas rápidas. Tanto as máquinas síncronas tradicionais de rotor bobinado como as máquinas síncronas a imãs permanentes necessitam em geral um conversor para o seu acionamento e controle, caso seja necessários que elas operem como motor com velocidade variável.

Uma utilização típica da máquina síncrona funcionando como gerador é em centrais elétricas, independente do seu tipo (hídrica, a carvão, a diesel, etc...). Praticamente toda a energia elétrica disponível é produzida por geradores síncronos em centrais elétricas; eles convertem, assim energia mecânica em elétrica. Geradores síncronos também são utilizados para geração de energia elétrica em centrais de pequeno porte e em grupos geradores de emergência, os quais são instalados em indústrias, hospitais, aeroportos, etc... Neste caso o gerador não está ligado a um grande sistema de energia, mas funcionando de forma isolada.

1.1. Construção do gerador Síncrono.

No gerador síncrono deve alimentar o enrolamento do rotor com corrente contínua, na qual produz um campo magnético giratório dentro do gerador no qual, por sua vez, induz um sistema trifásico de tensão nos enrolamentos do estator.

Essencialmente, o rotor do gerador síncrono é um grande eletroímã. Construtivamente, os pólos magnéticos do rotor podem ser salientes ou não salientes. O termo saliente significa “protuberância”, e um pólo saliente é um pólo magnético que sobressai da superfície do rotor. Por outro lado, um pólo não saliente é um pólo magnético construído nivelado com a superfície do rotor. A figura 1.1 apresenta um rotor de pólos não salientes (também conhecido como rotor de pólos lisos, ou rotor cilíndrico), enquanto a figura 1.2 mostra um rotor de pólos salientes. Os rotores cilíndricos utilizados normalmente para dois e quatro pólos, enquanto que os rotores de pólos salientes utilizados para quatro ou mais pólos. Como o rotor está sujeito a

campos magnéticos variáveis, deve construir com laminações para reduzir as perdas por corrente parasitas.

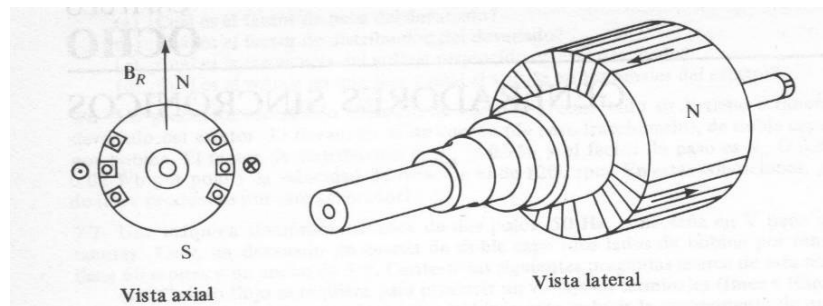


Figura 1.1. Rotor cilíndrico de dois pólos de uma máquina síncrona

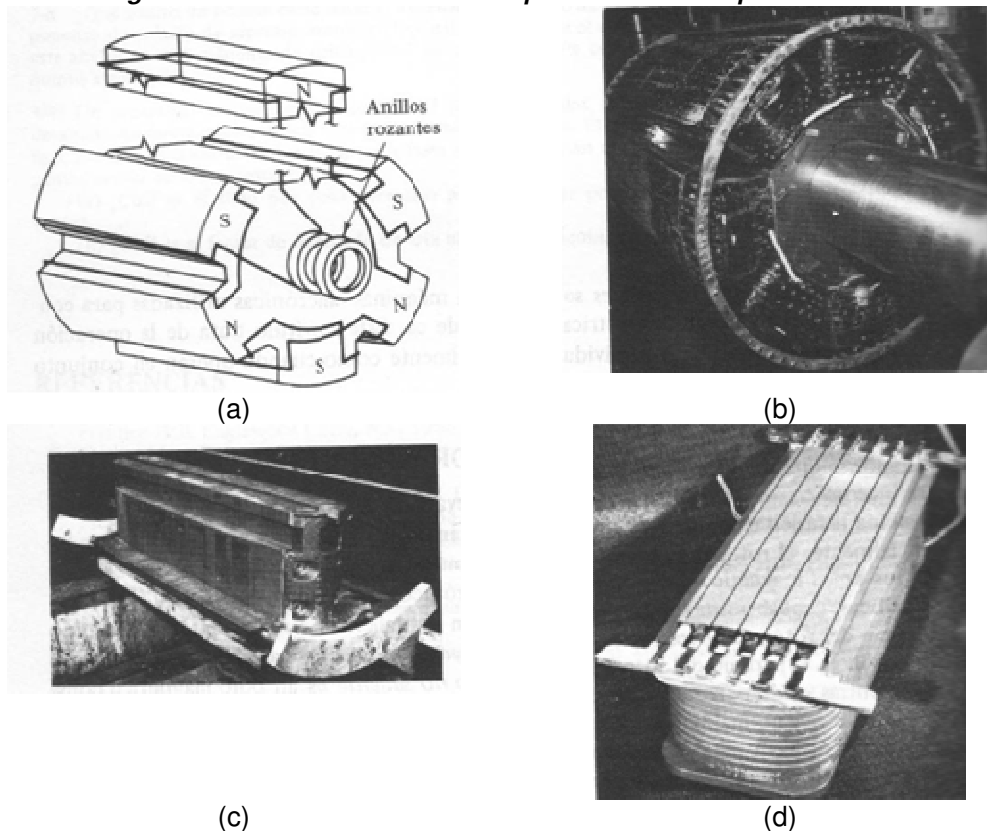


Figura 1.2. (a) rotor de pólos salientes de uma máquina síncrona de seis pólos, (b) Fotografia do rotor de pólos salientes de uma máquina síncrona de oito pólos, na qual pode ver o enrolamento de cada pólo (c) fotografia de um pólo saliente sem o enrolamento de campo (d) um pólo saliente com seu enrolamento de campo,

Deve fornecer alimentação CC ao circuito de campo do rotor. Como o rotor está em movimento, é necessário adotar construções especiais com a finalidade de fornecer energia de campo. As duas soluções mais comuns são:

a)- Fornecer energia cc ao rotor através de uma fonte externa por meio de rolamentos e escovas

b)- Prover energia cc por meio de um fonte especial construída diretamente sobre o eixo do gerador síncrono.

Os rolamentos são anéis metálicos em torno do eixo da máquina, mas isolados do mesmo eixo. Cada extremidade do enrolamento do rotor está conectada a um anel e sobre cada anel faz contato sobre uma escova. Se as escovas se conectam os terminais positivos e negativos da fonte, em todo momento a mesma tensão é aplicada no enrolamento de campo, sem importar a posição angular nem a velocidade do rotor.

A combinação dos enrolamentos e escovas causa problemas em máquinas síncronas, devido ao aumento da exigência de manutenção das máquinas pela periodicidade com que deve ser revisada. Adicionalmente, a queda de tensão nas escovas pode ser causada pelas de potência em máquinas com alta corrente de campo. Apesar destes problemas, em todas as pequenas máquinas síncronas utilizam enrolamentos com escovas isto porque é o método funcional menos custoso para fornecer a corrente de campo.

Em grandes geradores e motores, se utilizam excitatrizes sem escovas para fornecer a corrente de campo da máquina. A excitatriz sem escovas é um pequeno gerador de CA, com seu circuito de campo montado no estator e com a armadura montada sobre o eixo do rotor. A tensão trifásica da excitatriz é retificada para tensão contínua por meio de um circuito retificador, montado também sobre o eixo do gerador, e injetada diretamente em seu circuito de campo. Mediante o controle da corrente de campo da excitatriz (localizado no estator), se consegue ajustar a corrente de campo pela máquina principal sem a utilização de enrolamentos e escovas. A figura 1.3 se mostra o rotor de uma máquina síncrona com uma excitatriz sem escovas montadas sobre o mesmo eixo. Como não existem contatos mecânicos entre rotor e estator, a excitatriz sem escovas necessita muito menos manutenção que é sistema de enrolamentos e escovas.

Para assegurar que a excitação do gerador seja completamente independente de qualquer fonte de energia exterior, o sistema inclui geralmente uma pequena excitatriz piloto, constituído de um gerador com ímãs permanentes montados sobre o eixo do rotor e com o enrolamento trifásico no estator. Sua finalidade é fornecer a energia de campo da excitatriz na qual, por sua vez, alimenta o circuito de campo da máquina principal. Consequentemente, se o eixo do gerador se inclui a excitatriz piloto, não necessita prover fonte elétrica externa para operar o gerador.

Muitos geradores síncronos dotados de excitatriz sem escovas também trazem enrolamentos e escovas, com o propósito de prover uma fonte auxiliar de cc em casos de emergência.

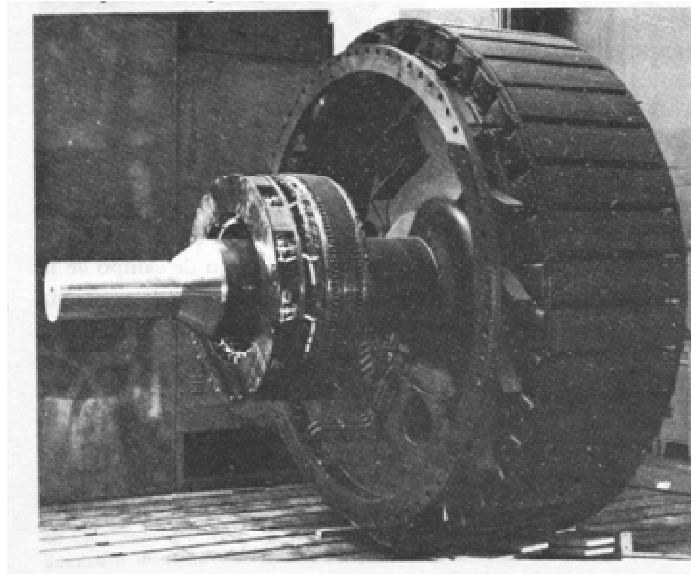


Figura 1.3. Fotografia do rotor de uma máquina síncrona com excitatriz sem escovas montadas sobre o mesmo eixo. Nota-se elementos retificadores eletrônicos próximos a armadura da excitatriz

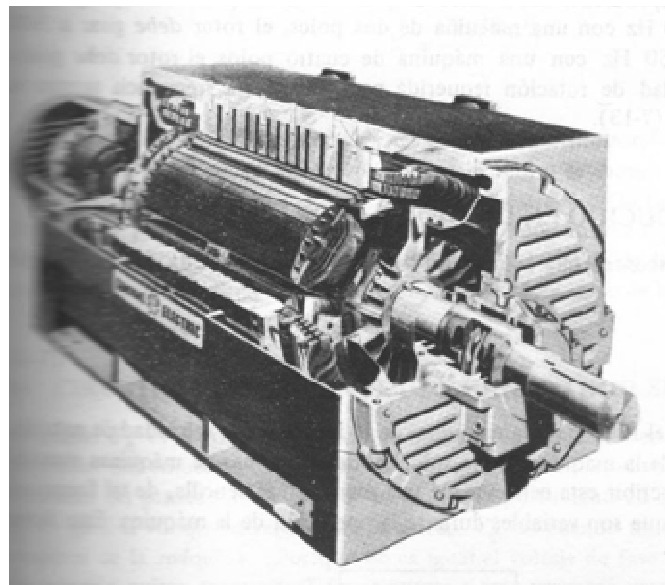


Figura 1.4. Vista do corte de uma máquina síncrona grande. Nota-se o rotor de pólos salientes e a excitatriz montada sobre o mesmo eixo.

A figura 1.4 apresenta o diagrama em corte de uma grande máquina síncrona com rotor e oito pólos, estator com enrolamento distribuído e dupla camada e excitatriz sem escovas.

1.2. Partes Construtivas Principais

As partes construtivas principais de um gerador síncrono são mostradas e são discutidas brevemente no que segue.

1.2.1. Estator

O estator da máquina síncrona é muito semelhante ao de um motor de indução. É composto de chapas laminadas dotadas de ranhuras axiais onde é alojado o enrolamento do estator. As chapas possuem características magnéticas de alta permeabilidade, criando um caminho magnético de baixa relutância para o fluxo, diminuindo assim o fluxo disperso e concentrando o campo no entreferro. A construção do rotor a partir de chapas tem a mesma justificativa que para os demais tipos de máquinas: diminuição das perdas provocadas por correntes parasitas (correntes de Foucault), as quais estariam presentes em maior grau, caso fosse empregado uma construção maciça. As chapas são em geral tratadas termicamente a fim de reduzir o valor das perdas específicas por correntes induzidas. Não existe, em geral, uma isolamento física entre as chapas que compõem o rotor e o estator. O enrolamento do estator pode ser tanto monofásico como trifásico. Em geral as máquinas síncronas são trifásicas, sendo que geradores monofásicos são mais utilizados em pequenas potências, ou quando não existe uma rede trifásica disponível, como em áreas rurais. Quando construídos para baixa tensão as bobinas do estator são formadas de fios com seção circular e esmaltados; as ranhuras do estator são neste caso do tipo semi-abertas. No caso de enrolamentos de alta tensão os condutores são de seção retangular e as bobinas recebem uma camada extra de isolamento com material a base de mica, sendo que as ranhuras são do tipo aberta. A conexão dos enrolamentos segue o mesmo padrão que para as máquinas de indução, havendo máquinas com enrolamentos para ligação série-paralela, estrela-triângulo e máquinas com tripla tensão nominal.

1.2.2. Rotor

O rotor é também formado de chapas laminadas justapostas que em geral são do mesmo material que o estator. Do ponto de vista construtivo existem dois tipos básicos de rotores: rotores contendo pólos salientes e rotores contendo pólos lisos (figura 1.5a e 1.5b, respectivamente).

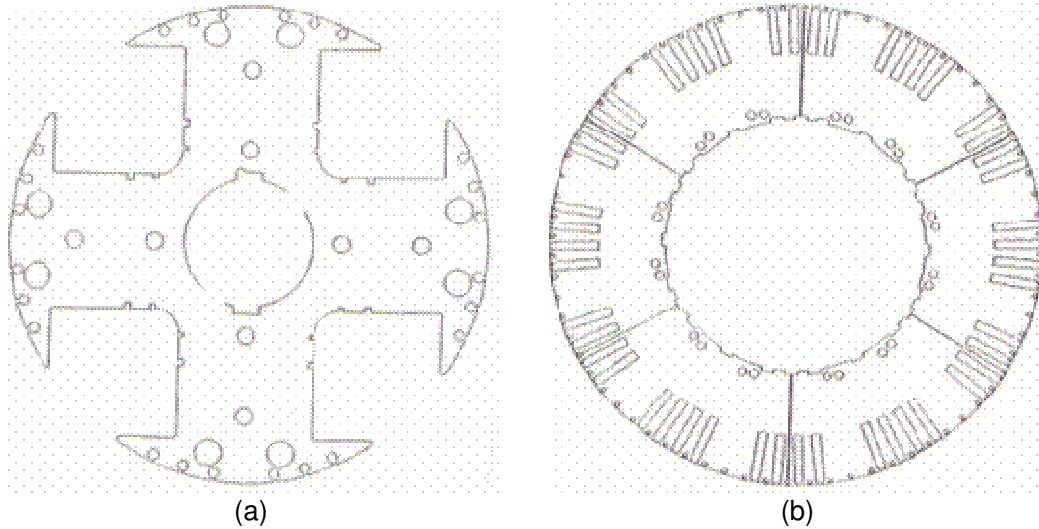


Figura 1.5. (a) rotor de pólos salientes, (b) rotor de pólos lisos

Esta diferenciação conduz a modelos equivalentes diferentes, mas não altera em nada o princípio de funcionamento, que permanece idêntico para ambos. Rotores de pólos lisos são em geral empregados em turbo alternadores, onde o número de pólos é 2 ou 4. Este emprego provém do fato que rotores com pólos lisos são mais robustos sendo assim mais aptos a trabalharem em altas rotações (3600 e 1800 rpm). Os geradores em pólos salientes são em geral empregados com número de pólos igual ou superior que 4. A escolha do número de pólos é ditado pela rotação mais apropriada para máquina primária. Turbinas hidráulicas, por exemplo, trabalham com baixa rotação, sendo por isso necessário, geradores com alto número de pólos. A velocidade de rotação da turbina hidráulica varia em função da pressão hidráulica existente e em função da altura da queda d'água, sendo que ela se situa entre 50 a 600 rpm. Além disso a velocidade também varia em função do tipo da turbina (Francis, Kaplan, Pelton, etc...). Este tipo de gerador em geral é construído com eixo vertical, possuindo grande diâmetro e pequeno comprimento axial; esta relação entre comprimento e diâmetro é ditada pela baixa rotação a que estão sujeitos (alto número de pólos). Turbo geradores em geral são construídos com eixo horizontal e possuem diâmetro reduzido e comprimento axial maior que o diâmetro, devido ao fato de girarem a altas rotações. Grupos geradores a diesel, por outro lado, utilizam geradores com número de pólos entre 4 e 8.

No caso de pólos salientes o enrolamento de campo, também chamado de enrolamento de excitação, é alojado no espaço interpolar. No caso de pólos lisos o enrolamento de campo é distribuído em ranhuras, as quais em geral cobrem apenas uma parte da superfície do rotor. Além do enrolamento de campo, o rotor pode conter também um enrolamento semelhante ao do rotor da máquina de indução em gaiola.

Este enrolamento é chamado de enrolamento amortecedor e é alojado em ranhuras semi-abertas e de formato redondo sobre a superfície do rotor. Conforme o nome sugere, ele serve para amortecer oscilações que ocorrem em condições transitórias, como por exemplo, uma retirada brusca de carga, alterações súbitas de tensão, variações de velocidade, etc.

Ele confere, assim, uma maior estabilidade à máquina. Neste enrolamento só é induzida tensão quando ocorrem fenômenos transitórios na máquina, em condições normais e em regime permanente não há nem tensão nem corrente induzida neste enrolamento; as suas dimensões são portanto reduzidas em relação ao enrolamento do estator e do rotor. No caso de motores síncronos ele pode também funcionar como dispositivo arranque, funcionando da mesma forma que o enrolamento em gaiola de esquilo dos motores de indução. O enrolamento neste caso se chama enrolamento de partida e a partida do motor é chamada de partida assíncrona; neste caso o motor não possui, via de regra, carga no eixo durante a partida. Devido ao fato de não haver em regime permanente variações de fluxo em relação ao rotor, este pode também ser construído de um material sólido, ao invés de lâminas. Assim, em algumas máquinas todo o ou parte do rotor é construído de material sólido, a fim de aumentar a rigidez mecânica. Neste caso, a própria superfície do rotor funciona como enrolamento amortecedor, sendo desnecessário um enrolamento amortecido inserido em ranhuras. Independente da forma construtiva, os pólos são alimentados com corrente contínua e criam o campo principal que induz tensão na armadura.

A alimentação do enrolamento de excitação pode ser feita por meio de anéis e escovas. A grande maioria dos geradores de média e baixa potência utiliza sistemas de excitação sem escovas. Neste caso a excitação é fornecida por meio de excitatrizes auxiliar montadas no eixo da máquina e de dispositivos a base de semicondutores. Detalhes desta forma de excitação podem ser encontrados em catálogos de fabricantes.

1.2.3. Conjunto de Escovas e Anéis

Têm por função conectar a fonte de corrente contínua com os pólos do rotor. Tratando-se de componentes que se desgastam e que podem produzir faíscas e interferência eletromagnética, em geral se empregam geradores com excitação sem escovas.

1.3. Princípio de Funcionamento do Gerador Síncrono

A máquina síncrona é composta do estator, que aloja um enrolamento monofásico ou trifásico e onde será induzida tensão pelo movimento do rotor. No enrolamento do estator será induzida uma tensão alternada, a qual produzirá uma corrente igualmente alternada quando o mesmo se encontrar sob carga. O rotor contém um enrolamento que é alimentado com corrente contínua e que serve para criar campo magnético principal na máquina.

O princípio de funcionamento de um gerador é muito semelhante ao de uma máquina de corrente contínua (figura 1.6). Conforme foi visto em disciplinas anteriores, sempre que houver um movimento relativo entre um condutor e um campo magnético haverá uma tensão induzida no condutor.

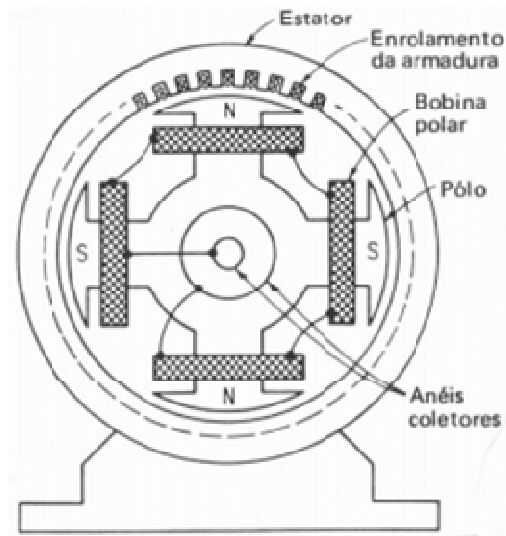


Figura 1.6. Representação esquemática da máquina síncrona.

No caso da máquina síncrona os condutores são fixos na armadura e o campo magnético é forçado pela máquina primária a se mover. Por sua vez, a máquina primária é acoplada mecanicamente ao rotor onde estão alojados os pólos e exerce sobre eles uma força fazendo-os girar. O movimento relativo entre o campo e o condutor faz com que surja uma tensão nos terminais do gerador. Ao ser ligado a uma carga a tensão induzida faz com que circule corrente pelo gerador e pela carga. A potência mecânica transferida pela máquina primária é assim convertida em energia elétrica (descontadas as perdas). O enrolamento de campo (alojado nos pólos) é alimentado por uma fonte de corrente contínua por meio de anéis deslizantes. Existem sistemas em que não existem anéis e escovas, sendo que a tensão contínua necessária ao enrolamento de campo é fornecida por meio de um sistema de excitação estático, formado por uma ou mais excitatrizes montadas no eixo e por

dispositivos a base de semicondutores. O gerador síncrono produz uma tensão do tipo alternada senoidal, podendo ser monofásica ou trifásica.

Numa máquina existem não apenas um condutor sendo movimentado no campo magnético, mas uma série de condutores ligados em série, fazendo com que a potência convertida seja maior que no caso de apenas um condutor. Com este arranjo a potência da máquina é maior, aumentando o grau de aproveitamento dos materiais.

1.4. Velocidade de rotação dos geradores síncronos.

Os geradores síncronos são, por definição, **Síncronos**, o que significa que a frequência elétrica produzida está fixada ou sincronizada com a parte mecânica de rotação do gerador. O rotor do gerador síncrono consiste em um eletroímã no qual se alimenta de cc. O Campo magnético de rotação e a frequência elétrica originada do estator estão relacionadas pela equação:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad 1.1$$

Onde: f_e - frequência elétrica em Hz

n_m - velocidade do campo magnético, em rpm (rotações por minuto – corresponde a velocidade do rotor das máquinas síncronas)

Como o rotor gira na mesma velocidade do campo magnético, a equação anterior relaciona a velocidade do rotor com a frequência elétrica do estator. Com a potência elétrica normalmente gerado a 50Hz ou 60Hz, isto significa que o gerador deve girar a uma velocidade constante, dependendo do número de pólos da máquina. Por exemplo, para gerar energia em 60 Hz com uma máquina de dois pólos, o rotor deve girar a 3600 rpm. Para gerar a 50 Hz com uma máquina de quatro pólos, o rotor deve girar a 1500 rpm. A velocidade de rotação requerida para uma certa frequência sempre se calcula com a equação 1.1.

1.5. Valores Nominais

Os principais valores nominais das máquinas síncronas são discutidos a seguir. Os valores nominais se referem ao funcionamento da máquina como gerador.

1.5.1. Tensão Nominal

É a tensão de trabalho do enrolamento do estator. Existem máquinas de baixa tensão (tensão abaixo de 600 volts) e máquinas de alta tensão (tensão acima de 600 volts).

Quando a máquina funciona como gerador e não estiver ligado a um grande sistema, deve-se prover a máquina de um regulador de tensão, o qual atua na fonte de corrente contínua que alimenta os pólos do rotor e tem por função manter a tensão no valor nominal.

1.5.2. Potência Nominal (Gerador)

É a potência aparente fornecida ao circuito elétrico conectado aos terminais do gerador, dada pela seguinte equação:

$$P_e = V_l \cdot I_l \quad (\text{monofásico}) \quad 1.2$$

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \quad (\text{trifásico}) \quad 1.3$$

A potência ativa fornecida pelo gerador depende da característica da carga, sendo dada pelas expressões:

$$P_e = V_l \cdot I_l \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{monofásico}) \quad 1.4$$

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{trifásico}) \quad 1.5$$

$\cos(\varphi)$ - Fator de potência do gerador (igual ao da carga quando o gerador trabalha isolado)

I_l - Corrente de linha

V_l - Tensão de linha

Considerando o caso em que o gerador trabalha de forma isolada, ou seja desconectado de um grande sistema de energia, o fator de potência com que o gerador trabalha depende exclusivamente da característica da carga a ele ligada. Todo o gerador deve, assim, ser capaz de fornecer a potência nominal dentro dos limites de fator de potência estabelecidos pelo fabricante. A faixa de valores para o de fator de potência se situa em geral entre 0.8 e 1.0. A potência ativa e reativa fornecida

pelo gerador é neste caso idêntica à da carga a ele ligada. A tensão terminal é mantida no valor nominal por meio do regulador de tensão.

Considerando, por outro lado, que o gerador trabalhe conectado a um grande sistema de energia com tensão e frequência fixa pode-se controlar a quantidade energia reativa, e o fator de potência com que o gerador trabalha, controlando-se a corrente de excitação do mesmo. Contudo, a faixa de operação do fator de potência deve ser respeitada. A quantidade de energia ativa que o gerador fornece ao sistema a ele ligado é controlada atuando-se sobre a máquina primária, a qual deve fornecer a potência ativa nos terminais mais as perdas.

Uma vantagem da máquina síncrona operando como motor é que o seu fator de potência pode ser ajustado por meio da corrente de excitação, permitindo que o motor trabalhe tanto com fatores de potência em adiantado como em atraso. O motor síncrono pode, assim fornecer energia reativa para a rede e também absorver energia reativa. Por essa característica ele é também empregado como forma de corrigir o fator de potência de instalações industriais.

1.5.3. *Rendimento*

O rendimento para a máquina funcionando como gerador é dado pela equação:

$$\eta = \frac{P_e}{P_m} \cdot 100 = \frac{(P_m - P_p)}{P_m} \cdot 100 \quad (\%) \quad 1.6$$

η - rendimento em percentual (%)

P_m - potência mecânica fornecida pela máquina primária no eixo (Watt)

P_e - potência elétrica fornecida à carga ligada aos terminais (Watt).

P_p - perdas (watt).

A curva de rendimento em função da carga é semelhante à curva para o motor de indução, sendo o rendimento muito próximo do nominal na faixa de 75% a 100% da potência nominal.

1.5.4. *Frequência*

A máquina síncrona sempre gira à velocidade síncrona (exceto em condições transitórias ou sob algum tipo de oscilação). A velocidade síncrona é definida pela

rotação da máquina primária, a qual fornece a potência ativa para o sistema ligado ao gerador. A frequência da tensão gerada depende assim da velocidade de giro e do número de pólos, de acordo com a equação:

$$f = \frac{n_s \cdot p}{120} \quad (\text{Hz}) \quad 1.7$$

Onde: f - frequência (Hz) da tensão gerada.

p - número de pólos da máquina, determinado pela construção da máquina. Ele é escolhido em função da rotação da máquina primária.

n_s - rotação da máquina primária (rpm).

De acordo com a equação acima, tomando-se uma máquina primária que gira a 1800 rpm e um gerador de 4 pólos obtém-se :

$$f = \frac{1800 \cdot 4}{120} = 60 \quad \text{Hz.}$$

Caso seja necessário que o gerador produza uma tensão a 50 Hz será necessário alterar a rotação da máquina primária para 1500 rpm.

1.6. Circuito equivalente do gerador síncrono.

A tensão E_A é a tensão gerada internamente, produzido em uma fase do gerador síncrono. Contudo, esta tensão E_A normalmente não é a tensão que aparece nos terminais do gerador. Realmente, a única oportunidade em que a tensão gerada E_A é igual à tensão entregue por fase, V_ϕ , é quando não circula corrente pela armadura da máquina.

Por que não é igual a tensão de fase V_ϕ , e a tensão E_A , e que relação existe entre elas?

A resposta a esta pergunta é demonstrada no modelo do gerador síncrono.

Há vários fatores que levam a diferença entre E_A e V_ϕ :

- A diferença do campo magnético do entreferro causada pela corrente do estator denominada reação de armadura.
- A auto-indutância das bobinas da armadura.
- A resistência das bobinas da armadura.
- O efeito da configuração do rotor de pólos salientes.

Analizando os efeitos dos três primeiros fatores e deles obter o modelo. Neste capítulo não levará em conta o efeito de pólos salientes, sobre o funcionamento da máquina; ou em outras palavras, neste capítulo se assumirá que todas as máquinas são de pólos lisos. Está suposição dará lugar a uma certa imprecisão nos resultados quando a máquina for realmente de pólos salientes, mas os erros são relativamente pequenos.

O primeiro efeito mencionado, é normalmente o de maior duração, é a reação de armadura. Quando gira o rotor do gerador síncrono, se induz a tensão E_A nos enrolamentos do estator do gerador, o qual dá lugar a circulação de corrente quando se conecta carga aos terminais de saída. Mas o fluxo de corrente trifásica pelo estator, dá lugar a um campo magnético na máquina. Este campo magnético do estator distorce o campo magnético original do rotor, modificando a tensão da fase resultante. Este efeito é conhecido como reação de armadura.

Como estão presentes duas tensões sobre o enrolamento do estator, a tensão resultante de uma fase será a soma das tensões geradas E_A e a tensão de reação da armadura E_{est} :

$$V_\phi = E_A + E_{est} \quad 1.8$$

O campo magnético resultante, B_{net} , corresponde a soma de dos campos magnéticos do rotor e do estator:

$$B_{net} = B_R + B_S \quad 1.9$$

Como os ângulos de E_A e de B_R são os mesmos, e os ângulos de E_{est} e de B_S são os mesmos, o campo magnético resultante B_{net} coincide com a tensão resultante V_ϕ . Como podemos modelar os efeitos da reação de armadura sobre a tensão de fase? Em primeiro lugar, a tensão E_{est} se atrasa 90° do plano coincidente com o valor máximo da corrente I_A . Em segundo lugar, a tensão E_{est} é diretamente proporcional a corrente I_A .

Como os ângulos de E_A e de B_R são os mesmos, e os ângulos de E_{est} e de B_S são os mesmos, o campo magnético resultante B_{net} coincide com a tensão resultante V_ϕ . Na figura 3.10 (d) aparece indicados a tensão e a corrente resultante.

Como podemos modelar os efeitos da reação de armadura sobre a tensão de fase? Em primeiro lugar, a tensão E_{est} se atrasa 90° do plano coincidente com o valor máximo da corrente I_A . Em segundo lugar, a tensão E_{est} é diretamente proporcional a corrente I_A .

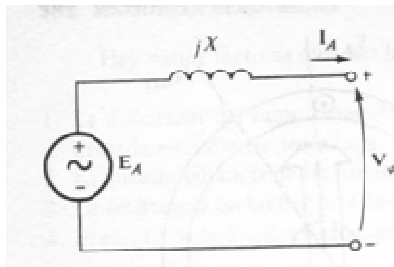


Figura 1.7. Circuito simples do gerador síncrono

Se X é a constante de proporcionalidade, então a tensão de reação de armadura pode ser escrita como:

$$E_{est} = -jXI_A \quad 1.10$$

Assim a tensão de fase é:

$$V_\phi = E_A - jXI_A \quad 1.11$$

Ao aplicar a lei das tensões de kirchoff ao circuito da figura 3.11 obtém-se a expressão.

$$V_\phi = E_A - jXI_A \quad 1.12$$

Esta é exatamente a mesma equação que expressa a tensão de reação da armadura. Por conseguinte, a tensão pela reação de armadura pode ser modelada como uma indutância em série com a tensão gerada interna.

Além disso, os efeitos da reação da armadura, as bobinas do estator apresentam também autoindutância e resistência. Se denominam por L_A a auto-indutância do estator (e X_A sua correspondente reatância), e por R_A sua resistência do estator, então a diferença total entre E_A e V_ϕ é dada pela expressão 3.23.

$$V_\phi = E_A - jX I_A - jX_A I_A - R_A I_A \quad 1.13$$

Como tanto os efeitos da reação de armadura como a auto-indutância se apresenta por reatâncias. Acostuma-se combinar os dois em uma só reatância conhecida como reatância síncrona da máquina.

$$X_S = X + X_A \quad 1.14$$

Por conseguinte, a expressão final de V_ϕ é:

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad 1.15$$

Agora é possível fazer o esquema equivalente do gerador síncrono trifásico: a figura 1.8 apresenta o circuito equivalente completo do gerador. Nele se tem uma fonte de cc alimentado o circuito de campo do rotor, no qual é representado por sua indutância e sua resistência em série. Em série com R_F esta a resistência variável R_{aj} que serve para regular a corrente de campo.

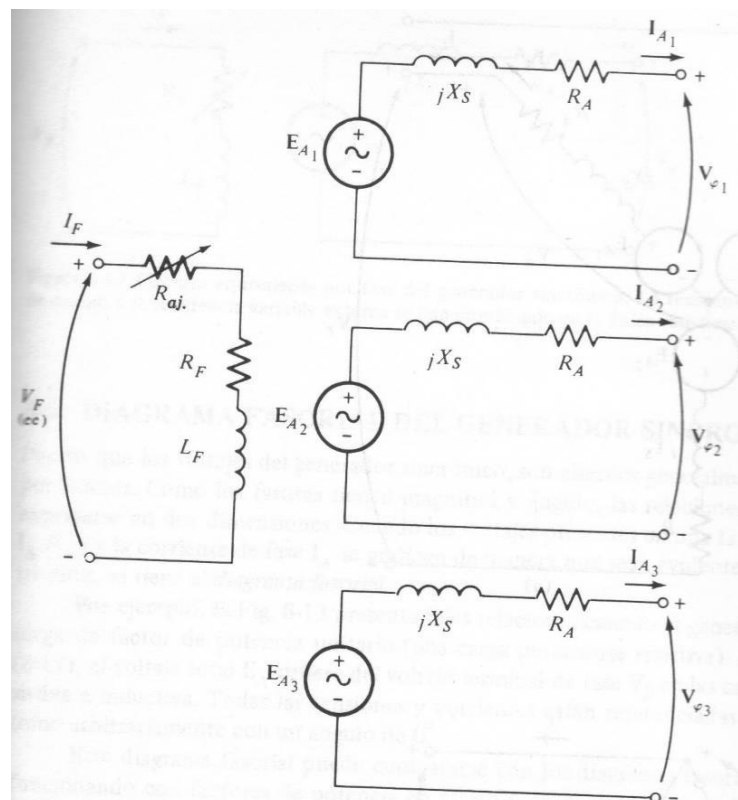


Figura 1.8. Circuito equivalente completo do gerador síncrono trifásico.

O que resta do circuito equivalente corresponde aos modelos de cada fase: cada fase contém uma tensão gerada em série com a reatância X_s (correspondente a soma da reatância da armadura e da auto-indutância das bobinas), e com a resistência R_A . A única diferença entre as três fases é constituída pelos ângulos de 120° de defasamento de tensão e correntes.

As três fases podem ser ligadas em Y ou em Δ , conforme indicado na figura 1.9. Se as fases se conectam em Y, a tensão nos terminais V_T e a tensão de fase V_ϕ cumprem a relação:

$$V_T = \sqrt{3}V_\phi \quad 1.16$$

Se as fases se conectam em Δ , então:

$$V_T = V_\phi \quad 1.17$$

O fato de que as três fases do gerador síncrono são idênticas, exceto pelo ângulo de fase, dá lugar a utilização do circuito equivalente por fase. A figura 1.9 apresenta este circuito. No entanto, um fato importante deve ser lembrado quando se utiliza o circuito equivalente por fase: As três fases têm tensões iguais e correntes iguais somente quando a carga do gerador é balanceada. Se as cargas não são balanceadas é exigido cada vez mais, sofisticadas técnicas analíticas que estão além do escopo do presente texto.

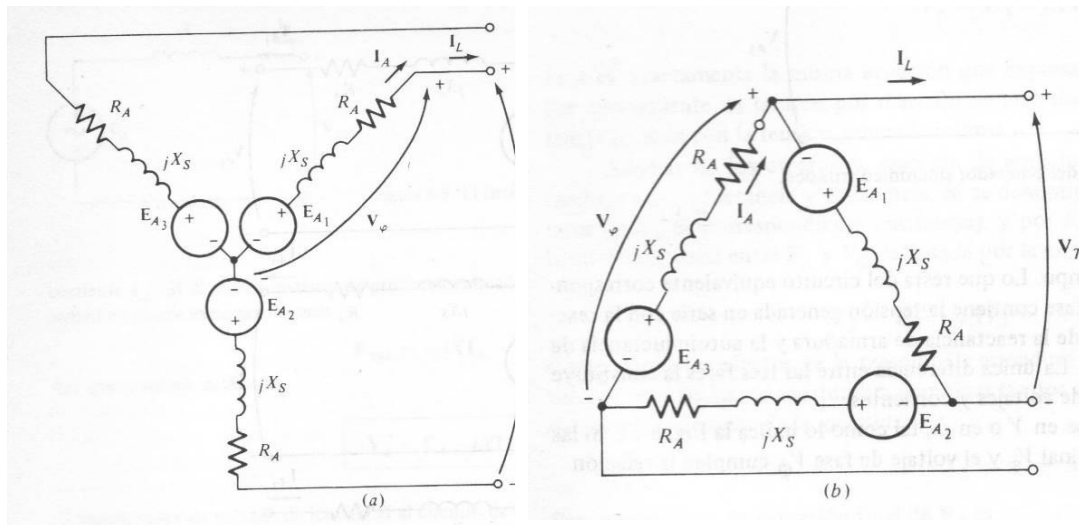


Figura 1.9. Circuito equivalente do gerador conectado em estrela (Y) e em delta (Δ)

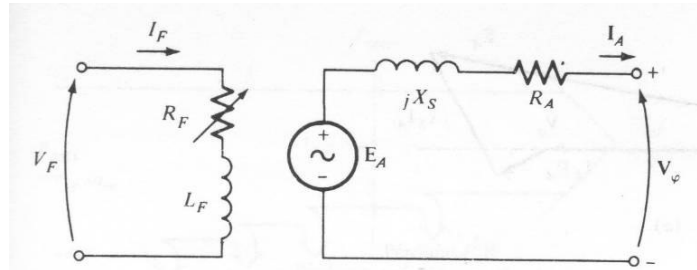


Figura 1.10. Circuito equivalente por fase do gerador síncrono.

1.7. Diagrama Fasorial do gerador síncrono.

Posto que as tensões do gerador síncrono são alternadas geralmente se apresentam por fasores. Como os fasores têm amplitude e ângulo, as relações entre elas devem ser expressas em duas dimensões. Quando as tensões presentes em uma fase (E_A , V_ϕ , $jI_A X_S$, $I_A R_A$) e a corrente de fase I_A são descritas no gráfico de maneira que sejam evidentes as relações entre eles, se tem o diagrama fasorial.

Por exemplo, a figura 1.11 apresenta tais relações quando o gerador alimenta uma carga de fator de potência unitário (uma carga puramente resistiva). Segundo a equação 1.15, a tensão total E_A difere da tensão terminal de fase V_ϕ nas quedas de tensão resistivas e indutivas. Todas as tensões e correntes estão referenciadas com V_ϕ , na qual se torna arbitrariamente com um ângulo de 0° .

Este diagrama fasorial pode ser comparado com os diagramas fasoriais do gerador funcionando com fatores de potência em atraso ou em adiantadas, as quais se apresentam na figura 1.16. Nota-se que para uma tensão de fase e uma corrente de armadura especificados, se requer maior tensão gerada E_A para cargas atrasadas e para cargas adiantadas. Por conseqüência, com cargas indutivas se necessita prover maior corrente de campos e pretender obter a mesma tensão nos terminais, como:

$$E_A = K\phi\omega \quad 1.18$$

E ω deve ser constante para conservar a freqüência constante.

Alternativamente, pra uma certa amplitude de corrente de campo e de carga, a tensão em terminais é menor com cargas atrasadas e é maior para cargas adiantadas.

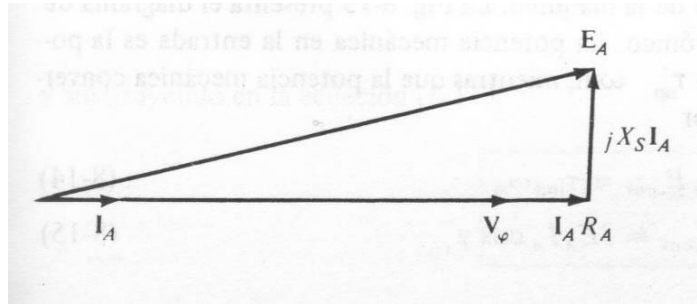


Figura 1.15. Diagrama fasorial do gerador síncrono com fator de potência unitário.

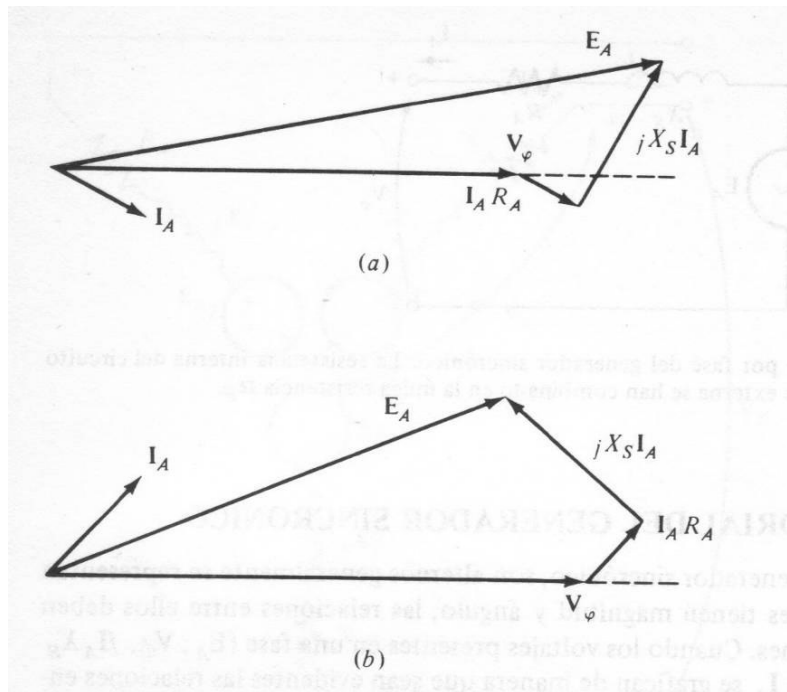


Figura 1.16. Diagrama fasorial do gerador síncrono com fatores de potência atrasado (a) e adiantado (b)

Em máquinas síncronas reais, a reatância síncrona é muito maior que as resistências do enrolamento R_A , de modo que esta última é muitas vezes negligenciada no estudo qualitativo das variações de tensão. Contudo, para resultados numéricos exatos deverá levar em conta R_A .

1.8. Torque e potência em geradores síncronos

Um gerador síncrono é uma máquina síncrona utilizada como gerador, que converte potência mecânica em potência elétrica trifásica. A fonte de potência

mecânica, pode ser um motor diesel, uma turbina de vapor, uma turbina hidráulica ou dispositivo similar. Qualquer que seja a fonte, deve ter a propriedade de manter quase constante a velocidade a qualquer carga, posto que de outra forma a frequência do sistema seria errada.

Nem toda a potência mecânica que entra no gerador síncrono sai da máquina como potência elétrica. A diferença entre as potências na entrada e saída do gerador corresponde as perdas da máquina. A figura 1.17 apresenta o diagrama de fluxo de potência do gerador síncrono. A potência mecânica na entrada é a potência no eixo do gerador $P_{ent} = \tau_{ap} \cdot \omega_m$, enquanto que a potência mecânica convertida em potência elétrica se expressa por:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \cdot \omega_m \quad 1.19$$

$$P_{conv} = 3E_A \cdot I_A \cos \gamma \quad 1.20$$

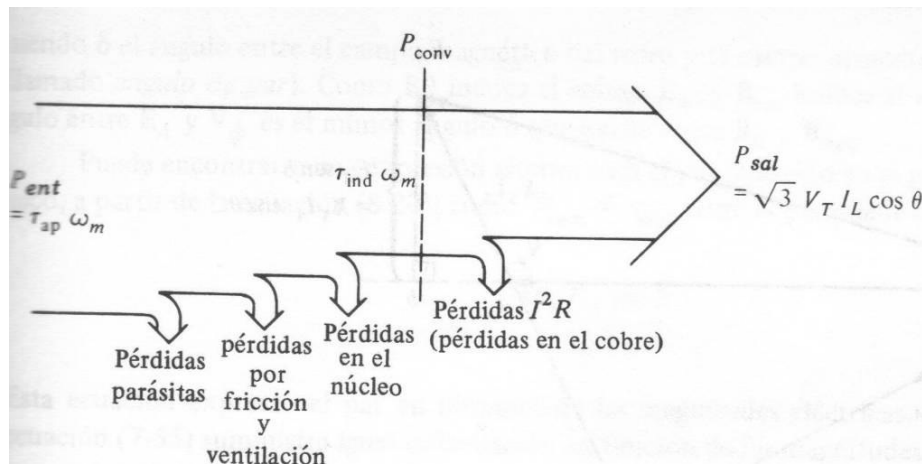


Figura 1.17. Diagrama de fluxo de potência do gerador síncrono

Sendo γ o ângulo entre E_A e I_A . A diferença entre a potência que entra no gerador e a potência transformada por ele mesmo corresponde as perdas mecânicas e as perdas no núcleo da máquina.

A potência real que sai do gerador síncrono pode ser expressas em valores de linha como:

$$P_{sai} = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \cos \theta \quad 1.21$$

E o valor de fase por:

$$P_{sai} = 3 \cdot V_\phi \cdot I_A \cdot \cos \theta \quad 1.22$$

Em valores de linha, a potência reativa de saída corresponde a expressão:

$$Q_{sai} = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \sin \theta \quad 1.23$$

E o valor de fase por:

$$Q_{sai} = 3 \cdot V_\phi \cdot I_A \cdot \sin \theta \quad 1.24$$

Se desprezar a resistência R_A de armadura (dado que $X_S \gg R_A$), pode se encontrado um equação muito útil para avaliar a potência que sai do gerador. Para derivar a equação, observa-se o diagrama fasorial da figura 1.18, na qual corresponde ao diagrama fasorial simplificado do gerador desconsiderando a resistência do estator.

$$I_A \cos \theta = \frac{E_A \sin \delta}{X_S} \quad 1.25$$

E substituído na equação 3.32

$$P = \frac{3V_\phi E_A \sin \delta}{X_S} \quad 1.26$$

Como na equação 1.26 foram desprezadas as resistências, significa que no gerador não há perdas elétricas, e a equação corresponde simultaneamente a P_{conv} e a P_{sai} .

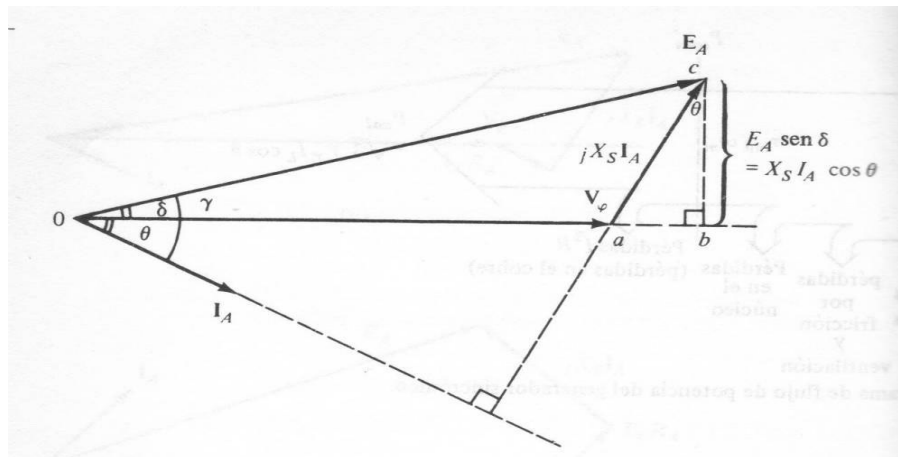


Figura 1.18. Diagrama fasorial simplificado.

A equação 1.26 indica que a potência produzida por um gerador síncrono depende do ângulo δ entre V_ϕ e E_A . O ângulo δ é conhecido como ângulo do torque da

máquina. Nota-se também que a potência máxima que pode fornecer o gerador, corresponde a $\delta = 90^\circ$, $\text{sen } \delta = 1$ e

$$P_{\max} = \frac{3V_\phi E_A}{X_S} \quad 1.27$$

A potência máxima expressada por esta equação corresponde ao limite de estabilidade estática do gerador. Normalmente, os geradores reais nunca chegam a aproximar deste limite, sendo ângulos típicos de torque de 15° e 20° a plena carga.

Observam-se novamente as equações 1.22, 1.24 e 1.26: se tomar constante V_ϕ , a potência real entregue é diretamente proporcional aos valores $I_A \cos \theta$ e $E_A \text{sen } \gamma$, e a potência reativa é diretamente proporcional a $I_A \cos \theta$. Estes fatos são úteis para desenhar o diagrama fasorial do gerador síncrono com carga variável.

O torque induzido no gerador pode ser expresso como:

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_S \quad 1.28$$

Como

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_{net} \quad 1.29$$

A equação 1.29 corresponde a:

$$\tau_{ind} = k B_R B_{net} \text{sen } \delta \quad 1.30$$

Sendo δ o ângulo entre o campo magnético do rotor e do campo magnético resultante (é chamado ângulo do torque). Como B_R induz a tensão E_A , e B_{net} induz a tensão V_ϕ , o ângulo entre E_A e V_ϕ é o mesmo ângulo δ que existe entre B_R e B_{net} .

Pode-se encontrar uma expressão alternativa para o torque induzido no gerador síncrono, a partir da equação 1.26; como $P_{con} = \tau_{ind} \omega_m$, o torque pode ser expresso como:

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_A \text{sen } \delta}{\omega_m X_S} \quad 1.31$$

2 . Motores de Indução:

2.1. Introdução:

As *máquinas elétricas* podem ser classificadas em dois grupos:

a) *geradores*, que transformam energia mecânica oriunda de uma fonte externa (como a energia potencial de uma queda d'água ou a energia cinética dos ventos) em energia elétrica (tensão);

b) *motores*, que produzem energia mecânica (rotação de um eixo) quando alimentados por uma tensão (energia elétrica), como se vê na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Fluxo de energia em motores elétricos.

Vê-se, então, que geradores e motores só se diferenciam quanto ao sentido de transformação da energia, possuindo ambos a mesma característica básica, formada por um elemento fixo, chamado *estator*, e outro móvel, capaz de girar (o *rotor*). Nesses elementos são fixados *enrolamentos* onde a corrente circula: um desses enrolamentos é capaz de gerar os campos magnéticos necessários ao funcionamento da máquina e é chamado *enrolamento de campo*; o outro é chamado *enrolamento de armadura* (ou *induzido*, no caso de geradores).

Em algumas máquinas, a armadura está no estator e o enrolamento de campo no rotor; em outras ocorre o inverso. O tipo de corrente (CC ou CA) que circula nesses enrolamentos estabelece qual o tipo de máquina.

A Figura 2.2 mostra os diversos tipos de máquinas disponíveis; dentre todas elas, destacam-se os motores *assíncronos* (ou *de indução*), utilizado na maior parte dos equipamentos que requerem acionamento elétrico. Por sua importância, resultado de sua confiabilidade, baixo custo e versatilidade.

Aproximadamente 40% de toda a energia elétrica consumida no Brasil é usada para o acionamento de motores elétricos, sendo que no setor industrial cerca de 50% da energia consumida deve-se a este tipo de máquina elétrica. Há estimativas de que exista grande número de instalações industriais no Brasil onde mais de 80% do consumo deva-se a motores elétricos.

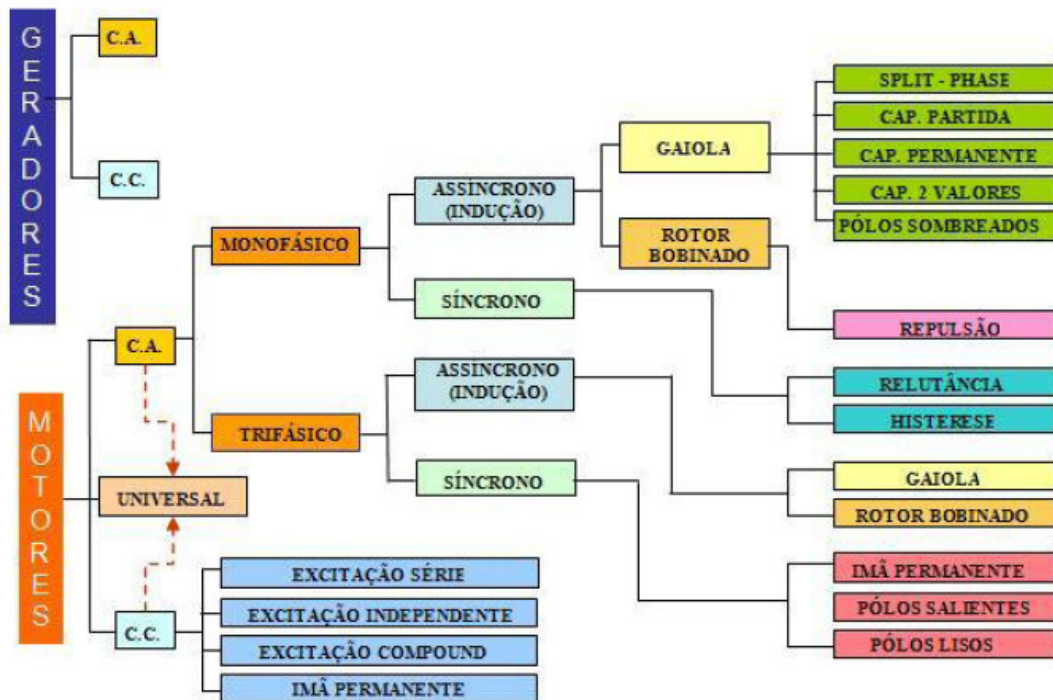


Figura 2.2 - A “árvore” das máquinas elétricas

2.2. Construção de um motor de indução:

Partes Construtivas Principais da Máquina de Indução

2.2.1. Carcaça

É a estrutura que suporta as demais tais como tampas, caixa de ligação, etc... Em geral é feita de ferro fundido e dotada de aletas para melhorar a capacidade de dissipação de calor.

2.2.2 Estator

É formado de um núcleo de chapas magnéticas (também chamado de pacote), o qual possui ranhuras axiais para alojar o enrolamento do estator. O uso de chapas magnéticas é justificado pela redução de perdas e melhora do rendimento. O uso de ranhuras além

de diminuir o entreferro efetivo e a corrente de magnetização, também é um meio bastante eficiente de transmissão do calor para o exterior. Existem máquinas de CA (em geral máquinas síncronas) em que não existe ranhuras, sendo que a superfície interna do rotor é lisa, conhecidas como slotless machine. Trata-se no entanto de máquinas de uso restrito, sendo a configuração com ranhuras a mais comum no caso de máquinas elétricas. O estator também aloja as bobinas do enrolamento estatórico que pode ser tanto trifásico como monofásico. Entre as chapas e as bobinas do enrolamento existe elementos de isolamento, cuja função é evitar colocar a carcaça e o pacote de chapas sob tensão.

No estator se situa o enrolamento de campo, que pode ser mono ou trifásico. A maneira como esse enrolamento é construído determina o número de pólos do motor, entre outras características operacionais. Suas pontas (terminais) são estendidas até uma caixa de terminais, onde pode ser feita a conexão com a rede elétrica de alimentação.

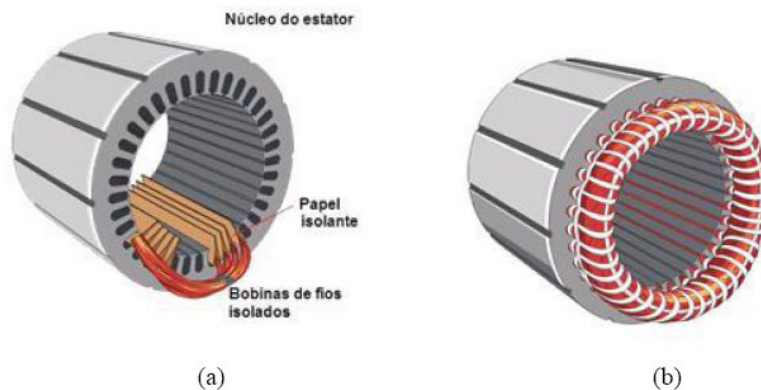


Figura 2.3 – Enrolamento de campo de um motor de indução: (a) execução dos enrolamentos; (b) núcleo com enrolamento completo.

2.2.3 Rotor

É igualmente composto de um núcleo de chapas magnéticas, também dotadas de ranhuras axiais, onde o enrolamento do rotor é alojado. Os enrolamento são de dois tipos:

- enrolamento em curto-circuito (rotor em gaiola de esquilo, rotor em curtocircuito), formado de barras de alumínio conectadas por anel em ambas as extremidades do pacote de chapas. Este enrolamento não é acessível, ou seja não existe nenhum terminal acessível que permita acessá-lo. A gaiola é injetada sob alta pressão e temperatura não havendo isolamento entre as barras e o pacote de chapas. Os anéis nas extremidades axiais tem também a função de garantir uma rigidez mecânica ao pacote de chapas. A forma

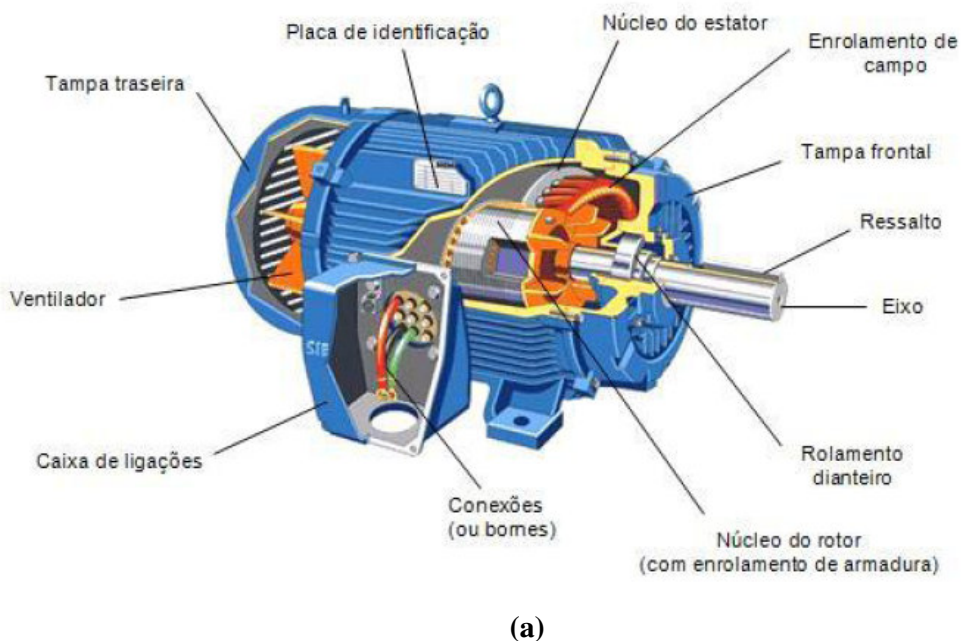
das ranhuras do rotor influencia o desempenho do motor, especialmente a curva de torque.

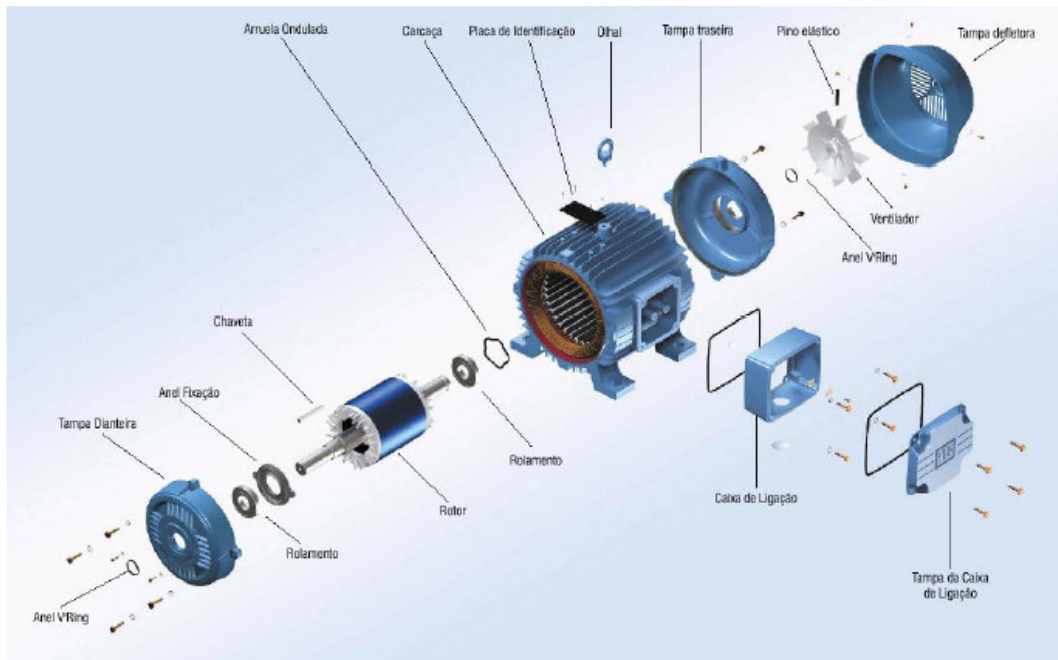
- enrolamento de bobinas (rotor bobinado) feitas em geral de cobre. Trata-se de um enrolamento semelhante ao enrolamento do estator, em geral trifásico. Os seus terminais são conectados a anéis coletores e escovas, os quais podem ser acessados externamente. Este tipo de enrolamento é usado quando se deseja um controle das características de torque e velocidade da máquina. É menos freqüente que o enrolamento em gaiola, uma vez que é mais caro e menos robusto. A escolha de um motor com rotor bobinado também pode ser requerida devida ao processo de partida do motor, uma vez que este tipo de motor pode fornecer um torque mais elevado na partida.



Figura 2.4 – Enrolamento de armadura de um motor de indução: (a) rotor gaiola; (b) rotor montado (corte).

A Figura 2.5 mostra a estrutura de motor de indução, que compreende.





(b)

Figura 2.5. Estrutura de um motor de indução fechado

O motor assíncrono é constituído basicamente pelos seguintes elementos: um circuito magnético estático, constituído por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si, ao qual se dá o nome de estator; por bobinas localizadas em cavidades abertas no estator e alimentadas pela rede de corrente alternada; por um rotor constituído por um núcleo ferromagnético, também laminado, sobre o qual se encontra um enrolamento ou um conjunto de condutores paralelos, nos quais são induzidas correntes provocadas pela corrente alternada das bobinas do estator. O rotor é apoiado num veio, que por sua vez transmite à carga a energia mecânica produzida. O entreferro (distância entre o rotor e o estator) é bastante reduzido, de forma a reduzir a corrente em vazio e, portanto as perdas, mas também para aumentar o fator de potência em vazio. Como exemplo apresentamos a "projeção" dos diversos elementos o motor assíncrono de rotor em gaiola de esquilo

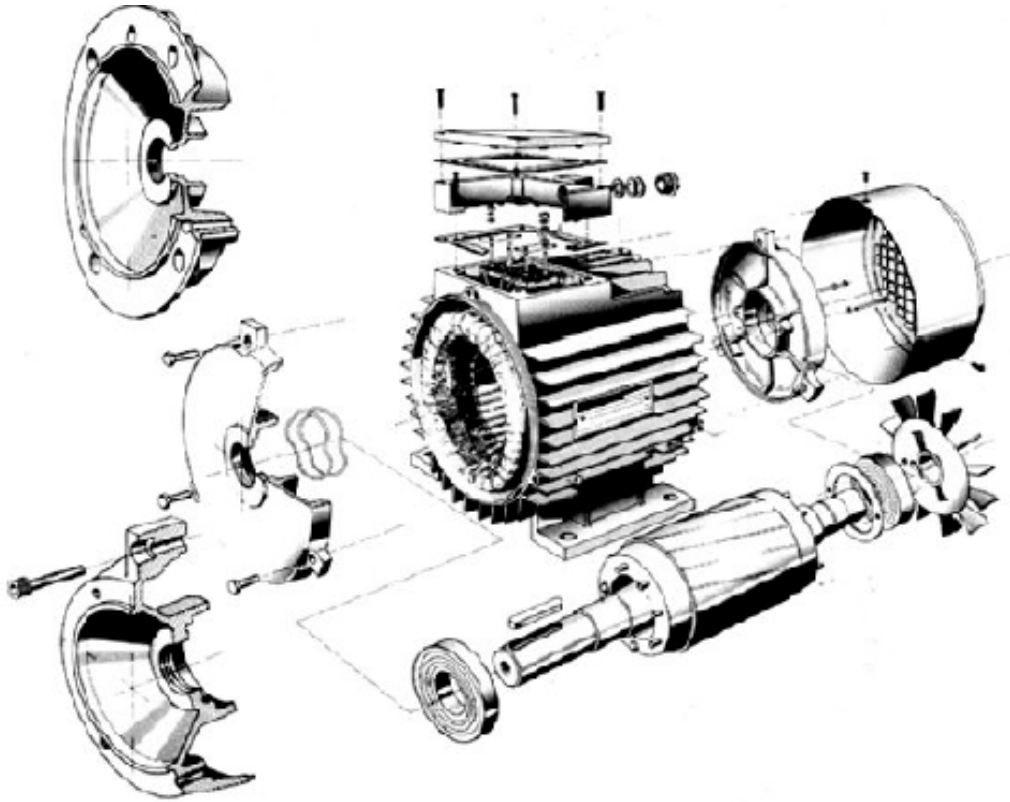


Figura 2.6. "Projeção" dos diversos elementos o motor assíncrono de rotor em gaiola de esquilo

2.3. Princípio de funcionamento:

Na região em torno de um ímã acontecem alguns fenômenos especiais, como a atração de pedacinhos de ferro ou o desvio da agulha de uma bússola. Diz-se que nesta região existe um *campo magnético*, o qual pode ser representado por *linhas de indução* (figura 2.7a). Também ao redor de um condutor percorrido por corrente elétrica existe um campo magnético, que pode ser intensificado se este condutor for enrolado, formando uma *bobina* ou *enrolamento* (Figura 2.7b). Nesses casos, a intensidade do campo magnético é diretamente proporcional à corrente.

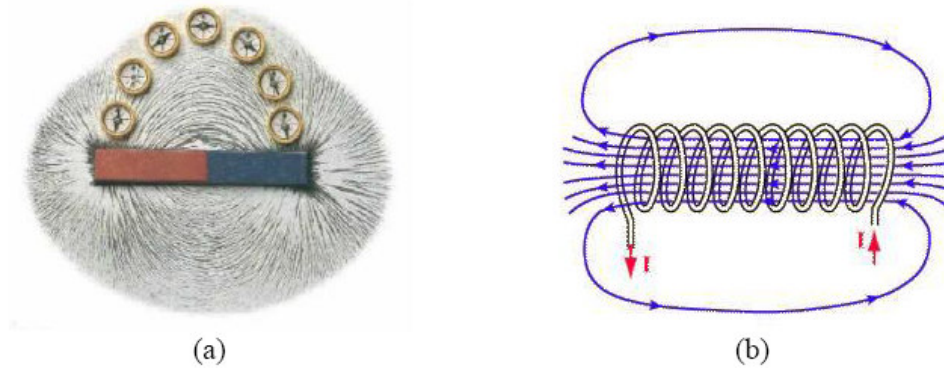


Figura 2.7. Campo magnético: (a) de um ímã; (b) de um enrolamento (bobina) percorrido por corrente.

Campos magnéticos são mensurados através de uma grandeza chamada indução magnética (simbolizada pela letra B), cuja unidade no SI é o Tesla (T). O valor de B é maior nas regiões onde as linhas estão mais concentradas.

Denomina-se fluxo magnético (símbolo ϕ) ao número de linhas de indução que atravessa a superfície delimitada por um condutor (uma espira, por exemplo). Esta grandeza é medida em Webbers (Wb), no SI.

Em 1831, Michael Faraday descobriu que quando o fluxo magnético em um enrolamento varia com o tempo, uma tensão u é induzida nos terminais da mesmo; o valor desta tensão é diretamente proporcional à rapidez com que o fluxo varia. Então, a Lei de Faraday (ou Lei da Indução Eletromagnética) pode ser expressa por

$$u = N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Onde: N = número de espiras do enrolamento

$d\phi/dt$ = velocidade de variação do fluxo magnético

Se os pólos de um ímã forem postos a girar ao redor de uma espira, como representado na Figura 2.8, o fluxo nesta varia com o tempo, induzindo uma tensão entre seus terminais; se estes formarem um percurso fechado, haverá neles a circulação de uma corrente induzida i .

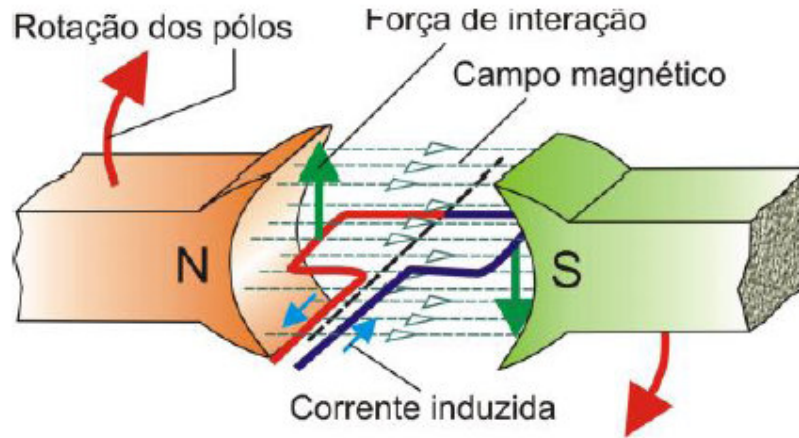


Figura 2.8. Ação de motor

No estudo do Eletromagnetismo, aprende-se que se um condutor estiver imerso em um campo magnético e for percorrido por corrente elétrica, surge uma força de interação dada por:

$$F = i\ell B \quad (2)$$

Onde:

- F = força de interação
- B = valor da indução magnética
- ℓ = comprimento dos lados da espira
- i = intensidade da corrente no condutor

É esta força que produz um conjugado nos lados da espira, fazendo-a girar (ação de motor).

A Figura 2.9 mostra os campos magnéticos formados pela alimentação trifásica em um motor, no qual os enrolamentos de campo estão localizados no estator. O campo magnético de cada fase é representado por um vetor e a soma vetorial dos mesmos dá o campo resultante. Observa-se que o efeito é o de um ímã girando ao redor do rotor, produzindo a ação de motor, tal como descrita no parágrafo anterior. A velocidade com que esse campo girante opera é chamada velocidade síncrona (n_s), dada por:

$n_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (\text{rpm})$	(3)
---	-----

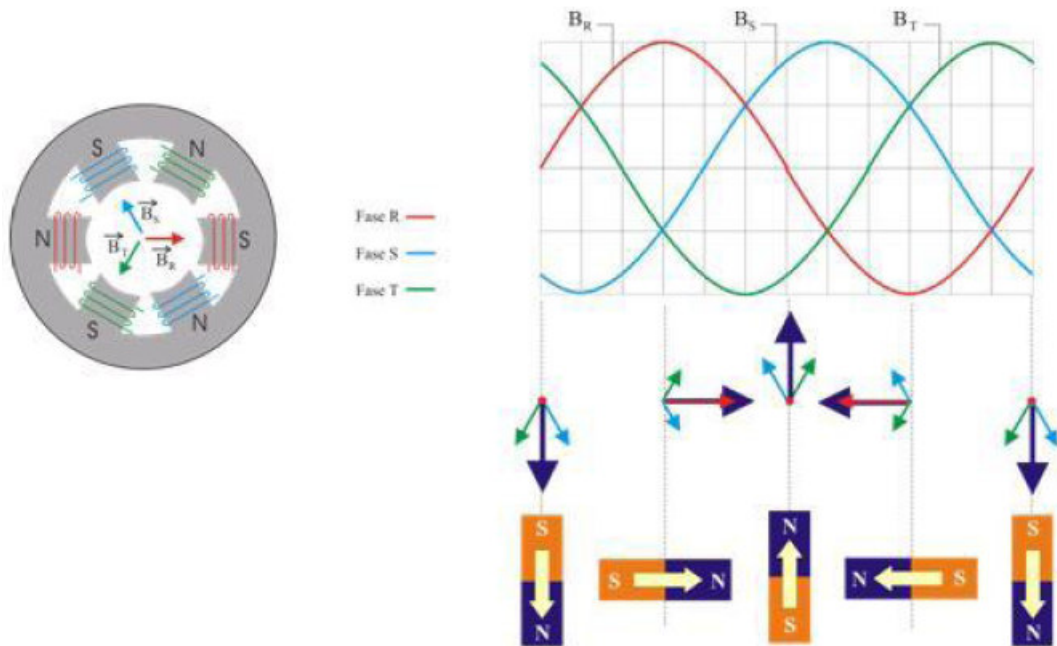


Figura 2.9. Formação de campo girante num motor trifásico

O número de pólos do motor é obtido através da forma de execução dos enrolamentos de campo; este número sempre é inteiro e par. Assim, pode-se construir motores com qualquer número de pólos, embora no comércio estejam disponíveis apenas motores de 2, 4, 6 ou 8 pólos.

A velocidade de um motor de indução sempre será menor que a síncrona¹, caso contrário não se conseguiria a variação de fluxo necessária para induzir corrente no enrolamento de armadura. Denomina-se escorregamento (s) à relação.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

Onde:

n_s = velocidade síncrona (em rpm)

n = velocidade do motor (em rpm)

2.4. Valores Nominais

Os principais valores que caracterizam o motor de indução são discutidos no que segue. O seu correto entendimento é de fundamental importância tanto na especificação de motores como para fins de substituição do mesmo. No que segue será assumido que os valores nominais se referem ao regime de funcionamento como motor.

2.4.1 Potência Nominal

Um motor elétrico recebe potência da rede elétrica (potência de entrada, P_e) e a transforma em potência mecânica (potência na saída, P_s) para o acionamento de uma carga acoplada ao eixo (Figura 2.10). A diferença entre as perdas na entrada e na saída constitui-se na perda do motor, e pode ser relacionada por seu rendimento (η), dado por:

$$\eta = \frac{P_s}{P_e}$$



Figura 2.10. Fluxo da potência em um motor

A potência nominal de um motor é a máxima potência que a máquina é capaz de disponibilizar continuamente em seu eixo quando alimentada com tensão e frequência nominais. É a potência na saída do motor e, sendo do tipo mecânico, é normalmente expressa em cv ou hp. Os motores de indução abrangem uma ampla faixa de potência, tipicamente de ¼ até 500 cv.

É interessante lembrar que nem sempre um motor estará operando com potência nominal. O percentual de plena carga expressa o quanto dessa potência nominal está sendo utilizada pelo motor, isto é:

$$\kappa = \frac{P_u}{P_n}$$

Onde:

P_u = potência que está sendo usada (cv, hp ou W)

P_n = potência nominal do motor (cv, hp ou W).

O conhecimento de κ é importante porque tanto o rendimento (η) como o fator de potência ($\cos \phi$) variam com esta grandeza: os fabricantes de motores costumam fornecer estes valores para 3 situações de percentual de plena carga (50%, 75% e 100%),

Chama-se fator de serviço (FS) ao fator que, aplicado à potência nominal, indica a carga permissível que pode ser aplicada continuamente ao motor, sob condições especificadas³. Este valor está na faixa de 1,0 a 1,35 e, de maneira geral, pode-se dizer que motores menores têm maior FS.

2.4.2 Frequência Nominal

É a frequência da rede de alimentação do motor, expressa em Hz, no Brasil a frequência padronizada é de 60 Hz. Deve-se salientar que é possível utilizar-se um motor de 50 Hz na frequência de 60 Hz, contudo as características de partida e de funcionamento serão alteradas, havendo em geral uma alteração na potência nominal. Quando isto for necessário é aconselhável uma consulta ao catálogo do fabricante

Os motores são projetados para trabalhar com uma determinada frequência, referente à rede de alimentação, admitida uma variação máxima de 5% (NBR 7094/96).

No Brasil, a frequência padronizada é 60Hz; entretanto, existem muitos equipamentos importados de países onde a frequência é 50Hz.

2.4.3 Velocidade Nominal

É aquela desenvolvida pelo motor quando utilizando sua potência nominal, alimentado por tensão e frequência nominais. Não deve ser confundida com a velocidade síncrona (n_s), dada pela Equação 5:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \quad (\text{rpm}) \quad (5)$$

Já se viu que a velocidade de um motor sempre será menor que a síncrona; a diferença entre a velocidade nominal e a síncrona é dada pelo escorregamento nominal, conforme Equação 6. Para a maioria dos tipos de motores de indução, este escorregamento está na faixa de 3-5%.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

2.4.4 Tensão Nominal

É a tensão de trabalho do motor em condições normais, não deve ser excedida sob períodos prolongados de tempo sob risco de avariar o motor; é a tensão de projeto do motor. Pela norma brasileira todo o motor deve ser capaz de funcionar satisfatoriamente quando alimentado tanto com tensão 10% abaixo como 10% acima da tensão nominal, desde que a frequência seja a nominal. Caso a frequência varie simultaneamente com a tensão, a variação da tensão deve ser reduzida proporcionalmente, de modo que a soma da variação de ambas não ultrapasse 10%. Por exemplo, se a frequência variar 2% a tensão só poderá variar de 8%. Os motores são em geral fabricados para operação numa temperatura ambiente máxima de 40 graus centígrados e uma altitude máxima de 1000 acima do nível do mar. Fora destas condições existem alterações nas características nominais, especialmente a potência nominal que será reduzida.

Os motores trifásicos sempre são ligados à tensão de linha da rede elétrica. Os valores de alimentação mais comuns são 220, 380, 440, 660 e 760V.

Esses motores podem ser constituídos por 1 ou 2 grupos de enrolamentos trifásicos. No primeiro caso, como são 3 enrolamentos, cada qual com um início e um fim, haverá 6 terminais disponíveis (motor de 6 pontas); no outro caso, um dos grupos pode ou não estar conectado internamente, configurando motores de 9 ou 12 pontas. A identificação dos terminais não é padronizada: alguns fabricantes usam números, enquanto outros usam letras. Neste capítulo, usarse-á a identificação de terminais mostrada na Figura 2.11.

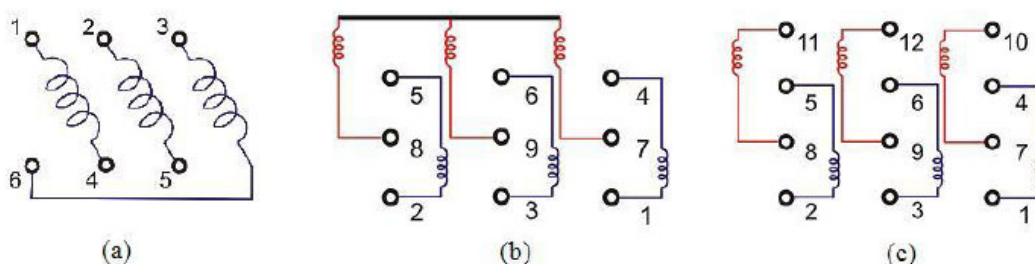
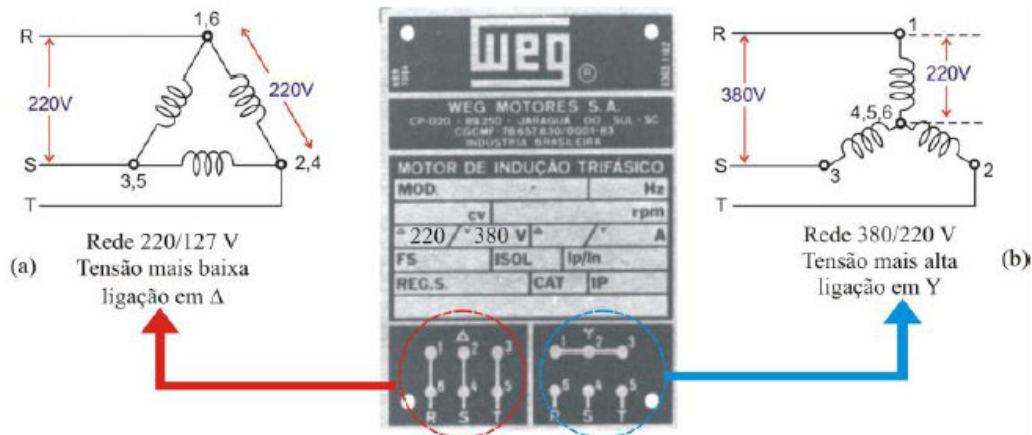


Figura 2.11. Identificação de terminais de motores trifásicos: (a) de 6 pontas; (b) de 9 pontas, ligação em Y; (c) de 12 pontas.

a) Motor de 6 pontas

São fabricados para operar com 2 tensões relacionadas por 3, usualmente 220-380 V ou 380-660 V. Na tensão mais baixa serão ligados em triângulo e na mais alta em estrela (Figura 2.12)



**Figura 2.12. Motor de 6 pontas, tensão nominal 220/380V: (a) conexão a rede 220/127 V
(b) conexão a rede de 380/220 V.**

b) Motor de 9 pontas

Podem ser ligados em tensões relacionadas por 2, como 220-440 V ou 230-460 V. Na tensão mais baixa os enrolamentos são ligados em paralelo (em Y ou \square , dependendo do tipo do motor) e na tensão mais alta são conectados em série, como se mostra na Figura 2.13.

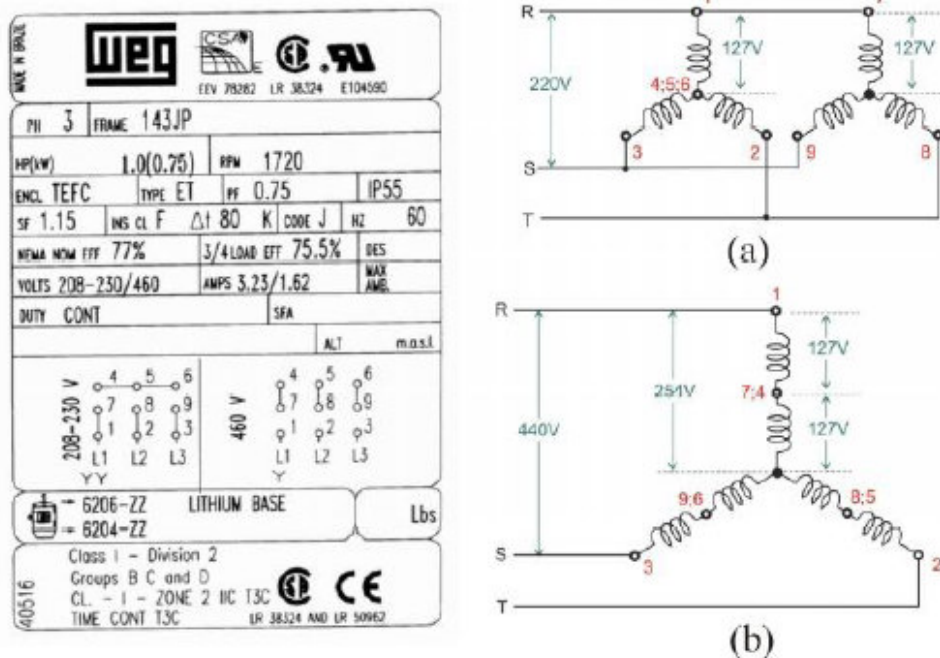


Figura 2.13. Motor de 9 pontas, tensão nominal 220-440V: (a) conexão à tensão mais baixa, ligação Y paralelo; (b) conexão à tensão mais alta, ligação Y série.

c) Motor de 12 pontas

Havendo 12 terminais disponíveis, é possível a ligação em 4 tensões diferentes, usualmente 220-380-440-760 V. A configuração dos enrolamentos é, respectivamente, Δ paralelo, Y paralelo, Δ série e Y série, como mostra a Figura 2.14.

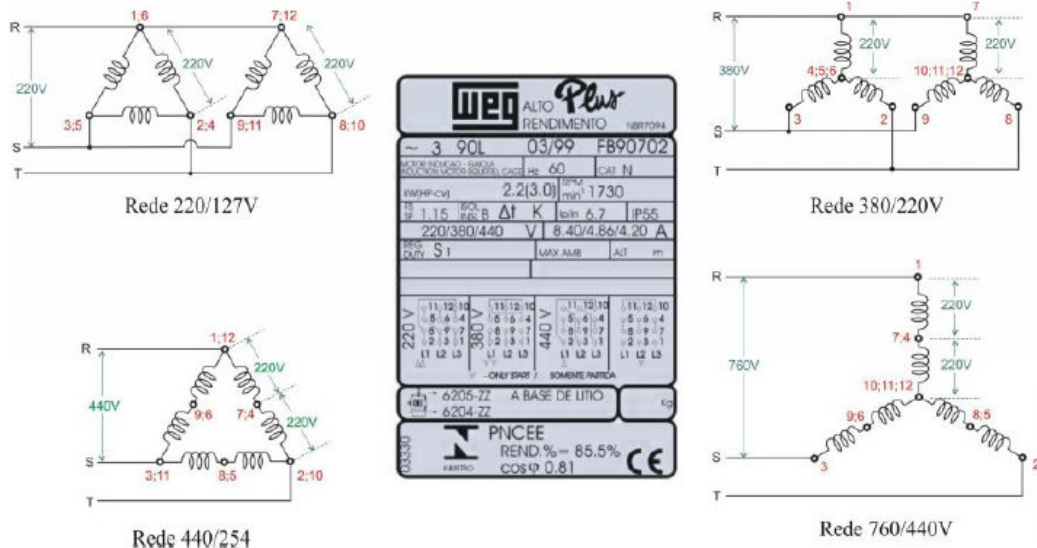


Figura 2.14. Motor de 12 pontas, tensão nominal 220-380-440-760V: (a) conexão a rede de 220/127V, ligação Δ paralelo; (b) conexão a rede de 380/220V, ligação Y paralelo; (c) conexão a rede de 440/254V, ligação Δ série; (d) conexão à tensão mais alta, ligação Δ série.

Para inverter o sentido de rotação de um motor trifásico, basta que se troquem duas fases da alimentação.

2.4.5. Corrente Nominal

É a corrente que o motor solicita da rede sob tensão, frequência e potência nominais. O valor da corrente depende do rendimento e do fator de potência do motor sendo dado pela seguinte relação:

$$I = \frac{P_m}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \left(\frac{\eta}{100}\right) \cdot \cos(\varphi)} \quad (\text{A}) - \text{motor trifásico} \quad (7)$$

$$I = \frac{P_m}{V \cdot \left(\frac{\eta}{100}\right) \cdot \cos(\varphi)} \quad (\text{A}) - \text{motor monofásico} \quad (8)$$

P_m : Potência mecânica fornecida no eixo, potência de projeto, indicada no catálogo do fabricante e na placa do motor (cv, HP ou watts). Caso a potência seja indicada em cv deve-se convertê-la usando-se a relação: 1 cv = 736 watts.

η : Rendimento em %

$\cos(\varphi)$: Fator de potência nominal.

2.4.6 Corrente de Partida

Na partida dos motores de indução é solicitada uma corrente muitas vezes maior que a nominal. À medida que o motor acelerado, a corrente vai diminuindo até atingir valor próximo ao de regime. A corrente de partida é relacionada à corrente nominal (I_n) através dos valores de I_p/I_n . Em certos motores, a corrente de partida é dada por uma letra código (COD), estabelecida pela relação

$$COD = \frac{\text{Potência aparente na partida (kVA)}}{\text{Potência nominal (cv)}} = \frac{\sqrt{3}U_L I_p}{1000 \times P_n} \quad (9)$$

Dada em kVA/cv. Os valores das letras código são dados na Tabela 1.

Tabela 1. Código de partida de motores de indução

COD	kVA/cv	COD	kVA/cv	COD	kVA/cv
A	0,00-3,14	H	6,30-7,09	R	14,00-15,99
B	3,15-3,54	J	7,10-7,99	S	16,00-17,99
C	3,55-3,99	K	8,00-8,99	T	18,00-19,99
D	4,00-4,49	L	9,00-9,99	U	20,00-22,39
E	4,50-4,99	M	10,00-11,09	V	22,40 ou mais
F	5,00-5,59	N	11,10-12,49		
G	5,60-6,29	P	12,50-13,99		

Alguns problemas decorrentes desta elevada corrente de partida são:

- queda de tensão na rede de alimentação;
- aumento da bitola dos condutores de alimentação e
- necessidade de transformadores de maior potência.

As concessionárias de energia elétrica limitam a potência nominal de motores para os quais pode ser dada a partida direta: no caso da CEEE (RS), é exigido algum dispositivo que reduza a corrente de partida de motores com potência superior a 5cv (alimentação em 220V) e 7,5cv (alimentação em 380V).

Os principais dispositivos de redução da corrente de partida são:

- chave estrela-triângulo, para motores de 6 ou 12 pontas;
- chave série paralelo, para motores de 9 ou 12 pontas;
- chave compensadora, para qualquer tipo de motor;
- soft-starter, que também pode ser utilizada em qualquer motor;
- inserção de resistências ou reatâncias de partida.

2.4.7. Escorregamento Nominal

É o escorregamento para a condição de plena carga do motor, correspondendo ao torque nominal.

2.4.8. Torque Nominal

É o torque fornecido pelo motor no seu eixo sob tensão e corrente nominais. Além do torque nominal também são importantes o torque máximo e o torque de partida. O conjugado máximo exige correntes superiores à corrente nominal e por isso não pode ser fornecido continuamente. Deve-se salientar que todo motor de indução possui capacidade de fornecer um torque acima do nominal por breves períodos de tempo.

2.4.9. Velocidade nominal

É a velocidade (rpm) do motor funcionando à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. Conforme visto anteriormente, a velocidade mecânica depende do escorregamento, do número de pólos e da frequência da rede de alimentação. A velocidade do motor de indução varia muito pouco entre a condição de vazio e plena carga, cerca de 10%. Desta forma, o motor de indução alimentado a partir da rede da concessionária não é muito adequado onde se exige velocidade variável. No entanto, quando alimentado por meio de um conversor estático, a variação de velocidade é possível numa faixa bastante ampla.

2.4.10. Rendimento nominal

Depende do projeto do motor, variando com a carga no eixo do motor. Representa a relação em percentual entre a potência elétrica fornecida pela rede e a potência mecânica fornecida no eixo.

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \cdot 100 = \frac{(P_e - P_p)}{P_e} \cdot 100 \quad (10)$$

η - rendimento em percentual

P_m - potência mecânica (útil) no eixo (Watt)

P_e - potência elétrica de entrada (Watt)

P_p - somatório das perdas (Watt).

A curva típica mostra que o motor obtém o maior rendimento dentro da faixa de operação que vai de 75% a 100% da carga nominal. O mesmo vale para o fator de potência. Desta forma deve-se evitar, sempre que possível, deixar o motor funcionando sob carga muito inferior à sua potência nominal, uma vez que isto acarreta um baixo rendimento e um baixo fator de potência, ambos indesejados, uma vez que significa custos operacionais e de aquisição do motor maiores que o necessário. Além disso, um motor com baixo fator de potência contribui para que o fator de potência global da instalação seja baixo, eventualmente acarretando muitas e/ou operação ineficiente da instalação.

O rendimento máximo que cada motor apresenta depende dos materiais utilizados na sua fabricação e das dimensões do mesmo. Em geral, o rendimento aumenta com as dimensões e a potência do motor, chegando a valores em torno de 98% para grandes motores (acima de 500 CV). Motores monofásicos de baixa potência apresentam rendimentos baixos, podendo chegar a 50%. Existem atualmente motores com rendimento acima do normal, chamados de motores de alto rendimento, que são mais caros que os normais. A economia de energia proporcionada permite que o custo adicional retorne num tempo muito menor que a sua vida útil. O seu uso requer via de regra um estudo técnico-econômico.

2.4.11. Fator de Serviço

O fator de serviço representa uma reserva de potência que a motor possui e que pode ser usada em regime contínuo (este tipo de regime é também chamado de regime S1, de acordo com a norma). A potência que pode ser obtida do motor é assim a potência nominal (indicada na placa) multiplicada pelo fator de serviço.

O fator de serviço não deve ser confundido com a sobrecarga momentânea do motor, a qual vale por curtos períodos de tempo. Uma indicação típica de sobrecarga é 60% da potência nominal por 15 segundos. Mesmo motores com fator de serviço 1.0 possuem uma determinada capacidade de sobrecarga por tempo limitado.

2.5. Conexões do Motor Trifásico

A grande maioria dos motores trifásicos são fornecidos para operação em pelo menos duas tensões diferentes, o que os torna aptos a operarem em dois sistemas com tensões diferentes. A escolha de uma ou outra ligação é feita a partir da tensão disponível no local onde o motor deverá operar, sendo que suas características não se alteram devido à reconexão. A adaptação da tensão do motor à da rede é feita por meio da reconexão dos terminais. Os principais tipos de ligação dos terminais são: ligação série-paralela, ligação estrela-triângulo e tripla tensão nominal.

2.5.1. Ligação Série-Paralela

Esta conexão permite que o motor seja ligado em dois níveis de tensão, sendo que uma é o dobro da outra. O enrolamento do motor é dividido em duas partes; ao se ligar as duas partes em série, em cada uma delas será aplicada metade da tensão de fase do motor, no caso considerado 127 Volts. Nesta conexão o motor poderá ser ligado a uma rede de 440 Volts entre fases (254 entre fase e neutro).

Ao se ligar em paralelo as duas bobinas de fase, o motor poderá ser ligado numa rede de 220 Volts entre fases. A tensão aplicada em cada uma das bobinas em paralelo é 127 Volts.

Ressalta-se que em ambos os casos, a tensão em cada uma das seis bobinas é 127 volts. Esta é a tensão nominal de projeto de cada uma das seções do enrolamento de fase, não devendo portanto ser ultrapassada. Nesta conexão o motor deve ser dotado de 9 terminais acessíveis na caixa de ligação.

2.5.2 Ligação Estrela-Triângulo

Nesta conexão ambos os terminais dos enrolamentos de fase são acessíveis na caixa de ligação, sendo assim possível a ligação da máquina tanto em estrela quanto em triângulo. A escolha de uma ou de outra ligação depende da tensão da rede onde o motor será ligado. A relação entre a tensão mais alta e a tensão mais baixa é de 3. Caso a tensão da rede seja 380 Volts deve-se ligar o motor em estrela; ao contrário, caso a rede seja de 220 Volts, deve-se ligá-lo em triângulo. Desta forma, fica assegurado que a tensão em cada uma das fases seja de 220 volts. Caso o motor for conectado em triângulo e ligado numa rede de 380 volts haverá um sobreaquecimento do motor causado pela corrente excessiva, decorrente da tensão ser maior que a nominal.

Nesta condição o motor poderá vir a ser danificado. Por outro lado, ligando-se o motor em estrela e conectando-o a uma rede de 220 volts, haverá uma tensão menor que a nominal aplicada em cada fase. Nesta condição, caso o motor consiga partir e atingir a rotação nominal, a corrente será menor que a nominal e o motor não conseguirá desenvolver a sua potência nominal. Também poderá ocorrer que o motor não consiga partir e atingir a velocidade nominal, ficando bloqueado e aumentando a corrente que nele circula. Resumindo, nenhuma destas condições é aconselhável para a operação do motor e deve em termos práticos ser evitada.

2.5.3 Tripla Tensão Nominal

Fazendo-se uma combinação dos dois tipos de ligação anteriores obtém-se 4 modos possíveis para a conexão da máquina. Neste tipo de motor o enrolamento é dividido em duas partes que podem ser ligadas em série ou em paralelo. Como todos os 12 terminais são acessíveis na caixa de ligação, pode-se ligar o motor tanto em estrela como em triângulo. Em geral, apenas 3 das 4 combinações possíveis são utilizadas sendo a quarta apenas uma tensão de referência, conforme ilustrado na figura 6:

- ligação estrela paralela (380 Volts, figura 6a);
- ligação triângulo paralela (220 Volts, tensão mais baixa, figura 6b);
- ligação triângulo série (440 Volts, figura 6c).

A quarta ligação no exemplo dado é ligação estrela série, o qual resultaria uma tensão de 760 Volts, não sendo na prática utilizada por não existir redes de baixa tensão com valor acima de 600 Volts. Esta tensão serve apenas para indicar a possibilidade de ligação em entrêla-série e para fins de partida do motor.

2.6. Motores Trifásicos.

Características Nominais

Quando comparados com os motores monofásicos de mesma potência e velocidade, os trifásicos só apresentam vantagens:

- são menos volumosos e têm menor peso (em média 4 vezes);
- têm preço menor;
- podem ser encontrados em uma ampla faixa de potência (de ¼ a 500 cv);

- não necessitam de dispositivo de partida, o que diminui seu custo e a necessidade de manutenção;
- apresentam rendimento maior e fator de potência mais elevado, o que se reflete em menor consumo (em média 20% menos)

O único ponto desfavorável é que os motores trifásicos necessitam de rede trifásica para a alimentação, o que nem sempre está disponível nas instalações. As principais características dos motores de indução são indicadas na placa de identificação. As principais informações obtidas nesta placa são apresentadas a seguir.

2.7. Motor Monofásico de Indução

Conforme foi visto, o motor trifásico possui 3 enrolamentos independentes que podem ser conectados de diversas maneiras (série, paralelo, estrela triângulo, etc..). O motor monofásico, ao contrário, possui em geral apenas um enrolamento principal (ou de trabalho) no estator, o qual é ligado a uma rede monofásica. Ao ser ligado a uma rede de tensão alternada senoidal, circula no mesmo uma corrente igualmente senoidal. O campo criado por esta corrente possui uma distribuição espacial no entreferro muito próxima de uma senóide, cujo valor instantâneo depende da corrente instantânea do enrolamento. O campo criado é assim um campo do tipo pulsante, o qual induz uma tensão no enrolamento do rotor. Imaginado-se que o rotor esteja parado, a força de interação dos campos criados pelo estator e pelo rotor faz surgir um torque que atua com igual intensidade nos dois sentidos de rotação do motor. Como resultado o motor não apresenta conjugado de partida, e assim não consegue, por ele mesmo, acelerar e atingir a rotação nominal.

Desta forma é necessário dotar o motor monofásico de um dispositivo auxiliar de partida, a fim de que o mesmo possa ser utilizado. Os dispositivos de auxílio atuam basicamente no sentido de criar um desequilíbrio no campo do estator. Uma vez que o motor começa a girar observa-se que o torque fornecido pelo motor no sentido de rotação é maior que o torque exercido no sentido contrário, ou seja o motor passa a fornecer um torque acelerante.

A forma mais usual de partida é o emprego de um enrolamento auxiliar, o qual pode atuar apenas na partida ou ainda ser conectado para funcionamento permanente.

Os tipos mais comuns de motores monofásicos com enrolamento auxiliar são os seguintes:

- motor com partida a resistência e chave centrífuga;

- motor com partida a capacitor e chave centrífuga;
- motor com capacitor permanente;
- motor com duplo capacitor.

Motores monofásicos são em geral maiores e possuem rendimentos menores que motores trifásicos de mesma potência.

2.8. Perdas

As perdas representam a parcela da potência que o motor consome durante o seu funcionamento. Por outro lado, o consumo de energia do motor está diretamente relacionado com o valor das perdas. Existe uma parcela das perdas que variam com a carga e uma parcela que é fixa. As principais perdas são descritas e discutidas no que segue:

a)- Perda sob Carga (Perdas Joule):

São as perdas que ocorrem nos enrolamentos do estator e do rotor devido ao efeito Joule. Elas existem sempre que o motor estiver conectado à rede. Deve-se salientar que esta parcela de perdas depende da temperatura de trabalho dos enrolamentos, uma vez que as resistências também dependem da temperatura. Elas são dadas pela seguinte expressão:

Perdas Joule do Estator:

$$P_{cs} = 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s$$

R - Resistência de Fase do Estator

Perdas Joule no Rotor

$$P_{cr} = 3 \cdot I_r^2 \cdot R_r$$

I_r - corrente do rotor

R - resistência do rotor

Conforme pode ser visto pelas fórmulas, quanto maior o volume de material condutor (cobre e alumínio) menor será esta parcela de perdas. A quantidade de material condutor é determinada pelo custo e pelo espaço disponível para o mesmo.

b)- Perdas Magnéticas (Perdas no Ferro)

Esta parcela ocorre em todas as partes ferromagnéticas que são atravessadas por fluxo magnético, também chamadas de partes ativas. Do ponto de vista operacional elas dependem basicamente da frequência e do nível de tensão aplicados. Do ponto de vista construtivo e de projeto elas dependem também da frequência, da qualidade das chapas (expressas em perdas em W/kg), da espessura das chapas, percentual de silício, nível de indução magnética e dimensões geométricas (volume) e do tratamento que elas sofrem (ou não) durante o processo de fabricação. Elas são divididas em duas parcelas: perdas por correntes induzidas (também chamadas de correntes de Foucault ou correntes parasitas) e perdas por histerese. Estas parcelas são em geral expressas em watts por unidades de volume dadas aproximadamente pelas seguintes expressões:

Perdas por Correntes Induzidas em W

$$P_{ci} = \varepsilon \cdot B_m^2 \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot V$$

ε - fator que depende da resistividade da chapa

B_m - indução máxima nas chapas (Tesla)

f - frequência

d - espessura das chapas

V - volume das chapas

Perdas por Histerese em W:

$$P_h = \lambda \cdot B_m^x \cdot f$$

λ , x - fatores que depende do tipo de chapa (valor típico $x=1.3$)

Perdas Magnéticas Totais

$$P_{mag} = \varepsilon \cdot B_m^2 \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot V + \lambda \cdot B_m^x \cdot f$$

c)- Perdas Mecânicas

As perdas mecânicas dependem basicamente das dimensões geométricas da máquina, do tipo de rolamento, tipo de lubrificação, potência requerida do ventilador

acoplado ao eixo e do atrito rotacional. Torna-se difícil estabelecer uma relação exata entre todas as variáveis que as influenciam. Uma expressão aproximada pode no entanto ser estabelecida:

$$P_{mec} = k \cdot D \cdot (L + 0.6 \cdot \tau_p) \cdot v^2$$

k - fator que depende do tipo de ventilação utilizado, para máquinas com ventilação superficial vale aproximadamente 15

D - diâmetro do rotor

L - comprimento do rotor

v - velocidade periférica do rotor em m/s

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \cdot \text{passo polar}$$

p - número de pólos da máquina

d)- Perdas Adicionais

Esta é uma parcela de perdas que toma em conta efeitos secundários sobre as perdas. As principais perdas de caráter secundário que estão incluídas nesta parcela são: perdas por efeito pelicular, perdas por pulsação do fluxo nos dentes, perdas devido a harmônicos superiores de campo, imperfeições e tolerâncias construtivas (excentricidade do rotor, por exemplo) e em máquinas de alta tensão perdas por efeito corona.

Uma vez que as perdas adicionais dependem de uma série de fatores é muito difícil estabelecer mesmo uma fórmula aproximada. Desta forma elas são determinadas com sendo um percentual das perdas totais da máquina, havendo fatores que são dados inclusive em normas (veja-se por exemplo a NBR 7094).

A norma IEC 34.2, que é adotada pela maioria dos países europeus, estabelece que as perdas adicionais devem ser consideradas como sendo 0.5 % da potência do motor. As normas japonesas não consideram as perdas adicionais, ao passo que a norma NEMA e CSA determinam procedimentos para a determinação indireta das perdas adicionais por meio de ensaios. Outras normas estabelecem que as perdas adicionais são em torno de 10-15% das perdas totais sob plena carga. Como as perdas adicionais

influenciam o rendimento, obtém-se valores bastante diferentes quando o mesmo é determinado segundo diferentes normas.

2.7. Motores de Indução Monofásicos.

Os motores monofásicos são assim chamados porque os seus enrolamentos de campo são ligados diretamente a uma fonte monofásica. Os motores de indução monofásicos são a alternativa natural aos motores de indução trifásicos, nos locais onde não se dispõe de alimentação trifásica, como residências, escritórios, oficinas e em zonas rurais. Apenas se justifica a sua utilização para baixas potências (1 a 2 KW). Entre os vários tipos de motores elétricos monofásicos, os motores com rotor tipo gaiola destacam-se pela simplicidade de fabricação e, principalmente, pela robustez e manutenção reduzida. Por terem somente uma fase de alimentação, não possuem um campo girante como os motores trifásicos, mas sim um campo magnético pulsante. Isto impede que tenham torque de arranque, tendo em conta que no rotor se induzem campos magnéticos alinhados com o campo do estator. Para solucionar o problema de arranque utilizam-se enrolamentos auxiliares, que são dimensionados e posicionados de forma a criar uma segunda fase fictícia, permitindo a formação do campo girante necessário para o arranque.

Tipos de Motores de indução monofásicos:

- Motor de Pólos Sombreados;
- Motor de Fase Dividida;
- Motor de Condensador de Partida;
- Motor de Condensador Permanente;
- Motor com dois Condensadores.

2.7.1. Caracterização, comparação com Motores Trifásicos.

Construtivamente, os motores monofásicos são semelhantes aos trifásicos, já estudados anteriormente, com a diferença de possuírem um único enrolamento de fase. Sua grande vantagem é a de poderem ser ligados à tensão de fase das redes elétricas, normalmente disponíveis em residências e pequenas propriedades rurais - ao contrário do que sucede com as redes trifásicas. Em contrapartida, possuem o inconveniente de

serem incapazes de partir sem a ajuda de um circuito auxiliar, o que não ocorre com os motores trifásicos.

Em uma comparação com motores trifásicos, os monofásicos apresentam muitas desvantagens:

- Apresentam maiores volume e peso para potências e velocidades iguais (em média 4 vezes); em razão disto, seu custo é também mais elevado que os de motores trifásicos de mesma potência e velocidade;
- Necessitam de manutenção mais apurada devido ao circuito de partida e seus acessórios;
- Apresentam rendimento e fator de potência menores para a mesma potência; em função disso apresentam maior consumo de energia (em média 20% a mais);
- Possuem menor conjugado de partida;
- São difíceis de encontrar no comércio para potências mais elevadas (acima de 10cv).

2.7.2. Partida de Motores Monofásicos.

Motores monofásicos não podem partir sozinhos porque não conseguem formar o campo girante, como fazem os motores trifásicos. A Fig. 4.15 mostra a formação do campo magnético devido a uma só fase. Como se vê, este campo é pulsante, tendo sempre a mesma direção e não permitindo a indução de correntes significativas nos enrolamentos rotóricos.

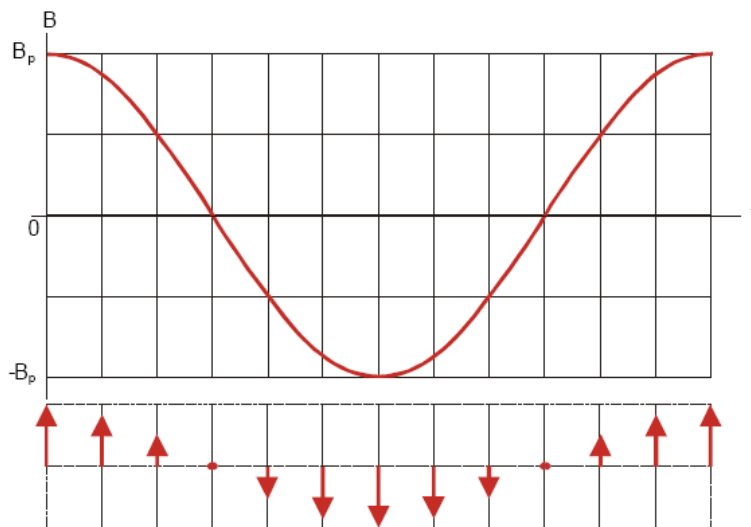


Figura 2.15. Campo magnético pulsante B gerado por alimentação monofásica.

Porém, se de alguma forma se puder conseguir um segundo campo com defasagem de 90° em relação à alimentação, se terá um sistema bifásico, com a conseqüente formação de um campo girante capaz de promover a partida, como mostra a Fig. 2.16. Existem várias maneiras de proporcionar esta defasagem. Cada uma delas corresponde a um determinado tipo de motor monofásico, como se verá na próxima seção.

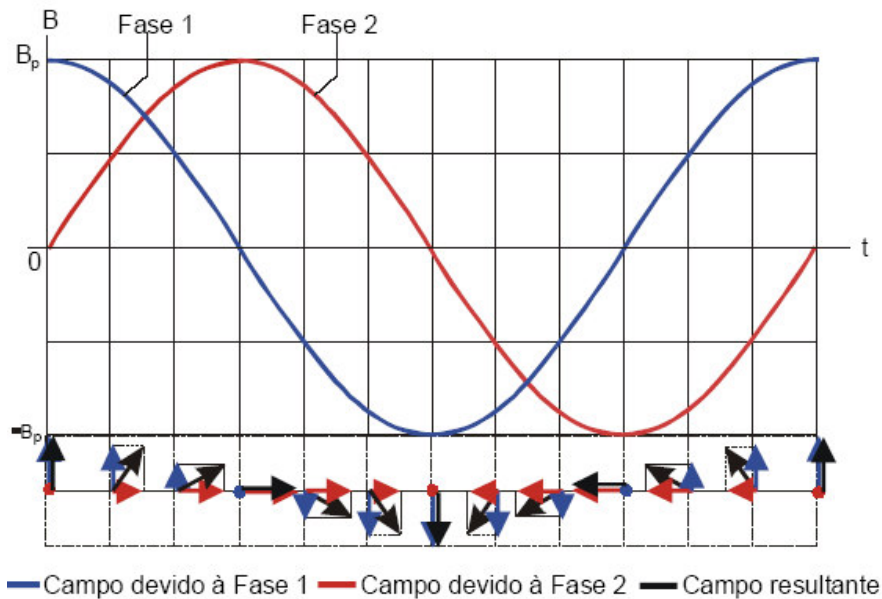


Figura 2.16. Campo magnético girante B formado por alimentação bifásica

É importante salientar que após atingir certa velocidade (entre 65 - 80% de sua velocidade síncrona), o motor pode continuar trabalhando com uma só fase. Isto quer dizer que, após acelerado, o circuito auxiliar de partida pode ser "desligado" sem que o motor pare.

2.7.3. Principais Tipos de Motores de Indução Monofásicos.

Motor de Fase Dividida

Possui um enrolamento auxiliar espacialmente defasado de 90° em relação ao enrolamento principal. Quando é atingida uma determinada rotação, este enrolamento auxiliar é desconectado do circuito do motor por intermédio de uma chave centrífuga. Já que é dimensionado para atuar somente durante a partida, se não for desconectado acabará por queimar.

Na prática, o ângulo de defasagem entre os campos nos dois enrolamentos (principal e auxiliar) é bem menor que 90° , o que resulta em conjugado de partida igual ou pouco superior ao nominal. Por isso esse tipo de motor é usado para cargas de pequena potência e conjugados de partida moderados (por exemplo: ventiladores, exaustores, bombas centrífugas, etc.).

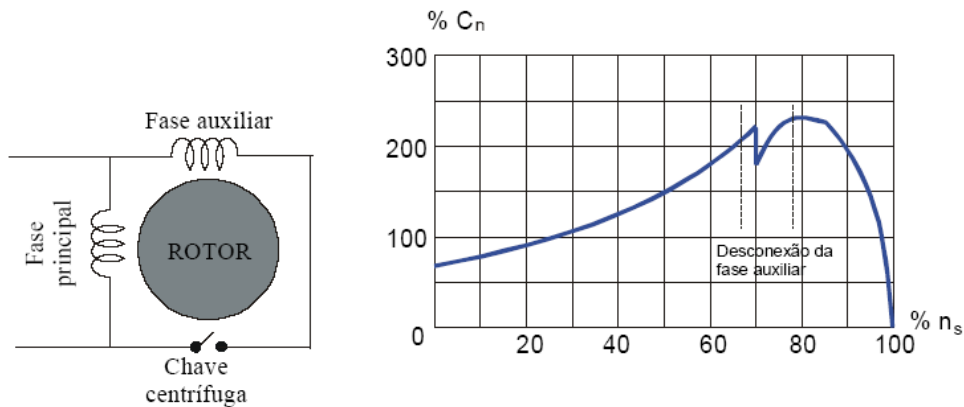


Figura 2.17. Circuito equivalente e característica conjugado x velocidade de um motor de fase dividida

Motor com Capacitor de Partida

O que diferencia este motor do de fase dividida é a inclusão de um capacitor em série com a fase auxiliar, o que permite a obtenção de ângulos de defasagem bem maiores e, conseqüentemente, conjugados de partida bem mais elevados (entre 200 e 350% do conjugado nominal).

O circuito do enrolamento auxiliar também é desligado através de chave centrífuga quando o motor atinge entre 75 e 80% da rotação síncrona.

É fabricado na faixa de potências de 1/4 a 15 cv e é usado numa grande variedade de aplicações.

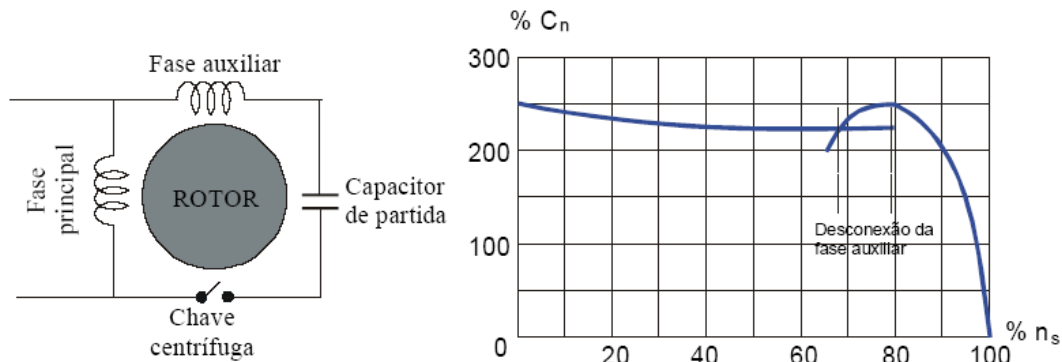


Figura 2.18. Circuito equivalente e curva conjugado x rotação de um motor com capacitor de partida.

Motor com Capacitor Permanente.

Neste tipo de motor, o enrolamento auxiliar e seu capacitor em série ficam permanentemente conectados, não sendo necessária a chave centrífuga. Isto é bom porque a ausência de partes móveis facilita a manutenção.

O conjugado máximo, o rendimento e o fator de potência desses motores são melhores que os de outros tipos, aproximando-se aos valores obtidos em motores trifásicos. Em contrapartida, seu conjugado de partida é menor que o dos motores de fase dividida (entre 50% e 100% do conjugado nominal), limitando sua utilização a equipamentos como pequenas serras, furadeiras, condicionadores de ar e máquinas de escritório. São fabricados normalmente para potências entre 1/5 a 1,5 cv.

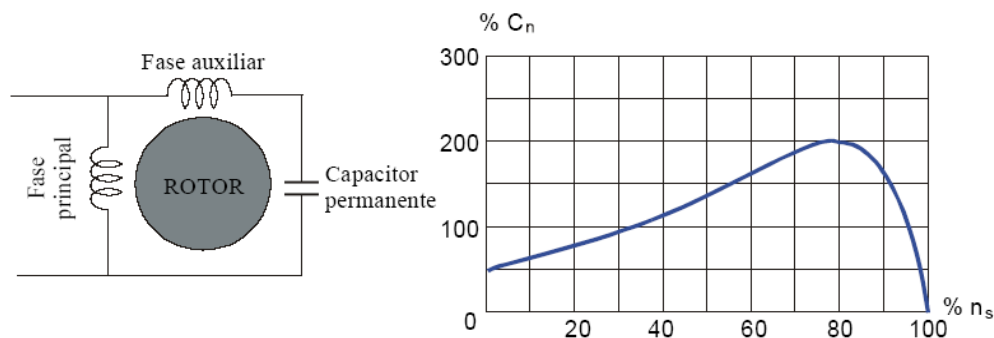


Figura 2.19 - Circuito equivalente e curva conjugado x rotação de um motor com capacitor permanente

Motor com Dois Condensadores

É uma "mistura" dos 2 anteriores: possui um capacitor de partida, desligado através de chave centrífuga quando o motor atinge cerca de 80% de sua rotação síncrona, e um outro que se encontra permanentemente ligado. Com isso, possui todas as vantagens daqueles motores: alto conjugado de partida, alta eficiência e fator de potência elevado.

No entanto seu custo é elevado e só é fabricado para potências superiores a 1 cv.

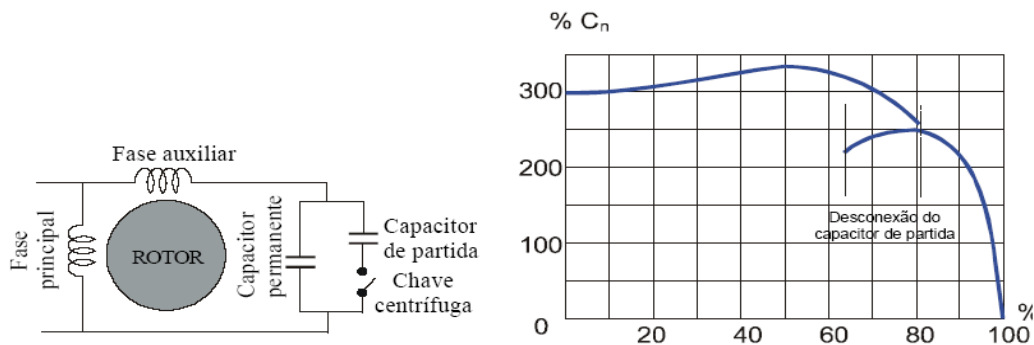


Figura 2.20. Circuito equivalente e curva conjugado x rotação de um motor com dois capacitores

Motor de Campo Distorcido Ou Motor de Pólos Sombreados

Também chamado de motor de pólos sombreados, este motor consegue criar um campo girante através de modificações feitas em seus pólos, o que pode ser feito de várias maneiras, caracterizando 3 tipos de motores:

- pólos salientes
- "esqueleto"
- de enrolamentos distribuídos

Um dos mais comuns é o de pólos salientes (figura abaixo), onde uma parte da cada pólo (entre 25% e 35%) é abraçada por uma espira de cobre em curto-circuito. O fluxo magnético produzido nesta espira fica atrasado em relação ao fluxo da parte não abraçada pela mesma, resultando num campo girante que sempre se move na direção da parte não abraçada para a parte abraçada do pólo.

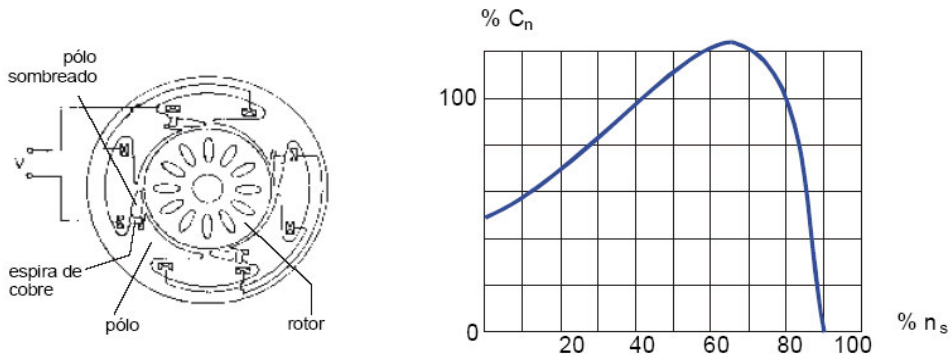


Figura 2.21.- Vista esquematizada e curva conjugado \times rotação de um motor de campo distorcido com pólos salientes.

Estes motores apresentam um único sentido de rotação. A maneira mais prática de obter-se rotação no sentido oposto é mudar a posição da ponta do eixo em relação ao estator; outros métodos são possíveis, porém muito onerosos.

Devido ao seu método de partida, é o motor mais simples, confiável e econômico.

Porém, seu conjugado de partida é bastante baixo (15% a 50% do C_{nom}) e apresenta fator de potência e rendimento baixos. Por este motivo é fabricado para pequenas potências (tipicamente de alguns milésimos de cv até 1/4 cv), podendo ser usado em processos de movimentação de ar (ventiladores, exaustores, secadores de roupa e de cabelo), pequenas bombas, compressores, projetores de slides, toca-discos e outros eletrodomésticos.