INTRODUÇÃO – TIPOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

As máquinas elétricas podem ser divididas em dois grupos:

- Máquinas Rotativas (motores e geradores)
- Máquinas Estáticas (transformadores)

I.1 - Tipos de Máquinas Elétricas Rotativas

As máquinas elétricas rotativas funcionam sob o princípio da conservação eletromecânica de energia e podem ser classificados em motores e geradores.

Gerador: recebe energia mecânica de uma fonte primária (Ex.: Turbina Hidráulica) e a converte em energia elétrica.

Motor: recebe energia elétrica de uma fonte de alimentação e a converte em energia mecânica.

I.2 - Máquinas C.A.

Como a energia elétrica é distribuída em corrente alternada, as máquinas C.A. são mais usadas. Os tipos são:

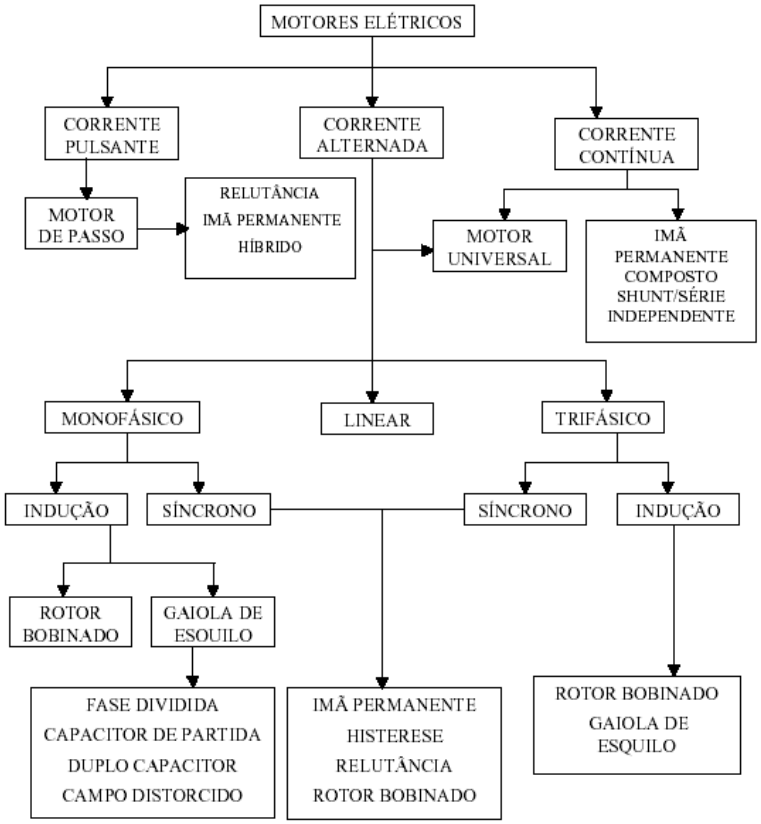
- Síncronas (velocidade em exato sincronismo com a fonte C.A.).
- Assíncronas ou de Indução (velocidade ligeiramente diferente comparada com a máquina síncrona).

I.3 - Máquinas CC

São de construção mais complexa, custando mais que as máquinas C.A. e assim são menos usadas.

As máquinas C.C. ainda são bastante usadas em tração (trens e metrôs). Além disso, apresentam grande facilidade no controle de velocidade.

I.4 - Classificação dos Motores Elétricos:



CAPITULO 1 ELETROMAGNETISMO

1.1 – Magnetismo

Segundo a História, a palavra *magnetismo* tem como origem *Magnésia*, nome de uma antiga cidade no continente asiático, de onde há registro da descoberta de um mineral que tinha a propriedade de atrair partículas de ferro. A este mineral deu-se o nome de *magnetita*, que é o óxido de ferro com tal propriedade.

O fenômeno do magnetismo está estritamente ligado à eletricidade. Embora em um ímã comum possa parecer que não - afinal funciona sem qualquer fonte de corrente elétrica - se consideramos o aspecto atômico, ele se deve ao movimento de cargas elétricas.

A habilidade de certos materiais - notadamente o ferro, o níquel, o cobalto e algumas de suas ligas e compostos - de adquirir um alto e permanente magnetismo, é de grande importância para a área de engenharia elétrica. As aplicações de materiais magnéticos são muitas e fazem uso de quase todos os aspectos do comportamento magnético.

As pesquisas por materiais magnéticos com melhores características são motivadas pela possibilidade de redução nas dimensões dos equipamentos e diminuição de limitações no desempenho devido à saturação e perdas.

1.1.1 - *Comportamento Magnético*

Alguns materiais, como o ferro, são marcadamente magnéticos, enquanto que outros não são. De fato, uma das técnicas mais simples de separação de materiais ferrosos dos não ferrosos é através da comparação de suas propriedades magnéticas.

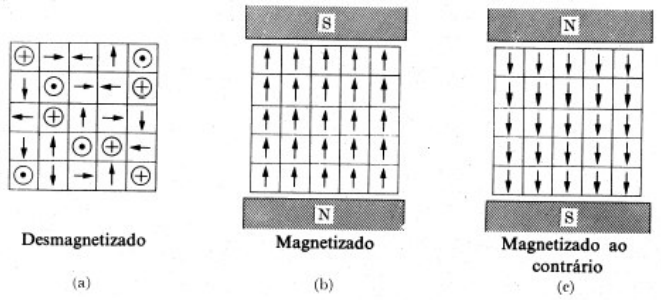
A importância histórica e comercial do ferro como um material magnético deu origem ao termo ***ferromagnetismo***, para englobar as intensas propriedades magnéticas possuídas pelo grupo do ferro na tabela periódica.

O magnetismo está relacionado com o movimento de cargas elétricas . Os elétrons giram em torno do núcleo dos átomos, mas também em torno de si mesmos, isto é semelhante ao que ocorre com os planetas e o sol. Há diversas camadas de elétrons, e em cada uma, os elétrons se distribuem em orbitais, regiões onde executam a rotação, distribuídos aos pares.

Ao rodarem em torno de si, os elétrons da camada mais externa produzem um campo magnético mínimo, mas dentro do orbital, o outro elétron do par gira também, em sentido oposto, cancelando este campo, na maioria dos materiais.

Porém nos materiais ferromagnéticos há regiões, chamadas *domínios magnéticos*, onde alguns dos pares de elétrons giram no mesmo sentido, e um campo magnético resultante da soma de todos os pares e domínios é exercido em volta do material: são os imãs.

Em um material magnético desmagnetizado os domínios estão orientados ao acaso, de forma que seus efeitos se cancelam. Entretanto, se os domínios são alinhados por um campo magnético externo, o material se torna magnetizado. O alinhamento de todos os domínios em uma direção origina um efeito aditivo, o qual pode ou não permanecer após a retirada do campo externo.



- Alinhamento de domínios. Um campo magnético externo pode alinhar os domínios ferromagnéticos. Quando os domínios estão alinhados, o material está magnetizado.

Para designar quando o alinhamento magnético é permanentemente retido ou não, são usados respectivamente os termos: “material magnético duro” e “material magnético macio”; como os materiais mecanicamente duros tendem a ser magneticamente duros, esses termos são adequados. Um material normalmente perde essa ordenação dos domínios magnéticos quando é recozido, já que a atividade térmica provoca a desorientação dos domínios.

O fato de dois ímãs se atraírem ou se repelirem, dependendo das suas posições, pode sugerir a existência de "cargas magnéticas" similares às elétricas. Entretanto, tal modelo não deve ser considerado.

Cargas elétricas podem existir de forma isolada mas não é possível separar espécies de magnetismo. Se um ímã for dividido em duas ou mais partes, estas serão simplesmente outros ímãs com as mesmas características de atração e repulsão do original. No modelo aceito, não existem cargas, mas sim *dipolos magnéticos*. Aos pólos são dados os nomes de *norte* e *sul*. E a interação entre os mesmos é a face mais visível do magnetismo: pólos idênticos se repelem e pólos opostos se atraem.

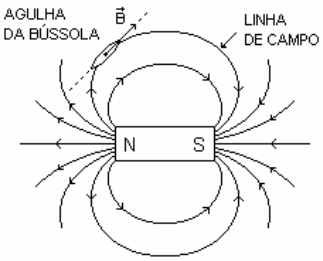
1.1.2 – Campo Mag*nético*

O conceito de campo magnético é similar ao do elétrico. O campo magnético é a tendência que uma região apresenta de atrair corpos metálicos magnetizáveis (materiais ferromagnéticos, como o ferro, o cobalto, o níquel e algumas ligas).

O campo magnético deve ser representado por um *vetor campo magnético* ***B,*** também chamado de *indução magnética*. E as linhas que representam o campo são ditas linhas de indução.

Toda linha de campo magnético é contínua e fechada, saindo do pólo N e chegando ao pólo S por fora do imã e saindo do pólo S e chegando ao pólo N por dentro do imã.

Apenas uma linha de campo passa por um dado ponto do espaço e essa linha é tangente ao vetor campo magnético B nesse ponto.

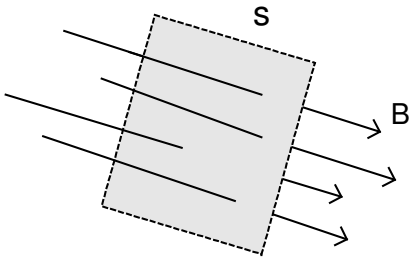


1.1.3 – Fluxo Mag*nético*

O número de linhas por unidade de área é proporcional ao módulo do vetor B. Isto significa que as linhas são mais próximas entre si onde B é maior e mais afastadas onde B é menor. Sendo assim, o vetor campo magnético B também pode ser tratado como a densidade de fluxo magnético.

O fluxo magnético Φ representa a quantidade de linhas de indução que atravessa uma área S. Então:

$$\Phi = B \cdot S$$



A unidade de fluxo é o Weber (Wb), já a unidade de B é o Tesla (T).

1.2 – Magnetismo e Eletricidade

O magnetismo e a eletricidade estão intimamente relacionados. O termo *Eletromagnetismo* associa estas duas áreas, demonstrando interação entre magnetismo e cargas elétricas ou correntes elétricas.

O eletromagnetismo pode ser descrito através de três princípios. Os quais são de profunda importância para estudo das máquinas elétricas e diversos equipamentos.

1.2.1 – 1° Princípio: Campo Magnético Criado Por Uma Corrente Elétrica

Pelo exposto em itens anteriores, o movimento de cargas elétricas produz um campo magnético. Assim, uma corrente elétrica em um condutor também produz campo magnético em torno do mesmo.

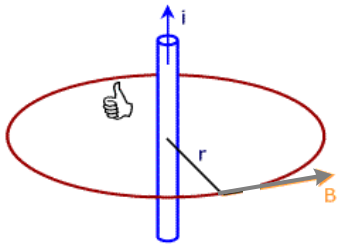
Campo magnético criado por um condutor retilíneo

No caso de um condutor retilíneo as linhas de indução são círculos concêntricos. A corrente elétrica num condutor produz campo magnético em torno dele, com intensidade proporcional à corrente e inversamente à distância.

$$B = \frac{\mu . i}{2\pi . r}$$

i: corrente elétrica
B: valor absoluto do vetor campo magnético em um ponto(A unidade de B no SI é o tesla (T))
μ = permeabilidade magnética do meio (T.m/A)
$\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ T.m/A (no vácuo)
r = distância do ponto ao fio (m)

O sentido de B é dado pela regra da mão direita conforme exibida na figura.

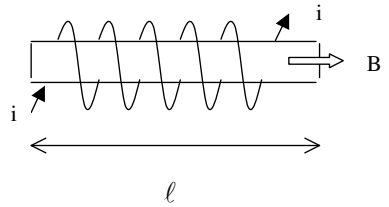


Regra da mão direita: "envolva o condutor com a mão direita de modo que o polegar aponte no sentido da corrente. Os demais dedos dobrados fornecem o sentido do vetor campo magnético B, no ponto considerado".

Campo magnético criado por um solenóide

Um solenóide, ou bobina, é um condutor enrolado de forma helicoidal, com as espiras bastante próximas entre si. Uma corrente elétrica circula pelo mesmo e os campos magnéticos das espiras se somam e o conjunto atua como se fosse um dipolo único. As possibilidades de se ter ou não o campo pelo simples ligar e desligar da corrente e de se ajustar o campo pela variação da corrente fazem do solenóide um dispositivo largamente usado.

$$B = \frac{\mu . N . i}{\ell}$$



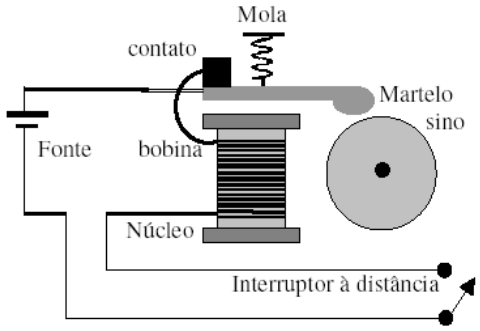
N = número de espiras
ℓ = comprimento do solenóide

Para determinar o sentido do campo na bobina podemos utilizar novamente a regra da mão direita: "envolva a bobina com a mão direita de tal forma que os quatro dedos acompanhem o sentido da corrente, e o polegar estendido indicará o sentido do campo"

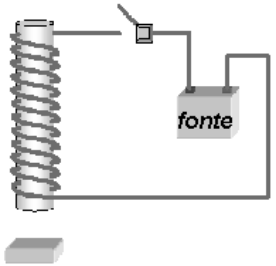
Aplicações:

Alguns exemplos de aplicação do 1° princípio são: campainha, eletroímãs, contatores.

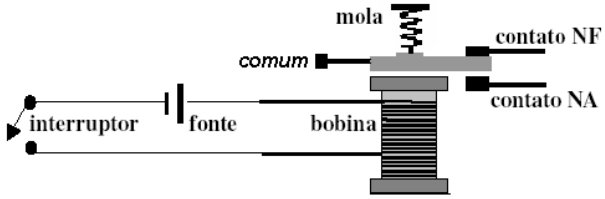
Numa campainha mostrada ao lado, quando o interruptor é fechado, a corrente circula pela bobina através do contato ligado ao martelo. Este é atraído pelo núcleo magnetizado, tocando o sino. Além disso, abre o circuito desligando a fonte e voltando para posição inicial por ação da mola. O ciclo se repete até que o interruptor seja aberto.



Os eletroímãs industriais são usados como ímãs temporários. De tamanho relativamente grande, os eletroímãs são utilizados no transporte de materiais metálicos. Quando a chave é fechada, o núcleo é magnetizado exercendo uma força de atração sobre o objeto a ser transportado.

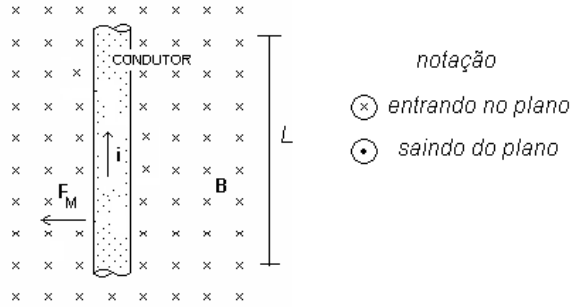


Os relés magnéticos ou contatores são dispositivos utilizados para controlar potências através de seus contatos, que estão normalmente abertos (NA) ou normalmente fechados (NF) e invertem estas condições quando a bobina é alimentada.

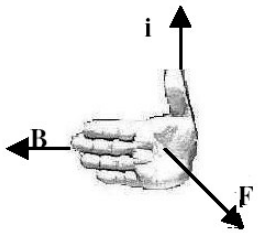


1.2.2 – 2° Princípio: Força sobre um Condutor de Corrente Elétrica

Um fio condutor percorrido por corrente elétrica mergulhado numa região de campo magnético, fica sob a ação de uma força, que resulta da soma das forças magnéticas que atuam sobre as partículas carregadas em movimento que constituem a corrente.



O sentido e direção da força F podem ser determinados pela regra da mão direita (tapa):



O valor da força pode ser calculado através de:

$$F = B\,I\,L\,\text{sen}\theta$$

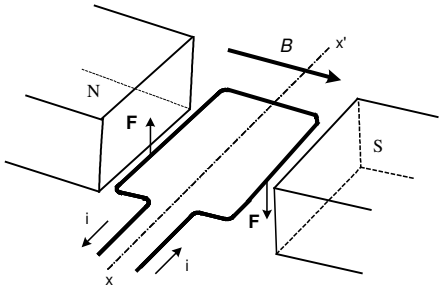
Onde F é a força em Newtons; L o comprimento do condutor, em m; e θ o ângulo entre o condutor e as linhas do campo.

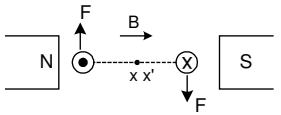
Note que se o condutor estiver paralelo às linhas de campo, $\theta = 0°$, daí a força será nula.

Aplicações:

As grandes aplicações do 2° princípio do eletromagnetismo são os motores elétricos. A seguir é mostrado o princípio de funcionamento do motor CC.

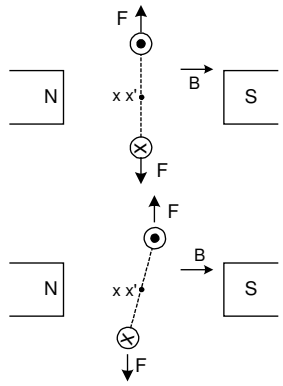
Uma espira é imersa em um campo magnético como mostra a figura. A espira é móvel em torno do eixo xx'. Quando uma corrente elétrica atravessa a espira, como indicado, os condutores laterais da espira sofrem ação de forças, cujos sentidos podem ser determinados pela regra da mão direita. A ação destas forças forma um conjugado (Torque), girando a espira em torno do eixo xx'. Em corte são mostrados a espira e os pólos do ímã.



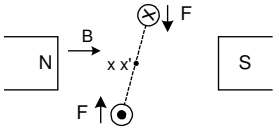


Durante o movimento o torque diminui, pois o braço (distância entre a projeção da força e o eixo de giro) vai diminuindo. No instante em que a espira assumir a posição vertical, o torque se anula. Entretanto, devido à inércia, a espira não pára e ultrapassa a posição vertical.

Isso acontecendo, o sentido do torque se inverte fazendo a espira girar para sentido contrário. A conclusão disso é que a espira fica parada na posição vertical.



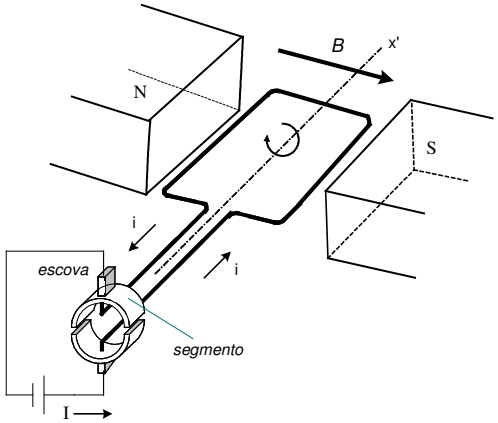
Para permitir o movimento de rotação da espira, usa-se um recurso muito simples: inverter o sentido da corrente na espira a cada meia volta. Assim, as forças invertem os sentidos, permitindo a continuidade do movimento, como mostra a figura ao lado.



Para executar esta solução utiliza-se um dispositivo simples chamado *comutador*. Trata-se de um anel dividido ao meio, sendo as duas metades (*segmentos*) rigidamente ligadas na espira, como mostra a figura.

Ao girar junto com a espira, os segmentos deslizam sobre dois contatos elétricos fixos (*escovas*). É por meio das escovas que a espira é ligada à fonte CC externa.

Observe que a corrente elétrica entrará na espira sempre pela mesma escova e que os contatos entre escovas e segmentos se alternam à medida que a espira gira.



Na prática, os motores possuem vários quadros com vários segmentos. Com isso, a rotação se torna mais suave e o torque mais elevado.

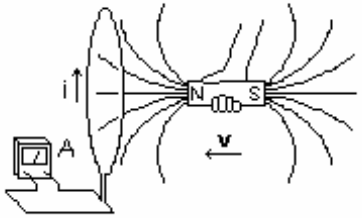
1.2.3 – 3° Princípio: Indução Eletromagnética

A descoberta da indução eletromagnética permitiu grande impulso no avanço da eletricidade. Até então a eletricidade era obtida por baterias. A indução eletromagnética possibilita a geração de força eletromotriz através de campos magnéticos que atravessam bobinas ou enrolamentos. Isso é a base de construção de geradores em usinas elétricas.

Lei de Faraday

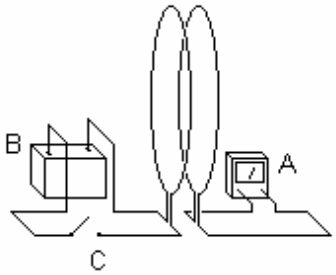
Segundo a lei de Faraday, se o fluxo magnético através da superfície limitada por um circuito varia com o tempo, aparece nesse circuito uma força eletromotriz (fem) induzida, ou seja , uma diferença de potencial elétrico.

A primeira experiência de Faraday foi um arranjo conforme a figura ao lado: uma espira de um material condutor de eletricidade conectada a um galvanômetro. Nesta situação, não se pode esperar indicação no instrumento, uma vez que não há fonte de corrente no circuito. Entretanto, se um ímã for aproximado da espira, o galvanômetro indica uma corrente. Se for afastado, também indica, mas em sentido oposto. Com o ímã em repouso, não há qualquer indicação.



Uma outra experiência foi realizada conforme figura ao lado: ao se ligar a chave, ocorre uma pequena e rápida deflexão no galvanômetro. E também ao se desligar, mas em sentido oposto. Mantida a chave ligada, por maior que seja a corrente circulando na espira esquerda, não há qualquer indicação no galvanômetro.

Essas experiências simples levaram à dedução da Lei de Indução de Faraday.



A corrente que circula pela espira com o galvanômetro é chamada corrente induzida, produzida por uma força eletromotriz (fem) induzida. E Faraday concluiu que esta tensão induzida é proporcional à variação do fluxo magnético com o tempo.

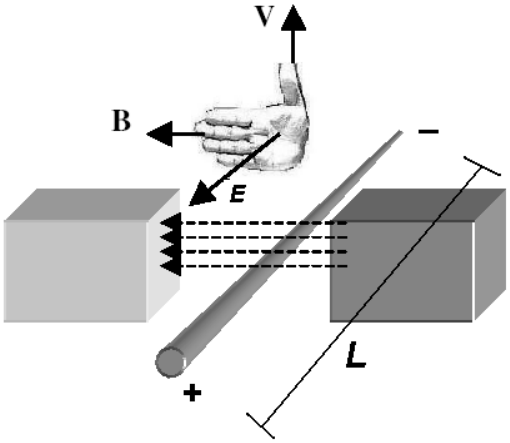
Uma outra exposição da lei de Faraday é mostrada a seguir.

Se um condutor "cortar" as linhas de indução de um campo magnético, surgirá entre seus terminais uma tensão induzida, a qual será proporcional à velocidade, ao comprimento do condutor, e ao campo.

$$E = BLv \cdot sen\theta$$

E é a tensão em V, L o comprimento em m, e v a velocidade do condutor, em m/s. θ é o ângulo entre o campo magnético e a velocidade.

Note que se θ for 0° não existirá tensão induzida, já que neste caso, o condutor não "corta" as linhas do campo.

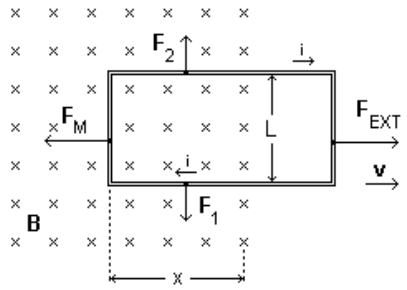


Lei de Lenz

"Segundo a lei de Lenz, qualquer corrente induzida tem um sentido tal que o campo magnético que ela gera se opõe à variação do fluxo magnético que a produziu".

Voltando ao exemplo da primeira experiência de Faraday, quando um imã é aproximado da espira, a corrente induzida que aparece na espira tem o sentido indicado porque, assim, ela gera um campo magnético cujo pólo norte se confronta com o pólo norte do imã. Os dois pólos se repelem, ou seja, o campo gerado pela corrente induzida na espira se opõe ao movimento do imã.

Um outro exemplo, no caso do movimento de uma espira dentro de um campo magnético por ação de uma força externa Fext.



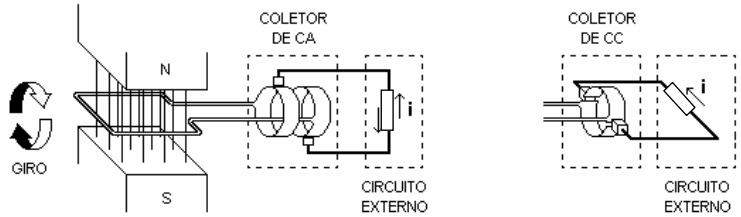
Como há variação de fluxo magnético no interior da espira, existe uma corrente induzida. Mas como um condutor percorrido por corrente elétrica mergulhado numa região de campo magnético fica sob a ação de uma força, então por efeito da corrente induzida na espira aparecem as forças F_1, F_2 e F_M. As duas primeiras se cancelam mutuamente. Como, pela lei de Lenz, a força F_M deve se opor à força F_{EXT}, a corrente induzida na espira pela variação do fluxo magnético deve ter o sentido indicado. Esse fato constitui um exemplo particular de aplicação da lei de Lenz.

Aplicações:

As grandes aplicações da indução eletromagnética são os geradores e transformadores.

Gerador Elementar

Um gerador elementar tem, como elementos básicos, um imã permanente, uma espira e um coletor. A espira gira ao redor do seu eixo com velocidade angular constante por alguma causa mecânica, na região de campo magnético entre o pólo N e o pólo S do imã permanente. O fluxo magnético que atravessa a superfície limitada pela espira varia com o tempo devido ao movimento. Pela lei de Faraday, essa variação do fluxo magnético faz aparecer na espira uma tensão induzida. A tensão induzida é originalmente alternada, entretanto, conforme o tipo de coletor utilizado, ela pode estar disponível externamente como alternada ou contínua.

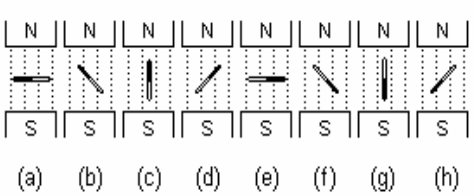


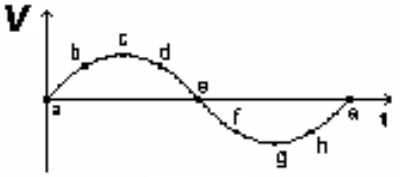
A tensão induzida na espira é dada por:

$$V(t) = B \cdot S \cdot w \cdot sen(wt)$$

Onde:
B – densidade de fluxo;
S – área da espira;
w - velocidade angular da espira.

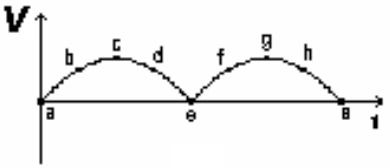
As Figuras abaixo representam oito posições sucessivas (a, b, c, d, e, f, g e h) da espira ao longo de um período de revolução e o correspondente gráfico da tensão induzida na espira. Considerando que a espira gira com velocidade angular constante ao redor do seu eixo, a freqüência da tensão gerada é dada por: $f = \omega / 2\pi$.





Como foi exposto anteriormente, a tensão induzida em um condutor que corta as linhas de campo, depende do seno do ângulo entre a velocidade e o campo. Isso explica o fato da tensão induzida se comportar como uma função senoidal. De acordo com a posição da espira, a tensão gerada evolui como uma função senoidal. Por exemplo, na posição (a): o ângulo entre a velocidade dos condutores laterais da espira e o campo magnético é 0°, ou seja, os condutores não cortam as linhas de campo, daí a tensão vale zero. Já na posição (c): o ângulo entre a velocidade dos condutores laterais da espira e o campo magnético é 90°, ou seja, a tensão é induzida é máxima. Após meio giro da espira, o sentido com que os condutores cortam as linhas de campo se inverte, invertendo o sentido da tensão induzida.

Para as mesmas posições sucessivas da espira, mas com o coletor de corrente contínua, o correspondente gráfico da tensão de saída aparece na figura ao lado. Este coletor é também chamado comutador, funcionando como um retificador, porém mecânico.



1.3 – Circuitos Magnéticos

Um circuito magnético pode ser comparado com um circuito elétrico. Nesta analogia, o fluxo magnético equivale a corrente elétrica. E duas grandezas fundamentais devem ser apresentadas: a força magneto-motriz (Fmm) e a relutância (Rel), as quais equivalem à tensão e resistência elétricas.

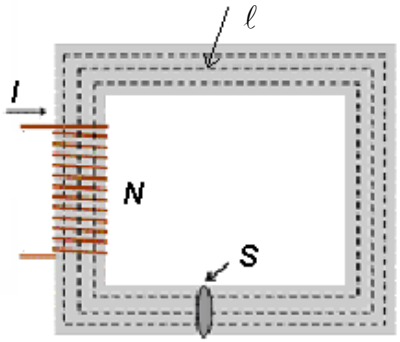
Assim, pode se escrever: $\Phi = \frac{Fmm}{\mathrm{Re}l}$; análogo a lei de ohm.

A força magneto-motriz (Fmm) é a força que produz fluxo magnético. Definida pelo produto entre o número de espiras e a corrente elétrica é dada em Ampère-espira (Ae).

$$F_{MM} = N \cdot I$$

A Relutância mede a oposição à formação de fluxo magnético, dada em Ae/Wb.

$$\mathrm{Re}\, l = \frac{\ell}{\mu \cdot S}$$



Onde: ℓ é comprimento médio do circuito magnético(m);
S é a área da seção transversal do núcleo (m2);
μ é a permeabilidade magnética do material.

1.3.1 – Indutância

Os três elementos passivos básicos em um circuito elétrico são resistor, capacitor e indutor. Um indutor, ou bobina, é caracterizada por uma grandeza chamada indutância.

A indutância de uma bobina é a relação entre o fluxo concatenado com a mesma e a corrente necessária para produzi-lo, isto é:

$$L = \frac{(N \cdot \Phi)}{I}$$

L: indutância da bobina, dada em Henry (H);
I: corrente em ampères (A);
Φ: fluxo produzido pela bobina, em Weber (Wb);
N: número de espiras.

Substituindo as relações já vistas, pode-se chegar numa expressão para o cálculo da indutância:

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot S}{\ell}$$

Note que a indutância depende de fatores geométricos do indutor, do número de espiras e do material utilizado como núcleo.

1.3.2 – Intensidade de Campo (H)

É a quantidade de ampère-espira por metro de comprimento do circuito magnético, ou seja:

$$H = \frac{N \cdot i}{L}$$

A unidade de intensidade de campo é o Ae/m. Note que quanto maior o comprimento da do circuito, menor será a intensidade de campo.

A partir das relações anteriores, pode-se demonstrar facilmente que existe uma relação entre a densidade de fluxo (B) e a intensidade de campo (H), dada por:

$$B = \mu \cdot H$$

Esta relação caracteriza o comportamento magnético do meio, ou seja, do material utilizado como núcleo magnético.

A permeabilidade magnética μ representa a maior ou menor facilidade com que o material é magnetizado. A unidade de permeabilidade é o T.m/Ae

O valor da permeabilidade não é constante sendo extraído de gráficos de curvas de magnetização.

1.3.3 - Curvas de Magnetização

Para cada tipo de material é levantada uma curva que relaciona a densidade de fluxo com a intensidade de campo, são as curvas B x H.

A curva é obtida, a partir de um material não magnetizado, incrementando-se a força magnetizante (intensidade de campo magnético), e obtendo-se o resultado da densidade de fluxo. O resultado é visto na linha pontilhada da figura.

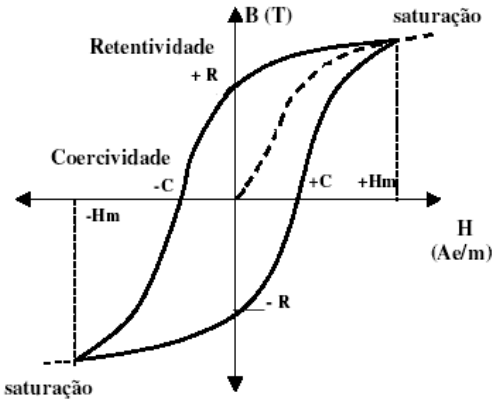
Nota-se que a partir de certo valor de intensidade de campo (H_M), um incremento neste produz pouco acréscimo na densidade de fluxo. Isso caracteriza a SATURAÇÃO magnética do material.

Ao diminuir a intensidade de campo, a densidade de fluxo não volta da mesma maneira que cresceu, e sim permanece no material uma magnetização remanescente. Quando H cai a zero, B ainda mantém um certo valor +R, chamado RETENTIVIDADE, INDUÇÃO RESIDUAL, ou DENSIDADE RESIDUAL DE FLUXO.

Para que a densidade possa ser anulada, é necessário aplicar uma força magnetizante no sentido contrário, ou seja, inverter a corrente. O valor de intensidade de campo necessário para tornar B igual a zero é chamado COERCIVIDADE (C).

Continua-se aumentando H no sentido negativo até atingir a saturação, com valores máximos de B e H. Ao se reduzir H até zero, da mesma forma, permanecerá um magnetismo residual, o qual será eliminado com um incremento positivo de H.

Com o ciclo completo tem-se um *Laço de Histerese*. A HISTERESE, que quer dizer atraso, é o fenômeno associado à propriedade que todo material magnético tem de ser opor a variação de fluxo magnético que por ele circula. Podemos notar que nos ramos descendentes dos laços, o valor de B é sempre maior que nos ramos ascendentes e que o material tende a se opor a variações de fluxo, que é o que chamamos de histerese.



Estas curvas mudam muito de um tipo de material para o outro e para o mesmo material também, já que sofrem o efeito da temperatura.

A escolha da material está relacionada com a aplicação do mesmo, por exemplo:

- Material com grande Retentividade e Coercividade são usados em ímãs permanentes;
- Material com baixa Retentividade e Coercividade são usados em eletroímãs;
- Para construção de máquinas deve se ter materiais com elevado valor de intensidade de campo de saturação;
- Na magnetização alternada, a área do laço de histerese deve ser a menor possível, pois a perda de energia é proporcional a esta área.

1.4 - Perdas

São dois os tipos de perdas em núcleos magnéticos.

1.4.1 – Perdas Por Histerese

A histerese apresentada por um material magnético causa uma perda de energia, necessária para a orientação dos domínios magnéticos - são as *perdas por histerese*. Quanto maior a área abrangida pelo laço de histerese maior será a perda de energia durante um ciclo completo de histerese. Esta perda de energia se manifesta pela produção de calor no material. A área do laço de histerese depende do valor máximo de campo atingido e do tipo de material utilizado.

Quando a magnetização varia muitas vezes por segundo, como é o caso da magnetização por corrente alternada, ocorre um aquecimento do material, caracterizando as perdas por histerese magnética. Sendo assim, tal perda depende, além da área do laço de histerese, da freqüência da corrente de magnetização.

1.4.2 – Perdas Por Corrente Parasita

A circulação de corrente alternada em enrolamentos produz fluxo magnético variável no núcleo. Como já vimos, pela lei de Faraday, surgirão tensões induzidas no núcleo. Como os núcleos são de material metálico, existirão correntes circulantes na própria massa metálica, conseqüentes das tensões induzidas. Essas *correntes parasitas*, ou *correntes de Foucault* provocam perdas Joule - são as *perdas por correntes parasitas*.

A fim de reduzir estas perdas, ao invés de núcleos maciços se empregam núcleos laminados, a exemplo dos núcleos dos transformadores. As chapas laminadas são dispostas de modo a reduzir as forças eletromotrizes induzidas e as correntes, diminuindo assim as perdas.

Tais perdas dependem da espessura das chapas, da densidade de fluxo magnético, da freqüência da corrente magnetizante e da resistividade do material empregado como núcleo.

1.4.3 – Núcleos Magnéticos Laminados ou Compactados

As perdas nos materiais magnéticos dependem da metalurgia do material, particularmente da percentagem de silício, da freqüência, da espessura do material laminado, e da indução magnética máxima.

A idéia é construir o núcleo de transformadores e máquinas rotativas de um material magneticamente “macio”, ou seja, com laço de histerese estreito. As perdas por histerese são minimizadas através de tratamento térmico apropriado nas chapas de ferro-

silício, as quais são construídas de maneira a terem propriedades magnéticas melhores segundo uma direção preferida.

As correntes de Foucault por sua vez são minimizadas construindo os núcleos com chapas finas e isolando-as, aumentado a resistência no caminho das correntes e portanto, reduzindo sua magnitude e conseqüentemente as perdas. Se as lâminas não forem colocadas apropriadamente elas tenderão a vibrar, contribuindo também para os ruídos do transformador ou motor. A espessura das chapas deverá ser tanto menor quanto maior for a freqüência da variação do fluxo ou, o que é o mesmo, quanto maior for a freqüência da corrente criadora deste fluxo.

O isolamento entre as chapas pode ser feito com papel, verniz, ou por oxidação.

Em alguns casos, ao invés de serem montados com chapas, núcleos compactados são fabricados com pó metálico. Esses pós metálicos apresentam características de resistividade bastante elevada, o que reduz ao nível necessário as correntes parasitas. São, em outras palavras, praticamente isolantes elétricos com características ferromagnéticas.

Os núcleos compactados, também chamados de *ferrite*, não exigem a prévia laminação do ferro. Além disso, por possuírem um laço de histerese com pequena área, têm a capacidade de trabalhar em freqüência elevada sem apresentar elevadas perdas.

Entretanto, ainda hoje, existe uma limitação técnica de fabricação de tais núcleos, aliada a uma limitação econômica, devido ao processo de fabricação. A técnica de fabricação de núcleos de ferrite se aplica somente a peças de pequeno e médio volume. Não resta dúvida, porém, que é um processo em franco desenvolvimento, devendo substituir gradativamente o dos núcleos laminados, devido aos maiores recursos que oferece.

CAPITULO 2

Conceitos Básicos de Mecânica Aplicados em Máquinas

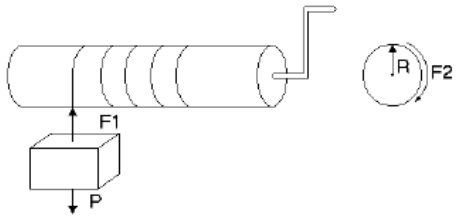
2.1. Conjugado:

O conjugado T, também chamado de torque ou momento é a medida do esforço necessário para se girar um eixo:

$$T = F.\ r \quad (N.m)$$

F = força em Newtons.
r = distância do braço de alavanca em metros.

Exemplo 1. Na figura, dado P = 20N e o diâmetro do tambor é de 20cm. Se o comprimento R2 da manivela for de 40cm, qual deve ser a força aplicada na manivela.



$$T = F_1.R_1 = F_2.R_2 \qquad F_1 = P = 20N$$

$$T = 20.0{,}1 = 2N.m$$

$$T = F_2.R_2 \ \rightarrow \ 2 = F_2.0{,}4 \ \therefore \ F_2 = 5N$$

$\therefore$ O comprimento da manivela multiplicou a força.

2.2. Energia, Trabalho realizado e Potência Mecânica.

O trabalho representa a energia transferida de um corpo para o outro ou a energia transformada de um tipo em outro. O Trabalho, dado em *Joules(J),* realizado por uma força *F* aplicada sobre um corpo durante o deslocamento *d* é dado por:

$$\tau = F \cdot d$$

A potência mecânica P exprime a rapidez com que a energia ou trabalho mecânico é realizado.

$$P = \frac{\tau}{t}$$

Onde: P é dado em J/s
t é o tempo gasto em s.

Definição de C.V.(cavalo-vapor)

$$1\ CV = 736W$$

1CV é a potência em "watts" necessária para se elevar uma massa de 75Kg a uma altura de 1 metro num tempo de 1 segundo.

Assim, para a definição de C.V., temos :

peso da massa de 75Kg $\Rightarrow P = m.g = 75.9{,}81 \cong 736N$ = Força = F

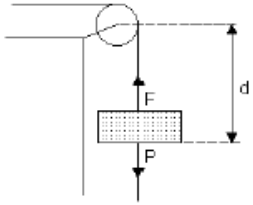
trabalho realizado $\Rightarrow \tau = F.d = 736.1 = 736Nm = 736J.$

$$\underline{\text{Potência}} \Rightarrow P = \frac{\tau}{t} = \frac{736J}{1s} = 736J/s = 736W.$$

Potências normalizadas em C.V.:

1/3 ; 1/2 ; 3/4 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7,5 ; 10 ; 12,5 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 40; 50 ; 60 ;75 ; 100 ; 125 ; 150 ; 175 ; 200 ; 250 .

Exemplo 2. Um peso de 600N deve ser elevado a uma altura de 2m por um motor. Se usarmos um motor que realize este trabalho em 12s e outro que realize em 2s, qual a potência de cada motor?



$$\tau = F.d$$

$$\tau = 1200Nm = 1200J$$

$$motor(1) \Rightarrow P_1 = \frac{\tau}{t_1} = \frac{1200J}{12s} = 100W = P_1$$

$$motor(2) \Rightarrow P_2 = \frac{1200J}{2s} = 600W = P_2$$

$$motor(1) \rightarrow P_1 = 100W \text{ ou } P_1 = 0{,}136CV$$

$$P_1 = 1/3\ CV \rightarrow \text{Potência Normalizada}$$

$$motor(2) \rightarrow P_2 = 600W \text{ ou } P_2 = 0{,}815CV$$

$$P_2 = 1CV \rightarrow \text{Potência normalizada.}$$

2.3. Relação entre conjugado e potência:

Na especificação e seleção de motores pode ser importante a avaliação da quantidade de torque disponível (numa polia ou eixo de motor) para se executar um determinado trabalho mecânico a uma certa velocidade.

A equação que relaciona a potência fornecida com o torque externo e a velocidade é dada por:

$$P_{MEC} = T \cdot \omega$$

Onde: T = torque (N.m)
ω = rotação (rad/s)
P_{MEC} = potência (W)

O quadro abaixo apresenta a relação anterior utilizando as grandezas com diferentes unidades.

$$P\,(cv) = \frac{C\,(kgfm) \times n\,(rpm)}{716} = \frac{C\,(Nm) \times n\,(rpm)}{7024}$$

$$P\,(kW) = \frac{C\,(kgfm) \times n\,(rpm)}{974} = \frac{C\,(Nm) \times n\,(rpm)}{9555}$$

INVERSAMENTE

$$C\,(kgfm) = \frac{716 \times P\,(cv)}{n\,(rpm)} = \frac{974 \times P\,(kW)}{n\,(rpm)}$$

$$C\,(Nm) = \frac{7024 \times P\,(cv)}{n\,(rpm)} = \frac{9555 \times P\,(kW)}{n\,(rpm)}$$

Exemplo 3. Qual o torque disponível no eixo do motor de 7,5 CV com o eixo girando a 1760 rpm?

velocidade do eixo ou velocidade do rotor - $n_r = 1760\text{rpm}$

$$\omega_r = \frac{n_r . 2\pi}{60}\,\text{rad/s} \quad \therefore \quad \omega_r = \frac{1760.2\pi}{60} = 184,3\text{rad/s}$$

$$T = \frac{P_{MEC}}{\omega} \Rightarrow T = \frac{7,5.736}{184,3} \cong 29,93\text{Nm}$$

CAPITULO 3. Motor de Passo

O motor de passo é um dispositivo eletromecânico que converte pulsos elétricos em movimentos mecânicos discretos.

A cada troca de sentido da corrente nos enrolamentos de um motor de passo corresponde um movimento angular discreto elementar chamado passo.

A cada passo executado o rotor se posiciona em uma nova posição estável, guardando entre um passo e outro a mesma precisão de posicionamento, sem erros cumulativos numa série de passos.

O princípio básico do motor de passo é muito antigo e ele está em uso a um longo tempo. Mas, esse tipo de motor, somente passou a apresentar maior significado comercial após o advento do controle eletrônico. As razões para este aumento de popularidade baseiam-se principalmente no alto grau de controle que é obtido. Sem o acionamento eletrônico o motor de passo perde muitas de suas vantagens. Provavelmente não existe motor mais diretamente associado com o controle eletrônico que o motor de passo.

Esses motores permitem controles de velocidade e posição precisos sem necessitar de realimentação, dispensando assim, transdutores de velocidade e posição, significando grande economia do sistema.

Adiciona-se a vantagem da ausência de realimentação, as características de robustez, vida longa, ausência de manutenção regular por não possuir escovas, e mais economia quando comparados aos servomotores de corrente contínua.

Estas características, aliadas à ampla faixa de velocidades, que podem ultrapassar a 20.000 passos/segundo em alguns modelos, tornam o motor de passo ideal para uma vasta gama de aplicações como solução simples e econômica.

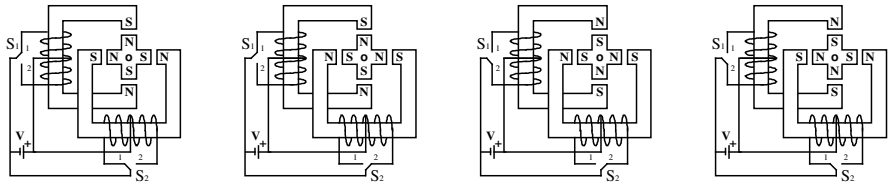
3.1 Funcionamento

Um motor de passo típico possui basicamente um rotor magnetizado permanentemente que apresenta em sua periferia um determinado número de pares de pólos que se alinham magneticamente com os pares de pólos gerados pelos enrolamentos nos dentes do estator.

Quando os enrolamentos do motor são alimentados com c.c., o rotor busca a posição de equilíbrio, ou de menor energia potencial, mais próxima e aí permanece até que haja inversão do sentido da corrente em uma das fases. Quando isto ocorre o rotor busca a nova posição de equilíbrio que, se for seguido o esquema de comutação do motor, estará imediatamente a direita ou a esquerda da posição anterior, de acordo com o sentido de comutação.

Para exemplificar, mostramos na figura a seguir o esquema simplificado de um motor de passo de duas fases com sua respectiva tabela de comutação.

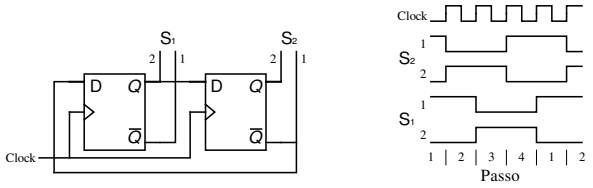
Para cada comutação das chaves S1 e S2, de acordo com a tabela, o rotor girará um passo no sentido horário ou anti-horário. A continuação da seqüência provocará no motor uma rotação contínua.



S_1	S_2	Passo
1	1	1
1	2	2
2	2	3
2	1	4

Anti-horário — Horário

Pela substituição das chaves por modernos circuitos digitais, microprocessadores e transistores, disponíveis atualmente no mercado, obtém-se controle integral de velocidade e posicionamento, juntamente com confiabilidade e vida longa.



3.2 Precisão

A precisão de passo dos motores está em torno de ± 5 % do passo. Isto significa que funcionando sem carga ou com carga constante, sempre na mesma direção, o rotor se posicionará com um erro máximo de ± 5 % do passo da posição desejada.

3.3 Conjugado

Há vários tipos de conjugado a serem considerados em um motor de passo:

Conjugado de Travamento

Quando o motor está parado e com a alimentação ligada (zero passos/segundo e corrente nominal), o conjugado necessário para deslocar o motor para uma nova posição de equilíbrio, vários passos adiante, é chamado de conjugado de travamento.

Normalmente, o conjugado de travamento está em torno de 110 a 115 % do conjugado nominal do motor. O conjugado de travamento atua como um poderoso freio, segurando a carga quando o motor está parado.

Conjugado Dinâmico

Podemos identificar dois tipos de conjugado dinâmico em um motor de passo, a saber:

- *Conjugado de Partida e Parada Sem Erro;*
- *Conjugado de Corrida.*

O Conjugado de Partida Sem Erro mostra com qual carga o motor consegue partir e parar sem erro (perda de passo) quando acionado com uma determinada freqüência fixa.

O Conjugado de Corrida é o conjugado disponível após o motor ter sido levemente acelerado.

Os conjugados, em médias e altas freqüências de passo, podem ser profundamente alterados pelo tipo de *driver* usado.

Conjugado Residual

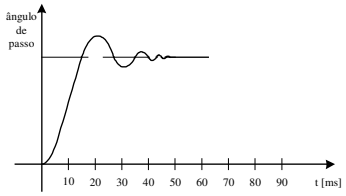
O conjugado resistente, em um motor de passo, quando não está energizado é chamado de Conjugado Residual.

É o resultado do fluxo magnético do ímã permanente do rotor. O seu valor é de aproximadamente 10 % do Torque de travamento.

Esta característica dos motores de passo de ímã permanente é aproveitada para segurar a carga (ou posição) mesmo quando o motor é desenergizado. A posição, entretanto, não terá a mesma precisão de quando o motor está energizado.

3.4 A Função Passo

Quando é dado um único passo em um motor de passo sem carga, a resposta típica é mostrada na figura abaixo.



Resposta Passo Único

Ou seja, quando é invertida uma das fases do motor, este parte para o passo seguinte, e oscila ligeiramente em torno da nova posição até parar definitivamente.

O tempo "t" que o motor leva para estabilizar é função do tipo de *driver* e da carga.

A ordem de grandeza desse tempo é de milisegundos, girando em torno de alguns para os motores menores até várias dezenas para os maiores.

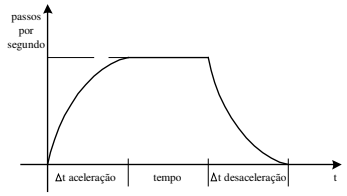
Para a grande maioria das aplicações este tempo de estabilização é irrelevante e pode ser perfeitamente desprezado.

3.5 Rampa de Aceleração

Em muitos casos, quando a carga inercial do sistema movido pelo motor de passo é pequena e/ou as rotações são baixas, podemos operar o motor diretamente por trem de pulsos de freqüência constante.

Ao contrário, se a carga inercial é grande e/ou se exige altas velocidades, torna-se necessário o uso de rampas de aceleração e desaceleração.

A Rampa de Aceleração consiste em se ir gradualmente aumentando a freqüência dos pulsos, e por conseqüência, a rotação do motor, até a velocidade final e fazer procedimento inverso até a parada do motor.



Rampa de aceleração e desaceleração

3.6 Aplicações

- mesas de coordenadas;
- retificas automáticas;
- bombas de deslocamento positivo;
- válvulas de comando remoto;
- manipuladores industriais (robôs);
- posicionadores de antenas;
- impressoras;
- *plotters*;
- disk *drivers*;

- máquinas de costura industrial;
- máquinas de bordar industrial;
- fac-símile;
- máquinas transfer.

3.7 Especificações Básicas

- Número de fases;
- Ângulo de passo [graus];
- Número de passos/rotação;
- Máximo Torque de partida [N.cm];
- Torque de travamento [N.cm];
- Torque Residual [N.cm];
- Inércia do motor [kg.cm^2];
- Precisão do ângulo de passo [%];
- Freqüência máxima de passo [kHz];
- Máxima freqüência [Hz ou passos/segundo];
- Corrente máxima por fase [A];
- Resistência por fase [Ω];
- Indutância por fase [m];
- Peso [kg];

Classe de isolação.

CAPITULO 4 - Motor de Corrente Contínua

4.1 – Introdução

Os motores de corrente contínuos, devidos suas características de acionamento e controle, foram usados extensivamente em acionamentos com velocidade variável até a alguns anos. Os motores CC podem proporcionar alto conjugado de partida, sendo também possível controlar sua velocidade sobre uma grande faixa. Os métodos de controle de velocidade são normalmente simples e mais baratos que aqueles para acionamentos em CA. Os motores série e os com excitação independente são normalmente usados em acionamentos de velocidade variável, sendo que os motores série são tradicionalmente utilizados em aplicações de tração.

Devido o sistema de comutação, os motores CC não são os mais adequados para aplicações em alta velocidade e requerem mais manutenção que um motor CA. Com o recente avanço na conversão de potência, técnicas de controle e microcomputadores, os acionamentos em CA estão se tornando mais competitivos que os com motores CC.

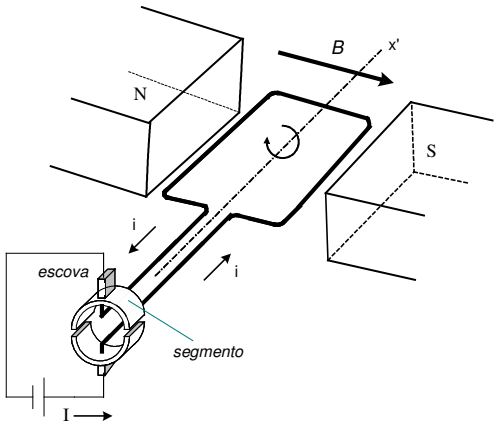
Apesar da crescente tendência da utilização de acionamentos CA, os acionamentos CC são normalmente utilizados em muitas indústrias e decorrerão ainda algumas décadas para que estes acionamentos sejam substituídos pelos de CA.

4.2 – Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do motor CC é o mesmo apresentado para o motor elementar discutido no Capítulo anterior – Eletromagnetismo. Baseia-se na produção de força em condutores percorridos por correntes elétricas quando imersos em um campo magnético.

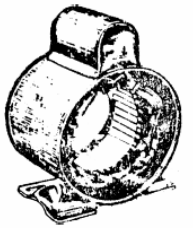
Na figura, a espira é imersa em um campo magnético. Quando uma corrente elétrica atravessa a espira, os condutores laterais da espira sofrem ação de forças, cujos sentidos podem ser determinados pela regra da mão direita. A ação destas forças forma um conjugado (Torque), girando a espira em torno do eixo xx'.

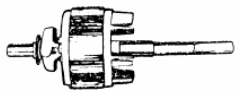
Para permitir o permanente movimento de rotação da espira, deve-se inverter o sentido da corrente na espira a cada meia volta. Para tal, utiliza-se o c*omutador.*



4.3 – Partes Construtivas

Num motor elétrico, distinguem-se essencialmente duas peças: o **estator**, conjunto de elementos fixados à carcaça da máquina, e o **rotor**, conjunto de elementos fixados em torno do eixo, internamente ao estator.


Estator ou Carcaça

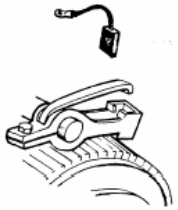

Rotor

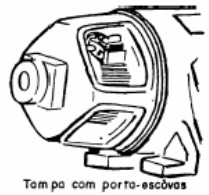
Na máquina CC o estator é formado por:

a) *Carcaça*: serve de suporte ao rotor, aos pólos e de fechamento de caminho magnético.

b) *Enrolamentos de campo:* têm a finalidade de gerar o fluxo magnético. São constituídos de condutores enrolados sobre núcleos de chapas de aço laminadas, cujas extremidades possuem um formato que se ajusta ao rotor e são chamadas de *pólos* ou *sapatas polares*.

c) *Conjunto porta-escovas e escova:* a porta-escovas permite alojar as escovas e está montada de tal modo que possa ser girada para ajustes. As escovas são compostas de material conduto (barras de carvão e grafite) e deslizam sobre as lâminas do comutador durante o movimento. São pressionadas por molas, proporcionando a ligação elétrica entre os condutores móveis e o exterior.



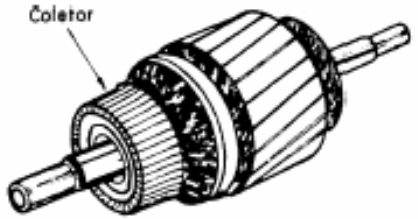

Tampa com porta-escovas

d) *Enrolamentos auxiliares:* são enrolamentos colocados em série com o circuito de armadura com a finalidade de compensar distorções no fluxo, provocadas pela circulação de corrente na armadura (reação de armadura). Isso evita, ou reduz, o aparecimento de faíscas na comutação. São dois enrolamentos utilizados: de interpólos e de compensação.

O **rotor** é composto de:

a) *Eixo da Armadura*: responsável pela transmissão de energia mecânica para fora do motor, pelo suporte dos elementos internos do rotor e pela fixação ao estator, por meio de rolamentos e mancais.

b) *Núcleo da Armadura*: composta de lâminas de Fe-Si, isoladas umas das outras, com ranhuras axiais na sua periferia para a colocação dos enrolamentos da armadura.



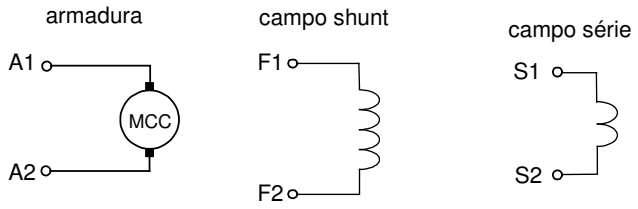
Rotor, também conhecido como induzido ou armadura

c) *Enrolamento da Armadura*: são bobinas isoladas entre si e eletricamente ligadas ao comutador.

d) *Comutador*: consiste de um anel com segmentos de cobre isolados entre si, e eletricamente conectados às bobinas do enrolamento da armadura.

4.4 – Enrolamentos, Terminais e Simbologia.

Em um motor CC existem três enrolamentos básicos: de armadura, de campo shunt e de campo série. Estes enrolamentos são acessíveis externamente através de terminais, possibilitando diferentes formas de ligação. Abaixo segue uma simbologia que pode ser utilizada.



O enrolamento de armadura (fixado ao rotor) é composto por bobinas conectadas ao comutador. Sua dimensão influencia diretamente na potência da máquina.

Os enrolamentos de campo shunt e série (fixados na carcaça) são responsáveis pela formação de fluxo magnético, apresentando características diferentes devido à forma com que são empregados.

O enrolamento de campo shunt possui muitas espiras de fio fino, apresentando resistência elétrica relativamente alta, sendo percorrido por baixas correntes.

O enrolamento de campo série é utilizado em série com o circuito de armadura, portanto, é percorrido por altas correntes. Sendo assim, é constituído por poucas espiras de fio grosso, apresentando baixa resistência elétrica.

4.5 – Equações Básicas e Modelo do Motor CC

A soma das forças que atuam sobre os condutores da armadura cria o conjugado eletromagnético, que depende da corrente de armadura, do fluxo magnético e de parâmetros construtivos da armadura. Assim, o torque (conjugado) é dado por:

$$T = k \cdot \phi \cdot I_A \qquad (1)$$

Onde:

ϕ: Fluxo magnético produzido pelo enrolamento de campo;
I_A: corrente que circula pela armadura;
k : constante construtiva do rotor das máquinas elétricas.

Sabemos que, quando um condutor está imerso num campo magnético, se deslocando com uma certa velocidade dentro deste campo, sobre ele é induzida uma

tensão elétrica. Essa força eletromotriz induzida é chamada de Força-contra-eletromotriz induzida f_{cem} - simbolizada por E_G.

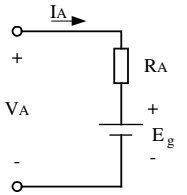
$$E_G = k \cdot \phi \cdot w \qquad (2)$$

Onde w é a velocidade angular do eixo.

O fluxo magnético ϕ produzido pelo enrolamento de campo depende, entre outros fatores, da corrente no enrolamento de campo I_F. Grosso modo, o fluxo ϕ pode ser considerado proporcional a corrente I_F, entretanto, deve ser lembrado que a relação existente é dada pela curva B x H do material magnético de compõe o núcleo da máquina.

O circuito da armadura pode modelado como mostra a figura abaixo. De onde se obtém a equação:

$$V_A = E_g + R_A \cdot I_A \qquad (3)$$



Onde:

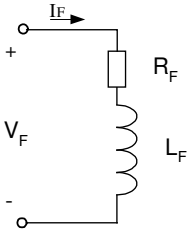
V_A: tensão entre os terminais da armadura;

R_A : resistência elétrica dos condutores da armadura;

E_G: tensão induzida na armadura;

I_A: corrente de armadura.

O circuito de campo shunt pode ser modelado por um circuito RL:



$$I_F = \frac{V_F}{R_F} \qquad (4)$$

Com as equações 2 e 3 anteriores se obtém uma equação dada por:

$$w = \frac{V_A - R_A \cdot I_A}{k \cdot \phi} \qquad (5)$$

Esta equação fundamental do motor CC proporciona análises importantes a respeito da variação de velocidade do motor CC. Note que:

- quanto maior a tensão aplicada na armadura, maior a velocidade.;
- quanto maior a corrente de armadura, menor a velocidade;
- quanto menor o fluxo magnético produzido pelo enrolamento de campo, maior a velocidade;
- nunca se deve alimentar a armadura sem alimentar o circuito de campo, pois isso faz com que o motor "dispare".

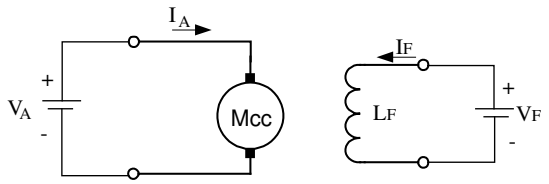
4.6 – Tipos de Excitação e Variação de Velocidade

Existem vários tipos de ligações que podem ser feitas no motor CC. Estas possibilidades se devem ao modo com que o enrolamento de campo e a armadura são conectados.

Cada tipo de excitação será apresentado a seguir.

a) Motor com Excitação Independente

Neste tipo de ligação, também chamado de excitação separada, o campo shunt e a armadura são alimentados por fontes independentes, proporcionando grande flexibilidade no controle de velocidade.



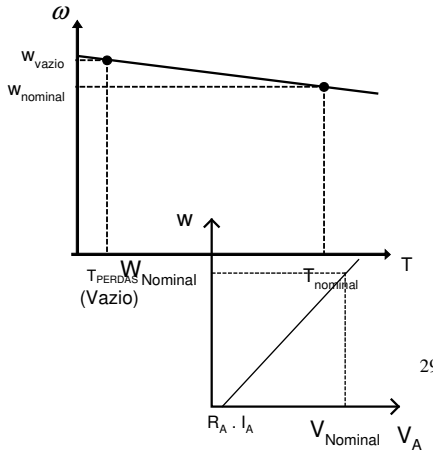
A variação de velocidade pode ser feita variando a tensão de armadura e/ou variando a tensão de campo.

Consideremos inicialmente que o fluxo magnético ϕ e a tensão de armadura V_A são constantes e com valor nominal. Assim, a partir das equações abaixo, podemos tirar conclusões importantes:

$$w = \frac{V_A - R_A \cdot I_A}{k \cdot \phi} \qquad T = k \cdot \phi \cdot I_A$$

1. a velocidade depende do valor da corrente de armadura, sendo que um aumento na corrente provoca uma redução na velocidade;
2. se a resistência de armadura fosse zero (condutor ideal), a velocidade seria constante, independente da corrente de armadura;
3. da equação de torque, nota-se que a corrente de armadura depende da carga mecânica acoplada ao eixo do motor. Quanto maior a carga, maior o torque necessário no eixo, logo, maior corrente será absorvida da fonte;
4. assim, conclui-se que a velocidade diminui quando a carga mecânica aumenta.

A curva ao lado representa o comportamento da velocidade em função do torque para excitação independente.



Um dos grandes requisitos em sistemas industriais é a possibilidade de

variação de velocidade.

Normalmente, a variação de velocidade é obtida através da variação da tensão de armadura mantendo o fluxo constante e nominal. A partir da equação (5) temos que a velocidade varia linearmente com a tensão de armadura como mostra a figura ao lado.

Com fluxo e corrente de armadura com valores nominais, obtém-se torque nominal desde velocidade zero até velocidade nominal.

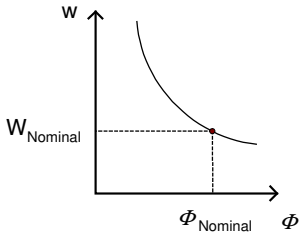
Sabendo que a potência é dada por $(P = w \cdot T)$, conclui-se a potência será proporcional a velocidade.

Muitas vezes é necessário elevar a velocidade acima do valor nominal, desde de que se respeite o valor máximo permitido para a máquina.

Neste caso, a tensão de armadura é mantida constante em seu valor nominal e a velocidade se eleva por meio do *enfraquecimento de campo*, que é feito através da redução de V_F e conseqüentemente a redução de I_F e ϕ para valores abaixo de seus valores nominais.

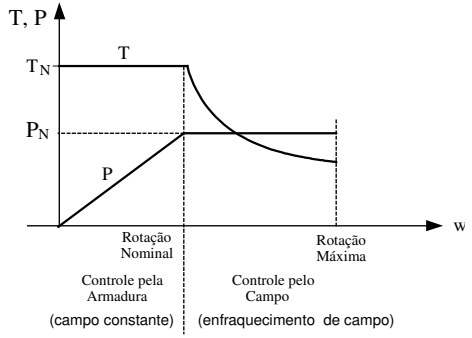
Da equação (5) nota-se que a velocidade é inversamente proporcional ao fluxo, como mostra a curva ao lado.

Se por um lado a redução de fluxo proporciona aumento da velocidade, por outro traz consigo a diminuição da capacidade de torque do motor, o que é verificado pela equação $T = k \cdot \phi \cdot I_A$.



A máxima velocidade obtida através do enfraquecimento de campo será limitada pelas características mecânicas do motor e a tendência do motor se tornar instável para operação com baixo fluxo.

As curvas abaixo representam o comportamento das grandezas torque(T), potência (P) e velocidade (w) para esta filosofia de controle apresentada.



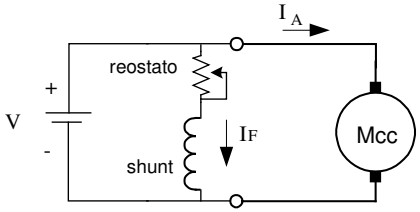
Os dois modos de controle apresentam características diferentes. O controle por armadura oferece rápida resposta, precisão e linearidade. Enquanto o controle por campo é lento devido à elevada constante de tempo do circuito (alta indutância).

Além disso, o controle de campo é isento de linearidade, fato comprovado pela curva *w* x ϕ já apresentada. Ainda se ressalta a relação não linear existente entre fluxo e

corrente de campo, devido à característica (curva B x H) do material magnético que compõe o núcleo.

b) Motor com Excitação Paralela (Shunt)

Neste tipo de ligação o campo shunt e a armadura são ligados em paralelo (derivação), a corrente da fonte bifurca-se passando parte pelo campo e o restante pela armadura. Esquematicamente o motor com excitação paralela é representado como se mostra abaixo:



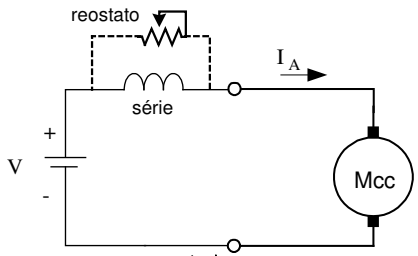
Este tipo se mostra como uma solução simples, já que necessita apenas de uma fonte. Entretanto dificulta o controle de velocidade em ampla faixa, pois não é possível reduzir a tensão de armadura sem reduzir junto o fluxo. Isso acontecendo, permite diminuição de velocidade mas reduz também a capacidade de torque da máquina. Assim sendo, os motores com excitação paralela são usados onde se requer pequeno torque de partida e uma velocidade praticamente constante, como nos ventiladores, bombas centrífugas, máquinas ferramentas, etc.

Quando for necessário variar a velocidade do motor derivação em pequena faixa, adiciona-se um reostato em série com o campo; manobrando-se o reostato consegue-se ajustar a corrente do campo que proporciona um fluxo adequado à velocidade desejada.

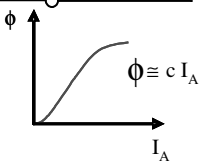
c) Motor Com Excitação Série

Neste tipo de excitação a armadura e o enrolamento de campo são ligados em série, portanto a corrente de armadura circula também pelo campo. Esquematicamente à máquina série é representada pela figura ao lado.

O enrolamento de campo utilizado é o enrolamento série, diferente dos casos anteriores onde o enrolamento shunt é usado. O enrolamento série apresenta menos espiras, porém de maior capacidade de corrente.



Neste tipo de motor o fluxo depende diretamente da corrente da armadura. Se considerarmos a relação entre fluxo e corrente linear, pode-se afirmar que, enquanto o núcleo magnético não estiver saturado, o conjugado varia diretamente com o quadrado da corrente, ou seja $T = k \cdot I_A^2$.



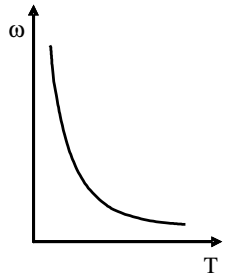
Sendo assim, o motor série possui um grande conjugado de partida, além de poder trabalhar em regime de sobrecargas, sendo o aumento do consumo de corrente relativamente moderado. Estas propriedades são essencialmente importantes para tração elétrica (trens, metrôs), acionamento de guindastes, pontes rolantes, etc, o que evidencia a aplicação dos motores com excitação série nestes fins.

Pelas relações básicas do motor CC, sabe-se que a velocidade varia inversamente com fluxo. E como no motor série o fluxo depende diretamente da corrente de armadura, logo a velocidade é quase inversamente proporcional a corrente de armadura.

Sendo assim, se a carga no eixo do motor aumenta, maior será o torque requerido e conseqüentemente, maior será a corrente de armadura, o que leva a um aumento de fluxo e portanto, diminuição da velocidade. Por outro lado se a carga diminui, a corrente e o fluxo diminuem, provocando aumento na velocidade.

O comportamento da velocidade com a carga (torque) é apresentado na figura ao lado.

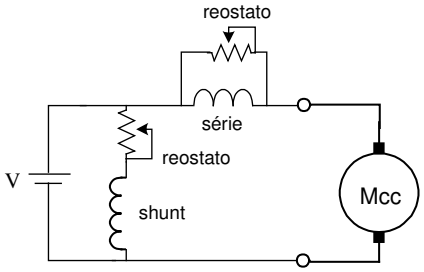
Para este tipo de excitação deve-se ter o cuidado de não deixar a carga diminuir demasiadamente, principalmente com tensão nominal, pois sendo o fluxo muito pequeno, há o perigo da máquina disparar com desastrosas conseqüências para os mancais e a armadura.



Quando a carga for constante e se necessita regular a velocidade, pode ser utilizado um reostato em paralelo com o enrolamento série variando assim o fluxo; ou se o campo série apresentar derivações pode-se variar o número de espiras. Há ainda outros processos para controlar a velocidade de um motor série.

Os motores série de pequena potência que possuem o campo laminado servem para funcionar com C.A. e são chamados de *motores universais*.

d) Motor Composto



4.7 – Inversão de Rotação

Os motores podem funcionar em ambos os sentidos de rotação, horário e anti-horário, sem prejuízo da ventilação, conjugado ou potência.

Para inverter o sentido de rotação do motor, deve-se inverter a polaridade da ligação da armadura ou do campo. A inversão de ambos ao mesmo tempo não trará resultados.

4.8 – Partida de Motores CC

O fator limitante da corrente de armadura na partida é a resistência de armadura, porque naquele instante a força contra-eletromotriz é nula. Como a resistência de armadura apresenta baixo valor, a corrente de partida é muito superior à corrente nominal.

$$I_{\substack{A \\ PARTIDA}} = \frac{V_A}{R_A}$$

Motores pequenos, de até 1 kW, poderão partir com tensão plena, e acima desse valor deverão possuir algum sistema de limitação da corrente, pois esta pode danificar o comutador.

Para reduzir a corrente na partida, podem ser utilizados resistores de partida em série com a armadura. Uma outra opção é elevar a tensão de armadura gradativamente à medida que a máquina acelera, isso é possível com o uso de *retificadores controlados* ou *Choppers*.

4.9 – Frenagem de Motores CC

A frenagem de um motor CC é caracterizada pela inversão do sentido da corrente de armadura, o que provoca um conjugado negativo, ou seja, as forças nos condutores da armadura invertem o sentido, provocando a desaceleração.

a) **Frenagem por Contra Corrente**

Este tipo de frenagem realiza-se invertendo o sentido de rotação do motor por inversão do sentido da corrente na armadura. Isso é obtido invertendo a polaridade da fonte que alimenta a armadura.

b) **Frenagem Reostática**

Durante a frenagem reostática, a armadura é desligada da rede e conectada a uma resistência de carga. Nesta situação a máquina funciona como gerador, dissipando a energia cinética armazenada em seu eixo.

c) **Frenagem Regenerativa ou com Recuperação de Energia**

Quando a máquina está inicialmente funcionando como motor e passa a ser acionada pela carga a uma velocidade superior à do funcionamento em vazio. Neste caso a força contra-eletromotriz torna-se maior que a tensão da fonte e, por isso, a corrente de armadura muda de sentido; em conseqüência, muda de sentido o conjugado desenvolvido pela máquina, isto é, a máquina funciona como gerador, transferindo energia do eixo para a fonte.

4.10 – Fontes de Alimentação de Motores CC

Para se obter uma tensão de corrente contínua de nível variável pode-se utilizar um dos seguintes métodos:

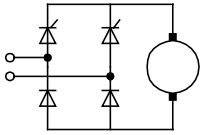
a) A corrente de armadura e do campo pode ser ajustada através de resistências variáveis em escalas. A desvantagem é o baixo rendimento devido às perdas geradas.

b) Conversores Estáticos

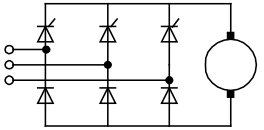
O anseio da indústria fabricante de máquinas por acionamentos que ocupem pouco espaço físico, mas que fossem altamente dinâmicos, isto é, com rápida variação de corrente a alta repetibilidade, levou ao desenvolvimento dos conversores estáticos a semicondutor.

Estes conversores aplicados a acionamentos de motores CC podem ser: uma ponte retificadora tiristorizada que fornece corrente contínua com tensão variável a partir de uma tensão alternada fixa em amplitude e freqüência; ou um circuito *Chopper,* que fornece tensão contínua variável a partir de uma tensão contínua de valor constante.

a) ponte retificadora monofásica com tiristores:

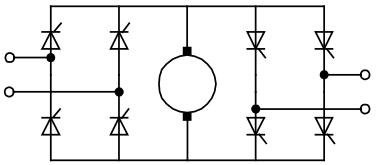


b) ponte retificadora trifásica com tiristores:

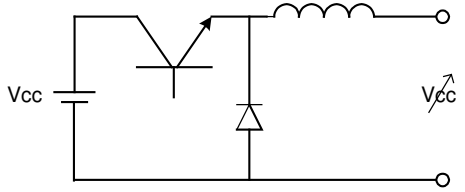


c) Conversores Duais:

Para aplicações onde se faz necessário o acionamento e frenagem em ambos os sentidos de rotação, deve-se utilizar conversores que permitam uma operação em 4 quadrantes. Para possibilitar essa operação, ligam-se duas pontes tiristorizadas em anti-paralelo. Essa ligação recebe a denominação de Conversor Dual.



d) Chopper: Através do chaveamento em alta freqüência da chave controlada (transistor) mostrada na figura abaixo pode-se controlar a tensão de saída a partir de uma fonte de alimentação com tensão constante. A utilização de chaveamento em alta freqüência visa minimizar as perdas e melhorar a eficiência da fonte. Por outro lado este conversor é mais caro e complexo que os anteriores.

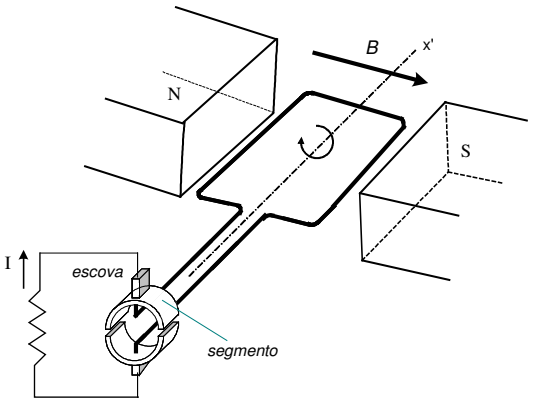


CAPITULO 5. Gerador de Corrente Contínua

5.1 – Introdução

A corrente contínua encontra aplicação em vários setores industriais, como, por exemplo: Instalações de eletroquímica, carga de baterias de acumuladores, tração elétrica, eletroímãs de aplicações industriais, solda elétrica a arco voltaico, etc. Nas instalações de eletroquímica a corrente contínua é obtida por meio da retificação da corrente alternada por meio de retificadores, porém em muitas instalações deste gênero a corrente contínua é obtida por *dínamos*, isto é, por máquinas que fornecem energia elétrica em corrente contínua utilizando energia mecânica produzida por motores de combustão ou por motores CA.

5.2 – Princípio de Funcionamento

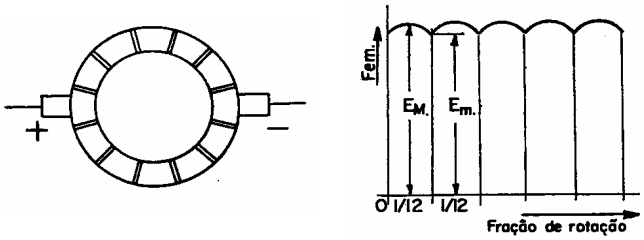


O princípio de funcionamento do gerador CC é o mesmo apresentado para o gerador elementar discutido no Capítulo anterior – Eletromagnetismo. Baseia-se na indução de tensão elétrica em condutores quando estes 'cortam' linhas de campo magnético.

Na figura, a espira é imersa em um campo magnético. Quando a espira é colocada em movimento de rotação, seus condutores laterais cortam as linhas de campo, o que leva ao surgimento de uma tensão induzida.

Originalmente a tensão induzida é alternada, porém, com o uso do comutador pode-se obter tensão contínua.

A corrente unidirecional pulsante, que tem um valor nulo duas vezes por ciclo, é dificilmente utilizável como alimentação CC comercial. A tensão de saída pode ser tornada menos pulsativa pelo uso de um grande número de bobinas os segmentos do comutador. O efeito de se aumentar o número de bobinas e segmentos é mostrado na figura abaixo. Para exemplificar, empregando 6 espiras, teremos 12 segmentos. Cada segmento estará em contato com a escova por 1/12 de rotação.



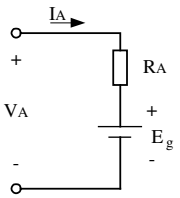
5.3 – Comparação: Ação Motora e Ação Geradora

Em termos construtivos o gerador CC e o motor CC são idênticos, ou em outras palavras, são a mesma máquina. Portanto a máquina CC pode ser operada como motor ou gerador.

Ressalta-se um fato ainda mais relevante: seja quando opera como motor ou gerador, sempre se desenvolve simultaneamente a ação motora e a ação geradora.

Quando a máquina funciona como motor, uma tensão induzida surge na armadura com sentido tal que se opõe a circulação de corrente na mesma. O circuito de armadura é representado abaixo.

$$V_A = E_g + R_A \cdot I_A \qquad \text{(motor)}$$

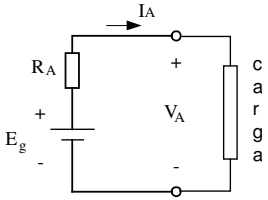


Note que para a corrente circular no sentido indicado, a tensão induzida (Eg) deve ser menor que a tensão nos terminais da armadura (Va). Assim, quando a máquina funciona como motor, a tensão induzida é sempre menor que a tensão nos terminais.

Quando a máquina opera como gerador, o movimento de rotação deve ser provocado por uma força externa. Com o movimento, uma tensão é induzida nos terminais da armadura. Quando ligada a uma carga, a circulação de corrente de armadura produzirá um *torque resistente,* que se opõe ao movimento, ou seja com sentido contrário ao torque externo.

No caso de um gerador o circuito de armadura é representado abaixo.

$$V_A = E_g - R_A \cdot I_A \qquad \text{(gerador)}$$



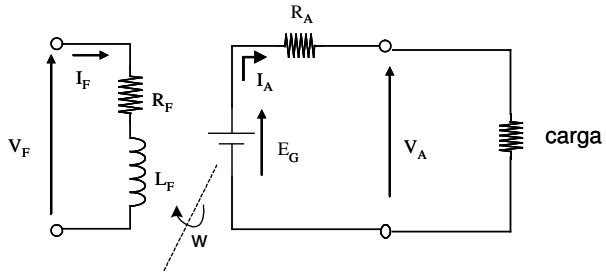
Note que no caso gerador a corrente de armadura tem o mesmo sentido que a tensão induzida. Além disso, observa-se que a tensão induzida Eg é sempre maior que a tensão nos terminais da armadura (Va).

5.4 – Tipos de Excitação

Existem vários tipos de ligações que podem ser feitas no gerador CC. O método de classificação dos geradores CC está baseado no modo de excitar o enrolamento de campo para produzir a fluxo magnético necessário para gerar a tensão.

e) Gerador com Excitação Independente

Neste tipo de ligação, também chamada de excitação separada, o campo shunt é ligado a uma fonte CC, que é independente da tensão de armadura Va.



Como já tratamos, a tensão induzida é dada por:

$$E_G = k \cdot \phi \cdot w$$

Assim, a tensão induzida depende do fluxo magnético ϕ, produzido pelo enrolamento de campo; e da velocidade *w* com que a armadura é movimentada pela *máquina primária*.

A tensão nos terminais da armadura Va é dada por:

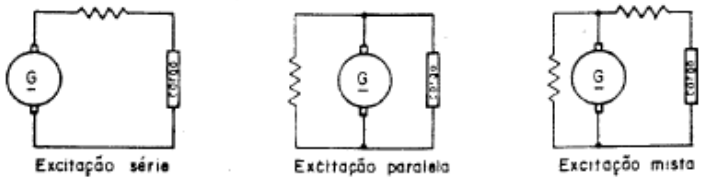
$$V_A = E_g - R_A \cdot I_A$$

Note que a tensão nos terminais da armadura (Va) depende da carga. Com o aumento da corrente de armadura, ocorre um decréscimo da tensão Va, provocado pela queda de tensão existente nos enrolamentos da armadura ($R_A \cdot I_A$).

f) Geradores Auto-Excitados

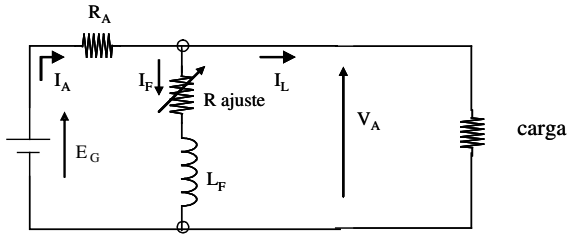
É possível que um gerador CC produza uma tensão com suficiente magnitude para excitar seu próprio campo, tal excitação é denominada de *auto-excitação*.

Os geradores auto-excitados podem ser *shunt (paralelo)*, *série* ou *compostos*.



Gerador shunt auto-excitado

Neste caso o enrolamento de campo shunt é ligado na armadura, como mostra o esquema abaixo. Pode-se utilizar um reostato para ajuste de corrente de campo.



A auto-excitação é possível tendo em vista a presença do magnetismo remanescente (*magnetismo residual)* que permaneceu no núcleo da máquina na última vez em que foi a mesma foi desligada.

Assim, quando a armadura é colocada em movimento por ação da máquina primária, existirá uma pequena tensão induzida nos terminais da armadura. Como esta tensão está aplicada ao circuito de campo, começa circular uma pequena corrente de campo I_F. Com esta corrente, ocorre um crescimento do fluxo magnético levando a um aumento da tensão gerada. Isso faz a corrente de campo aumenta ainda mais e assim por diante. Este processo continuará até que em alguns segundos a máquina fornece a tensão nominal.

A Figura abaixo mostra este processo. A curva representa o comportamento da tensão gerada versus corrente de campo em um gerador (curva de magnetização). Representam-se graficamente também uma família de retas representando diferentes resistências do circuito de campo.

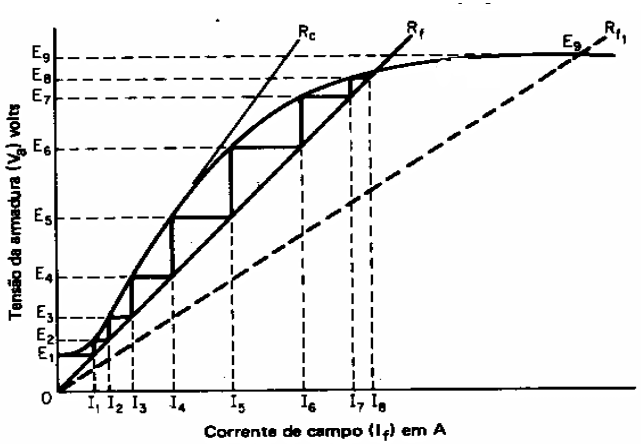


Fig. 3-8 — Escorvamento de um gerador-shunt auto-excitado.

O ponto de interseção entre a curva de magnetização e a reta da resistência de campo define o ponto em que o processo pára. A tensão induzida produzida, quando aplicada ao

circuito de campo, produz uma corrente que, por sua vez, produz um fluxo magnético suficiente para induzir uma tensão de mesma magnitude.

Por exemplo, para resistência do circuito de campo igual à R_f, a tensão final é dada por E_8.

Se a resistência do circuito de campo for diminuída para R_{f1}, por meio de reostato de campo, a tensão gerada atinge um valor maior, dado por E_9.

De outro modo, se a resistência do circuito de campo for aumentada a tensão induzida atingirá um valor mais baixo. A resistência do reostato pode ser aumentada até que o circuito de campo alcance a *resistência crítica de campo,* Rc. Resistências superiores ao valor crítico não permitirão a auto-excitação, produzindo uma tensão na armadura aproximadamente igual a E_1.

Razões que impedem a auto-excitação:

- Falta de (ou baixo) magnetismo residual – provocado por vibração excessiva, calor extremo, choques mecânicos, longo tempo desenergizado.
- Conexão do circuito de campo invertida em relação ao circuito de armadura;
- Resistência do circuito de campo maior do que a resistência critica;
- Conexão aberta ou alta impedância no circuito de armadura – comutador sujo, escova frouxa.
- Baixa resistência de carga.

CAPITULO 6 - Circuitos em Corrente Alternada

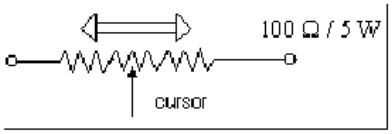
6.1 – Elementos de Circuitos

a) Resistores: são elementos nos quais é válida a Lei de Ohm.

Normalmente os resistores são especificados em função da sua resistência (Ω) que significa o grau de oposição à circulação de corrente que o mesmo apresenta, e da potência (W), que significa a máxima dissipação de calor (por efeito Joule), que o mesmo pode suportar.

Podem ser construídos basicamente de carvão e fio.

Outra categoria de resistores são os potenciômetros que permitem a variação da resistência através de um cursor.



O potenciômetro pode possuir variação logarítmica ou linear.

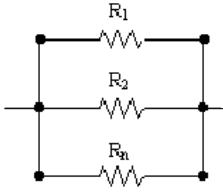
Os chamados reostatos são potenciômetros para aplicação em potências elevadas.

a-1) Associação de Resistores:

- SÉRIE:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \quad (\Omega)$$

- PARALELO:



$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (\Omega)$$

b) Capacitores:

b-1) Introdução: são elementos que armazenam energia na forma de um campo elétrico.

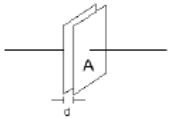
Capacitância: É a capacidade de um capacitor em armazenar energia na forma de cargas elétricas.

18

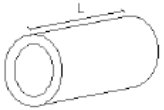
capacitância: $C = \frac{Q}{V}$ (F)

ou: $C = \frac{\phi_{elétrico}}{\text{Tensão}}$ (F)

$C = \frac{\varepsilon_o A}{d}$



$C = \frac{2\pi\varepsilon L}{\ln(b/a)}$



onde:

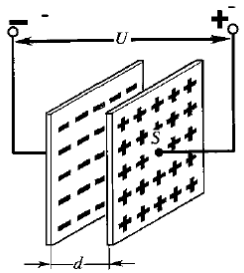
Q = carga armazenada em uma de suas placas (C)

V = tensão ou ddp entre as placas (V)

Como 1F é uma quantidade muito grande, usa-se submúltiplos do Faraday :

$$1\mu F = 10^{-6} F$$
$$1nF = 10^{-9} F$$
$$1pF = 10^{-12} F$$

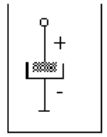
A maioria das aplicações utiliza capacitores de valores fixos mas, também existem capacitores variáveis.



Os capacitores são especificados pela capacitância (F) e pela tensão (V).

Os capacitores ainda podem ser :

- polarizados : usados somente em tensão contínua.



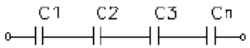
- despolarizados : usados em tensão alternada.

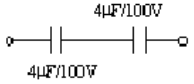
São aqueles usados em motores monofásicos e na correção do F.P. (fator de potência).

b-2) Associação de Capacitores

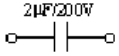
- Série :

Este tipo de associação é empregado quando desejamos aumentar a tensão da associação, ou proceder a despolarização de dois capacitores polarizados.



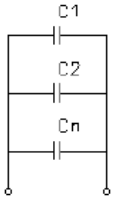


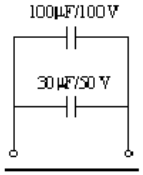
$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n}$$



Este tipo de associação é empregado quando desejamos aumentar a tensão da associação, ou proceder a despolarização de dois capacitores polarizados.

- Paralelo :





$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \ldots + C_n (F)$$

Esta associação é empregada quando desejamos aumentar a capacitância equivalente. O nível de tensão será igual àquele de menor valor.

* Reatância Capacitiva :

O capacitor apresenta, quando conectado em sinais alternados, uma "resistência" que aumenta quanto menor a frequência, que é chamada de REATÂNCIA CAPACITIVA, calculada por :

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \qquad (\Omega)$$

onde : f = frequência do sinal alternado em Hz

C = capacitância do capacitor em F.

O capacitor é um curto-circuito para frequências altas.

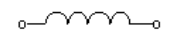
c) Indutores : são elementos que armazenam energia na forma de um magnético. Indutância é a capacidade de armazenar energia na forma de magnético.

$$L = \frac{\phi_{magnético}}{I} \qquad (H)$$

L - indutância

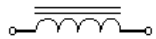
ϕ - fluxo magnético

I - corrente



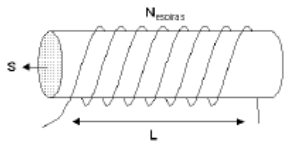
Indutor com núcleo de ar

ou



Indutor com núcleo de material ferromagnético

Indutor de Geometria Simples

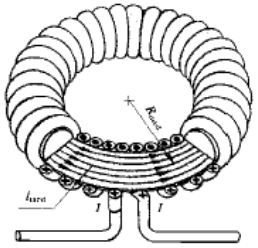


$$L = \frac{\mu N^2 S}{l} \text{ (H)}$$

$\mu = \mu_r \mu_o$

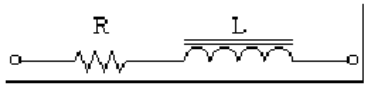
$\mu_r = meio - ferro, aço$

$\mu_o = vacuo$ ou ar



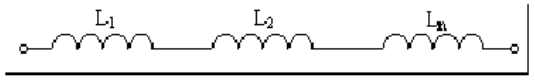
$$L = \frac{\mu N^2 S}{2\pi l}$$

Os motores, transformadores, podem ser representados de uma maneira simples, como indutores :



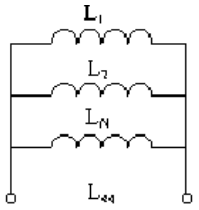
Ø-1) Associação de Indutores :

* Série :



$$L_{eq} = L_1 + L_2 + ... + L_n$$

* Paralelo :



$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + ... + \frac{1}{L_n}$$

Normalmente um indutor é especificado para um nível de corrente e uma indutância. Ex: 100mH / 2A.

Reatância Indutiva

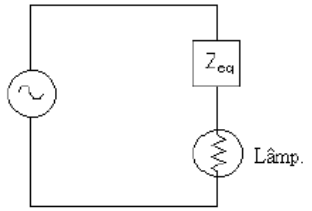
O indutor apresenta uma "resistência" que aumenta com a frequência, chamada de reatância indutiva X_L.

$$X_L = 2\pi f L(\Omega)$$

onde L é a indutância do indutor.

O indutor é um curto-circuito para frequências baixas.

Z(Ω) Impedância , que é uma "resistência" equivalente de um dispositivo que contenha, resistência - indutância, resistência - capacitância, indutância - capacitância, ou resistência - capacitância - indutância.



Circuito resistivo - indutivo - capacitivo → série

$$Z_{eq} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad \Omega$$

No exemplo $X_L = X_C$, isto é chamado de RESSONÂNCIA ELÉTRICA.

A ressonância ocorre em uma determinada frequência

$$X_L = X_C$$

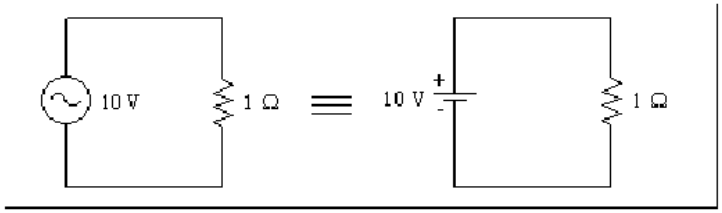
$$2\pi . f . L = \frac{1}{2\pi . f . C}$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L.C}} \qquad (Hz)$$

6.2 – Definições gerais

O valor eficaz de uma tensão alternada é aquele que produzirá um calor no resistor equivalente ao calor produzido por uma tensão contínua de mesmo valor.

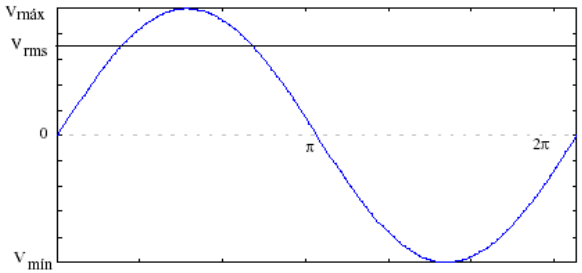
Por exemplo:



Nos dois casos :

$$P = \frac{V^2}{R} = 100 \text{ W}$$

O valor eficaz também pode ser chamado de valor rms ("root means square")=(valor médio quadrático).



$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V_{max}.\text{sen}^2\,\omega t} \quad \text{(V)}$$

O valor médio da tensão alternada é nulo (semi-ciclo positivo somado ao semi-ciclo negativo, resulta zero).

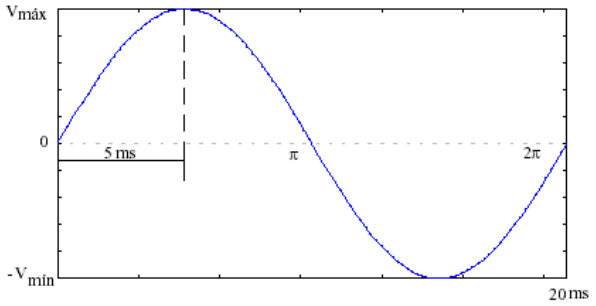
Valor instantâneo: valor em cada instante do tempo.

No nosso exemplo o "v" instantâneo, $v(t) = V_{max}.\text{sen}\,\omega t$ (V)

onde: ω = frequência angular (rad/s)

ω = 2πf (rad/s)

t = tempo em segundos.



$$V_{eficaz} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}707 V_{max} \text{ (V)}$$

No nosso exemplo: $V_{AB}{}_{RMS} = 120V \Rightarrow V_{max} \cong 169{,}73V$

O valor máximo é o maior valor instantâneo da tensão: (positivo ou negativo)

$V_{AB}(t) = 170\,\text{sen}\,\omega t$

↓

Vab(instantâneo)

por exemplo, para t = 5 ms, Vab inst.?

$$\omega = 2\pi f \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{20.10^{-3}} = 314 \text{ rad/s}$$

$$V_{AB} = 170\,\text{sen}(314.5.10^{-3}) \Rightarrow V_{AB} = 170.\text{sen}\,\frac{\pi}{2}$$

$$V_{AB} = 170 \text{ V}$$

Portanto:

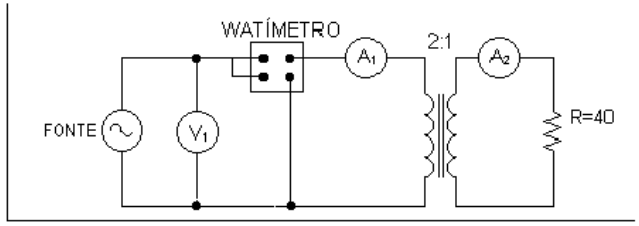
$V_{AB}(t) = V_{MAX}\,\text{sen}\,\omega t$ (V) é a equação da forma de onda de Vab.

6.3 – Potência em Corrente Alternada

As potências envolvidas em c.a. são três:

- Potência Ativa, dada em watts, W;
- Potência Aparente, dada em volt x ampère, VA;
- Potência Reativa, dada em volt x ampère reativo.

Exemplo 1 Consideremos o seguinte circuito abaixo:



onde foram lidos os seguintes valores nos instrumentos:

V_1 = voltímetro de ferro móvel $\Rightarrow$ 120V eficazes
A_1 = amperímetro de ferro móvel $\Rightarrow$ 1A eficaz
A_2 = amperímetro de ferro móvel $\Rightarrow$ 1,5A eficaz
W_1 = watímetro dinamométrico $\Rightarrow$ 100W

a) Qual a potência elétrica consumida da fonte em W?

Potência Ativa, P(W), representa a potência que foi transformada em trabalho (por exemplo, aquecimento).

$$P_R = R\,I^2\,(W) \Rightarrow P_R = 40 \cdot (1,5)^2 = 90W$$

A potência ativa total, consumida da fonte, é aquela lida no $W_1 = 100W$.

P = 100W, porém a potência transformada em trabalho (aquecimento) $P_R = 90W$.

$P - P_R = 10W$ $\rightarrow$ Perdas no transformador, que também representam consumo em watts.

b) Qual a potência elétrica que a fonte de tensão alternada deve fornecer em volt x ampère?

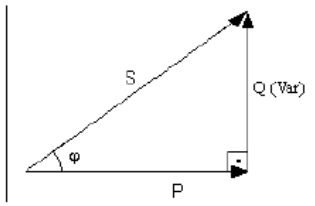
Potência Aparente S(V.A) é o produto da tensão total pela corrente total.

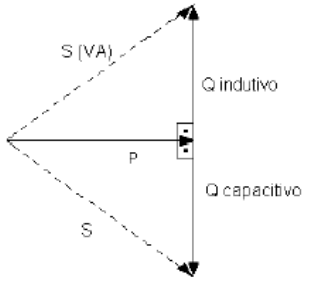
No nosso caso, $S = V_1.I_1$ (V.A) $\rightarrow$ **S = 120 VA**

c) Por que $S \geq P$?

Potência Reativa Q (V.Ar) = é aquela parcela da potência aparente necessária para a criação do campo magnético magnético (potência reativa indutiva consumida por transformadores e motores, por exemplo) ou gerada por capacitores (potência reativa capacitiva, gerada por capacitores).

Triângulo de Potências: É a composição S, P e Q.





Fator de Potência: é o cosseno do ângulo φ:

$$F.P. = \cos\varphi = \frac{P}{S}$$

Num sistema ideal $\rightarrow S = P$

S é sempre maior ou igual a P, porque a maioria dos sistemas possui a necessidade de consumir potência reativa Q (normalmente reativa - Indutiva).

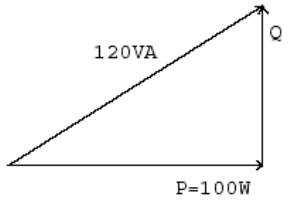
d) Qual o F.P. do nosso exemplo?

$$S = 120\ VA;\ P = 100\ W\ \therefore\ F.P. = \cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{100}{120} = 0{,}83$$

e) Esta instalação estaria dentro da Norma com relação ao F.P.?

Norma atual pede $\cos\varphi$ = F.P. $\geq 0{,}92$.

No nosso exemplo:

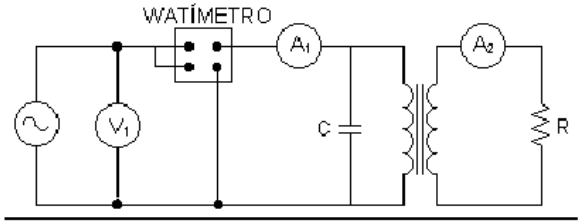


$$S^2 = P^2 + Q^2 \Rightarrow Q = \sqrt{14400 - 10000}$$
$$Q = 66{,}33\ VAr$$
$$\cos\varphi = 0{,}83 \quad \therefore \varphi_1 = 33{,}9°$$

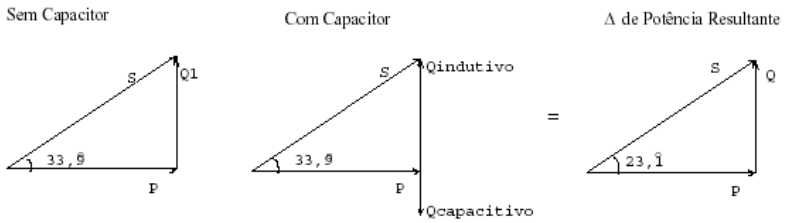
f) O que será necessário se realizar para que F.P. $\geq 0{,}92$.

Para elevarmos o F.P. de 0,83 para 0,92 é necessário a instalação de capacitores para correção do F.P.

No nosso exemplo o circuito ficaria assim:



- capacitor é utilizado para compensar potência reativa indutiva.



F.P. = $\cos\varphi_2 = 0{,}92 \rightarrow \varphi_2 \cong 23{,}1°$.

- Vantagem = diminuição da corrente no sistema pois o vetor S diminui com o uso do capacitor, pois diminui Q_2, diminui S.

Cálculo do capacitor para correção de F.P.: $P_{antes} = P_{depois}$

$$\varphi_2 = 23{,}1 \therefore \cos\varphi_2 = 0{,}92$$
$$\cos\varphi_2 = \frac{P}{S_2} \therefore S_2 = \frac{P}{\cos\varphi_2} = \frac{100}{0{,}92} \Rightarrow S_2 = 108{,}7\ VA$$
$$S^2 = P^2 + Q^2$$
$$\therefore Q_2 = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(108{,}7)^2 - (100)^2}$$
$$\underset{com\ capacitor}{\therefore} \quad Q_2 \cong 42{,}6\ VAr_{(INDUTIVO)}$$
$$\therefore Q_2 = Q_1 - Q_C \ \therefore Q_C = Q_1 - Q_2 \quad \therefore Q_C \cong 23{,}7\ VAr$$

↓ potencia gerada pelo capacitor.

A potência reativa capacitiva Qc gerada pelo capacitor será calculada por:

$$Q_C = \frac{V^2}{X_C} \quad (VAr)$$

onde $X_C = \frac{1}{2\pi.f.C}$

$$Q_C = \frac{V^2}{\frac{1}{2\pi.f.C}} \quad \Rightarrow \quad C = \frac{Q_C}{2\pi.f.V^2}$$

onde: V = tensão eficaz da fonte

f = frequência da fonte (Hz)

No nosso exemplo:

$$C = \frac{23,7}{2\pi.60.(120)^2} \Rightarrow C \cong 4,35\ \mu F$$

e

$V \geq V_{MÁX}$

$V \geq \sqrt{2}.120V \qquad \mathbf{V \geq 169,7V}$

g) Quais as vantagens da correção do fator de potência:

1) Atender à Norma . Instalações atuais com FP<0,92 , ficam sujeitas à multa.

2) Redução da potência aparente S da instalação e conseqüentemente redução na corrente total.

Após a instalação do capacitor teríamos as seguintes leituras nos instrumentos:

$V_1 = 120V$ eficazes
$W_1 = 100W$
$A_2 = 1,5A$
$A_1 = ?$

Se a potência S diminui, a corrente total lida em A_1, também irá diminuir.

$S_2 = V.I_{TOTAL}$

$$I_{TOTAL} = \frac{S_2}{V} = \frac{108,7}{120} \Rightarrow I_{TOTAL} \cong 0,90A$$

$A_1 = 0,90A$

h) Qual é a tensão no secundário do transformador ? (tensão sobre o resistor R=40Ω)

$V_R = R.I \qquad V_R = (40).(1,5) = 60V$

Se não conhecêssemos a corrente?

Pela relação de transformação:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad \Rightarrow \qquad \frac{120}{V_2} = \frac{2}{1} \qquad \therefore \mathbf{V_2 = 60\ V}$$

i) Desenhe as formas de onda da tensão da fonte e da corrente total para o circuito sem o capacitor. Escreva também as equações correspondentes:

(tensão instantânea da fonte e corrente instantânea total).

TENSÃO DA FONTE :

* Equação da tensão instantânea

f = 60 Hz

V = 120 V eficazes

$v(t) = V_{MÁX.} \operatorname{sen} \omega t \ \ (V)$

$\omega = 2\pi.f \ \ (rad/s)$

$V_{MÁX} = \sqrt{2}.V_{eficaz}$

$\omega \cong 377\ rad/s$

$V_{MÁX} = 169,7V \ \ \therefore \ 169,7.\operatorname{sen}(377t) \quad [V]$

CORRENTE TOTAL:

* Equação da corrente instantânea total:

"O circuito é do tipo resistivo-indutivo (tem o resistor e o transformador que possui indutância), portanto a corrente está atrasada em relação à tensão".

$i(t) = I_{MÁX}.\operatorname{sen}(\omega t - \varphi)$

onde: cosφ = F.P. → corrente atrasada

$I_{TOTA} = 1,0$ A eficaz

$I_{TOTAL} = \sqrt{2}.I_{eficaz}$

$I_{MÁX} = 1,41$ A

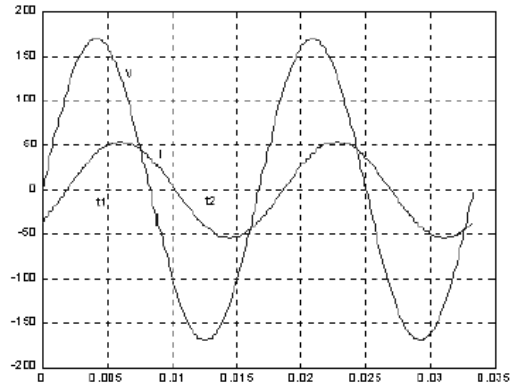
$\cos\varphi = 0,83 \quad \rightarrow$ sem capacitor

$\varphi \cong 33,9^o \qquad \varphi = \text{graus}.\frac{\pi}{180^o}$ (rad)

$\therefore \varphi = 33,9^o \frac{\pi}{180^o} \text{rad} \Rightarrow \varphi \cong 0,59$ rad

$i(t) = 1,41.\text{sen}(377t - 0,59)$ [A]

Ex 1



Formas de onda da tensão da fonte e da corrente total sem o capacitor:

$v(t) = 169,7.\text{sen}\,\omega \cdot t$

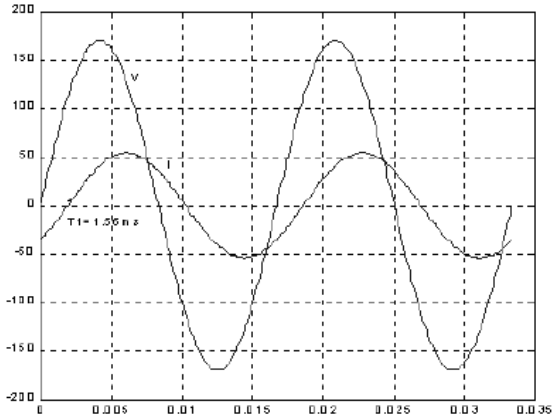
$v(t) = 169,7.\text{sen}(377.\frac{16,667.10^{-3}}{4})$

$v(t) \cong 169,7V$

sem o capacitor

$i(t) = 1,41.\text{sen}(\omega t - \varphi)$

$i(t) = 1,41\,\text{sen}(377t - 0,59)$



O tempo t de atraso da corrente em relação à tensão (carga resistiva-indutiva) é calculado por:

F.P. sem o capacitor ≅ 0,83

$\cos\varphi = 0,83 \therefore \varphi = 33,9^o$

$2\pi.\text{rad} \rightarrow \frac{1}{60}\text{s} \rightarrow 16,667\text{ms}$

$33,9^o = 0,59\text{rad} \rightarrow t$

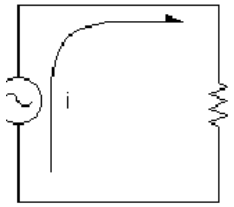
$\therefore t = 1,565\text{ms}$

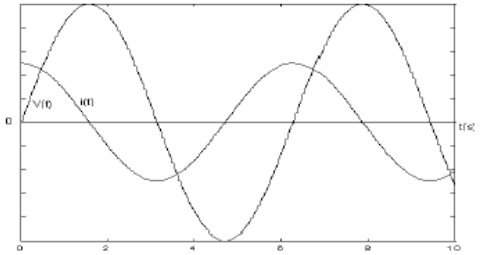
que é o tempo de atraso da corrente.

6.4 – Sistemas em Corrente Alternada

a) Introdução

A corrente alternada se caracteriza pelo fato de sua amplitude variar com o tempo. Esta variação normalmente é senoidal e no caso do sistema elétrico do Brasil a frequência desta variação é de 60Hz (ciclos/segundo).





As mesmas definições de valor instantâneo, valor máximo, valor eficaz , descritas para a tensão, também são válidas para corrente instantânea :

$$i(t) = I_{MAX}.\text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (A)$$

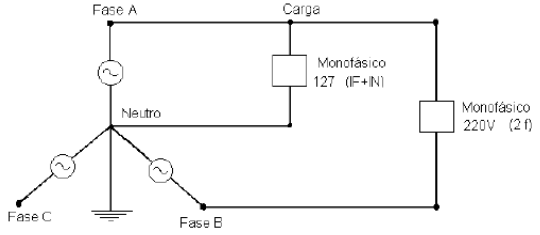
$$I_{eficaz} = \frac{I_{MAX}}{\sqrt{2}} \quad (A)$$

Normalmente, quando se fala em corrente e tensão, sem se explicar mais nada, por exemplo, V=127V ou I=10A, está se referindo a valores eficazes.

Defasagem (φ) : é um ângulo (em graus ou radianos) que mede o atraso (φ é negativo) ou o avanço (φ é positivo) da forma de onda da corrente em relação à forma de onda da tensão (que é a referência). cosφ = fator de potência.

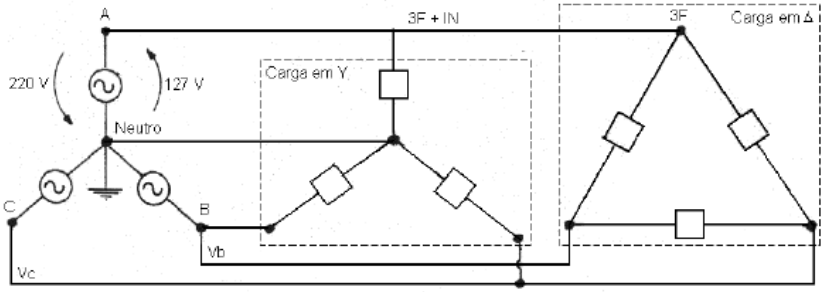
b) Sistema de corrente alternada monofásico:

Neste sistema existem somente 2 terminais, sendo que um deles funciona como retorno.



c) Sistema de corrente alternada trifásico :

Este sistema é formado pela ASSOCIAÇÃO DE 3 SISTEMAS MONOFÁSICOS Va, Vb, Vc, com uma defasagem entre eles de 120°. Neste sistema podem existir 3 ou 4 terminais.

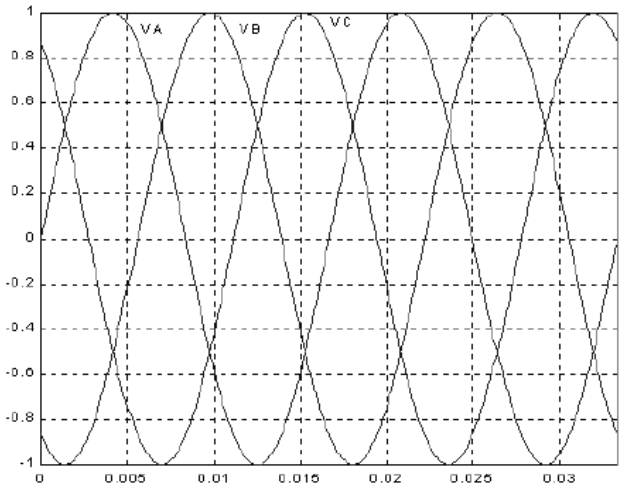


$$V_a = V_{MAX}.\text{sen}\,\omega t$$

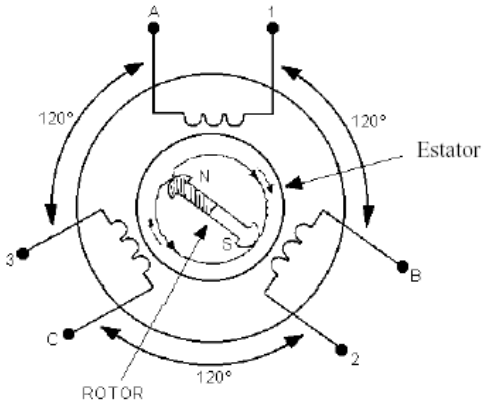
$$V_b = V_{MAX}.\text{sen}(\omega t - 120^o)$$

$$V_c = V_{MAX}.\text{sen}(\omega t - 240^o) \quad \text{ou} \quad V_c = V_{MAX}.\text{sen}(\omega t + 120^o)$$

Um sistema trifásico é chamado de equilibrado quando os valores de Va, Vb e Vc forem equilibrados.



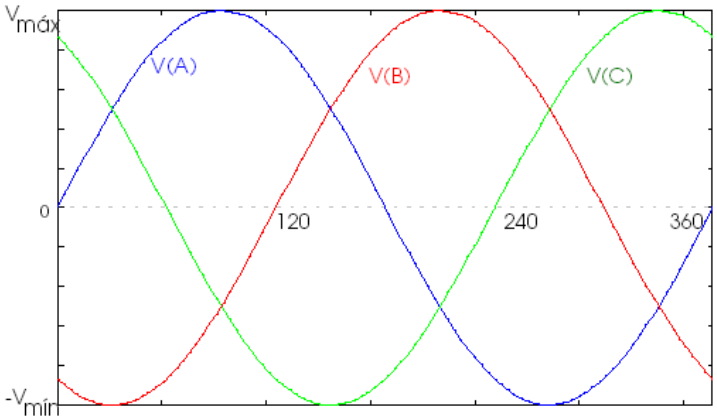
Geração de Tensão Alternada Trifásica



gerador trifásico

de 2 pólos

$n_s = 3.600 rpm$



$$V(A) = V_{MÁX}.\text{sen}\,\omega t \ (V)$$

$$V(B) = V_{MÁX}.\text{sen}(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \ (V)$$

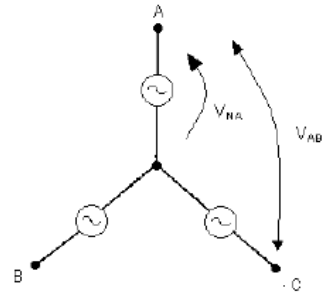
$$V(C) = V_{MÁX}.\text{sen}(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \ (V)$$

6.5 – Tipos de Ligação em Sistemas 3Ø

Os três sistemas monofásicos que formam um sistema trifásico podem ser ligados de duas maneiras para se obter níveis de tensão diferentes :

* ligação em triângulo ou delta (Δ) - (3 fases ou 3 fios).

* ligação em estrela ou Y - (4 fios ou 3 fases e 1 neutro).

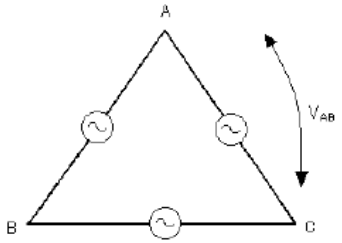


Ligação em Y

V_{AN} = tensão de fase

V_{AB} = tensão de linha

$V_{AB} = \sqrt{3}.V_{AN}$ (V)



Ligação em Δ

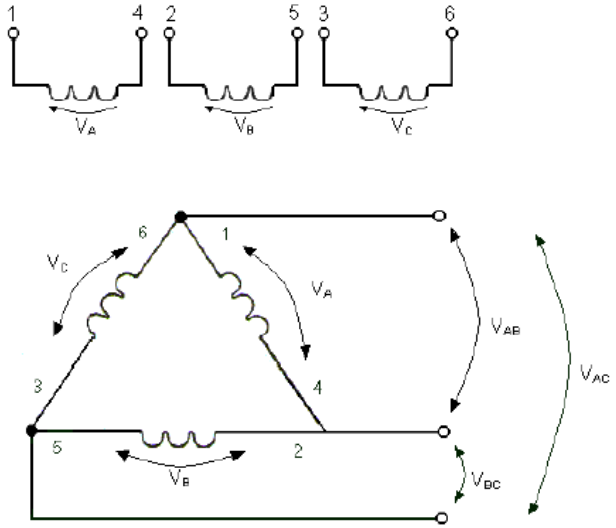
V_{AB} = tensão de linha

Tensão de fase : É a tensão em cada sistema monofásico.

Tensão de linha : É a tensão entre dois sistemas monofásicos.

a.) Ligação em triângulo (Δ) :

Bobinas de um motor trifásico de indução



Sistema em Triângulo equilibrado

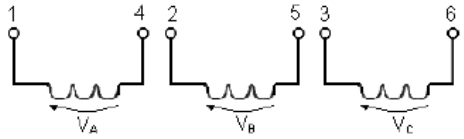
tensão de linha = tensão de fase = $V_{AB} = V_{BC} = V_{CA}$

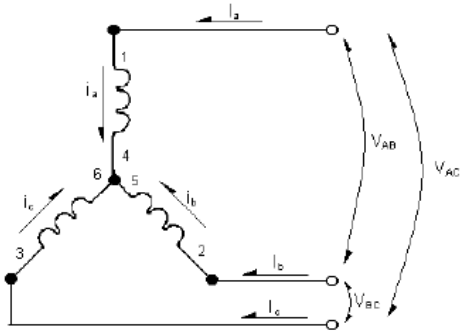
corrente de linha = $I_A = I_B = I_C$

corrente de fase = $i_A = \frac{I_A}{\sqrt{3}}$; $i_B = \frac{I_B}{\sqrt{3}}$; $i_C = \frac{I_C}{\sqrt{3}}$

b.) Ligação em estrela (Y) :

Bobinas de um motor trifásico de indução.





$i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0$

Sistema em Y - equilibrado

tensão de linha = $V_{AB} = V_{BC} = V_{CA}$

tensão de fase → $V_A = \frac{V_{AB}}{\sqrt{3}}; V_B = \frac{V_{BC}}{\sqrt{3}}; V_C = \frac{V_{CA}}{\sqrt{3}}$

corrente de linha = corrente de fase → $i_a = I_A; i_b = I_B; i_c = I_C$

Exemplo 2 Seja um motor trifásico conectado em Δ, em uma rede trifásica de 220V. Sendo a corrente de linha igual a 10A, pede-se:

a.) A tensão em cada bobina do motor.

b.) A corrente em cada bobina do motor.

c.) O esquema de ligação em Δ.

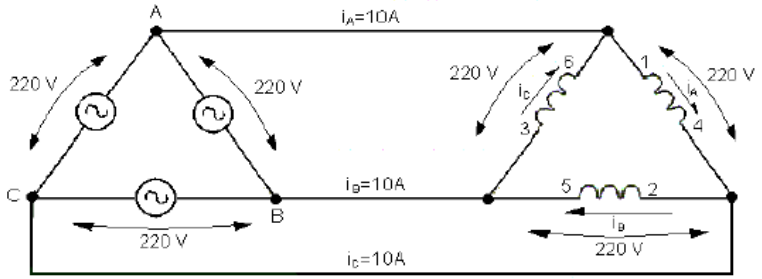
d.) Se o mesmo motor fosse conectado em Y, qual deveria ser a tensão da rede trifásica e qual o esquema de ligação.

Solução:

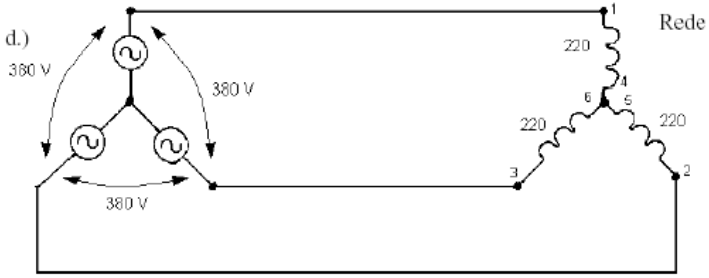
a.) 220V.

b.) corrente de fase = $\frac{\text{corrente de linha}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5{,}8 = i_a = i_b = i_c$.

c.)



d.)



Rede = 380/220 V

(Lins)

Tensão na bobina = 220V = tensão de fase.

Tensão da fonte trifásica = tensão de linha.

Tensão de linha = $\sqrt{3}.220 = 381$V.

6.6 – Potências 3Ø

Um motor ligado a uma rede de alimentação absorve energia elétrica e a transforma em energia mecânica. A rede deve estar apta a fornecer a potência aparente S, necessária para a operação do motor. O consumo de energia elétrica está ligado com a potência ativa P. A corrente total circulante é ligada com S.

Em um sistema monofásico :

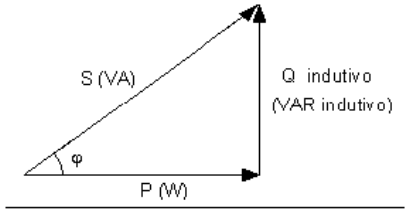
$S = P_{AP} = P_{APARENTE} : V.I\ (VA)$, potência aparente.

S é o produto da tensão pela corrente total.

Em um sistema trifásico :

$S = 3.V_{FASE}.I_{FASE}\ (VA)$

$S = \sqrt{3}.V_{LINHA}.I_{LINHA}\ (VA)$



$COS\varphi = F.P. = \frac{P}{S}$

P(W) representa trabalho realizado (aquecimento, energia mecânica, iluminação, etc.).

Q indutivo representa a criação dos campos magnéticos necessários para operação do motor.

S (potência aparente - VA); P (potência ativa - W); Q (potência reativa) que no motor é reativa - indutiva.

Rendimento : É a relação entre Potência Mecânica Útil entregue ao eixo do motor e a Potência Elétrica Ativa em watts solicitada ou consumida pelo motor da rede de alimentação.

$$\eta(\%) = \frac{P_{MEC}}{P_{ATIVA}} \times 100$$

Exemplo 3 Um motor elétrico trifásico com um rendimento de 85% absorve uma corrente de linha eficaz de 10A e opera com uma tensão de 220V em triângulo.

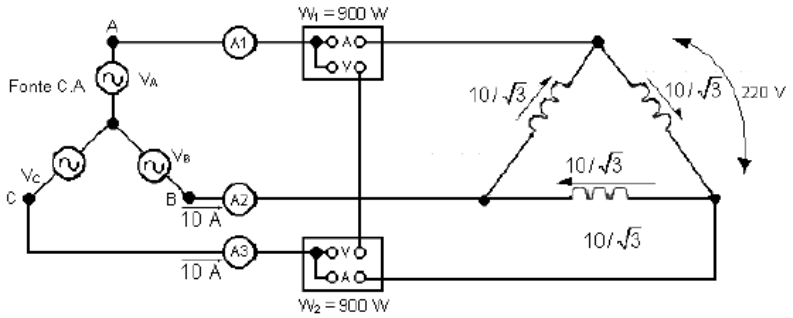
Se a potência consumida é de 1800W, pede-se:

a.) A potência aparente.

b.) O fator de potência.

c.) A potência mecânica disponível no eixo.

d.) Desenhe o esquema do sistema de alimentação conectado ao motor.



Dados:

$\eta = 85\%$

ligação Δ com V=220V

$I_{linha} = 10A$

$P = 1800W = W_1 + W_2$

a.)

$S_{3\phi} = ?$ $\quad S_{3\phi} = \sqrt{3}.V_{LINHA}.I_{LINHA}$

$= \sqrt{3}.220.10$

$S_{3\phi} = 3810,5VA$

b.) $F.P. = \frac{P}{S} = \frac{1800}{3810,5} \cong 0,47$

Sist. Resistivo - indutivo

F.P. no caso é mais baixo (F.P.≥0,92)

c.) Pmec disponível no eixo ?

$\eta = \frac{P_{MEC}}{P_{ATIVA}} \times 100\%$ $\qquad 85 = \frac{P_{MEC}}{1800} \times$

$P_{MEC} \cong 1530W$ $\qquad P_{MEC} \cong 2CV$

outro modo de calcular $S_{3\phi}$

$S_{3\phi} = 3.V_{FASE}.I_{FASE}$

$S_{3\phi} = 3.(220).(10/\sqrt{3})$

$S_{3\phi} = 3810,5VA$

e.) Relação entre conjugado e potência :

Na <u>especificação</u> e <u>seleção</u> de motores pode ser importante a avaliação da quantidade de torque disponível (numa polia ou eixo de motor) para se executar um determinado trabalho mecânico <u>a uma certa velocidade</u>.

A equação que relaciona a potência fornecida com o torque externo e a velocidade é dada por :

$$P_{MEC} = T.\omega \ (W)$$

onde T = torque (N.m)

ω = rotação em rad/s.

Exemplo 4 Qual o torque disponível no eixo do motor de 7,5 CV com o eixo girando a 1760 rpm?

velocidade do eixo ou velocidade do rotor - $n_r = 1760rpm$

$\omega_r = \frac{n_r.2\pi}{60} rad/s \quad \therefore \quad \omega_r = \frac{1760.2\pi}{60} = 184,3rad/s$

$T = \frac{P_{MEC}}{\omega} \Rightarrow T = \frac{7,5.736}{184,3} \cong 29,93Nm$

CAPITULO 7 - Motor de Indução Trifásico – MIT

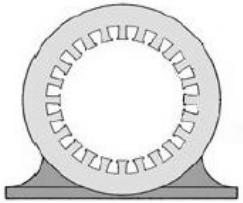
7.1 – Características Construtivas

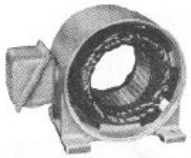
As máquinas elétricas rotativas são constituídas de 2 partes :

* o estator que é a parte fixa;

* o rotor que é a parte móvel.

a.) O Estator : consiste de um núcleo cilíndrico, laminado e ranhurado, que é colocado em uma carcaça em forma de bobinas e estão interligadas de forma a obter a tensão desejada.





b.) O Rotor

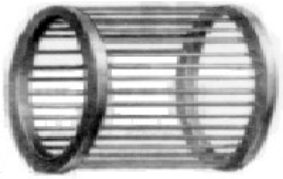
O rotor do motor de indução pode ser de 2 tipos :

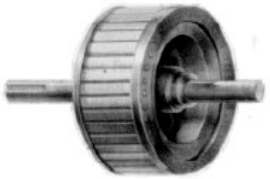
* Rotor em gaiola de esquilo ou rotor em curto.

* Rotor bobinado ou rotor de anéis.

b.1.) Rotor em gaiola :

No rotor em gaiola, os condutores (ou bobinas) são constituídos por barras de cobre ou alumínio colocadas em ranhuras.



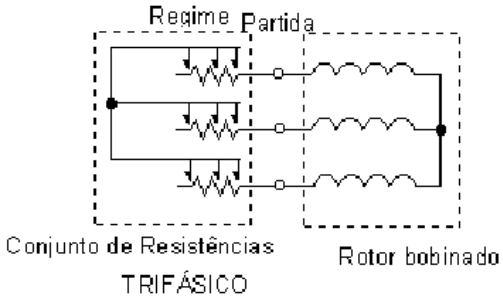


Nas duas extremidades das barras existem 2 anéis curto-circuitando todas as barras. Esta estrutura é semelhante a uma gaiola de esquilo (EUA, "Squirrel Cage").

É o tipo de rotor mais empregado (mais barato e não requer manutenção elétrica).

b.2.) Rotor Bobinado : A construção de um rotor bobinado é muito mais cara que um rotor em gaiola, e é executada quando se deseja a variação da velocidade da máquina. Um motor de rotor bobinado é possível controlar-se através da corrente que circula no rotor além da velocidade conjugado do mesmo.

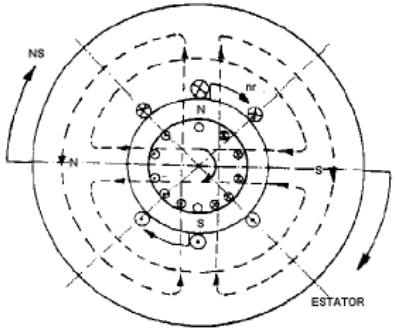
Nesse tipo de rotor os fins de cada fase são levados através do eixo à anéis coletores, de modo que, por meio de escovas fixas no estator da máquina, pode-se ter



acesso ao circuito elétrico do rotor. Desta forma, pode-se inserir resistências externas em série com o rotor, o que possibilita o controle da velocidade e do conjugado.

7.2 – Princípios de Funcionamento

O funcionamento do motor de indução baseia-se no princípio da formação de um campo magnético produzido pelos enrolamentos do estator.



n_S = velocidade síncrona do campo

n_r = vel. do campo girante do rotor

motor de 2 pólos

O fluxo magnético girante aparece no estator devido as correntes alternadas circulantes nas bobinas do estator. Este fluxo magnético do estator se desloca em relação ao rotor, cortando as barras do rotor induzindo tensões (Lei de Faraday) que farão circular correntes também alternadas no rotor. Como as correntes do rotor tem polaridades contrárias do estator (Lei de Lens), cria-se também no rotor um campo magnético girante que será atraído e arrastado pelo campo girante do estator.

Desenvolve-se assim um conjugado mecânico no rotor levando o mesmo a girar.

A velocidade do rotor (n_r) é sempre menor que a velocidade do campo girante do estator (n_S), também chamada velocidade síncrona. Se o rotor fosse levado até a velocidade síncrona ($n_r = n_S$), não haveria mais velocidade relativa entre os campos girantes do estator e do rotor e conseqüentemente a tensão induzida cessaria, não haveria mais corrente no rotor, o conjugado mecânico diminuiria e o rotor automaticamente perderia velocidade ($n_r<n_S$), então, novamente o rotor iria adquirir o conjugado.

A operação do *motor girando sem carga* denomina-se *operação em vazio*. A medida que se coloca carga no eixo a tendência da velocidade *é diminuir para compensar o conjugado resistente da carga*.

A operação do *motor com carga* é denominada *operação em regime permanente*.

A diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor é chamada de velocidade de *escorregamento* (n_e):

$$\mathbf{n_e = n_S - n_r}$$

n_S = velocidade síncrona

n_r = velocidade do rotor.

Assim, o *escorregamento s* é definido por:

$$s(\%) = \left(\frac{n_S - n_r}{n_S}\right) \times 100$$

$$n_r = n_S\,(1\text{-}s)\ \text{rpm}$$

sendo que s para motores de indução de gaiola é de 2 a 5%.

A velocidade síncrona (n_S) é dado por

$$n_S = \frac{120\,f}{p}\ \text{rpm}$$

onde: f = frequência em hertz

p = número de pólos.

Podemos variar a velocidade n_S e, conseqüentemente, n_r variando-se o número de pólos **p** (alterando-se construtivamente as bobinas do estator) ou variando-se a frequência (eletronicamente por inversores).

para f = 60Hz

p	2	4	6	8
n_S (rpm)	3600	1800	1200	900

OBS.: O motor de indução normalmente é empregado onde se deseja uma velocidade constante próxima da velocidade síncrona n_S.

Quando se deseja um motor de grande porte com velocidade amplamente variável, podemos aplicar as seguintes soluções:

a) motor de corrente contínua (metrôs, trens, veículos elétricos);

b) motor de rotor bobinado;

c) motor de gaiola acionado através de *conversores de frequência* (inversores que controlam eletronicamente a *tensão* e a *frequência* aplicada ao motor).

Exemplo 1 Um motor de indução de gaiola opera com uma velocidade nominal de 1720 rpm numa rede trifásica. 220V/60 Hz. Pede-se:

a) A velocidade síncrona n_S e o *número de pólos*;

b) O escorregamento em percentual s(%).

resolução:

a) $n_r = 1720$ rpm $\rightarrow n_S = 1200$ rpm

$\rightarrow n_S = 1800$ rpm

como $n_r < n_S$ (escorregamento)

$\therefore n_S = 1800$ rpm

$$n_S = \frac{120 f}{p} \text{ rpm} \quad \therefore \quad p = \frac{120 \times 60}{1800}$$

$\Rightarrow$ **p = 4 pólos**

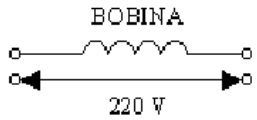
$$b)\ s(\%) = \left(\frac{n_S - n_r}{n_S}\right) \times 100 = \frac{1800 - 1720}{1800} \times 100$$

$\Rightarrow$ **s(%) = 4,4%**

7.3 – Tipos de Ligação

Dependendo da maneira com que são conectados os terminais das bobinas do estator, os motores de indução trifásico podem ser ligados a rede de alimentação que possuem diferentes níveis de tensão.

A maioria dos motores operam em circuitos trifásicos de tensões de 220V, 380V e 440V. Normalmente cada bobina é construída para operar em 220V.

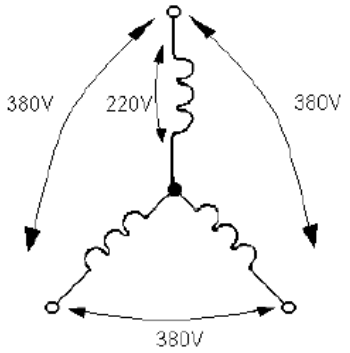


8.3.1 *Motor com um enrolamento por fase*

a) de 3 terminais e tensão normal única:

Já possuem uma conexão e podem ser ligados em redes trifásicas de 220V e 380V.

a-1) Fechados com Ligação em Estrela



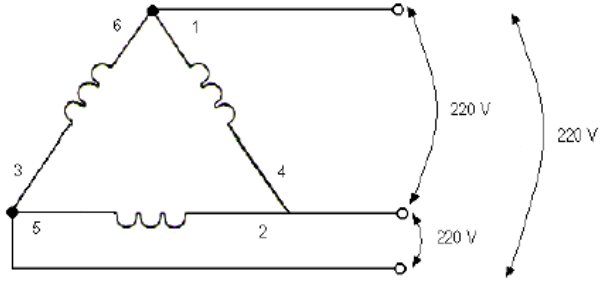
por fase

$$\frac{V_{linha}}{\sqrt{3}} = V_{fase}$$

$$\frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{V}$$

alimentação: 3ϕ, 380/220V.

a-2) Fechado em triângulos



Alimentação:

3ϕ, 220/127V

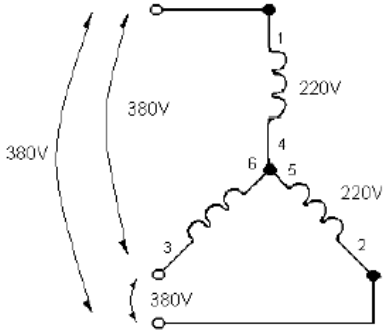
Normalmente os motores com 3 terminais são de pequena potência (menores que 5cv) e com partida direta.

b) De 6 terminais e Dupla Tensão Nominal

São os mais comuns e fabricados em potência pequenas, médias e grandes.

Podem ser conectados com:

b-1) Ligação Estrela – Y

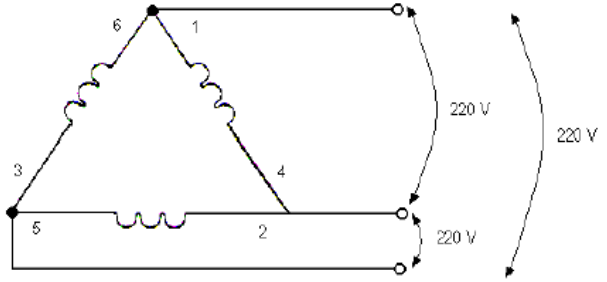


Tensão de linha = 380V

220V = tensão de fase

Alimentação:3ϕ, 380/220V

b-2) Ligação em Triângulo - Δ (delta)



Alimentação:

3ϕ, 220/127V

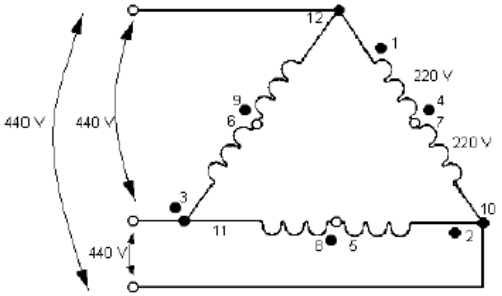
Os motores de 6 terminais possuem o recurso de permitir a redução da corrente de partida (normalmente $I_p \geq 7\ I_{nominal}$), através de dispositivos estrela-triângulo (chaves manuais ou contatores eletromagnéticos). Na partida ligação Y e em regime nominal ligação Δ (motor 380/220V). No caso a chave Y-Δ para este motor deve ser usada em redes de 220V.

7.3.2 *Motor com 2 enrolamentos por fase:*

São motores que possuem 12 terminais acessíveis e tensão nominal múltipla.

a) Ligação em triângulo - Δ (delta)

As duas bobinas de cada fase são ligadas *em série* e o conjunto em Δ .

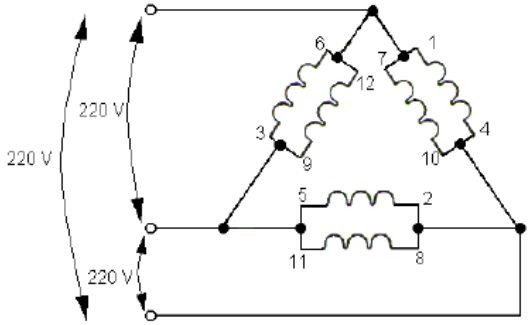


tensão de linha = 440V

Alimentação:440/254V

b) Ligação em Duplo-Delta (ΔΔ)

As duas bobinas são ligadas em paralelo e o conjunto em Δ.

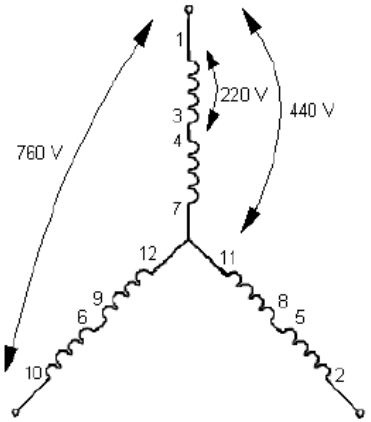


Alimentação:

3ϕ, 220/127V

c) Ligação em Y

As duas bobinas de cada fase são ligadas em série e o conjunto em Y.

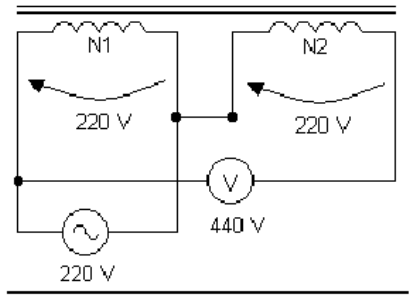


Alimentação:

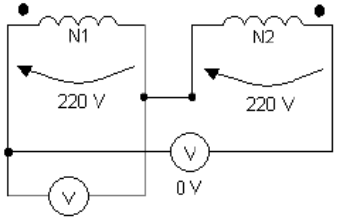
3ϕ, 760/440V

OBS.: Polaridade Instantânea das Bobinas

1) ADITIVA

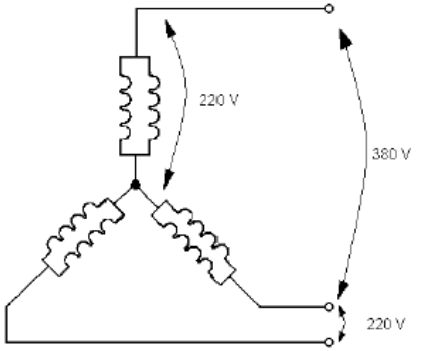


2) SUBTRATIVA



d) Ligação em Dupla Estrela -YY

As duas bobinas de cada fase são ligadas em paralelo e o conjunto em Y.



Alimentação:

3ϕ, 380/220V

Exemplo 2 Um motor de indução 3ϕ, 10 cv, com FP=0,80 e rendimento de 85%, está conectado em duplo delta. Pede-se:

a) Qual a tensão da rede de alimentação 3ϕ;

b) O número de terminais do motor;

c) A tensão de fase e a tensão de linha;

d) A tensão em cada bobina;

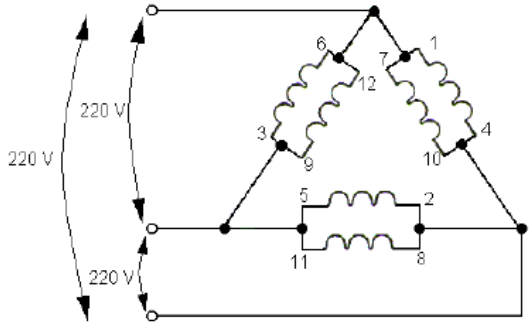
e) A corrente de linha e a corrente de fase;

f) A corrente em cada bobina.

resolução:

a) Alimentação 3ϕ, 220/127V

220V: V_{linha}; 127V: $V_{fase\ p/\ rede}$

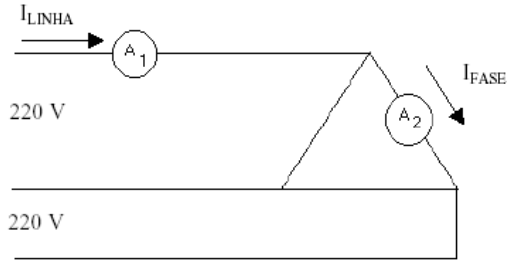


b) 12 terminais

c) Para o motor { tensão na fase = tensão na linha = 220V

d) 1 bobina = 220V (SEMPRE)

e)

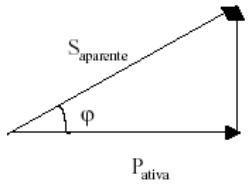


$S_{3\phi} = ? \rightarrow I_{linha}$

$P_{mec} = 10.736 = 7360\ W$

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{ativa}} \times 100 \qquad \therefore P_{ativa} = \frac{P_{mec}}{\eta} \times 100$$

$P_{ativa} = 8659\ W$



$$FP = \cos\varphi = \frac{P}{S}$$

P_{ativa} é a potência consumida total (trabalho + perdas). É aquela paga pelo consumidor.

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{P}{FP} = \frac{8659}{0,8} \quad \Rightarrow \quad S_{3\phi} = 10824\ VA$$

η alto significa baixas perdas.

FP alto significa redução na Potência Aparente (S) e redução, conseqüentemente, na corrente circulante.

$\therefore S_{3\phi} = 3 \cdot V_{fase} \cdot I_{fase}$

ou $S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_{linha} \cdot I_{linha}$

$$I_{fase} = \frac{I_{linha}}{\sqrt{3}}(A) = \frac{28,4}{\sqrt{3}} \Rightarrow I_{fase} = 16,4A$$

f) $I_{bobina} = \frac{I_{fase}}{2} \Rightarrow I_{bobina} = 8,2A$

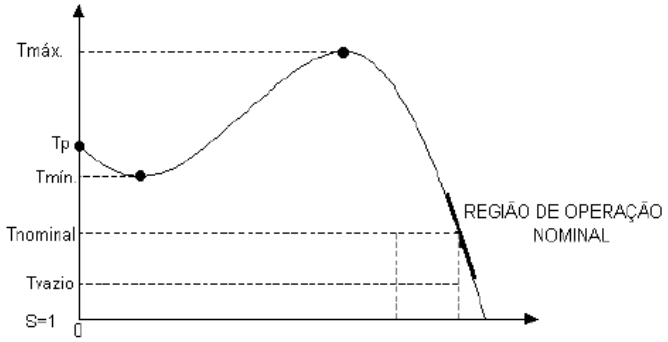
7.4 – Curvas Características do MIT

7.4.1 Conjugado x Velocidade (T_e x n_r)

O motor de indução tem um conjugado nulo à velocidade síncrona ($n_r = n_s$) → s = 0 e T = 0.

A medida que é aumentada a carga no eixo do motor, a sua velocidade diminui até um ponto onde o conjugado desenvolvido é máximo.

Qualquer acréscimo de carga além desse ponto ($T_{máx}$ → Região de operação instável) faz com a velocidade caia bruscamente, podendo algumas situações travar o rotor.



sendo:

T_p = conjugado de partida: é o conjugado com o motor travado, ou torque desenvolvido na partida do motor.

$T_{mínimo}$ = conjugado mínimo: é o menor valor de conjugado obtido desde velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo.

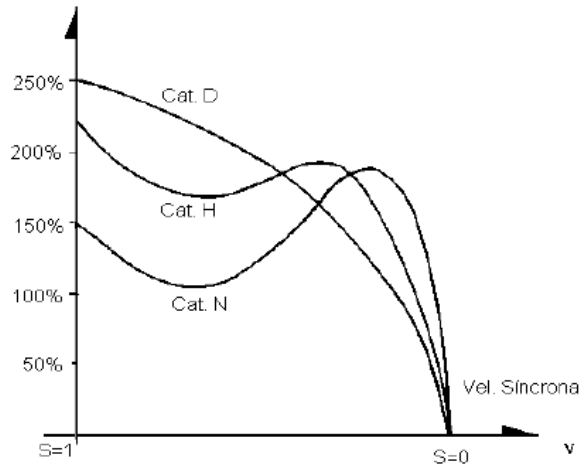
$T_{máximo}$ = conjugado máximo: é o máximo valor de conjugado que o rotor pode desenvolver *sem travar o eixo*.

$T_{nominal}$ = conjugado nominal: é o conjugado que o motor fornece com carga nominal no eixo. Normalmente $T_{nominal}$ ocorre com S entre 2 e 5%.

T_{vazio} = conjugado para o motor operando sem carga. Representa o conjugado sem carga no eixo.

7.4.2 Categorias

De acordo com as formas construtivas do rotor de motores de indução de gaiola podem apresentar diferentes características de conjugado e corrente de partida conforme o gráfico:

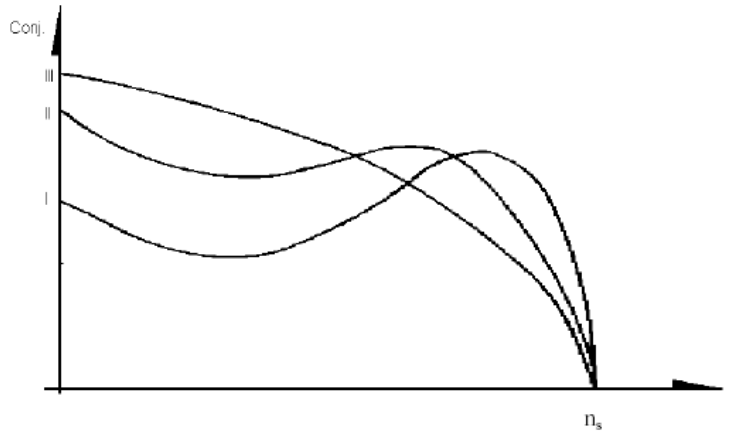


a) Categoria N: conjugado de partida T_p normal; corrente de partida I_p normal (6 a 7 x $I_{nominal}$); Escorregamento baixo ($2\% \leq S \leq 5\%$). Nesta categoria se enquadram a maioria dos motores que acionam cargas normais tais como: bombas centrífugas, máquinas operatrizes. O rotor possui gaiola única.

b) Categoria H: conjugado de partida T_p alto; corrente de partida I_p normal; escorregamento baixo. São motores adequados para cargas com elevada inércia, como: peneiras e transportadoras - carregadoras. O rotor é de Dupla Gaiola.

c) Categoria D: T_p alto; Ip normal; S_{alto} (maior que 5%), motores para cargas que apresentam picos intermitentes, tais como: prensas excêntricas, tesouras e elevadores.

OBS.: O motor de rotor bobinado pode apresentar diferentes curvas conjugado x velocidade, de acordo com o valor da resistência externa acrescentada ao rotor.



① Sem resistência externa no rotor (os anéis estão em curto-circuito, sendo o rotor bobinado, então, equivalente ao rotor de gaiola).

② Com resistência externa no rotor.

③ Com resistência externa no rotor de maior valor.

Exemplo 3 Um motor de indução de gaiola 4 pólos, 60Hz, apresenta um escorregamento nominal de 2% e conjugado nominal de 40 N.m. Este motor deve acionar uma bomba hidráulica do tipo centrífuga ($C = k.n_r^2$). Determine o *ponto de operação* do conjugado motor-bomba, dado que o conjugado resistente da bomba para n_r = 2000 rpm é de 60 N.m.

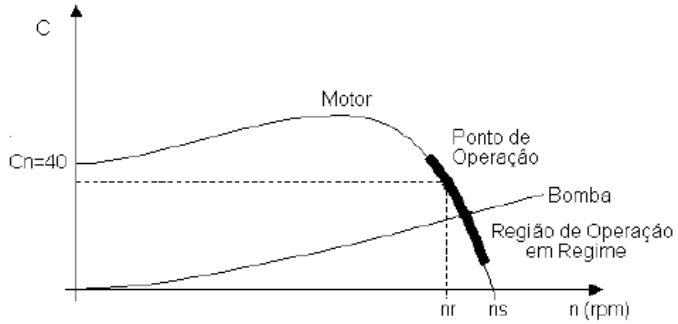
resolução:

a) Cálculo da velocidade nominal do motor, para S = 2%.

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

$$n_r = n_s \cdot (1 - S)$$

$$n_r = 1800 \cdot (1 - 0{,}02) \Rightarrow n_r = 1764 \text{ rpm}$$



b) Cálculo da constante K da bomba:

$$C = K \cdot n_r^2 \qquad \therefore K = \frac{C}{n_r^2} = \frac{60}{2000^2} = 15 \times 10^{-6} \ (N.m / rpm^2)$$

c) Determinação da rotação n_r do motor no ponto de operação do conjunto *motor-bomba*.

Determinante da equação da reta:

$$\begin{vmatrix} x & y & 1 \\ 1764 & 40 & 1 \\ 1800 & 0 & 1 \end{vmatrix} \qquad \Rightarrow \qquad 40x + 1800y - 72000 - 1764y = 0$$

$$\therefore y = \frac{-40}{36}x + 2000$$

A equação C x n_r do motor, na região de regime será:

$$C_{motor} = \frac{-10}{9} \cdot n_r + 2000 \qquad (II)$$

A equação da bomba: $C_{bomba} = K \cdot n_r^2$ (III)

No ponto de operação: (III) = (II)

$C_{motor} = C_{bomba}$

$$-\frac{10}{9} n_r + 2000 = K \cdot n_r^2$$

$$15 \times 10^{-6} \cdot n_r^2 + \frac{10}{9} n_r - 2000 = 0$$

n_{r1} = -75832 rpm; n_{r2} = 1758 rpm

esse valor deve estar entre 2% a 5% de escorregamento, caso contrário esse valor não vale.

∴ no ponto de operação: n_r = 1758 rpm

E o conjugado resistente da bomba será igual ao conjugado desenvolvido pelo motor:

com n_r = 1758 rpm

$$C = K \cdot n_r^2 = (15 \times 10^{-6}) \cdot (1758)^2 \Rightarrow C = 46,36 \text{ N.m}$$

d) Esta velocidade está dentro dos valores nominais para o motor de indução?

Valores nominais para o escorregamento: 2% ≤ S ≤ 5%.

Para $n_{r,conj}$ = 1758 rpm, $n_r = n_1 (1-S)$, n_r = 1800 rpm ∴ S = 2,33%

∴ esta velocidade se encontra dentro dos limites nominais (1764 ≤ n_r ≤ 1710).

7.4.3 Determinação do Tempo de Aceleração de um MIT em Carga

É o tempo que o motor leva para atingir a velocidade nominal, desde o instante em que é acionado.

Através desse tempo, pode-se verificar se o motor conseguirá acionar uma determinada carga, sem sobreaquecimento dos enrolamentos. Com o valor de t_a , pode-se determinar e dimensionar os dispositivos de partida e a proteção do motor.

O tempo de aceleração t_a é calculado por :

$$t_a = \frac{GD^2 . N}{375(C_m - C_s)}$$

onde:

t_a = tempo de aceleração em s.

N = variação da rotação do motor. No caso do motor partir em repouso, $N = n_R$ que é a velocidade nominal do motor em rpm.

GD^2 = efeito de inércia. É o produto da massa girante pelo diâmetro de giração ao quadrado ($Kg.m^2$).

C_m = conjugado motriz médio em N.m.

C_s = conjugado médio da carga em N.m.

OBS: $GD^2 = 4.J_T$ $J_T \rightarrow$ momento de inércia total

com:

$$J_T = J_m + J_C \ (Kg.m^2)$$

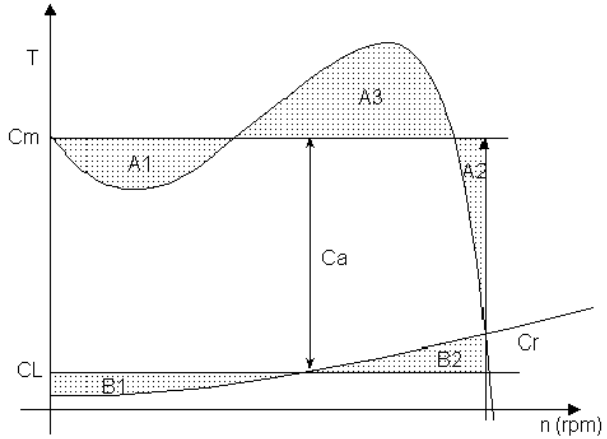
onde:

J_T = momento de inércia total.

J_m = momento de inércia do motor.

J_C = momento de inércia da carga.

A diferença entre os conjugados, $(C_m - C_l)$, é chamado conjugado médio de aceleração.



para o conjugado médio Cm:

$$A_1 + A_2 = A_3$$

para o conjugado médio C_1 : $B_1 = B_2$

$C_a = C_m - C_1 \Rightarrow$ conjugado médio de aceleração (N.m)

O momento de inércia rotacional define a resistência de um corpo se opor às variações de velocidade, em relação a um eixo.

Assim, nas partidas com carga de elevada inércia a curva T x n se mantém, mas o tempo de aceleração aumenta até o motor atingir a velocidade nominal.

Exemplo 4 Calcular o tempo de aceleração de um motor de indução trifásico de 250CV, 4 pólos, 60 Hz, com escorregamento de 1,11%, se o mesmo for acoplado diretamente a uma carga cujo momento de inércia é de 10,1 Kg.m^2.

O momento de inércia do motor é de 3,4 Kg.m^2 e supõe-se que o motor parta em repouso e com um conjugado médio de aceleração de 42,86 N.m.

$$n_S = \frac{120.f}{p} = \frac{120.60}{4} = 1800\text{rpm}$$

$$GD^2 = 4.J_T = 4.[J_m + J_C]$$

$$GD^2 = 4.[(3,4) + (10,1)]$$

$$GD^2 = 54.1\text{Kgm}$$

$$t_a = \frac{GD^2.N}{375(Cm - Cs)}$$

$$C_a = C_m - C_1 = 42,82\,\text{N.m} \qquad t_a = \frac{54,1x1780}{375x42,86} \qquad \therefore t_a = 6,0\text{s}$$

7.5 – Dispositivos de Partida

7.5.1 Introdução

Durante a partida do Motor de Indução Trifásico (MIT), a corrente consumida eleva-se a um valor muito maior que a nominal ($I_P \cong 6$ a $7\ I_N$) podendo assim causar distúrbios na rede de alimentação.

Para evitar esse problema é conveniente limitar-se a corrente de partida do MIT por métodos de partida.

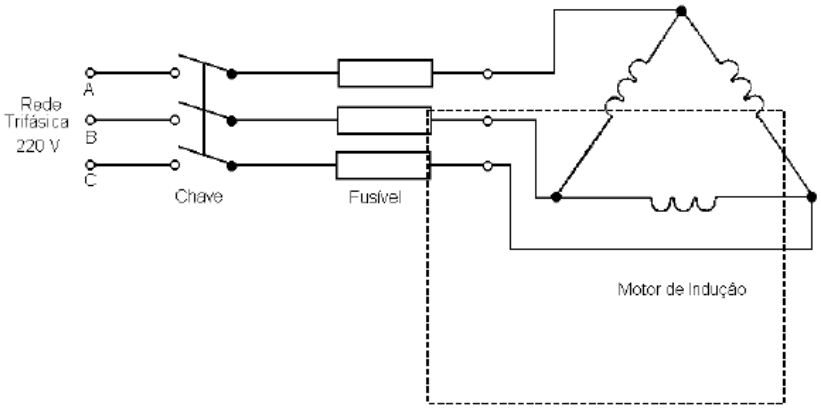
O transitório de partida também pode gerar aumento de demanda na conta de energia elétrica consumida.

Os critérios para a seleção dos métodos de partida envolve considerações quanto a capacidade de instalação e os requisitos da carga a ser acionada.

7.5.2 Partida Direta

Do ponto de vista do motor, esta é a forma mais adequada de se partir o motor de indução, desde que as condições locais permitam.

Neste caso o motor é alimentado com tensão plena já na partida.



Os dispositivos de partida mais comuns são: chaves interruptoras, disjuntores e contatores eletromagnéticos.

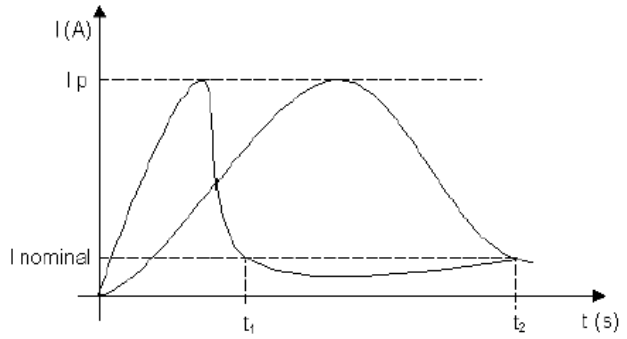
As condições para partida direta são:

* Capacidade de fornecimento de corrente da rede, muito maior que a corrente de partida;

- Motor de potência pequena (< 5CV), especialmente para redes alimentadas diretamente por transformador de distribuição da concessionária.

* Motor parte em vazio.

Obs: O maior valor de pico da corrente de partida, independe do motor partir em vazio ou em carga.



$t_2 >> t_1$

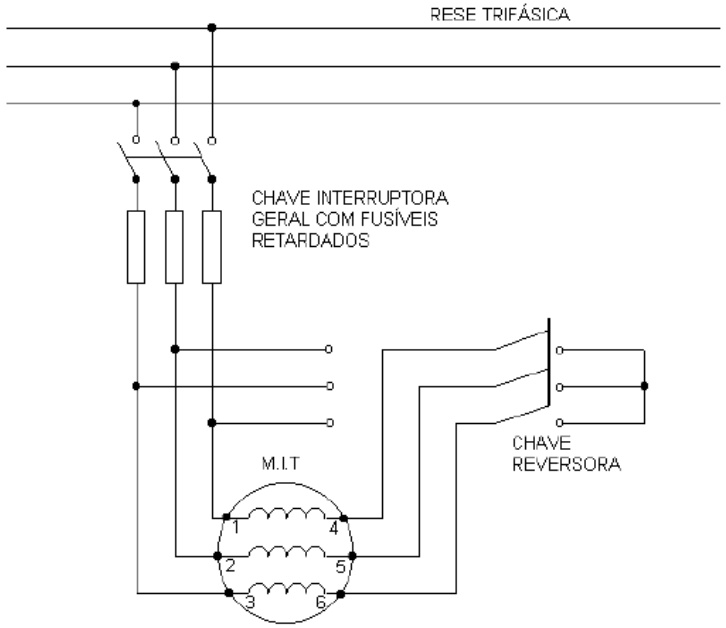
A diferença está no decréscimo da corrente de partida.

7.5.3 Partida Estrela-Triângulo (Y/Δ)

Um motor elétrico pode partir através de uma chave estrela-triângulo se possuir 6 terminais acessíveis (motor de dupla tensão). O procedimento para o acionamento é feito colocando-se inicialmente a chave na posição Y até a velocidade do motor atingir um valor próximo da velocidade de regime, quando então a chave é colocada na posição Δ. Se a comutação Y-Δ for antecipada pode haver uma elevação excessiva na corrente, fazendo desaparecer as vantagens do método.

Na partida (Y), o conjugado e a corrente de partida se reduzem a 1/3 (33%) dos seus valores se a partida fosse em Δ.

Devido à redução do conjugado de partida, indica-se este método para motores que partem em vazio; máquinas com características centrífugas ou máquinas-ferramenta.



VANTAGENS:

* Custo reduzido.

* Elevado número de manobras.

* Dimensão compacta.

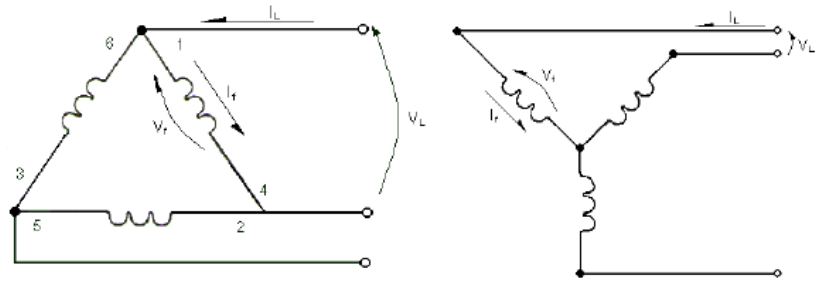
DESVANTAGENS:

* Aplicação específica em motores de 6 terminais acessíveis.

* Tensão na rede deve ser a mesma da tensão do motor em Δ.

* O motor deve alcançar pelo menos 90% da velocidade nominal para que se possa efetuar a comutação Y-Δ.

Demonstração



$$Z_\Delta = \frac{V_{f\Delta}}{I_{f\Delta}} = \frac{\sqrt{3}.V_L}{I_L} \qquad Z_Y = \frac{V_{fY}}{I_{fY}} = \frac{V_L}{\sqrt{3}.I_{LY}}$$

$$Z_\Delta = Z_Y$$

$$\frac{\sqrt{3}.V_L}{I_{L\Delta}} = \frac{V_L}{\sqrt{3}.I_{LY}} \Rightarrow 3.I_{LY} = I_{L\Delta}$$

$$I_{LY} = \frac{1}{3}.I_{L\Delta}$$

$$I_{LY} = 33\%I_{L\Delta} \quad I_{LY} = 33\%I_{L\Delta}$$

$$I_{PY} = 33\%I_{P\Delta}$$

Então, por exemplo, um motor de 10CV, 220V, com I_{NOM}(regime) de 27A.

$I_{P\Delta} = 6.I_{NOM} \cong 162A$

$I_{PY} = \frac{1}{3}.I_{P\Delta} \cong 54A$ - redução da corrente de partida

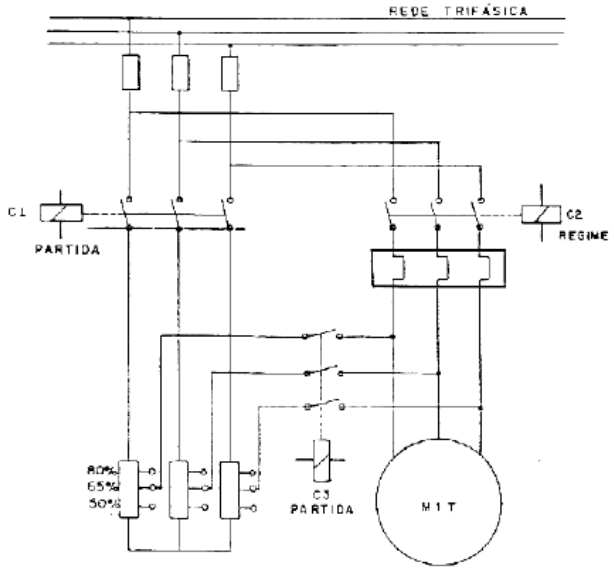
Pode-se também escrever que :

$T \cong K.V_{fase}^2 (N.m)$

$T_{PY} = \frac{1}{3}.T_{P\Delta}$

7.5.4 Partida com Chave Compensadora (Autotrafo)

A chave compensadora também é um método que usa como recurso para redução da corrente de partida a redução da tensão na partida do motor. Basicamente consiste de um auto-transformador de vários "taps". O primário é ligado à rede e os "taps"do secundário são ligados às bobinas do estator do motor. Este método é utilizado para partida de motores com potências maiores, acionando cargas com grande conjugado de partida, tais como britadores, grandes compressores e máqunas acionadas por correia.



Chave Compensadora :

Normalmente os transformadores possuem taps de 50%,65% e 80% da tensão. Na partida, com a chave compensadora, a corrente de linha e o conjugado, sofrem uma redução que varia com o quadrado da relação de transformação.

VANTAGENS :

* Variação gradativa do tap → permitindo a seleção da tensão aplicada ao motor.

* Não é limitada pelo tipo de ligação do motor de indução trifásico.

DESVANTAGENS :

* Custo superior ao da chave Δ-Y

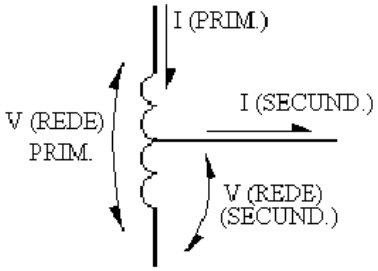
* Dimensão volumosa.

* Número de manobras limitada.

Demonstração

Pode-se demonstrar : $I_{\text{partida no primário}} = a^2 . I_{\text{partida c/ tensão plena}}$ onde:

$$a = \frac{I_{primário}}{I_{secundário}} = \frac{V_{prim.}}{V_{sec\,und.}} = \frac{N_{prim.}}{N_{sec\,und.}}$$



$$I_{P\ c/\ chave} = I_{P\ s/\ chave} .(\%redução)^2$$

Por exemplo, tap de 65% :

$$I_{P\ c/\ chave} = (0,65)^2 . I_{P\ s/\ chave}$$

e para o conjugado: $T_{P\ s/\ chave} = a^2 . T_{P\ s/\ chave}$

Exemplo 5 Um motor de gaiola 3ϕ, 380/220V, 15CV, FP=0,8, 1730 rpm e rendimento de 85%, tem uma corrente de partida 6 vezes superior a nominal e um torque de partida 3 vezes superior ao torque nominal.

Calcular para o motor operando em uma rede de 220/127V.

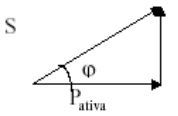
a.) A corrente e o torque de partida com tensão plena:

motor 380/220 V

Y Δ

tensão plena = 220 V

Pmecânica = CV x 736 (W)



$$\eta(\%) = \frac{P_{mecânica}}{P_{ativa}} .100\%$$

$$P_{ativa} = \frac{15x736}{0,85} .100 = 12988W$$

$$Perdas = P_{ativa} - P_{mecânica} = 1498W$$

$$S = P_{aparente} = \frac{P_{ativa}}{F.P.}$$

$$S_{3\phi} = \frac{12988}{0,8} \Rightarrow S_{3\phi} = 16235VA$$

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} . V_{linha} . I_{linha}\ (VA)$$

ou

$$S_{3\phi} = 3 . V_{fase} . I_{fase}\ (VA)$$

Tensão plena = Conexão Δ (no caso)

$$I_{linha} = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} . V_{linha}} = \frac{16235}{\sqrt{3} . 220} \therefore I_{NOMINAL} = 42,60A$$

$$\therefore I_P = 6 . I_{NOMINAL} = 6\ .\ 42,60 \Rightarrow I_P = 225,6A$$

$T_{NOMINAL} = ?$

$$P_{mecânica} = T . \omega\ (W) \quad \therefore\ T_{NOMINAL} = \frac{P_{mecânica}}{\omega_{r\,NOMINAL}}$$

$\omega_r = ?$ $\quad n_R = 1730rpm$

$$\omega_r = \frac{n_R . 2\pi}{60} = \frac{1730 . 2\pi}{60} = 181,16\ rad/s$$

$$T_{NOMINAL} = \frac{15x736}{181,16} = 61\ N.m$$

dado : Tp = 3.Tn Tp = 183 N.m

b.) Idem (I_P, T_P) para o motor acionado por uma chave Y-Δ :

$$I_{NOMINAL} = 42,6\ A = I_\Delta$$

$$I_{PY} = \frac{1}{3} . I_{P\Delta}$$

$$I_{PY} = \frac{1}{3} . 6 . I_\Delta \quad \therefore\ I_{PY} = 85,2A$$

c.) Idem (I_P, T_P) para o motor acionado por chave compensadora com taps de 50%, 65% e 80%.

c.1) Tap de 50%

$$I_{P50\%} = (\%redução)^2 . I_{P\Delta}$$

$$I_P = (0,50)^2 . 225,6 \quad \therefore\ I_{P50\%} = 64A$$

$$T_{P50\%} = (0.50)^2 . T_{P\Delta} \cong 45,75N.m$$

Exemplo 6 Dado um motor de indução trifásico de 12 terminais, pede-se :

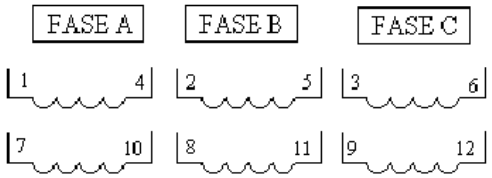
a.) Quais as conexões para o motor operando nas seguintes redes de alimentação :

a-1.) 220/127 V; a-3.) 440/254 V;

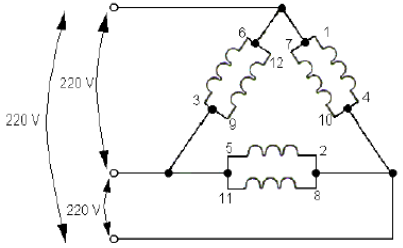
a-2.) 380/220 V; a-4.) 760/440 V.

b.) Em quais redes o motor pode ser acionado por chave Y-Δ ?

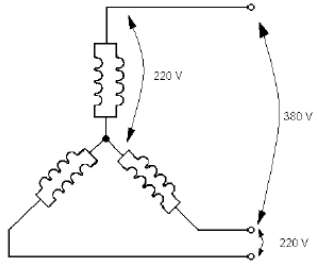
Dado :



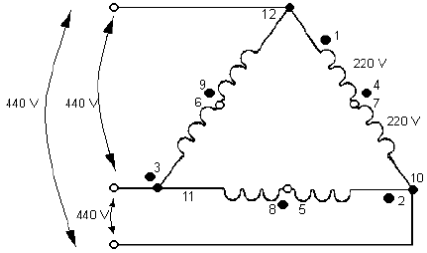
a-1.) Duplo-Delta (ΔΔ)



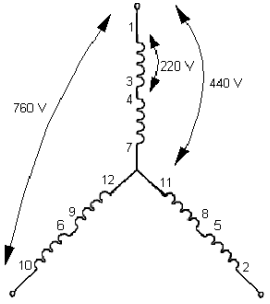
a-2.) Duplo Y (YY)



a-3.) Delta (Δ)



a-4.) Estrela (Y)

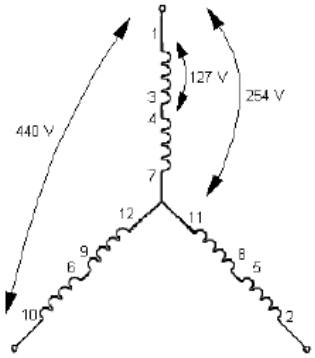


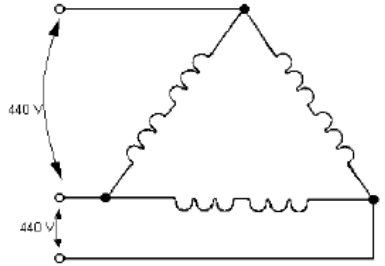
a-2.) rede 380/220 V. Não é possível, pois: Partida Y, tensão plena no motor (alta I_P); Regime Δ, cada bobina iria receber 380V, queimando-as.

a-3.) 440/254V é possível chave Y/Δ (semelhante à rede de 380/220 V).

a-4.) 760/440V. Não é possível

Partida Y : Regime Δ





CONCLUSÃO : A chave Y-Δ pode ser usada sempre que a tensão na conexão delta coincidir com a tensão de linha da rede, pois a tensão em regime = tensão de linha.

Exemplo 7 Um motor 3ϕ, 220V, 5CV, 1715 rpm, cosφ=0,87; consome da rede de energia, quando em condições nominais, uma potência aparente 5715,77 VA.

a.) Determine a corrente e o rendimento nas condições nominais.

b.) Determine as perdas internas no motor.

Dados: V_{linha} = 220V = tensão em regime

operação em regime = em condições nominais de carga

rotação nominal = n_R = 1715rpm; cosφ = FP = 0,87

Pmec = 5CV ou Pmecânica = 5x736 = 3680 W.

$S_{3\phi}$ = 5715,77 VA.

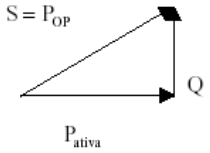
$$S_{3\phi} = \sqrt{3}.V_{linha}.I_{linha}$$

$$I_{linha} = I_{nominal}$$

$$\therefore I_{nominal} = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}.V_{linha}} = \frac{5715,77}{\sqrt{3}.220} = 15A$$

em 220V, a corrente será 15A.

b.)



$$P_{ativa} = S.\cos\varphi \ \ (W)$$

$$P_{ativa} = 4972,72W$$

$$P_{ativa} = P_{mecânica} + P_{perdas} \ \ (W)$$

$$\therefore \ P_{perdas} = P_{ativa} - P_{mecânica} \ \ (W)$$

$$P_{perdas} = 1292,72W$$

$$\eta\% = \frac{P_{mec}}{P_{ativa}} x100\% \quad \therefore \ \eta = 0,74 \text{ ou } 74\%$$

Exemplo 8 Um M.I.T. de gaiola desenvolve um conjugado de partida de 35 N.m., quando acionado por uma chave compensadora com tap de 50%.

a.) Qual Tp com tap de 65% ?

$$T_{P_{c/\,chave}} = a^2.\ T_{P_{s/\,chave}}$$

$$T_{s/\,chave} = \frac{T_{c/chave}}{a^2} = \frac{35}{(0,5)^2} \Rightarrow T_P = 140N.m.$$

$$T_{P_{(65\%)}} = (0,65)^2.140 \Rightarrow T_{P_{(65\%)}} = 59,15N.m.$$

CAPITULO 8. - Acionamento de Motor de Indução 3Ø (MIT)

8.1 – Introdução

Os motores de indução trifásicos são robustos, têm um custo menor, comparativamente com os motores CC, particularmente os motores de indução com rotor em gaiola, requerem pouca manutenção e tem uma alta relação peso/potência. Até recentemente estes motores eram pouco usados em aplicações com controle de velocidade, através dos métodos clássicos, pois sua eficiência diminui muito para operação com velocidades menores. Estes motores tem sido utilizados em aplicações que requerem velocidade constante e que operam a partir de uma fonte de alimentação com tensão e freqüência constantes. Com a evolução da eletrônica de potência, os conversores atingiram um estágio, no qual os motores de indução podem ser considerados como sérios rivais do motor CC, em muitos sistemas de controle de velocidade.

Os conversores necessários para controlar satisfatoriamente a velocidade de um motor de indução são relativamente complicados e mais caros que aqueles para os motores CC, mas a confiabilidade e conveniência da fonte de alimentação, compensam suas desvantagens.

Em muitas aplicações a fonte de energia para a alimentação do motor de indução pode ter :

- Tensão terminal controlada e freqüência constante;
- Tensão terminal e freqüência constantes;
- Tensão terminal e freqüência controladas;
- Corrente de linha e freqüência constantes;

Para análise do comportamento de um motor de indução utiliza-se representar seu funcionamento através de um modelo matemático. O modelo básico utilizado neste capítulo é aquele obtido para um motor de indução com rotor bobinado; sendo que o motor com rotor em gaiola, é considerado como um caso especial. Os modelos desenvolvidos são utilizados somente para a determinação da operação em regime permanente de um motor de indução sob condições balanceadas.

8.2 – Circuito Equivalente

O circuito equivalente por fase de um motor de indução com rotor bobinado é mostrado na Fig. 9.1. No modelamento do sistema físico de campos magnéticos e circuitos acoplados, existem pequenas aproximações para levar em conta a representação de fenômenos físicos distribuídos através de elementos de circuitos concentrados. Estas aproximações não produzem discrepâncias significantes entre as previsões de desempenho a partir do modelo e o desempenho real do motor alimentado com fonte de tensão e freqüência constantes. Portanto, o modelo da Fig. 9.1, pode ser chamado de circuito equivalente “exato”. A seguinte relação freqüência/velocidade pode ser aplicada ao modelo:

$$\omega_r = \omega_s - \frac{p}{2}\omega_m \qquad (9.1)$$

Onde : ω_r – freqüência angular do rotor (rad/s);
ω_s – freqüência angular do estator (rad/s);

ω_m – velocidade angular do rotor (rad/s);
p – número de pólos.

O escorregamento é definido por:

$$s = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \frac{p}{2}\omega_m}{\omega_s} \qquad (9.2)$$

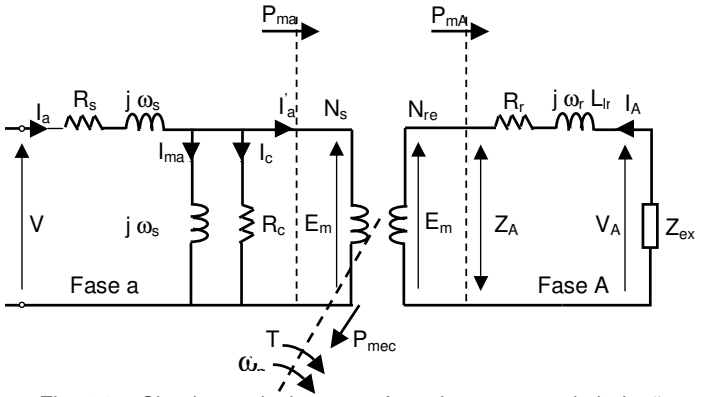


Fig. 9.1 – Circuito equivalente por fase de um motor de indução

Se N_{re} e N_{se} são os números de espiras efetivas por fase do rotor e do estator, respectivamente, tem-se:

$$\frac{E_{mA}}{E_{ma}} = s\,\frac{N_{re}}{N_{se}} \qquad (9.3)$$

$$\frac{I_A}{I_a'} = \frac{N_{se}}{N_{re}} \qquad (9.4)$$

A impedância do circuito do rotor Z_A é vista pela fonte de alimentação do estator, como uma impedância equivalente Z_A', onde:

$$\frac{Z_A'}{Z_A} = s\left(\frac{N_{re}}{N_{se}}\right)^2 \qquad (9.5)$$

Das relações anteriores pode ser mostrado que a relação entre as potências desenvolvidas (por fase) nos circuitos do rotor e do estator é:

$$\frac{P_{mA}}{P_{ma}} = s \qquad (9.6)$$

Portanto a potência trifásica, convertida em potência mecânica é:

$$P_d = 3(P_{ma} - P_{mA}) = 3(1-s)\,P_{ma} = 3\,\frac{p}{2}\,\frac{\omega_m}{\omega_s}\,P_{ma} \qquad (9.7)$$

O conjugado desenvolvido pelo motor é:

$$T = \frac{P_d}{\omega_m} = 3\,\frac{p}{2}\,\frac{P_{ma}}{\omega_s} \qquad (9.8)$$

Em algumas aplicações com motor de indução com rotor bobinado, alimentado por conversor, é necessário utilizar o modelo da máquina, mostrado na Fig. 9.1. Para motor de indução com rotor em gaiola, para o qual não existe a possibilidade de conexões externas ao circuito do rotor, com todos os parâmetros e variáveis referidos ao estator pode-se utilizar o circuito equivalente da Fig. 9.2.

Neste circuito:

$$P_{ma} = \frac{R_r'}{s}\left(I_a'\right)^2 = R_r'\left(I_a'\right)^2 + \frac{(1-s)}{s}\,R_r'\left(I_a'\right)^2 \qquad (9.9)$$

A potência desenvolvida total pelo motor é:

$$P_d = 3\,\frac{(1-s)}{s}\,R_r'\left(I_a'\right)^2 \qquad (9.10)$$

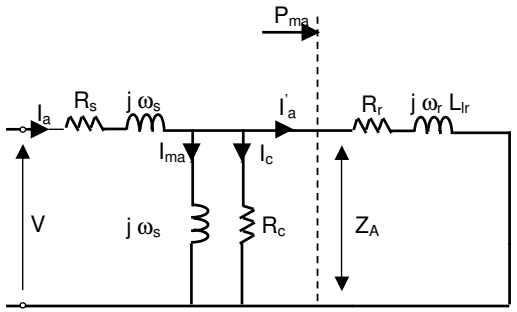


Fig. 9.2 – Circuito equivalente por fase referido ao estator

8.3 – Curvas Características

A Fig. 9.3.a mostra as curvas do conjugado desenvolvido, do fator de potência, da corrente de entrada e da potência de entrada em função do escorregamento para um motor de indução de 15kW, rotor bobinado com tensão terminal e a freqüência constantes. Na Fig. 9.3.b são mostradas as mesmas curvas e a curva da tensão terminal, porém com a corrente de entrada e freqüência constantes. Deve-se ressaltar que L_{ms} é considerada constante, mesmo com a variação da tensão terminal. O escorregamento nominal deste motor é aproximadamente 0,03, e no caso da alimentação com fonte de corrente, a corrente de entrada é aproximadamente igual ao seu valor nominal, na região de operação instável da característica conjugado-escorregamento (inclinação positiva). O motor não deve operar na região estável com esta corrente pois a tensão terminal poderia ser excessivamente alta e o circuito magnético poderia estar muito saturado. É claro, portanto, que uma fonte de corrente não poderia ser usada em um sistema sem uma malha de realimentação de velocidade. As curvas do fator de potência em função do escorregamento são idênticas para os 2 tipos de fonte de alimentação.

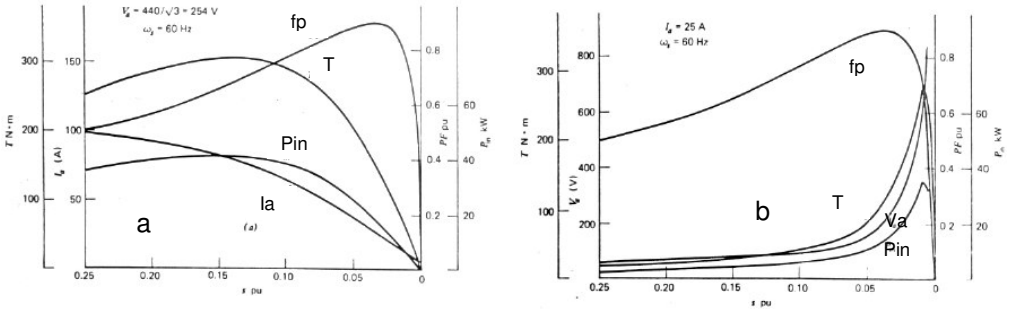


Figura 9.3 – Curvas características de um motor de indução

8.3 – Controle de Velocidade de MIT

O controle de velocidade para um motor de indução, tem sido desejado há muito tempo, e vários métodos para se obter a variação de velocidade em degraus ou continuamente, tem sido desenvolvidos, alguns dos quais resultaram em máquinas complicadas (motor Schrage) e alguns no uso de máquinas auxiliares (sistemas Scherbius e Kraemer). Poucos destes sistemas têm uma eficiência razoável e todos requerem mais manutenção que a do próprio motor de indução. Os princípios básicos dos métodos de controle de velocidade que são relevantes para sistemas que utilizam conversores, serão discutidos a seguir.

8.3.1 – Variação da Resistência do Circuito do Rotor

A vantagem do motor de indução com rotor bobinado em relação ao de rotor em gaiola é a possibilidade de controlar a velocidade da carga do motor, através da inserção de resistências adicionais no circuito do rotor. Esta técnica possibilita também manter a corrente do motor em valores baixos durante a sua partida, sem sacrificar o conjugado de partida, portanto quando são necessárias partidas repetidas ou partida com cargas com elevada inércia, com tempo de aceleração muito grande, o motor de indução com rotor bobinado é apropriado para realização deste serviço, sem perigo de sobreaquecimento. O

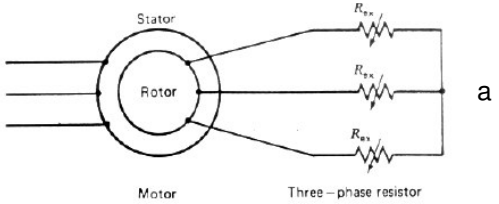
circuito do motor com resistência externa variável, no circuito do rotor é ilustrado na Fig. 9.4.a.

A eq. (9.11) mostra que se a resistência do circuito do rotor for variada, o escorregamento no qual ocorre o conjugado máximo também variará e pode se torna maior que a unidade. A família de curvas conjugado-escorregamento para vários valores de resistência adicionais no circuito do rotor, é mostrada na Fig. 9.4.b. A operação estável ocorrerá na intersecção das curvas do conjugado desenvolvido com curva do conjugado de carga no eixo do motor, mais o conjugado devido às perdas rotacionais. Se a resistência do circuito do rotor for suficientemente grande, a carga pode acionar o motor no sentido contrário, como mostrado no ponto *p* na Fig. 9.4.b. Neste ponto o conjugado do motor tem um sentido contrário ao da rotação. A inversão da seqüência de fases da fonte de alimentação do motor, produz uma frenagem (plugging) na máquina no segundo quadrante da Fig. 9.4.b. A corrente é muito alta, a menos que um grande valor de resistência adicional seja inserido, tornando a relação conjugado de frenagem por amperagem baixa. Este método é permissível somente para curtos períodos de frenagens rápidas ou longos períodos com frenagem lenta. Pode-se notar que em vazio o controle de velocidade não é efetivo pois a velocidade é muito próxima da velocidade síncrona, não importando o valor de resistência adicional inserido no circuito do rotor.

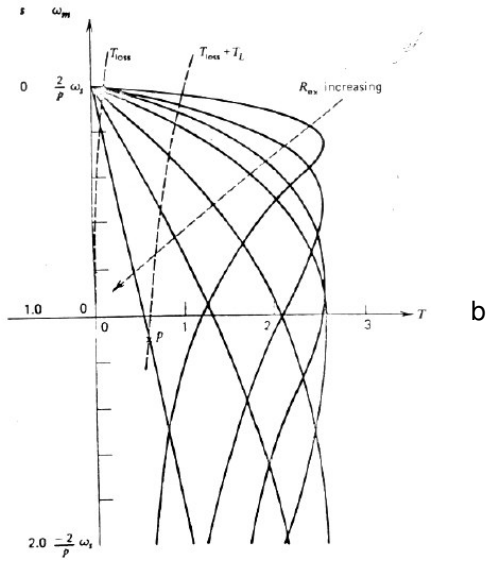
Se o escorregamento torna-se negativo, que é o caso quando o motor é acionado, com velocidade acima da velocidade síncrona, através de um sistema mecânico, o conjugado desenvolvido torna-se negativo e obtém-se a frenagem com regeneração, com a energia no sentido para a fonte de alimentação.

Um método alternativo de variação da resistência do circuito do rotor é mostrado na Fig. 9.5. Aqui a saída do rotor é retificada e aplicada a um único resistor variável. Este arranjo elimina qualquer perigo de desbalanceamento devido à desigualdade de um resistor trifásico, como mostrado na Fig. 9.4.a. O sistema da Fig. 9.5 poderia ser alterado através da introdução de um chopper entre o retificador e o resistor, o qual poderia ter um valor fixo. Este é um sistema para o qual uma malha de realimentação de velocidade poderia ser adicionada para proporcionar um controle velocidade independente do conjugado de carga. A desvantagem do retificador no circuito do rotor é que as correntes do rotor não são senoidais e as harmônicas são transferidas através do motor para a fonte de alimentação.

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{V}_a}{\left(R_s + R_r'/s\right) + j\,\omega_s\,L_L} \qquad (9.11)$$



a



b

Fig. 9.4 – Controle de velocidade de um motor com rotor bobinado através da variação da resistência externa ao circuito do rotor

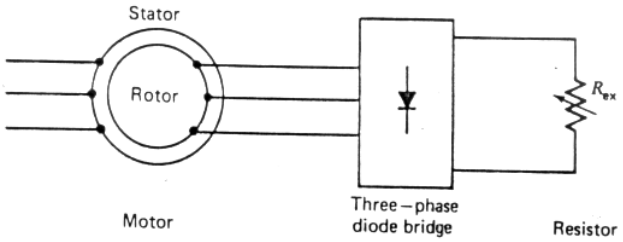


Fig. 9.5 – Método alternativo para a variação da resistência do circuito do rotor

8.3.2 – Variação da Tensão Terminal

Como o conjugado desenvolvido é proporcional ao quadrado da tensão aplicada, o controle de velocidade da carga do motor pode ser obtido através da variação da tensão terminal. Para isto, é necessário usar um motor de indução com rotor em gaiola classe D, com uma gaiola de alta resistência ou um motor com rotor bobinado com alguma resistência fixa inserida no circuito do rotor. Neste caso as curvas conjugado-velocidade poderiam ter a forma mostrada na Fig. 9.6. O motor com rotor bobinado tem uma vantagem que o calor gerado pela resistência do circuito do rotor, em sua maior parte, é produzida externamente a máquina e é facilmente dissipado. O motor pode ser portanto, menor que um com rotor em gaiola, para realizar o mesmo serviço. O controle com o motor com rotor em gaiola, tem a vantagem da simplicidade.

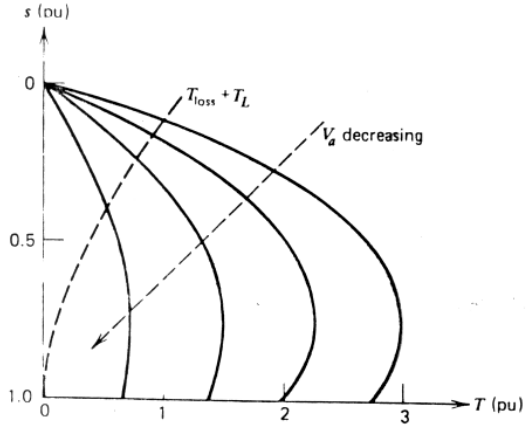


Fig. 9.6 – Controle de velocidade através da variação da tensão da fonte de alimentação

8.3.3 – Variação da Freqüência da Fonte de Alimentação

A velocidade síncrona de um motor de indução é dada por:

$$\omega_s = \frac{4\ \pi\ f}{p} \text{ ou } N_s = \frac{120.f}{p} \qquad (9.12)$$

Se a freqüência da fonte de alimentação puder ser variada, a velocidade do motor em carga e em vazio também poderá ser variada. Em algumas aplicações especiais a instalação era justificável, antes da introdução dos conversores de potência. A fonte para esta condição, poderia ser obtida através de um gerador CA, com a velocidade controlada por um motor CC. A curvas conjugado-velocidade obtidas com este sistema são ilustradas na Fig. 9.7. A característica de base é aquela obtida com a freqüência da fonte igual à freqüência padrão do sistema de potência ω_b para a qual o motor foi projetado.

Se o circuito magnético do motor não se torna saturado (ele é projetado para operar com um determinado grau de saturação) os circuitos equivalentes das Fig. 9.1 e 9.2, mostram que a tensão V_a precisa ser aumentada ou diminuída com ω_s. Se o efeito da impedância do estator pode ser ignorado, mantendo-se a relação V_a / ω_s constante, resultará num valor de I_{ma} constante e isto resultará em um grau de saturação e uma amplitude constante para a densidade de fluxo no entreferro. Somente em baixas freqüências o efeito de R_s torna-se maior que o de L_{ls}, sendo portanto necessário aumentar a relação V_a/ω_s.

A eq. (9.13) mostra que se mantendo a relação V_a/ω_s constante e se ω_s não for muito baixa, o conjugado máximo é mantido constante. Isto resulta em curvas paralelas, como mostrado na parte inferior da Fig. 9.7.

$$|T_{max}| = \frac{3p}{4}\ \frac{(V_a)^2}{(\omega_s\ L_L)^2} \qquad (9.13)$$

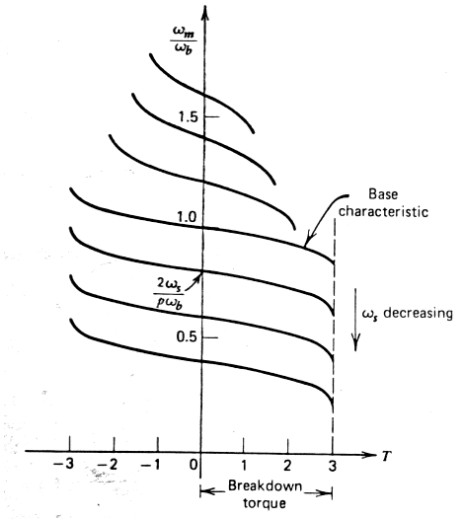


Fig. 9.7 – Operação do motor de indução com freqüência variável

A característica básica é obtida para tensão e freqüência nominais. Para velocidades acima das obtidas sob estas condições, ω_s deve ser aumentado, mas a tensão terminal não pode exceder o seu valor nominal, pela limitação da fonte de alimentação ou um limite imposto pelo isolamento do estator. Se a relação V_a / ω_s decresce, o conjugado máximo também diminuirá, mas não o produto $(s\ \omega_s)$ no qual ele ocorre. Portanto para freqüências maiores que a nominal, obtêm-se as características que mostradas na parte superior da Fig. 9.7. Esta corresponde a região de operação com enfraquecimento de campo de um motor CC com excitação independente e a expressão "enfraquecimento de campo" pode ser também aplicada ao motor de indução, pois com a diminuição da relação V_a/ω_s a amplitude do campo girante no entreferro do motor também diminui.

8.4 – Características Nominais

O diagrama na Fig. 9.7 é para operação como motor no sentido positivo de rotação para frenagem com regeneração. Se este diagrama for girado de 180° e o resultado adicionado a Fig. 9.7, o diagrama composto obtido, poderia ser tanto para operação com rotação no sentido positivo como negativo. A imposição de uma velocidade limite por razões mecânicas, poderia resultar em uma fronteira horizontal desde a parte superior até a parte inferior do diagrama e a adição de uma envoltória, através dos pontos de conjugado máximo em todas as curvas, resultaria em uma característica similar a máquina CC. Esta característica representa a fronteira que não poderia ser ultrapassada por nenhum ponto de operação do motor, em nenhuma circunstância, pois se fosse

ultrapassada, levaria o motor à condição de rotor bloqueado ou acionado a uma velocidade incontrolada no segundo quadrante.

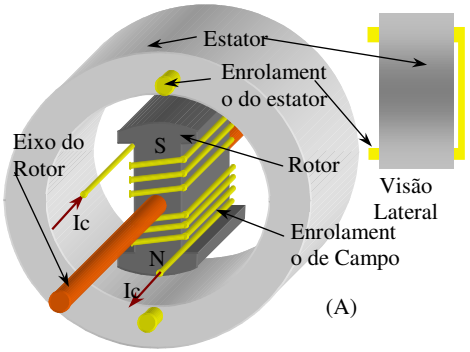
Se os pontos para operação com corrente permissível, forem marcados em cada curva e juntados para formar uma fronteira similar no mesmo formato, estes estariam dentro da região definida anteriormente e formariam a fronteira d com os pontos de operação contínua com a corrente permissível. Estes valores permissíveis de corrente para operação contínua são determinados pelo valor eficaz da corrente e ao valor da variação de fluxo.

Quando os terminais do estator de um motor de indução com rotor em gaiola são conectados a um conversor, a corrente e a variação do fluxo no motor não são funções senoidais no tempo, mas contêm harmônicas, as quais dependem da natureza do conversor e das condições de operação. As componentes harmônicas aumentam as perdas para uma dada potência mecânica, em relação àquelas quando o motor é alimentado por uma fonte convencional com tensão senoidal.

Os motores com rotor em gaiola classe B e C, são projetados para operar com velocidade constante, com alto conjugado e partida e baixa corrente de partida, e são providos de gaiola com ranhuras profundas ou dupla gaiola. O resultado é que os parâmetros do circuito equivalente do motor, variam com a velocidade. A variação de velocidade em um motor com rotor em gaiola, resulta também na variação do sistema de ventilação. A redução de ventilação devido a diminuição da velocidade para aproximadamente a metade, em sistemas com freqüência variável, é compensado pela redução das perdas no ferro que varia com a baixa freqüência. Para operação com uma velocidade e freqüência igual ao dobro da nominal, o aumento da ventilação, não é suficiente para dissipar o aumento de calor. Portanto para a operação sobre toda a faixa de velocidade, com freqüência variável, os motores classe B e C devem ter uma diminuição de sua capacidade em aproximadamente 20% para não ter sobreaquecimento.

O motor com rotor bobinado pode operar com os terminais do estator ou do rotor conectados a conversores. Em ambos os casos existem componentes harmônicas e este motor deve ter sua capacidade limitada para a faixa de velocidade.

CAPITULO 9. Gerador Síncrono (Alternadores)



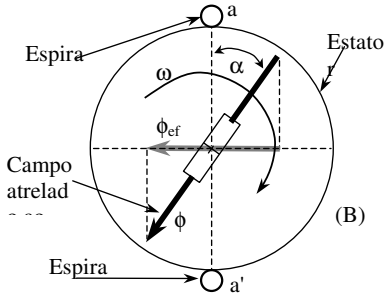


Figura 1 – Esquema 3D de um alternador monofásico (A) e seu corte transversal (B)

9.1 – Introdução

São máquinas elétricas girantes destinadas a gerar corrente alternada a partir de uma fonte mecânica. Uma ilustração tridimensional de um alternador monofásico com rotor de pólos salientes é mostrada na Figura 1 (A), onde Ic é a corrente de campo. Nessa figura, foram omitidos os anéis coletores, ilustrados na Figura 6 (A), que se ligam ao enrolamento de campo.

9.2 - Princípio de funcionamento (Alternador monofásico)

Vamos supor um campo magnético girando com velocidade ω no interior de uma espira, como mostra a Figura 1 (B). Pela Lei de Faraday, a tensão induzida será proporcional ao número de espiras e à variação do campo que atravessa essa espira.

Lei de Faraday

$$E = N \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

E = Tensão induzida (V)
N = número de espiras
ϕ = Fluxo (Wb)

Na figura 1 (B), o ângulo α é proporcional à velocidade de rotação (ω), podendo ser expresso como: $\alpha = \omega.t$

O fluxo que atravessa perpendicularmente a espira (ϕ_{ef}), será a projeção do fluxo total (ϕ) sob o eixo perpendicular à área da espira e pode ser expresso como: $\phi_{ef} = \phi.\text{sen}(\alpha) = \phi.\text{sen}(\omega.t)$. Então, pela Lei de Faraday, tem-se:

$E = N \cdot \frac{d(\phi \cdot \text{sen}(\omega \cdot t))}{dt}$, ou seja: $\boxed{E = N \cdot \phi \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)}$ (Eq. 1)

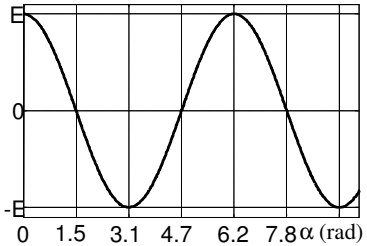


Figura 2 – Forma de onda gerada

Pela Eq. 1 pode-se ver que a tensão induzida tem a forma de um cosseno, ou seja, tem amplitude e período. A amplitude da tensão gerada é proporcional ao número de espiras (N), ao fluxo (ϕ) e à velocidade de rotação (ω), porém, a alteração na velocidade de rotação modifica a freqüência da onda (termo no interior do cosseno). A forma de onda gerada é mostrada na Figura 2. Nela é possível ver que quando

α=0, ou seja, quando o pólo Sul está exatamente sob o condutor **a**, a onda de tensão atinge o pico positivo. Quando o pólo Norte está sob o condutor **a**, ou seja, após o ímã ou o rotor ter girado meia volta, a onda atinge o valor de pico negativo, ou seja, completa meio período (a tensão é medida do ponto a' para o ponto a). Se tivéssemos no rotor um ímã como mostrado na Figura 3, com 4 pólos, o pólo Norte passaria pelo condutor **a** ¼ de volta após o pólo Sul ter passado pelo mesmo condutor, ou seja, a onda completaria um período quando o rotor completasse a metade da volta completa – a freqüência seria 2 vezes maior que para o ímã de 2 pólos. Se o rotor tivesse 6 pólos, a onda gerada completaria um ciclo quando o rotor completasse 1/3 da volta – a freqüência seria 3 vezes maior. Se o rotor tivesse 8 pólos, a onda completaria um ciclo a ¼ da volta no eixo – a freqüência seria 4 vezes maior. Se o rotor tivesse P pólos, a onda completaria um ciclo a 2/P da volta no eixo – a freqüência seria P/2 vezes maior. Com isso, pode-se concluir que podemos variar a freqüência da onda gerada, para uma mesma velocidade de rotação do campo, alterando o número de pólos (número de Nortes e Sul) da máquina, sendo que a freqüência será P/2 vezes a freqüência caso o rotor tivesse apenas dois pólos. A freqüência da onda gerada é função do conteúdo do cosseno, ou seja, da velocidade de rotação ω (rad/s), que é equivalente a $2 \cdot \pi \cdot f$, onde f é a freqüência de giro (em Hertz, ou voltas por segundo), a mesma freqüência da onda gerada (para o caso de 2 pólos). Portanto, a partir de $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, chega-se à seguinte conclusão: $f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \omega$. Tendo a velocidade (n) em rotações por minuto (rpm), podemos escrever: $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$ (rad/s) e conseqüentemente: $f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$ (Hz). Portanto, para o caso de um rotor com dois pólos, tem-se que a freqüência da onda gerada é: $f = \frac{n}{60}$ (Hz). Como visto anteriormente, o número de pólos (P) afeta a freqüência da onda proporcionalmente a P/2, portanto, para uma máquina de **p** pólos, a relação entre o número de pólos (p), a velocidade de rotação do eixo em rpm (n) e a freqüência da onda gerada (Hz) é dada pela equação: $f = \frac{p}{2} \cdot \frac{n}{60}$ ou $f = \frac{n \cdot p}{120}$.

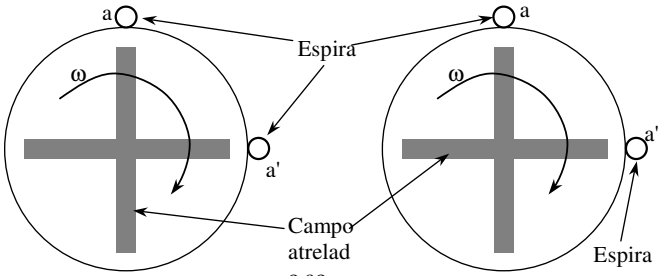


Figura 3 – Rotor com quatro pólos. Posição inicial (A) e após ¼ de volta

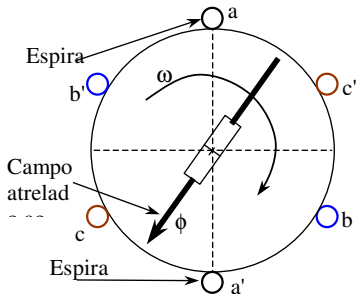
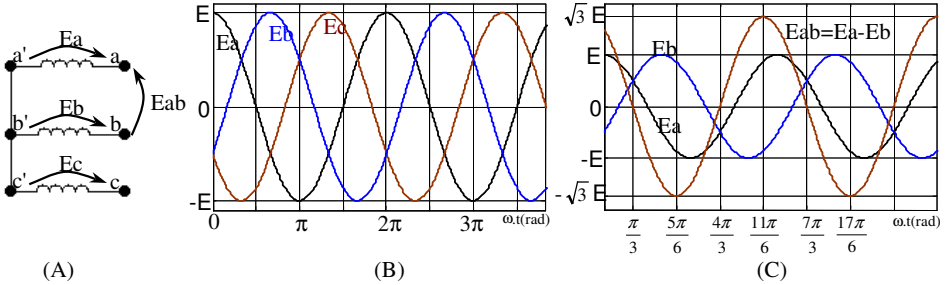


Figura 4 – Alternador trifásico

9.3 - Alternador Trifásico

Os hidrogeradores e demais geradores que alimentam a rede de distribuição são trifásicos, ou seja, a mesma máquina gera 3 ondas de tensão distintas ao mesmo tempo. Para conseguir isso, distribui-se as três espiras com um deslocamento de 120°. Com isso, as três formas de onda produzidas também serão defasadas uma das outras de 120°, portanto, entre uma fase e outra, haverá também uma diferença de potencial de forma senoidal porém de amplitude $\sqrt{3}$ vezes a amplitude de uma das fases. A figura 4 ilustra um alternador trifásico simplificado. Nessa figura, pode-se ver que logo após o pólo Sul passar pelo condutor **a** (pico positivo na bobina a), ele passará pelo condutor **c'** (pico negativo na bobina c) e em seguida, pelo condutor **b** (pico positivo na bobina b). A Figura 5 mostra um esquema de ligação das bobinas denominado ligação em **Y** bem como a forma de onda das três tensões induzidas e a diferença de potencial entre as fases **a** e **b.** Ea, Eb e Ec são chamadas tensões de fase e as tensões Eab=Ea-Eb, Eac e Ebc, são chamadas tensões de linha.



(A) (B) (C)

Figura 5 – Esquema de ligação das bobinas em Y (A), tensões de fase (B) e tensão de linha (C)

9.4 - Constituição Física

Nos alternadores, o local onde estão as bobinas onde serão induzidas as tensões geradas é denominado armadura, enquanto que a bobina que produz o campo que induzirá as tensões é denominada bobina de campo. Essas máquinas podem ser construídas de diversas maneiras, entre elas, podemos destacar:

- **Campo no estator**

No exemplo mostrado acima, o campo encontra-se no rotor. Porém, se quiséssemos construir o alternador com campo fixo no estator e a armadura no rotor, como ilustra a Figura 6 (A), também seria possível. Essa configuração possui a desvantagem da necessidade de seis anéis coletores para o caso de alternadores trifásicos (2 para cada fase), além do rotor possuir menos espaço físico para disposição dos enrolamentos e grande inércia. Pode-se dizer com pequena margem de erro que essa configuração não é utilizada para alternadores.

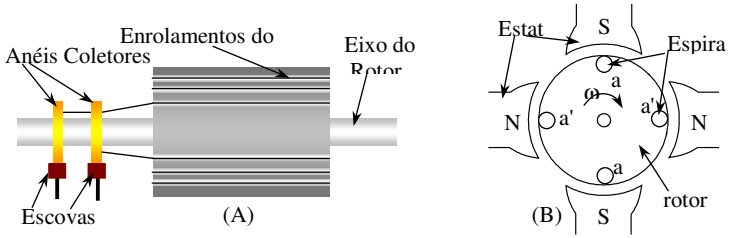


Figura 6 – Máquina com campo no estator (A) e campo disposto no rotor e anéis

- **Campo no rotor**

Com o campo disposto no rotor e a armadura no estator, tem-se a vantagem da necessidade de apenas 2 anéis coletores para alimentação do campo no rotor, como ilustra a Figura 6 (B), além de, no caso de geração em alta tensão, as conexões de alta tensão (tensões induzidas no estator) estarem fixas, sem as partes móveis dos coletores. A alimentação do campo, é feita em baixa tensão, o que facilita sua isolação. Outras vantagens que podem ser citadas na utilização do campo no rotor são:

Vantagens na Ventilação: A maior parte do calor é produzida no enrolamento da armadura. Estando esse enrolamento no estator, onde os limites de tamanho são menos rigorosos, a construção da máquina para melhoramento da refrigeração é facilitada.

Peso e inércia do rotor reduzidos: Um enrolamento de campo de baixa tensão, com muitas espiras e condutor fino, dificilmente requererá a mesma quantidade de cobre e isolação que um enrolamento trifásico de alta tensão. Estando o primeiro no rotor, a dimensão do mesmo e conseqüentemente sua inércia e peso podem ser bastante reduzidos.

Melhoria do Isolamento: Alternadores de alta capacidade, geralmente carregam altas correntes a tensões apreciáveis. É mais fácil isolar um membro estacionário que um rotativo, portanto, o enrolamento da armadura no estator facilita sua isolação.

- **Rotor com Pólos Salientes**

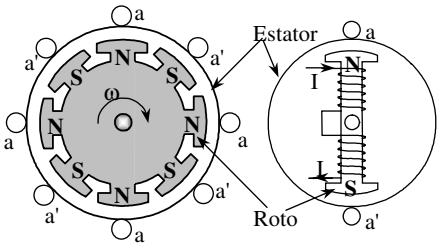


Figura 7 – Rotores com pólos Salientes

Rotores com pólos salientes são mostrados na Figura 7. Nesses tipos de máquinas o entreferro não é uniforme, devido à saliência do rotor. Um alternador com pólos salientes é utilizado geralmente para geração em baixas velocidades, como os hidrogeradores, possuem uma grande quantidade de pólos (mais de 50) e o rotor é geralmente curto e possui um grande diâmetro, para abrigar os enrolamentos de campo.

- **Rotor Cilíndrico**

Os alternadores com rotor cilíndrico, ou pólos não salientes, possuem o entreferro constante. São utilizados geralmente para geração em altas velocidades - como em turbinas a vapor -, possuem uma pequena quantidade de pólos devido à alta velocidade e são de rotores de pequeno diâmetro e grande comprimento. A

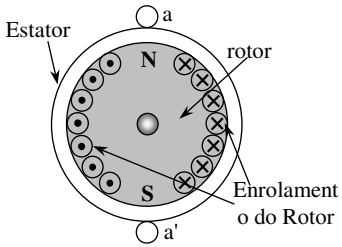


Figura 8 – Máquina com rotor cilíndrico

Figura 8 ilustra uma máquina com rotor cilíndrico de 2 pólos.

- **Modos de excitação**

A excitação do campo nos alternadores pode ser dar de diversas maneiras, dentre elas, destacamos:

a) Gerador CC no próprio eixo
Nessa forma de excitação um gerador CC autoexcitado é acoplado ao eixo do da máquina AC, gerando a tensão CC que alimenta o campo do alternador.

b) Excitação Independente
O campo é alimentado por uma fonte CC externa.

c) Excitação pelo próprio alternador
No caso de induzido rotativo, a alimentação do campo (no estator) se dá através da montagem de um comutador no eixo do alternador que converte a tensão AC em CC.
Nos casos de induzido fixo, a tensão AC gerada é convertida em CC através da utilização de um circuito retificador que alimenta o campo. Na partida, o campo é alimentado em frações de segundos por um banco de baterias.

9.5 - Funcionamento

- **Funcionamento a Vazio**

A característica de tensão a vazio de um alternador é idêntica à de um gerador CC. Da mesma forma que o gerador CC, quando acionamos o alternador com velocidade nominal e aumentamos a partir de zero sua corrente de excitação, obtemos os valores de fem induzida. A característica a vazio ou curva de magnetização do alternador, ilustrada na Figura 9, refere-se sempre a uma determinada velocidade e permite avaliar o estado de saturação do circuito magnético da máquina em condições normais de funcionamento. Para levantarmos a curva de magnetização devemos realizar a montagem indicada na Figura 10.

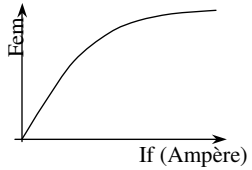


Figura 9 – Curva de magnetização

- **Funcionamento com carga**

Quando é adicionado carga ao alternador, a tensão gerada e a tensão na carga se diferenciam, devidos dentre outros, à característica da carga e à impedância síncrona. A impedância síncrona (Zs), como descrito na Eq. 2, é composta pela resistência da armadura Ra e pela reatância síncrona (Xs), que por sua vez é composta pela reatância da armadura (Xa) mais a reatância equivalente da reação da armadura (Xar). $Zs = Ra + Xs$, onde $Xs = Xa + Xar$ (Eq. 2)

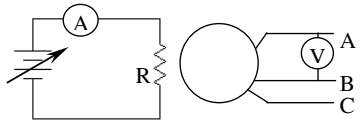


Figura 10 – Esquema de ligação para levantamento da curva de magnetização do alternador.

A impedância síncrona pode ser estimada curtocircuitando-se o gerador e aumentando-se gradativamente a excitação do campo até a corrente no estator atingir seu valor nominal. A partir daí, com base na corrente de campo e na curva de magnetização, tem-se a tensão gerada Eg, que dividida pela corrente de curto-circuito, nos dá a impedância síncrona. Cargas indutivas, provocam uma desmagnetização do gerador, diminuindo a tensão gerada e cargas capacitivas provocam uma super magnetização, aumentando a tensão gerada. A regulação de tensão no gerador é

calculada subtraindo-se a tensão gerada (Eg) pela tensão na carga (Vc) e dividindo o resultado pela tensão na carga, como descrito na Eq. 3.

$$\text{Re}\, g = \frac{Eg - Vc}{Vc} \quad \text{ou} \quad \text{Re}\, g(\%) = \frac{Eg - Vc}{Vc} \cdot 100\% \quad \text{(Eq. 3)}$$

9.6 - Operação em paralelo

As máquinas elétricas em geral são projetadas para funcionamento dentro de uma faixa bastante restrita. Essa faixa de operação coincide com a condição nominal da máquina, onde eficiência da mesma é maximizada e fora dela a máquina opera muitas vezes sem nenhum dano, porém, não com a mesma eficiência. Os alternadores não fogem à regra, tendo seu ponto de operação com máxima eficiência em sua condição nominal. Portanto, quanto mais próximo da condição nominal um alternador funcionar, melhor estará sendo o seu aproveitamento.

As flutuações de carga ao longo do dia são enormes, sendo a utilização do sistema em horários de pico, muito maior que por exemplo, de madrugada. Visto essa variação, é extremamente útil a utilização de vários alternadores de menor capacidade, que vão sendo acionados para funcionamento em paralelo com outros alternadores à medida que a carga vai aumentando, fazendo sempre que todos operem o mais próximo possível de sua condição nominal. A utilização de várias unidades de geração também é útil visto a necessidade de manutenção, onde uma unidade pode estar fora de utilização para reparo enquanto as outras suprem (dentro do possível) a demanda, sem comprometimento de toda a usina. Contudo, a operação em paralelo requer o atendimento de alguns requisitos:

1. Os valores eficazes das tensões devem ser idênticos;
2. As tensões de todos os alternadores a serem ligados em paralelo devem ter a mesma forma de onda;
3. As tensões devem estar exatamente em oposição de fases (um alternador em relação ao outro ou em relação ao barramento);
4. As freqüências devem ser a mesma;
5. As características combinadas de tensão total dos alternadores e da velocidade da máquina devem ser descendentes com a aplicação de carga. (A máquina deve diminuir a velocidade e com a diminuição da velocidade, deve-se ter uma diminuição da tensão gerada, para evitar que com aumento da carga, a máquina dispare);
6. Para alternadores trifásicos, a seqüência de fases deve ser a mesma.

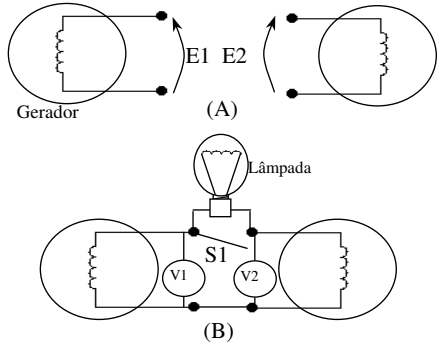


Figura 11 – Paralelismo de Alternadores Monofásicos

No sistema de distribuição, como em condições normais já há vários geradores funcionando em paralelo, diz-se que o sistema é um barramento infinito, de freqüência, tensão e seqüência de fases fixos. Com isso, para a operação em paralelo com esse barramento uma unidade geradora deve atender aos requisitos específicos desse barramento (tensão, freqüência, etc).

Vamos primeiro analisar dois alternadores monofásicos, como mostrado na Figura 11 (A). Para que eles possam ser ligados em paralelo, a forma de onda de E1 deve ser idêntica à de E2 e as duas devem estar em fase, ou seja, quando E1 atingir o pico positivo, E2 no mesmo instante deve atingir o pico positivo. Um método simples para realizar tal tarefa é utilizando-se uma lâmpada e dois voltímetros, como mostrado na Figura 11 (B). Nessa ilustração, Com os valores de V1 e V2 iguais, a lâmpada piscará se as freqüências estiverem diferentes, terá um brilho constante se as ondas tiverem a mesma freqüência porém estiverem defasadas e ficará apagada se as ondas estiverem em fase. Nesse momento (quando a lâmpada permanecer apagada), a chave S1 pode ser fechada, colocando assim os dois geradores para funcionar em paralelo. Em alternadores trifásicos, o sincronismo desejado é o mesmo para o caso monofásico, com a diferença das três fases terem que atender aos requisitos ao mesmo tempo. Haverão apenas duas seqüências de fases, pois o rotor do alternador só pode girar em dois sentidos distintos, portanto, a seqüência de fases, que a princípio parece ser um grande complicador, pode ser facilmente descoberta ligando-se um pequeno motor de indução trifásico ao barramento e logo após, ao gerador. Se o sentido de rotação for o mesmo, a seqüência de fases é a mesma, se o sentido de rotação for diferente, quaisquer duas fases do gerador devem ser invertidas, de modo a alterar a seqüência de fases. Descoberto a seqüência de fases, cabe agora a sincronização. Existem ferramentas específicas para descobrir a seqüência de fases (indicador de seqüência de fases) e para obter sincronização (sincronoscópio), porém, procedimentos simples como do caso monofásico podem ser utilizados para o mesmo objetivo, porém, com menor precisão. A Figura 12 ilustra procedimentos para sincronizarmos alternadores trifásicos, após descoberta a seqüência de fases.

A Figura 12 (A) ilustra um método denominado Método da Lâmpada Apagada. Nesse método, liga-se através de lâmpadas as fases pares dos dois geradores. Com o mesmo valor lido em V1 e V2, se as lâmpadas piscarem, os dois geradores estão com freqüências diferentes, portanto, deve-se variar a velocidade de um dos dois até que as Lâmpadas parem de piscar. Igualadas as freqüências, iguala-se novamente o valor de V1 e V2, ajustando a excitação. Se as lâmpadas estiverem acesas, as ondas dos dois geradores estarão defasadas. Deve-se então variar lentamente a velocidade de um dos geradores até que as lâmpadas estejam apagadas.

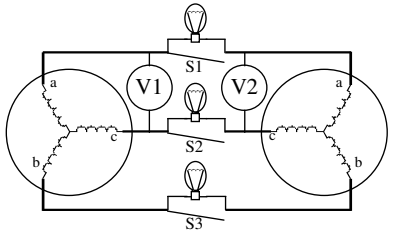


Figura 12 (A) – Método das Lâmpadas para sincronização.
Lâmpada Apagada

No Método da Lâmpada Acesa, ilustrado na Figura 12 (B), cada fase de um gerador é ligada a uma outra fase do outro gerador que não seja a fase correspondente. Nesse método, busca-se o ponto onde as três lâmpadas estão acesas na intensidade máxima.

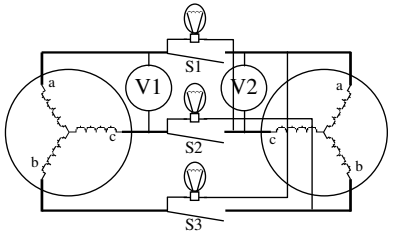


Figura 12 (B) – Método das Lâmpadas para sincronização.
Lâmpada Acesa

Um terceiro método, ilustrado na Figura 12 (C) e denominado Método da Lâmpada Girante ou Método do Fogo Girante, uma fase é ligada à fase correspondente no outro gerador ou no barramento e as outras duas são invertidas. Nesse método, teremos duas lâmpadas acesas e uma apagada, piscando sucessivamente quando não sincronizados os geradores. O momento certo do fechamento das chaves (S1 a S3) é quando a lâmpada que interliga as duas fases correspondente nos alternadores (fase **c** na Figura 12 letra C) permanece constantemente apagada enquanto as outras duas lâmpadas permanecem acesas em seu brilho máximo e as leituras nos dois voltímetros V1 e V2 são idênticas.

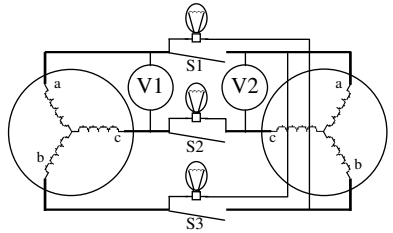


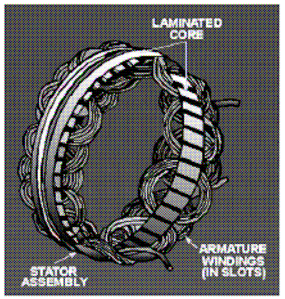
Figura 12 (C) – Método das Lâmpadas para sincronização.
Lâmpada Girante – duas acesas e uma apagada

CAPITULO 10 - . MOTORES SÍNCRONOS

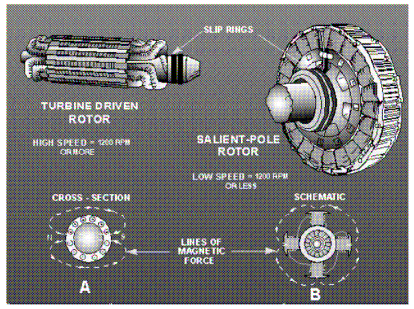
10.1 – Introdução

O motor síncrono recebeu este nome porque o movimento do seu rotor é sincronizado com o campo girante estabelecido no estator.

Os motores síncronos funcionam através da aplicação de uma tensão alternada nos terminais do estator (induzido), excitando o campo rotórico por meio de uma fonte de corrente contínua que pode ser diretamente obtida de uma rede de CC., de um conjunto retificador, de uma excitatriz diretamente acoplada no eixo do motor, comumente chamada dínamo, ou de um grupo motor gerador. Geralmente a excitação do campo rotórico é feita através de anéis coletores acoplados ao eixo do motor.



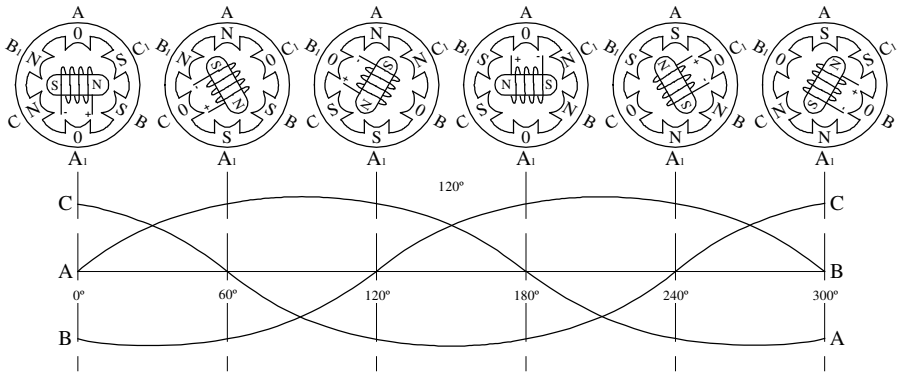
Enrolamento estatórico de uma Máquina Síncrona



Tipos de Máquinas Síncronas

10.2 – Princípio de Funcionamento

A aplicação de uma CA. trifásica ao estator produz um campo magnético girante em torno do rotor $(N_S = 120.f/p)$. Quando o rotor é energizado com CC, ele atua como um ímã em barra suspenso em um campo magnético que gira até se alinhar com o campo magnético. 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, e este, portanto se torna capaz de acionar uma carga.

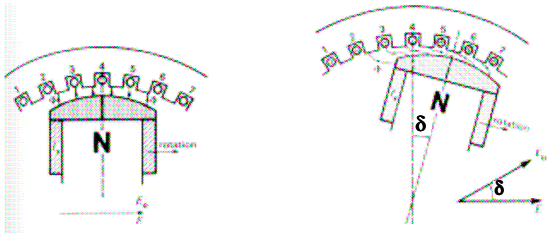


Os motores síncronos, comparativamente aos motores de indução, são de pequena utilização em instalações industriais.

A corrente absorvida pelo circuito estatórico (I_a) é função da corrente de excitação (I_f) para uma determinada carga acionada pelo motor. Quando o motor está girando a vazio, a corrente do estator é praticamente igual à corrente de magnetização. Se for acoplada ao motor uma carga mecânica, a corrente absorvida pelo estator aumentará, estabelecendo um conjugado motor suficiente para vencer o conjugado resistente.

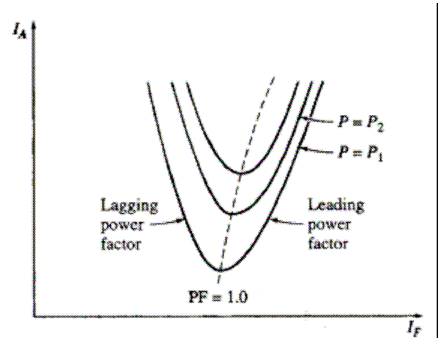
10.3 – O Motor Síncrono como Impedância (Variação do Fator de Potência)

Quando uma carga é aplicada, o rotor responde com um ângulo de fase (δ) em relação ao campo. Observe que a velocidade ainda é síncrona, mas a fase entre o rotor e o campo varia. Nessas condições, o fator de potência é comumente em atraso. À medida que aumenta a corrente contínua de excitação, o fator de potência torna-se unitário e a seguir adiantado. Assim para uma dada carga, o fator de potência do motor síncrono é determinado pela corrente contínua de excitação.



Representação física do ângulo de carga (δ)

Quando a corrente de excitação é de valor reduzido, isto é, o motor está sub-excitado, a força eletromotriz induzida no circuito estatórico é pequena, fazendo com que o estator absorva da rede de alimentação uma determinada potência reativa necessária à formação de seu campo magnético e cuja corrente está atrasada em relação à tensão da rede. Se a corrente de excitação for aumentada gradativamente, mantendo-se a grandeza da carga, conseqüentemente elevando-se o valor da força eletromotriz no estator, deve-se chegar num determinado instante em que a corrente estatórica, até então atrasada, deve ficar em fase com a tensão da rede, significando um fator de potência unitário. Se este procedimento continuar, isto é, se a corrente de excitação for aumentada ainda mais, a corrente estatórica se adiantará em relação à tensão, caracterizando a sobre-excitação do motor síncrono, fazendo com que este passe a fornecer potência reativa à rede, trabalhando com um fator de potência capacitivo.



Corrente do induzido (I_a) x Corrente de campo (I_f)

Isto é verificado graficamente nas curvas ao lado, que mostram as variações da corrente do campo, sob carga, para várias condições de fator de potência.

O fator de potência da maioria das cargas, por exemplo, de motores de indução, é indutivo (em atraso). O fator de potência de um motor síncrono pode ser unitário, adiantado ou atrasado, dependendo da excitação de CC. Sob condições sem carga, a corrente solicitada por um motor síncrono é pequena.

Este é o princípio básico da correção do fator de potência de uma instalação, utilizando um motor síncrono em alternativa a banco de capacitores.

A utilização de motores síncronos acionando determinados tipos de carga mecânica, para correção de fator de potência de uma instalação industrial, requer cuidados adicionais com respeito às flutuações no conjugado, devido à natureza da própria carga. Também, motores síncronos de potência inferior a 50cv, não são adequados à correção do fator de potência, em virtude da sensibilidade de perda de sincronismo, quando da ocorrência de flutuações de tensão na rede de alimentação.

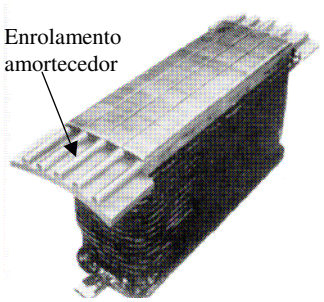
10.4 – Partida do Motor Síncrono

Os motores síncronos apresentam dificuldades operacionais práticas, pois necessitam de fonte de excitação e de manutenção constante muitas vezes dispendiosa.

Uma das desvantagens de utilização do motor síncrono puro é que ele não pode partir de uma posição de repouso apenas com a aplicação da CA ao estator. No instante em que a CA é aplicada ao estator, aparece um campo girante de alta velocidade. Este campo girante passa diante dos pólos do rotor tão rapidamente que o rotor não tem oportunidade de partir; ele é repelido primeiro em um sentido e a seguir no outro. Em outras palavras, um motor síncrono em sua forma pura não apresenta conjugado de partida. É necessário que se leve o mesmo a uma velocidade suficiente próxima da velocidade síncrona, a fim de ele possa entrar em sincronismo com o campo girante.

São empregados vários recursos para tal finalidade, dos quais são citados dois:

- Utilização de um motor de corrente contínua acoplado ao eixo do motor síncrono;
- Utilização de enrolamento de compensação (enrolamentos amortecedores).



Pólo saliente de um MS.

Durante a partida do motor síncrono dotado de enrolamentos de compensação, também conhecidos como enrolamentos amortecedores, o enrolamento de campo de corrente contínua deve ser curto-circuitado, enquanto se aplica a tensão da rede nos terminais do estator, até levar o motor, a vazio, à condição de sincronismo, semelhantemente a um motor de indução. A seguir, desfaz-se a ligação de curto-circuito do enrolamento de campo e aplica-se nele uma corrente contínua, ajustando-se adequadamente à finalidade de utilização a que se propõe.

Construtivamente, os enrolamentos de compensação podem ser do tipo gaiola de esquilo ou do tipo rotor bobinado.

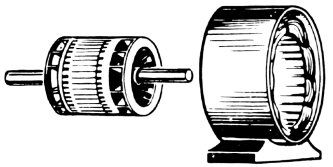
Portanto, ele é posto em movimento com auxílio de um pequeno motor de indução, ou com enrolamento equivalente incorporado ao motor síncrono. Quando o rotor se aproxima da velocidade síncrona graças ao dispositivo de partida, ele passa a ser energizado pela fonte de CC. O rotor passa então a acompanhar o campo girante. Um motor desse tipo é conhecido como de indução na partida e funcionamento síncrono.

Quando se dá partida em um motor síncrono, há movimento relativo entre o campo girante e o rotor e, assim, aparece uma tensão alternada no enrolamento do rotor de pólos salientes. Isto pode auxiliar o rotor gaiola, proporcionando conjugado de partida adicional para por em movimento o motor síncrono.

CAPITULO 11 - MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS

11.1 – Introdução

Os motores elétricos de indução monofásicos são de pequeno uso em instalações industriais. De um modo geral, são empregados em locais onde não se dispõe de alimentação trifásica, como residências, escritórios, oficinas e em zonas rurais.



Dentre os vários tipos, os motores com rotor do tipo gaiola de esquilo se destacam pela simplicidade de fabricação e, principalmente, pela robustez, confiabilidade e longa vida sem necessidade de manutenção.

São construídos, normalmente, para pequenas potências, em geral até 15cv, e apresentam fator de potência em atraso entre 0,6 e 0,8.

11.2 – Tipo de Motores 1Ø

Os motores monofásicos, por terem somente uma fase de alimentação, possuem campo magnético pulsante. Tendo em vista que no rotor se induzem campos magnéticos alinhados com o campo do estator, isto impede que tenham conjugado para partida. Não é prático acionar o rotor com as mãos. Para solucionar o problema, utiliza-se um arranjo auxiliar de forma a criar uma segunda fase fictícia, permitindo a formação do campo girante necessário para a partida.

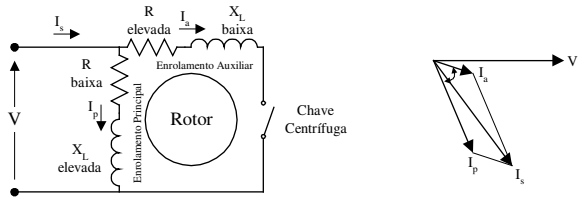
Existem basicamente cinco tipos mais usuais de motores de indução monofásicos com rotor gaiola, classificados de acordo com o arranjo auxiliar de partida empregado:

- Motor de Fase Dividida
- Motor de Capacitor de Partida
- Motor de Capacitor de Partida Permanente
- Motor com Dois Capacitores
- Motor de Campo Distorcido ou Pólos Sombreados

a) Motor de Fase Dividida

Este motor possui no estator um **enrolamento principal** em quadratura com um **enrolamento auxiliar** de partida, ambos ligados à mesma rede de alimentação monofásica de corrente alternada.

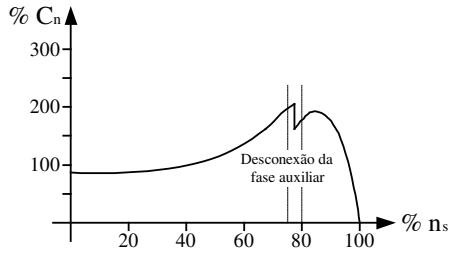
O enrolamento principal é distribuído uniformemente nas ranhuras em volta do estator, e apresenta normalmente uma baixa resistência e uma elevada reatância.



O enrolamento auxiliar é também distribuído uniformemente em volta do estator, mas inicia em ranhuras defasadas de um ângulo de 90º do início do enrolamento

principal. Tem uma elevada resistência e uma baixa reatância, de modo que sua corrente esteja adiantada no tempo em relação a corrente do enrolamento principal, aproximadamente de um ângulo de 25º. A corrente no enrolamento principal é maior que a no enrolamento auxiliar. A finalidade essencial do enrolamento auxiliar é de criar um conjugado necessário para a rotação inicial e a conseqüente aceleração do rotor no sentido do campo girante produzido pelas correntes.

A chave centrífuga mantém em união um bloco de contatos com os contatos do enrolamento auxiliar através de molas, de modo que o circuito está fechado na partida. À medida que aumenta a velocidade do motor, pesos são deslocados para fora, superam a tensão das molas e afastam o bloco de contatos abrindo o circuito do enrolamento auxiliar, o qual permanece aberto enquanto o motor estiver funcionando.



O enrolamento auxiliar é desconectado da rede através da chave centrífuga a uma rotação situada entre 75% a 80% da velocidade síncrona, pois, nesse intervalo de velocidades, o conjugado produzido pelo campo pulsante do enrolamento principal excede àquele desenvolvido pelos dois enrolamentos combinados. É evidente também, que a corrente do enrolamento principal sozinha produz menos perdas, já que aquelas do enrolamento auxiliar são eliminadas.

Em alguns casos específicos, o enrolamento auxiliar é desconectado por um relé de corrente, uma chave manual ou outros dispositivos especiais.

Como o enrolamento auxiliar é dimensionado para atuação somente na partida, seu não desligamento provocará a sua queima.

Empiricamente, pode-se estabelecer que o conjugado de partida é proporcional ao seno do ângulo entre as correntes nos enrolamentos principal e auxiliar, no instante de partida. Como esse ângulo de defasagem é pequeno, estes motores têm conjugado de partida igual ou pouco superior ao nominal, o que limita a sua aplicação a potências estacionárias e a cargas que exigem um moderado conjugado de partida, tais como ventiladores, exaustores, pequenos polidores, compressores herméticos, bombas centrífugas, etc. Normalmente são construídos em potências fracionárias que não excedem a ¾ de cv.

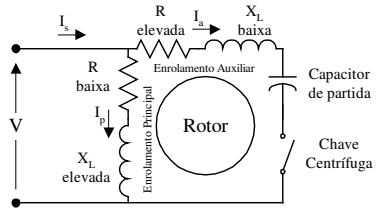
A corrente de rotor bloqueado varia entre 5 a 7 vezes a corrente nominal, mas não constitui um problema, uma vez que os rotores desse tipo de motor são de tamanho reduzido, apresentando uma baixa inércia mesmo quando ligados à carga, o que faz com que a corrente de partida relativamente elevada caia quase que instantaneamente.

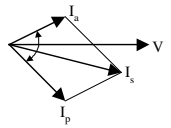
Para inverter-se o sentido de giro do motor de fase dividida, é necessário inverter a polaridade dos terminais de ligação da rede em relação a um dos enrolamentos, principal ou auxiliar. A inversão do sentido de giro nunca pode ser feita em condições de funcionamento, e por isso, o motor de fase dividida é classificado como um motor “não reversível”.

O controle de velocidade em motores de fase dividida deve ser realizado numa faixa bastante limitada, que se situa acima da velocidade de operação da chave centrífuga e abaixo da velocidade síncrona. Entretanto, o controle de velocidade é muito difícil, já que sua velocidade síncrona é determinada pela freqüência da rede e pelo número de pólos desenvolvidos pelo enrolamento principal.

b) Motor de Capacitor de Partida

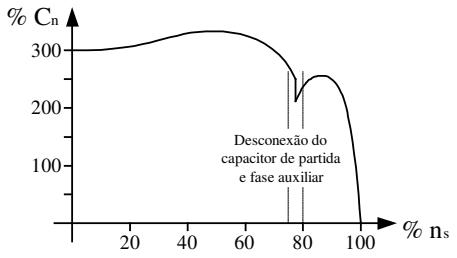
É um motor semelhante ao de fase dividida. A principal diferença reside na inclusão de um capacitor eletrolítico em série com o enrolamento auxiliar de partida. O capacitor permite um maior ângulo de defasagem entre as correntes dos enrolamentos principal e auxiliar, cerca de 80º, proporcionando assim, elevados conjugados de partida.





O uso do capacitor também tende a reduzir a corrente de rotor bloqueado, uma vez que melhora o fator de potência, fornecendo uma componente da corrente que se adianta em relação à tensão aplicada.

Para velocidades entre 80% e 90% da velocidade síncrona, a curva de conjugado com os enrolamentos combinados cruza a curva de conjugado do enrolamento principal. Para velocidades acima deste ponto o motor desenvolve, para qualquer escorregamento, menor conjugado com o circuito auxiliar ligado do que sem ele. Devido ao fato de o cruzamento das curvas não ocorrer sempre no mesmo ponto e o disjuntor centrífugo não abrir sempre exatamente na mesma velocidade, é prática comum fazer com que a abertura aconteça, na média, um pouco antes do cruzamento das curvas.



Como no motor de fase dividida, o circuito auxiliar é desconectado quando a rotação do motor atinge 75% a 80% da velocidade síncrona. Neste intervalo de velocidades, o enrolamento principal desenvolve sozinho quase o mesmo conjugado que os dois enrolamentos combinados. Após a desconexão do circuito auxiliar o seu funcionamento é idêntico ao do motor fase dividida.

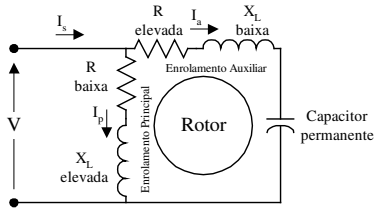
Devido ao dimensionamento do enrolamento auxiliar e do capacitor de partida basear-se apenas no seu funcionamento intermitente, uma chave centrífuga de partida defeituosa, poderá causar danos não apenas aos enrolamentos do motor, mas também ao capacitor.

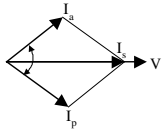
Com o seu elevado conjugado de partida (entre 200% a 300% do conjugado nominal), o motor de capacitor de partida pode ser utilizado para acionar bombas, compressores, unidades de refrigeração, condicionadores de ar e máquinas de lavar de grande porte. É fabricado em tamanhos de potência inteira que vão de ¼ cv a 15 cv.

Igualmente aos motores de fase dividida, para inverter-se o sentido de giro dos motores de capacitor de partida, é necessário inverter a polaridade dos terminais de ligação da rede em relação a um dos enrolamentos. Mas, diferentemente dos motores de fase dividida, é possível realizar a inversão do sentido de giro com o motor em funcionamento, isto é, o motor de capacitor de partida é “reversível”.

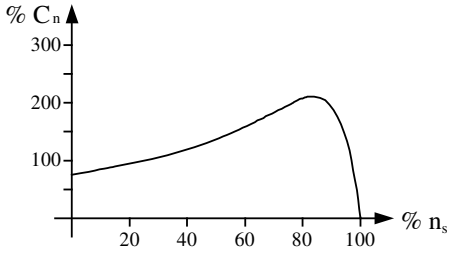
c) Motor de Capacitor Permanente

Neste tipo de motor, o enrolamento auxiliar e o capacitor ficam permanentemente ligados à rede. Construtivamente são menores e isentos de manutenção pois não utilizam contatos e partes móveis como nos motores anteriores.

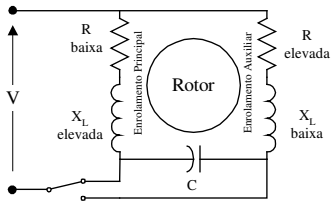




O valor do capacitor utilizado é baseado nas condições ideais de funcionamento: alto conjugado máximo, alto rendimento e alto fator de potência. Entretanto, esse valor é pequeno demais para as finalidades de partida, resultando num conjugado de partida muito baixo, compreendido entre 50% a 100% do conjugado nominal, o que limita a sua aplicação a equipamentos que não requeiram elevado conjugado de partida, tais como: bombas centrífugas, ventiladores, exaustores, sopradores, esmeris, pequenas serras, furadeiras, condicionadores de ar, pulverizadores, etc. Normalmente são fabricados para potências fracionárias de $^1/_{50}$ cv a 1,5 cv.



O motor de capacitor permanente é classificado como um motor “reversível”. Devido ao seu baixo conjugado de funcionamento, se a polaridade dos terminais de ligação da rede é invertida em relação a um dos enrolamentos, o seu sentido de giro também se inverte.



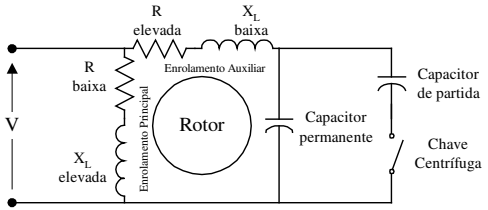
Seu sentido de giro pode ser facilmente invertido com a construção de um motor de dois enrolamentos idênticos ligados a um único capacitor, como mostra a figura. Uma chave reversora, colocada externamente ao motor, permite que se desloque o capacitor para qualquer um dos dois enrolamentos, o que faz com que aconteça a inversão.

Devido ao campo magnético girante, razoavelmente uniforme, criado pelos dois enrolamentos idênticos, cujas correntes estão defasadas de aproximadamente 90º, o conjugado de funcionamento do motor de capacitor permanente não apresenta a característica pulsante comum à maioria dos motores monofásicos quando carregados, o que o torna menos ruidoso.

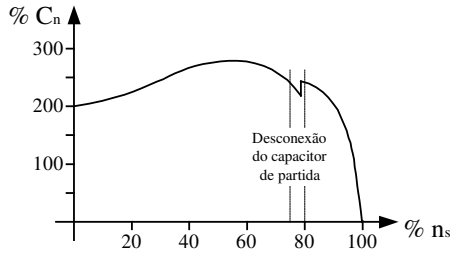
Devido a sua sensibilidade às variações da tensão aplicada, o motor a capacitor permanente permite o controle limitado da velocidade através da variação da tensão da rede.

d) Motor de Dois Capacitores

O motor com dois capacitores combina as vantagens da operação silenciosa e do controle limitado de velocidade de um motor de capacitor permanente, com o conjugado de partida elevado de um motor de capacitor de partida.



Nele se utilizam dois capacitores durante o período de partida. Um deles é um capacitor eletrolítico de partida, de capacidade razoavelmente elevada, cerca de 10 a 15 vezes o valor do capacitor de funcionamento, que é desligado do circuito através de uma chave centrífuga quando a velocidade do motor atinge 75% a 80% da velocidade síncrona.



É classificado como um motor “reversível”, pois, quando em funcionamento, se a polaridade dos terminais de ligação da rede é invertida em relação a um dos enrolamentos, o seu sentido de giro também se inverte.

Inversões freqüentes reduzem a vida útil da chave centrífuga. Por isso, quando se realizam freqüentes reversões prefere-se usar um motor de capacitor permanente.

Devido ao alto custo, normalmente são fabricados em potências superiores a 1 cv.

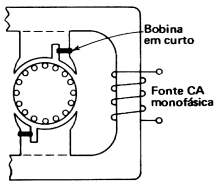
e) Motor de Campo Distorcido ou Pólos Sombreados

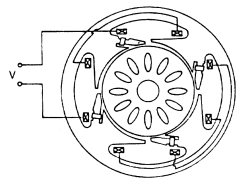
O motor de campo distorcido se destaca entre os motores de indução monofásicos por seu processo de partida, que é mais simples, confiável e econômico.

Construtivamente existem três tipos:

- de pólos salientes
- tipo esqueleto
- de enrolamento distribuído

A forma mais comum é a de pólos salientes. Os pólos consistem das laminações e de uma espira de cobre em curto-circuito enrolada numa ranhura localizada em torno de um segmento, em geral 25% a 30%, de cada peça polar.



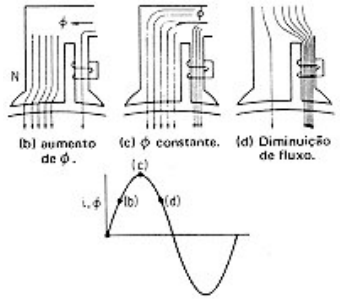


Motor de 2 pólos

A corrente induzida nesta espira faz com que o fluxo que atravessa a parte da peça polar abraçada pela espira, sofra um atraso em relação ao fluxo da parte não abraçada. O resultado disto é semelhante a um campo girante que se move na direção da parte não abraçada para a parte abraçada do pólo, produzindo um conjugado que fará o motor partir e atingir a rotação nominal.

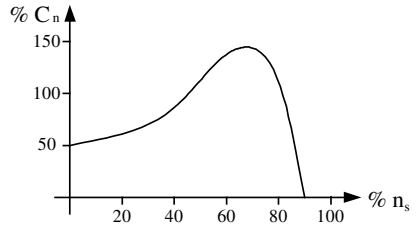
O sentido de rotação depende do lado em que se situa a parte abraçada do pólo. Conseqüentemente, o motor de campo distorcido apresenta um único sentido de rotação. Este pode geralmente ser invertido, mudando-se a posição da ponta de eixo do rotor em relação ao estator.

Motor de 4 pólos



Relação da variação da corrente e do fluxo nos pólos

De forma geral o controle de velocidade dos motores de campo distorcido consiste em reduzir-se a tensão de alimentação aplicada.



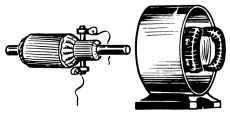
Quanto ao desempenho, os motores de campo distorcido apresentam baixo conjugado de partida (15% a 50% do nominal), baixo rendimento e baixo fator de potência. Devido a esses fatos, eles são normalmente fabricados para pequenas potências fracionárias, que vão de alguns milésimos de cv até o limite de ¼ cv, embora as duas últimas considerações tenham pouca importância quando se trata de pequenos motores.

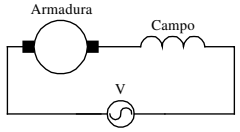
Pela sua simplicidade, robustez e baixo custo são ideais em aplicações tais como: movimentação de ar (ventiladores, exaustores, purificadores de ar, unidades de refrigeração, secadoras de roupas e secadores de cabelos), pequenas bombas e compressores, projetores de slides, toca-discos de vinil e aplicações domésticas.

CAPITULO 12 - Motor Universal

Sempre houve necessidade de um motor que pudesse ser utilizado em aplicações portáteis e que pudesse funcionar em quais quer freqüências, a partir de quaisquer fontes de potência disponíveis, nos diferentes países que pudesse ser visitado por um viajante ou turista.

Os motores de corrente alternada série pequenos, de potência fracionária, podem operar tão bem em c.a. como em c.c., daí sua designação de motor universal.





Suas características são semelhantes às do motor de corrente contínua série. Trata-se de um motor de velocidade variável, com baixas velocidades para grandes conjugados e altas velocidades para pequenas cargas. O conjugado de partida também é elevado.

Por este motivo, são usados comumente em pequenos eletrodomésticos , como furadeiras elétricas e lixadeiras, onde é requerido conjugado elevado, e em liquidificadores, aspiradores de pó e bombas centrífugas, onde é requerida alta velocidade.

Normalmente são fabricados para potências fracionárias de até $^3/_4$ cv. Para potências acima de alguns poucos cv, , funcionam precariamente em corrente alternada. Há um grande faiscamento nas escovas, e o rendimento e o fator de potência decrescem.

São necessárias as seguintes modificações nos motores de corrente contínua série para que melhore a sua operação em corrente alternada:

- Construir a estrutura do campo com laminações mais finas para reduzir as perdas por correntes parasitas, que são muito elevadas;
- Diminuir o número de espiras no campo para reduzir a queda de tensão reativa e as perdas devido à histerese e às correntes parasitas;
- Aumentar o número de pólos para restabelecer o torque total;
- Aumentar o número de espiras na armadura e o número de segmentos no comutador para compensar o decréscimo do fluxo do campo;
- Adicionar uma resistência em série com as ligações da armadura ao comutador para reduzir as correntes circulantes, o faiscamento das escovas e o aumento das dificuldades de comutação;
- Adicionar tipos especiais de enrolamentos de compensação para diminuir o aumento da reação da armadura devido ao aumento do número de condutores da armadura;
- Adicionar tipos especiais de enrolamentos de interpolos para diminuir o aumento da reação da armadura devido ao aumento do número de condutores da armadura.

Na grande maioria dos casos, os motores de corrente alternada série monofásicos de potência mais elevada, foram superados nas respectivas aplicações pelos motores de indução e síncronos polifásicos, face a maior simplicidade destes.

CAPITULO 13 - TRANSFORMADORES

13.1 Introdução

Fundamentalmente, o primeiro transformador foi construído por *Michel Faraday*. No ano de 1882 *Gouland e Gibbs* construíram na forma comercial, o primeiro transformador de corrente alternada. É a *Michel Faraday* a quem se deve a construção do primeiro transformador elementar, na forma de uma bobina chamada de indução, a qual tinha a forma de um anel e se encontrava disposta sobre o anel de ferro, sendo alimentada por uma corrente contínua que era interrompida periodicamente.

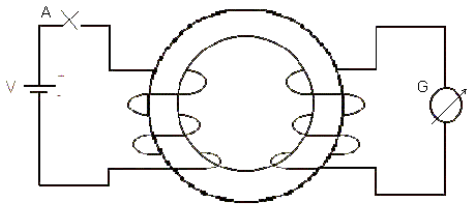


Figura 1. Primeiro transformador.

Toda vez que ocorria o fechamento ou a abertura da chave "A", o galvanômetro acusava deflexão do ponteiro e logo voltava à situação normal. Faraday concluiu que se o galvanômetro deflexionava, então necessariamente circulava corrente através do enrolamento secundário. Essa corrente do secundário variava de acordo com a variação da corrente do primário (abertura e fechamento da chave "A"). Essa variação passava de zero a um determinado valor ou vice-versa. As relações eletromagnéticas de corrente e fluxo, obviamente, obedeciam à Lei de Lenz.

Supomos que a corrente circule no primário no sentido conforme indicado pela figura abaixo. O sentido do fluxo ϕ_1 será o indicado. Este fluxo ϕ_1 varia de zero a este valor (fechando e abrindo a chave), induzindo corrente no secundário. Esta corrente induzida no secundário terá o sentido de circulação tal que induz um fluxo ϕ_2, de sentido contrário à ϕ_1. Após uma fração de tempo "t", subseqüente ao fechamento da chave "A", o fluxo mútuo atinge seu ponto de equilíbrio e em conseqüência, a corrente no secundário cai a zero. O fenômeno da indução da corrente I_2 se repete quando é aberta a chave "A", circulando agora em sentido contrário.

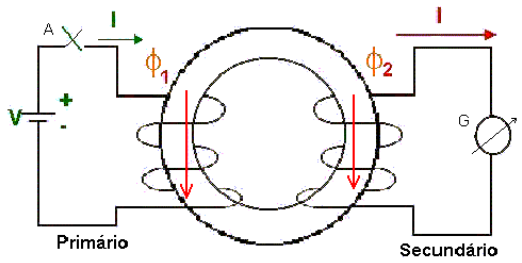


Figura 2 - Corrente Induzida no Secundário.

Faraday descobriu que sempre que o fluxo variável atravessa uma bobina, induz uma corrente que induz um segundo fluxo cujo sentido é contrário ao do primeiro. Com isto estava fundamentado o princípio eletromagnético do transformador.

13.2 - Generalidades

Os transformadores são máquinas estáticas de indução, cuja função consiste em transformar os valores de Tensão e Corrente, mantendo a potência constante.

Distinguem-se três tipos de transformadores:

1- Transformadores de Potência ou Força:
São transformadores destinados a fornecer grande quantidade de energia elétrica, normalmente empregados nas estações ou subestações de energia e sua capacidade é de centenas e até milhares de kVA´s.

2- Transformadores de Sinal:
São transformadores de pequena capacidade utilizados em circuitos eletrônicos, com finalidade de filtragem, casamentos de impedância, dentre outras.

3- Transformadores de Medição (TP, TC):
Destinados a adaptar sinais de alta tensão ou alta corrente e níveis (valores) mais facilmente utilizados pelos equipamentos de medição, proteção e controle.

13.3 – Princípio de Funcionamento:

Para iniciar o estudo do princípio de funcionamento de um transformador ou trafo, seja um núcleo de material magnético ideal (μ=∞) e dois enrolamentos (bobinas) distintos compartilhando o mesmo fluxo magnético. O primeiro (primário) enrolamento possui índice 1 e possui N_1 espiras. O segundo enrolamento (secundário), de índice 2 possui N_2 espiras. O fluxo magnético produzido por um dos enrolamentos atravessa o outro, como ilustrado na figura 3 abaixo. A figura mostra também uma representação elétrica do sistema através de indutores mutuamente acoplados. O sinal de polaridade indica o sentido da tensão induzida em cada indutor.

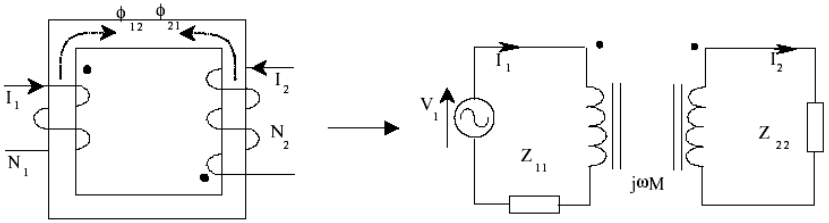


Figura.3 – Representação fundamental do transformador ideal.

O princípio de funcionamento é baseado na lei de Faraday-Lenz, onde uma tensão elementar *"e"* é induzida em cada uma das espiras de uma bobina submetida a uma variação de fluxo ($\Delta\phi$) ao longo do tempo de tal forma que possa produzir uma corrente que crie um fluxo se opondo a esta variação:

$$e = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Em uma bobina com *"n"* espiras teremos um fluxo concatenado $\lambda = n.\Phi$ e , portanto, uma tensão total E entre seus terminais:

$$E = \frac{\Delta\lambda}{\Delta t} = n.\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

O circuito da figura 4 apresenta as principais grandezas em um trafo ideal (sem perdas).

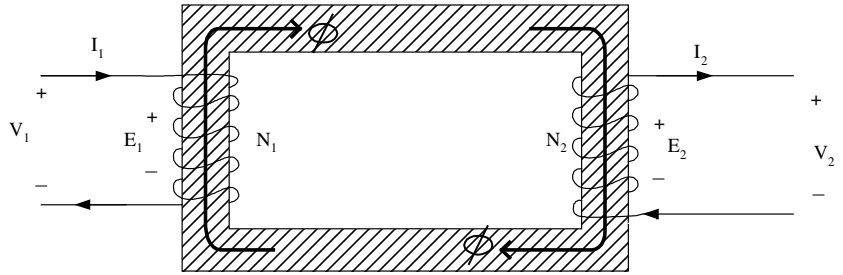


FIGURA 4 – TRANSFORMADOR IDEAL DE DOIS ENROLAMENTOS

Algumas definições básicas com relação à nomenclatura:

- Enrolamento Primário: Onde é aplicada a tensão da rede, onde é recebida a energia.
- Enrolamento Secundário: Onde é entregue a energia a carga.
- Enrolamento de Alta Tensão: Enrolamento no qual será aplicada a tensão mais alta.
- Enrolamento de Baixa Tensão: Enrolamento no qual está aplicada a tensão mais baixa.
- Transformador Redutor: Quando o primário é o lado de A.T.
- Transformador Elevador: Quando o primário é o lado de B.T.

13.4 – Principais relações:

Segundo o princípio de funcionamento, a tensão induzida no enrolamento primário N_1 vale:

$$E_1 = N_1.\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

E o enrolamento secundário vale:

$$E_2 = N_2.\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Como em um trafo ideal E1=V1 e E2=V2, e o fluxo Φ é comum aos dois enrolamentos:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1.\frac{\Delta\phi}{\Delta t}}{N_2.\frac{\Delta\phi}{\Delta t}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

A relação acima é chamada de relação de espiras ou relação de transformação e normalmente é representada pela letra *a* ou *α*.

Como este trafo ideal não possui perdas a potência de entrada é igual a potência de saída, então $V_1.I_1 = V_2.I_2$:

$$\boxed{\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2.}{I_1.} = a}$$

$$\boxed{\frac{S_1}{S_2} = 1}$$

A impedância equivalente vista do primário é dada pela lei de ohm : $Z_1 = \frac{V_1}{I_1}$

E no secundário: $Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$

A relação de impedâncias será então:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\frac{V_1}{I_1}}{\frac{V_2}{I_2}} \quad \Rightarrow \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{V_1.I_2}{V_2.I_1} \quad \Rightarrow \quad \frac{Z_1}{Z_2} = a^2 \quad \Rightarrow \quad \boxed{Z_1 = a^2.Z_2}$$

13.5 – Autotransformadores:

Teoricamente um autotransformador ou autotrafo é definido como um transformador que tem um só enrolamento. Resultando desta forma em um elemento abaixador ou elevador, porém sem isolação elétrica. Observa-se que o circuito magnético formado pelo núcleo é idêntico ao do trafo convencional (ver figura 3), contudo os enrolamentos primário (1º) e secundário (2º) estão eletricamente conectados conforme mostra a figura 5 abaixo. Em seguida são mostrados os esquemas elétricos correspondentes a um autotrafo abaixador e elevador na figura 6.

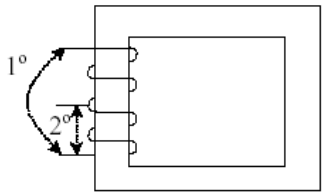


FIGURA 5 – AUTOTRASFORMADOR ELEMENTAR

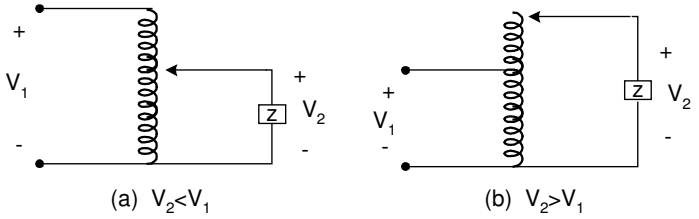


FIGURA 6 – AUTOTRASFORMADOR (A) ABAIXADOR E (B) ELEVADOR

Destacam-se como principais características dos autotransformadores:

- ✓ Sem isolação;
- ✓ Menor custo, por kVA;
- ✓ Menor peso e volume, para a mesma potência;
- ✓ Maior potência para o mesmo volume;
- ✓ Maior rendimento.

Transformadores convencionais podem ser ligados como autotrafos. Um exemplo desta ligação é mostrado na figura 7 abaixo. O autotrafo resultante desta ligação possui uma potência nominal maior do que a potência nominal do trafo original porque a potência transformada (transferida magneticamente pelo núcleo) agora é acrescentada de uma segunda parcela de potência que é transferida ao secundário diretamente por condução elétrica. Desta forma:

Potência do autotrafo = Potência transformada + Potência conduzida

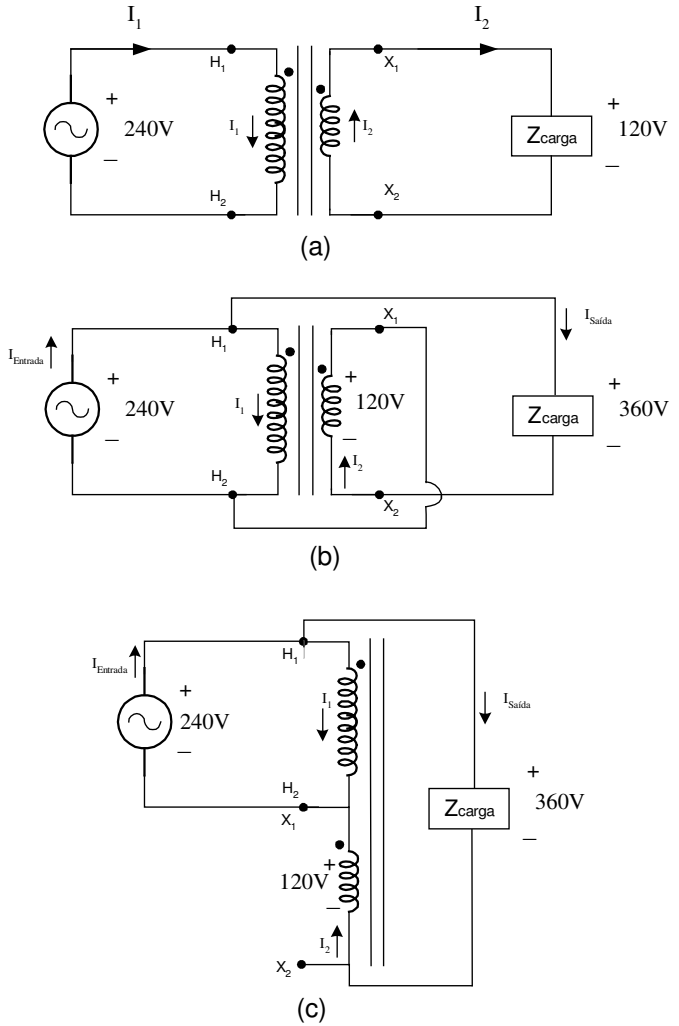


FIGURA 7 – (A) TRAFO CONVENCIONAL (B) LIGADO COMO AUTOTRAFO (C) LIGADO COMO AUTOTRAFO

Exemplo:

Considere o trafo abaixador mostrado na figura 7 (a) com especificações nominais 10kVA , 240V / 120V. Este transformador é ligado como autotrafo conforme esquema mostrado na figura 7 (b) e (c). Determine as novas especificações e calcule o aumento de potência resultante da ligação como autotrafo.

Resposta: As correntes nominais do trafo original são I1=41,67A e I2=83,33A . Após a ligação como autotrafo, as correntes em cada enrolamento se mantém nos valores nominais, só que agora a tensão de saída na carga será maior : 120V+240V = 360V

A corrente de entrada também sofre um aumento, pois uma parte da corrente de entrada ainda vai para o enrolamento primário e a outra vai diretamente para a carga:

$I_{ENTRADA} = I1 + I_{SAÍDA}$ ➔ 41,67+83,33 = 125A

Temos então $S_{ENTRADA} = 240 \times 125 = 30kVA$ e $S_{SAÍDA} = 360 \times 83,33 = 30kVA$

Com um aumento percentual de $Aumento(\%) = \frac{S_{Autotrafo}}{S_{Trafo}} = \frac{30000}{10000} x100 = 300\%$

Conclusão: Com a ligação proposta constriu-se um autotrafo elevador de 240V/360V com potência nominal = 30kVA.

2.10 - Transformadores trifásicos:

A maioria dos trafos de grande potência é trifásico, por este motivo convém conhecer algumas particularidades, apesar de muitas vezes um circuito trifásico equilibrado ser tratado como monofásico através da redução ao circuito equivalente por fase.

Para a transformação dos sistemas 3ϕ pode-se empregar 3 trafos monofásicos idênticos. Os 3 enrolamentos que serão alimentados pela linha 3ϕ primária estarão ligados em estrela ou triângulo. Outras formas de ligação de trafos 3ϕ (zigue-zague, delta aberto) não serão abordadas neste texto. Dos três enrolamentos de saída em Y ou Δ irá sair a linha 3ϕ secundária. Conforme mostra a figura 8.

Enquanto a carga alimentada for simétrica e equilibrada o trafo 3ϕ pode ser estudado observando apenas uma das fases do mesmo, qualquer que seja o esquema de ligações do primário ou secundário.

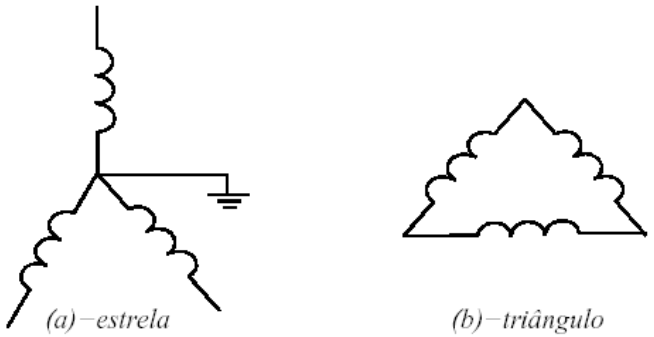


Figura 8 - Ligações mais comuns empregadas em transformadores.

Os tipos mais comuns de ligações são:

a)Y–Y : A presença do neutro aterrado é opcional neste tipo de transformador, a corrente de linha é igual a corrente de fase, sua tensão entre linhas é 3 vezes maior que a tensão de fase. A presença do neutro neste transformador é muito útil, pois o retorno da corrente ocorre pelo neutro, caso a carga no secundário seja monofásica não irá ocorrer

circulação de corrente em todos os terminais do primário do transformador. A diferença entre a tensão de fase e de linha justifica sua ampla aplicação em atividades envolvendo alta tensão.

b)Δ–Y : Empregado em transformadores elevadores de usinas hidroelétricas, devido a circulação da 3ª harmônica das correntes magnetizantes, assegurando a forma senoidal dos fluxos e das tensões.

c)Y–Δ : Quando as fases do secundário estão conectadas em Δ e ocorre o desequilíbrio de uma das fases há circulação de correntes por todas as fases. Uma carga monofásica gera uma tensão idêntica e simétrica nas fases e ocorre elevadas perdas ôhmicas e dispersões magnéticas.

d)Δ–Δ : As tensões secundárias, desconsiderando-se os defasamentos, são iguais e simétricas, qualquer que seja a carga. São amplamente utilizados para alimentação de cargas fortemente desequilibradas. Outra característica é que a eliminação de um dos lados do triângulo não impede o surgimento das 3 fases no secundário. Esta propriedade é interessante pois permite a utilização de dois trafos monofásicos em um sistema 3ϕ.

Os transformadores 3ϕ tais como qualquer sistema 3ϕ de potência é especificado pela potência aparente nominal e pela tensões nominais, podendo-se a partir destas obter os valores nominais de corrente e impedância.

Um ponto importante a se notar é que, em se tratando de trafos 3ϕ, a relação de espiras N_1/N_2 pode ser diferente da relação de tensões de linha V_{L1}/V_{L2} devido às diferentes formas em que os enrolamentos podem ser ligados, estando hora submetidos a tensões de linha (ligação Δ), hora submetidos a tensões de fase que é $\sqrt{3}$ vezes menor.

EXEMPLO:

Três trafos monofásicos elevadores com relação de espiras $N_1/N_2 = 0,1$ serão interconectados formando um trafo trifásico. Determine a relação de transformação V_{L1}/V_{L2} caso a ligação dos enrolamentos seja:

a) Primário em Y e secundário em Y;
b) Primário em Y e secundário em Δ ;
c) Primário em Δ e secundário em Y ;
d) Primário em Δ e secundário em Δ .

Solução:

a) Como ambos (primário e secundário) estão ligados em Y, a tensão em cada enrolamento corresponde a tensão de fase.O enrolamento primário está submetido a uma tensão $V_{F1} = \frac{V_{L1}}{\sqrt{3}}$ e no enrolamento secundário será induzida uma tensão $V_{F2} = 10.\frac{V_{L1}}{\sqrt{3}}$ sabendo que $V_{F1}.\sqrt{3} = V_{L1}$ e $V_{F2}.\sqrt{3} = V_{L2} \quad \Rightarrow \frac{V_{L1}}{V_{L2}} = 0,1$

b) Como as ligação de primário e secundário não são iguais, o primário em Y tem $V_{F1} = \frac{V_{L1}}{\sqrt{3}}$ e irá induzir em cada fase do secundário $V_{F2} = 10.\frac{V_{L1}}{\sqrt{3}}$. Estando o secundário ligado em Δ a tensão de linha é igual a tensão de fase.

Assim $V_{F1}.\sqrt{3} = V_{L1}$ e $V_{F2} = V_{L2} \quad \Rightarrow \frac{V_{L1}}{V_{L2}} = 0,1.\sqrt{3}$

c) Agora é o primário que apresenta tensão de fase igual à de linha $V_{F1} = V_{L1}$ que induz em cada enrolamento secundário $V_{F2} = 10.V_{L1}$. Devido a ligação Y a tensão de linha do secundário é $V_{L2} = V_{F2}.\sqrt{3} \quad \Rightarrow \frac{V_{L1}}{V_{L2}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}}$

d) Novamente ambos enrolamentos tem a mesma forma de ligação, resultando em uma relação de transformação igual à relação de espiras. $\frac{V_{L1}}{V_{L2}} = 0,1$