

MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO



António M. S. Francisco

versão 1
02/06

INTERNET

Páginas interessantes:

<http://endrino.cnice.mecd.es/~jhem0027/>
<http://webelec.waika9.com>
<http://www.epsic.ch/pagesperso/schneiderd/index.htm>
<http://users.pandora.be/educyclopedia/electronics/motorac.htm>
<http://iut.univ-lemans.fr/mp/cours/moteurlec/Accueil.htm>
<http://www.ac-nancy-metz.fr/pres-etab/loritz/formations/ssi/cours/electrotechnique/MoteursAC/moteurasyn.htm>
<http://philippe.berger2.free.fr/>
<http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/PO>
<http://eduvisilva.com.sapo.pt>
http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/eduardop/MqE/mqe_disciplina.htm
<http://www.esta.ipt.pt/default.asp?s=7&t=1&a=download&n=160>

Fabricantes de motores:

<http://www.abb.pt>
<http://www.sea.siemens.com/step/default.html>
<http://www.ceg.it>
<http://www.bonfiglioli.com>
<http://www.leroy-somer.com>

Outros artigos do autor:

<http://amsfrancisco.planetaclix.pt>
<http://automatos.planetaclix.pt>

ÍNDICE

Motores de Indução	2
Motor de Indução Trifásico	2
1. Constituição	2
1.1. Motor com o Rotor em Curto-Circuito	3
1.2. Motor com o Rotor Bobinado	4
2. Princípio de Funcionamento	4
3. Velocidade do Motor	5
4. Perdas do Motor	6
5. Aplicações.....	6
6. Placa de Características	7
7. Caixa de Bornes	7
7.1. Ligação dos Condutores à Placa de Bornes	8
8. Símbolos do Motor Assíncrono Trifásico	8
9. Arranque Estrela – Triângulo	8
10. Inversão de Marcha.....	9
11. Protecção Contra Sobreintensidades	10
12. Motor Trifásico Alimentado em Monofásico	10

MOTORES DE INDUÇÃO

Enquanto, nos motores de corrente contínua o estator e o rotor necessitam de alimentação, nos motores de indução só o estator é alimentado, o rotor recebe energia por indução, por isso, estes motores são chamados de motores de indução.

As máquinas rotativas de corrente alternada dividem-se em dois grandes grupos: máquinas síncronas e máquinas assíncronas.

Uma máquina diz-se síncrona quando roda à velocidade de sincronismo, isto é, à velocidade que resulta da aplicação da expressão $v=f/p$ (f - frequência da tensão de alimentação e p - número de pares de pólos da máquina).

Uma máquina diz-se assíncrona quando roda a uma velocidade diferente da velocidade de sincronismo.

Estas duas máquinas podem funcionar como gerador ou como motor. No caso da máquina síncrona temos o motor síncrono e o gerador síncrono ou alternador. No caso da máquina assíncrona, a utilização como gerador é pouco usual, a sua grande utilização é como motor assíncrono.

Estas máquinas podem ainda funcionar em corrente alternada monofásica ou polifásica.

MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O motor indução ou motor assíncrono foi patenteado em 1888 por *Nikola Tesla* e actualmente constitui mais de 90 % dos motores utilizados na indústria. Trata-se de uma máquina robusta, de fácil construção, de baixa manutenção, facilmente colocada em serviço e mais barata comparada com outras.

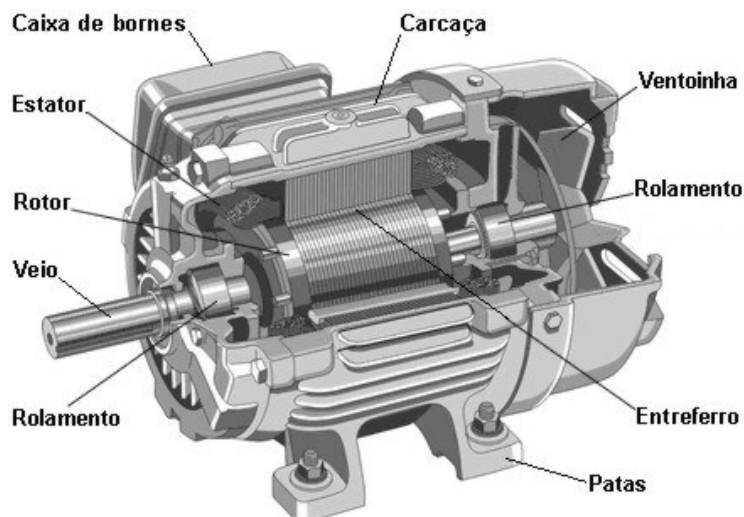
Um motor de indução tem nos enrolamentos do estator e do rotor somente corrente alternada. Pode ser comparado com um transformador em que os enrolamentos do secundário recebem energia por indução.

Os tipos básicos de motores de indução são os trifásicos e os monofásicos.

Os motores de indução monofásicos, normalmente potências baixas, têm grande aplicação, principalmente, em utilização doméstica. Por outro lado, os motores de indução trifásicos são utilizados na maioria dos accionamentos na indústria.

1. CONSTITUIÇÃO

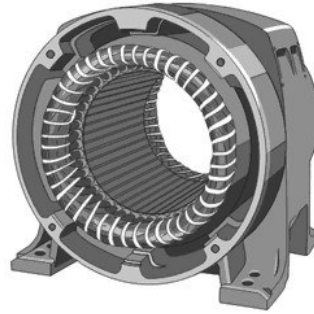
O motor de indução trifásico é constituído pelos seguintes elementos:



- O **estator**, parte fixa da máquina, é constituído por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si para reduzir as perdas por histerese e as correntes de Foucault. As chapas possuem ranhuras nas quais são colocados os três enrolamentos, disposto geometricamente a 120° e constituídos por várias bobinas. O modo como as bobinas são ligadas umas às outras define o número de pares de pólos do motor. Os enrolamentos são alimentados por tensão trifásica e o conjunto é alojado no interior de uma carcaça em ferro fundido, aço ou alumínio.



Estator

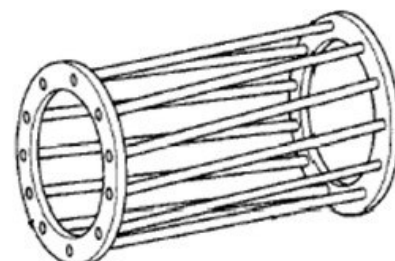
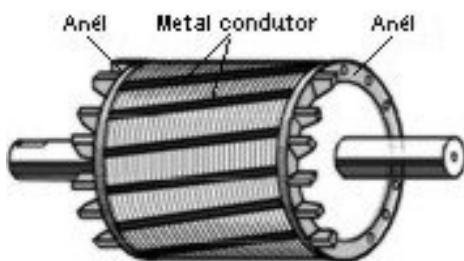


Estator colocado na carcaça

- O **rotor**, parte móvel da máquina, é constituído, tal como o estator, por chapas finas, isoladas uma das outras e ranhuradas. Nas ranhuras são colocados enrolamentos – motor de rotor bobinado – ou condutores paralelos – motor de rotor em curto-circuito ou rotor em gaiola de esquilo –. O rotor é apoiado no veio de rotação do motor, que possui rolamentos nos extremos e que transmite à carga a energia mecânica produzida. Entre o rotor e o estator existe o entreferro, que deve ser o mais pequeno possível, de forma a reduzir a relutância magnética total do circuito e assim aumentar a indução e consequentemente o fluxo (o ar é muito menos permeável do que o ferro).

1.1. MOTOR COM ROTOR EM CURTO-CIRCUITO OU EM GAIOLA DE ESQUILO

Possui rotor constituído por condutores paralelos alojados dentro de ranhuras das chapas laminadas e ligados entre si, nos topos, por anéis condutores (curto-circuitos). Esta disposição forma uma espécie de gaiola de esquilo, figuras seguintes.



Em motores de maior potência, os condutores colocados dentro das ranhuras do rotor são feitos em barras de cobre, alumínio ou algumas das suas ligas. Em motores pequenos, a gaiola pode ser inteiramente moldada, normalmente a alumínio.

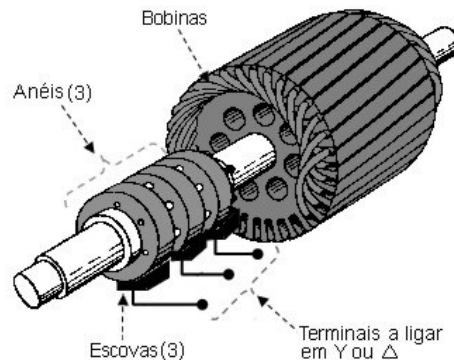
De referir que as barras condutoras da gaiola são dispostas com uma determinada inclinação com a finalidade de melhorar as propriedades de arranque e diminuir os ruídos.

Um motor de rotor em curto-circuito é um motor de uma só alimentação, não necessita de colectores nem de escovas. Não possui, por isso, contactos eléctricos móveis. Este facto, têm como resultado um motor robusto e, praticamente, sem manutenção.

1.2. MOTOR DE ROTOR BOBINADO

Este motor é, normalmente, de potência elevada e destina-se a arranques de cargas com elevado binário resistente e grande inércia. Permite arranques suaves e progressivos recorrendo a resistências, chamadas resistências rotóricas, ligadas, através de escovas e anéis colectores, em série com o enrolamento trifásico do rotor.

Estas resistências, quando do arranque, vão sendo progressivamente retiradas até que o motor atinja a sua velocidade nominal. Deste modo, é possível controlar o binário de arranque de uma forma progressiva.

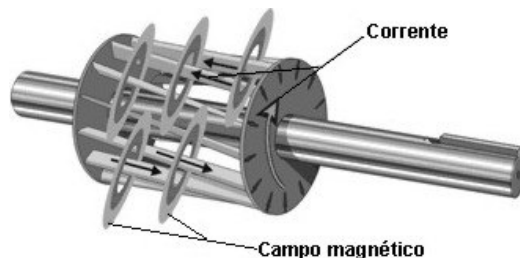


Apesar desta vantagem, para as mesmas especificações, o motor de rotor bobinado é mais caro e menos eficiente que o motor de gaiola de esquilo. Por esta razão, este tipo de motor só é utilizado quando o de gaiola de esquilo não consegue fornecer o binário de arranque pretendido.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

No motor assíncrono trifásico o estator é formado por conjuntos de três enrolamentos colocados de forma que entre eles exista um ângulo de 120° . Estes enrolamentos, ao serem percorridos pela corrente trifásica da rede de distribuição pública, criam um campo magnético girante:

- Este campo, ao atravessar o rotor, provoca uma variação de fluxo nos condutores da gaiola de esquilo ou do rotor bobinado, gerando-se, de acordo com a lei de *Faraday*, uma força electromotriz induzida (f.e.m.) nesses condutores;
- Como os condutores do rotor, quer no caso do rotor em curto-circuito, quer ou no caso do rotor bobinado, estão em circuito fechado, os mesmos são percorridos por correntes induzidas;
- Estas correntes induzidas, de acordo com a lei de *Lenz*, têm um sentido tal que, pelas suas acções magnéticas, tende a opor-se à causa que lhes deu origem.



No rotor vai ser gerado, a cada momento, um campo magnético que tende a opor-se ao campo magnético girante do estator. Para se opor, os dois campos têm de possuir pólos contrários.

- Como o campo do estator é girante, e, sabendo que pólos de nomes contrários se atraem, o rotor entra em movimento, tentando acompanhar o campo girante. O mesmo nos diz a lei de *Laplace*: Um condutor, percorrido por corrente, mergulhado num campo magnético, fica sujeito a uma força electromagnética.

Como se pode constatar, o princípio de funcionamento do motor de indução baseia-se em leis fundamentais do electromagnetismo: lei de *Faraday*, lei de *Lenz* e lei de *Laplace*.

Lei de Faraday: "Sempre que através da superfície abraçada por um circuito tiver lugar uma variação de fluxo ($d\phi/dt$), gera-se nesse circuito uma força electromotriz induzida (e). Se o circuito for fechado, será percorrido por uma corrente induzida".

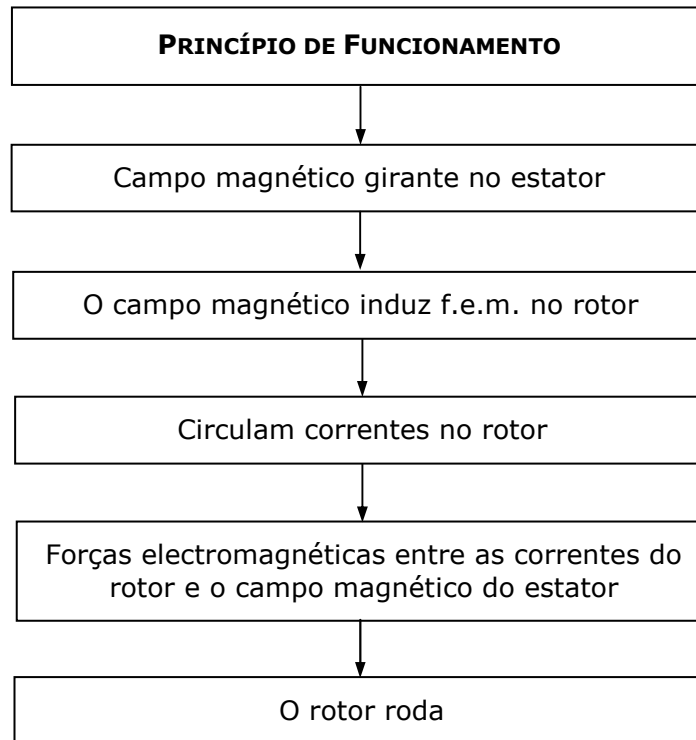
$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

Lei de Lenz: "O sentido da corrente induzida é tal que esta, pelas suas acções magnéticas, tende sempre a opor-se à causa que lhe deu origem".

Lei de Laplace: "Sobre um condutor rectilíneo, percorrido por corrente, mergulhado num campo magnético, é exercida uma força electromagnética que é proporcional à indução magnética (B) a que ele está sujeito, à corrente (I) que o percorre, ao seu comprimento (l) e ao seno do ângulo que ele forma com a indução ($\sin \alpha$)".

$$F = BIl \sin \alpha$$

Resumindo:



3. VELOCIDADE DO MOTOR

A velocidade de um motor de indução é função da frequência da corrente de alimentação e do número de pares de pólos do estator.

$$n_s = \frac{f}{p} \cdot 60$$

n_s – velocidade do campo girante (r.p.m.), (min^{-1})
 f – frequência da corrente (Hz)
 p – número de pares de pólos

A velocidade nominal (n_n) do motor de indução é ligeiramente inferior à velocidade do campo girante (velocidade de sincronismo), o motor possui escorregamento.

4. PERDAS DO MOTOR

Em funcionamento como motor, a máquina absorve potência eléctrica da rede e fornece, potência mecânica no veio. Este é o modo de funcionamento mais comum da máquina assíncrona.

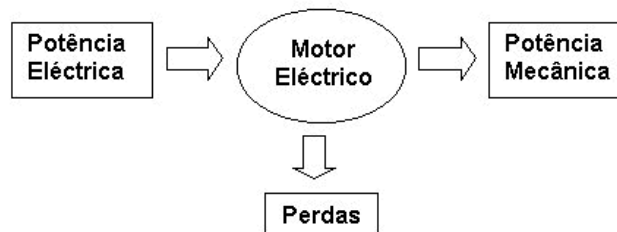
As perdas que ocorrem num motor são, essencialmente, as seguintes:

- Perdas eléctricas;
- Perdas magnéticas;
- Perdas mecânicas.

As perdas eléctricas aumentam acentuadamente com a carga aplicada ao motor. Estas perdas, por efeito de Joule, podem-se reduzir aumentando a secção dos condutores.

As perdas magnéticas ocorrem nas lâminas de ferro do estator e do rotor. São devidas ao efeito de histerese e às correntes induzidas (correntes de *Foucault*), variam com a densidade do fluxo e a frequência. Estas perdas podem ser reduzidas através do aumento da secção do ferro no estator e no rotor, através do uso de lâminas delgadas e do melhoramento dos materiais magnéticos.

As perdas mecânicas são devido à fricção dos elementos, ventilação e perdas devido à oposição do ar. Podem ser reduzidas, usando elementos com baixa fricção e com o aperfeiçoamento dos sistemas de ventilação.

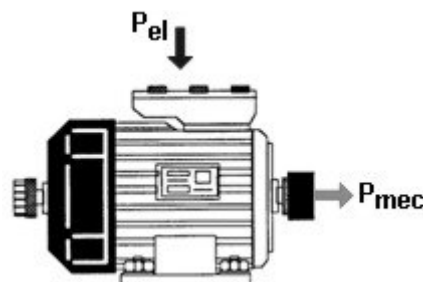


O motor eléctrico transforma a potência eléctrica (P_{el}) absorvida em potência mecânica (P_{mec}) e uma pequena percentagem em perdas.

As perdas, que são inerentes ao processo de transformação, são quantificadas através do rendimento.

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}} (\%)$$

A potência mecânica traduz-se basicamente, no binário que o motor produz no veio do rotor.



5. APLICAÇÕES

O motor de indução de rotor em curto-circuito é actualmente o motor mais usado na indústria e também em utilizações domésticas, dada a sua grande robustez, baixo preço, arranque fácil (pode mesmo ser directo, em motores de baixa potência) e facilidade de alimentação através da corrente alternada da rede de distribuição pública.

Este motor, como não possui colectador, não produz faíscas e tem portanto uma manutenção muito mais reduzida do que qualquer outro.

Associados a conversores electrónicos de tensão e frequência (variadores electrónicos de velocidade), os motores de indução tendem a assumir um papel de primazia nos accionamentos eléctricos.

O accionamento de máquinas e equipamentos mecânicos, por motores eléctricos, é um assunto de extraordinária importância económica. No campo de accionamentos industriais, avalia-se que de 70 a 80% da energia eléctrica consumida pelo conjunto de todas as indústrias seja transformada em energia mecânica através de motores eléctricos. Destes, os mais utilizados na indústria, são de motores de indução gaiola de esquila.

6. PLACA DE CARACTERÍSTICAS

A placa de características, fixada no corpo do motor, informa sobre o fabricante, sobre os valores nominais do motor e outros.

ABB		ABB Motors			CE
3-motor M2QA 90 S2 A					IEC 34-1
3GQA091101-ASA					EFF2
6205/C3		6205/C3		IP 55	Ins.cl F
V	Hz	r/min	kW	cosφ	A
220-240Δ	50	2850	1.5	0.87	5.58
380-420Y	50	2850	1.5	0.87	3.23
440-480Y	60	3420	1.73	0.87	3.30
No 329 11117711				21 kg	

7. CAIXA DE BORNES

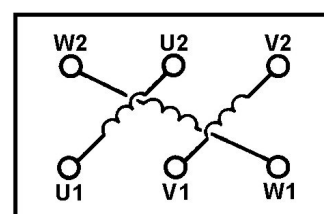
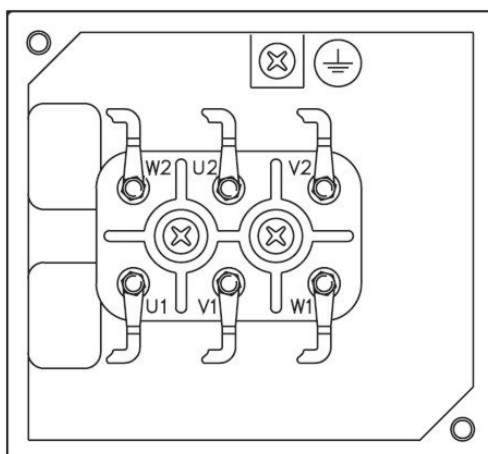
A caixa de bornes possui no seu interior, para os motores trifásicos de uma velocidade, uma placa com 6 bornes, marcados de acordo com a norma IEC 34-8 (EN 60034-8). Estes bornes destinam-se a ligar entre si os enrolamentos do motor e efectuar a ligação à rede eléctrica.

A disposição dos bornes permite, no motor trifásico, através de *shunts*, colocar facilmente o motor a funcionar em estrela ou em triângulo. Os esquemas de ligação estão, normalmente, desenhados na parte interior da tampa da caixa de bornes.

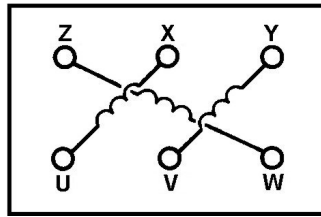
Para além dos bornes dos enrolamentos e do borne para à ligação à terra, a caixa de bornes pode conter também ligações para termistores, elementos de aquecimento, interruptores bimetálicos, ou elementos de resistência PT 100.

A ligação à terra do motor é obrigatória e deve ser assegurada de acordo com a regulamentação em vigor no país.

Placa de bornes - norma IEC 34-8



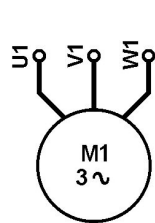
Placa de bornes antiga



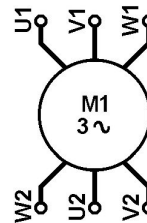
7.1. LIGAÇÃO DOS CONDUTORES À PLACA DE BORNES

Os condutores dos cabos devem ser equipados com terminais adaptados à secção do condutor e ao diâmetro dos parafusos da placa de bornes.

8. SÍMBOLOS DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO



Com 3 terminais acessíveis



Com 6 terminais acessíveis

9. ARRANQUE ESTRELA – TRIÂNGULO

Os três enrolamentos do estator do motor de rotor em curto-circuito, antes de serem ligados à rede trifásica, têm de ser ligados entre si para que o motor funcione. A ligação dos enrolamentos pode ser feita em estrela ou em triângulo.

Para ser possível as duas ligações, os 6 terminais dos enrolamentos têm de estar acessíveis. Caso estejam acessíveis apenas 3 terminais os enrolamentos já estão internamente ligados em triângulo.

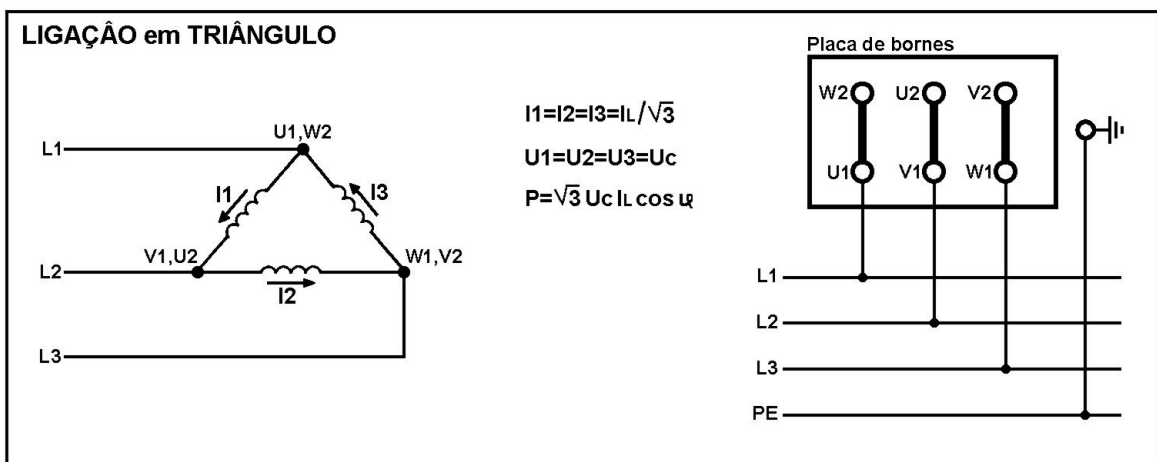
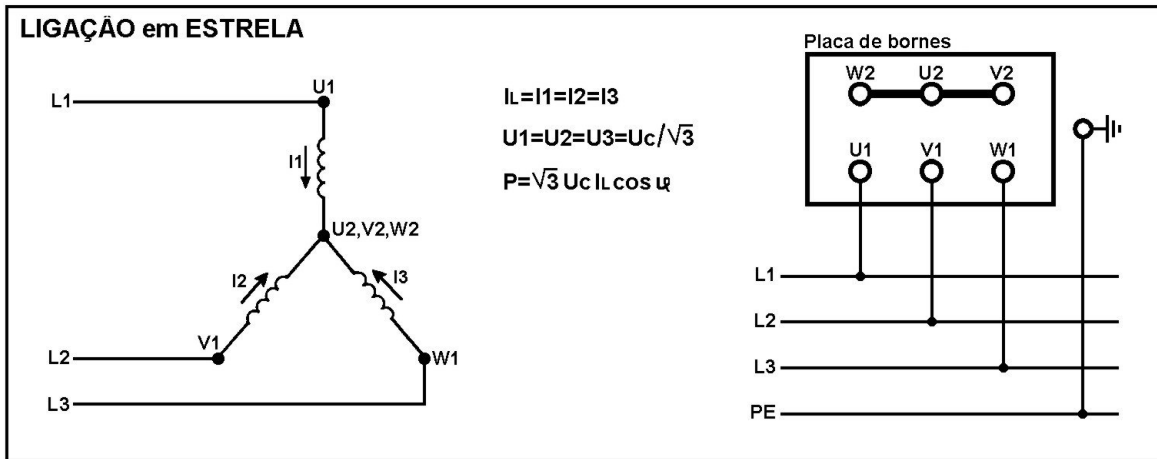
A possibilidade dos enrolamentos serem ligados em estrela ou em triângulo permite a realização do arranque do motor em duas fases:

1. O motor arranca com os seus enrolamentos ligados em estrela, a corrente absorvida da rede, para mesma tensão de alimentação, é 1/3 da corrente absorvida relativamente ao arranque em triângulo e o binário de arranque também é 1/3 do binário de arranque em triângulo.
2. Após o arranque e atingida uma velocidade de aproximadamente 80% da velocidade nominal, os enrolamentos são ligados em triângulo, funcionando o motor à potência nominal.

A finalidade do chamado "arranque estrela – triângulo" é atenuar a elevada corrente de arranque dos motores, que provoca quedas de tensão na rede que podem afectar o funcionamento de outros aparelhos a ela ligados ou mesmo actuação dos aparelhos de protecção. Com este processo consegue-se suavizar o arranque do motor e atenuar a perturbação causada à rede.

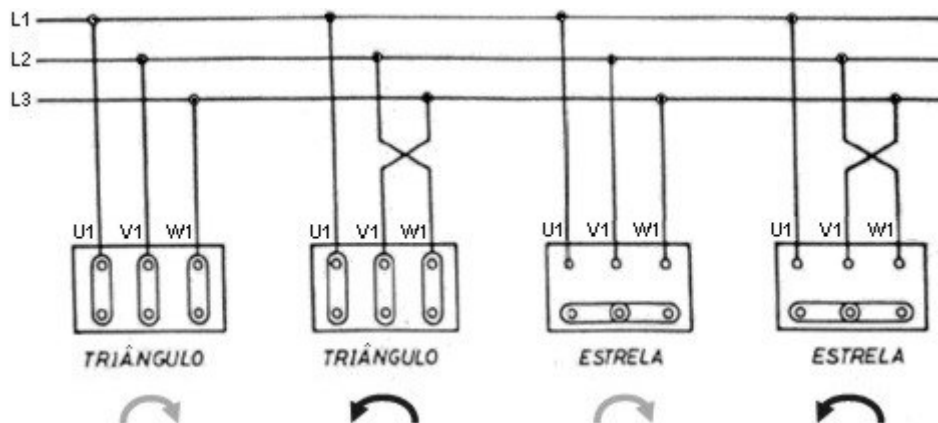
Este tipo de arranque só é possível em motores cuja tensão nominal em "triângulo" corresponda à da rede trifásica (400V). É obrigatório na rede pública portuguesa de BT para motores de potência até 11 kW, para potências até 4 kW o motor pode arrancar com os enrolamentos ligados em triângulo (arranque directo).

Os motores são construídos para funcionarem com os enrolamentos ligados em triângulo.



10. INVERSÃO DE MARCHA

A inversão do sentido de rotação, com os enrolamentos ligados em estrela ou em triângulo, é obtida por troca de duas das fases que alimentam o estator do motor.



Esta operação, num automatismo, é executada por contactores, após se retirarem todos os *shunts* da placa de bornes.

11. PROTECÇÃO CONTRA SOBRECARGAS

As sobrecargas perigosas podem aparecer durante o funcionamento dum motor devidos a sobrecargas mecânicas dum determinada duração, por falta de uma fase, e sobretudo por curto-circuito na cablagem. Para se evitar que os motores ou as instalações eléctricas que os alimentam avariem, devem ser previstos dispositivos de protecção contra curto-circuitos e contra sobrecargas.

Na protecção contra curto-circuitos, se feita por fusíveis, os mesmos devem ser de alto poder de corte, normalmente tipo aM. Se esta protecção for realizada por disjuntores, os mesmos serão do tipo magnético.

Relativamente à protecção contra sobrecargas, esta é geralmente feita por relés térmicos. Estes devem ser regulados para o valor da intensidade de corrente constante na placa de características para a tensão e frequência da alimentação do motor.

Se a protecção contra curto-circuitos e contra sobrecargas é feita por um mesmo dispositivo, ele terá de ser do tipo magneto-térmico.

Os motores também podem ser equipados com sondas térmicas, colocadas junto dos seus enrolamentos, que detectam a temperatura dos mesmos e informam o circuito de comando.

12. MOTOR TRIFÁSICO ALIMENTADO EM MONOFÁSICO

Com o auxílio de condensadores permanentes, motores de indução trifásicos de pequena potência, podem ser operados a partir da rede monofásica (230V).

Esta ligação é possível porque a utilização do condensador produz, tal como estudado no motor monofásico, um campo girante que provoca a rotação do motor.

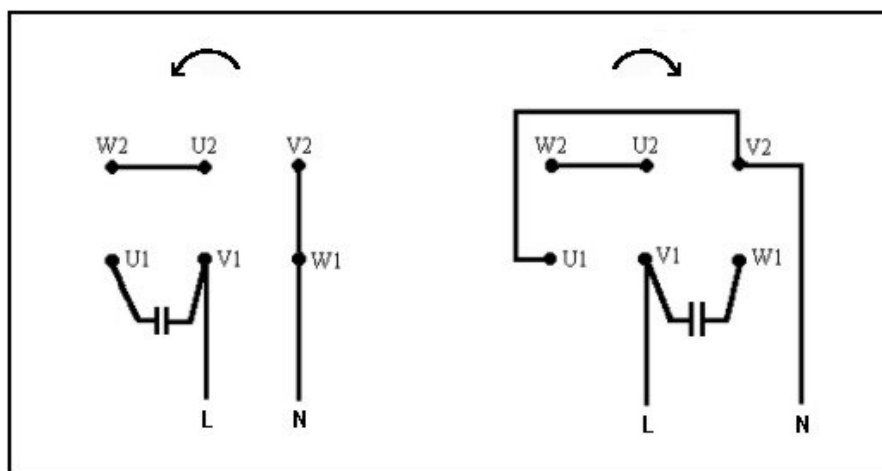
Dispondo o motor trifásico de três bobinas, com os respectivos terminais acessíveis, existem várias hipóteses de ligação das mesmas, para se obter um funcionamento de acordo com os princípios do motor monofásico.

A seguir, indicam-se esquemas de ligação vulgares.

Enrolamento Principal – Uma Bobina (V1-V2)

Enrolamento Auxiliar – Duas Bobinas em Série (U1-U2 + W1-W2)

Repartindo desta forma as três bobinas do motor trifásico, obtêm-se dois enrolamentos. Ligando um condensador permanente, de valor adequado, em série com o enrolamento auxiliar e as bobinas, como se mostra na figura seguinte, temos uma ligação e um funcionamento idêntico ao motor monofásico de condensador permanente.



Como no motor monofásico, a inversão do sentido de rotação é efectuada por inversão do sentido da corrente no enrolamento auxiliar (bobinas U1-U2 + W1-W2).

Enrolamento Principal – Duas Bobinas em Série
Enrolamento Auxiliar – Uma Bobina

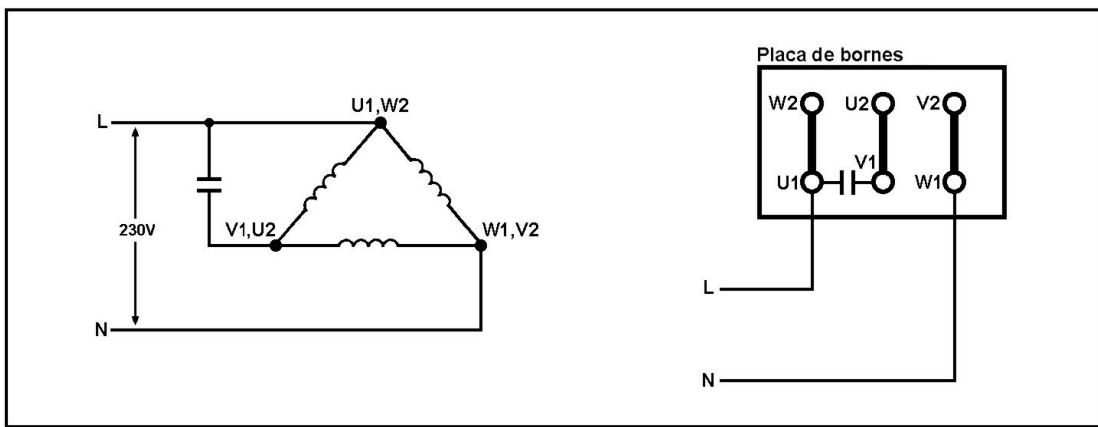
Com esta ligação a tensão aplicada ao enrolamento principal (230VAC) vai repartir-se por duas bobinas em série. Assim, o binário será ainda mais reduzido. Esta ligação tem pouca utilização.

Enrolamento Principal – Duas Bobinas em Paralelo
Enrolamento Auxiliar – Uma Bobina

Ligação também pouco utilizada.

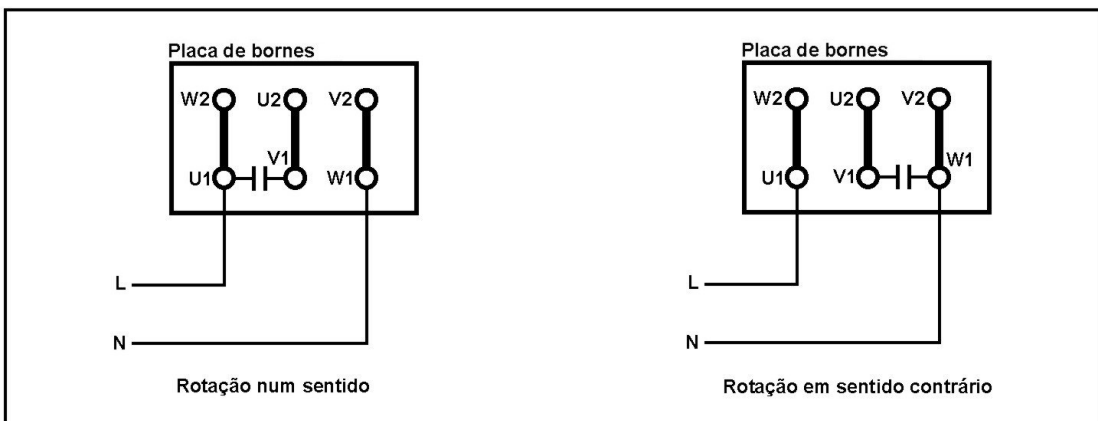
Bobinas do Motor Ligadas em Triângulo

Neste caso, o condensador fica em paralelo com qualquer das bobinas, ver figura seguinte:



A alimentação monofásica é aplicada entre dois bornes do motor; o borne livre e um dos bornes onde está ligado o condensador.

O sentido de rotação do motor pode ser invertido mudando o terminal do condensador que está ligado à rede, ver figura seguinte:



Esta é uma solução vulgar. Também é a solução possível para motores trifásicos que só tenham acessíveis três terminais.

Dimensionamento do Condensador (valores empíricos)

Cada kW de potência do motor, para a tensão da rede de 230V, requer um condensador permanente de, aproximadamente, 40 μ F (cada 1hp necessita de um condensador de 30 μ F).

Atenção!

- Em todas as montagens o condensador utilizado é do tipo permanente e para tensões de trabalho de 450V~. Este condensador terá de possuir uma capacidade que possibilite o arranque do motor;
- Apesar, de hoje em dia os condensadores possuírem normalmente uma resistência interna de descarga, antes de qualquer intervenção no motor ou no armário do automatismo, deve-se assegurar que os condensadores estão descarregados.

Notas:

- As soluções apresentadas podem não funcionar bem com determinados motores, pode ser necessário alterar o valor do condensador;
- Alimentando motores trifásicos com tensão monofásica de 230V, o binário de arranque é significativamente reduzido relativamente ao binário em trifásico. No caso deste binário ser insuficiente, para garantir um arranque sem problemas, ter-se-á de ajustar o valor do condensador;
- Num motor trifásico, funcionando com alimentação monofásica, a sua potência cai para cerca de 70% da sua potência em alimentação trifásica;
- Ter em conta que na alimentação de um motor trifásico em monofásico a corrente consumida, se o condensador não estiver bem dimensionado, pode ter um valor bem superior à corrente consumida na alimentação trifásica. Antes da ligação definitiva ensaiar a montagem e verificar a corrente. Caso contrário, os enrolamentos do motor podem ser sujeitos a um aquecimento exagerado e, conseqüentemente, à sua destruição.