

Motor Elétrico de Indução

Neste capítulo vamos abordar um elemento clássico encontrado em qualquer máquina ou equipamento, o motor elétrico de indução, também definido como motor elétrico do tipo gaiola (atribuído ao formato do rotor que se assemelha a uma gaiola de esquilo). Os motores elétricos executam a função básica de transformar energia elétrica em energia mecânica. Os modernos processos industriais utilizam-se de máquinas e equipamentos para produção de bens de consumo em regime contínuo. Essas máquinas são constituídas por sistemas mecânicos que realizam vários tipos de movimento, que podem ser classificados em três tipos básicos, *Vertical*, *Horizontal* e *Circular*, e a combinação desses três movimentos resulta em movimentos mais complexos.

Motores elétricos de indução são empregados na maioria das vezes para realização desses movimentos, pois apresentam inúmeras vantagens como baixa manutenção, alta robustez, facilidade de instalação e integração, quando comparados a sistemas mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos, bastando, para isto a engenhosidade humana na elaboração e desenvolvimento desses mecanismos. Adiante conheceremos as características e aplicações desse elemento-chave na indústria atual moderna.

13.1. O Motor Elétrico

Um motor elétrico de indução convencional é formado por dois elementos básicos, **Rotor** e o **Estator**. O rotor é definido como sendo a parte que é movimentada (móvel) e é responsável pela transmissão da força gerada pelo conjunto à carga, e o estator a parte estática (fixa) do conjunto, responsável pela geração da força necessária a movimentação do rotor.

- **Rotor**

O rotor é fabricado em discos de chapas de aço magnético não isoladas com espessuras reduzidas e tratadas termicamente para redução de perdas. Essas chapas são montadas individualmente de forma a produzir um conjunto semelhante a um cilindro. Em suas extremidades são montados anéis metálicos, fabricados em materiais condutores (geralmente alumínio) ligados de forma a estabelecer um curto-circuito ao longo do perímetro do cilindro. No centro do rotor é inserido um eixo de aço maciço perfeitamente alinhado e centrado com o restante dos componentes, o eixo é montado sobre mancais de rolamentos, permitindo que todo o conjunto (rotor) gire de forma livre e com o mínimo de atrito possível no interior do estator.



- **Estat**

O estator também é formado por chapas de aço magnético com pequena espessura, posicionadas individualmente uma ao lado da outra. Essas chapas são estampadas com cavidades chamadas de ranhuras que, após montadas e alinhadas, formam canais por onde são inseridos os condutores para formação do campo magnético. Os condutores são fabricados em fio de cobre esmaltado e enrolados de forma a produzir um espiral. Várias espiras forma uma bobina, um conjunto de bobinas formam um pólo, que se associado de forma correta a outro pólo, obtemos um arranjo denominado par de pólos. Um par de pólos é capaz de gerar campos magnéticos opostos, norte e sul ou positivo e negativo; a combinação correta dos campos magnéticos produzidos por vários pares de pólos é responsável pela movimentação do rotor do motor. A quantidade de pares de pólos existentes em um motor de indução define a velocidade em que o rotor irá girar.

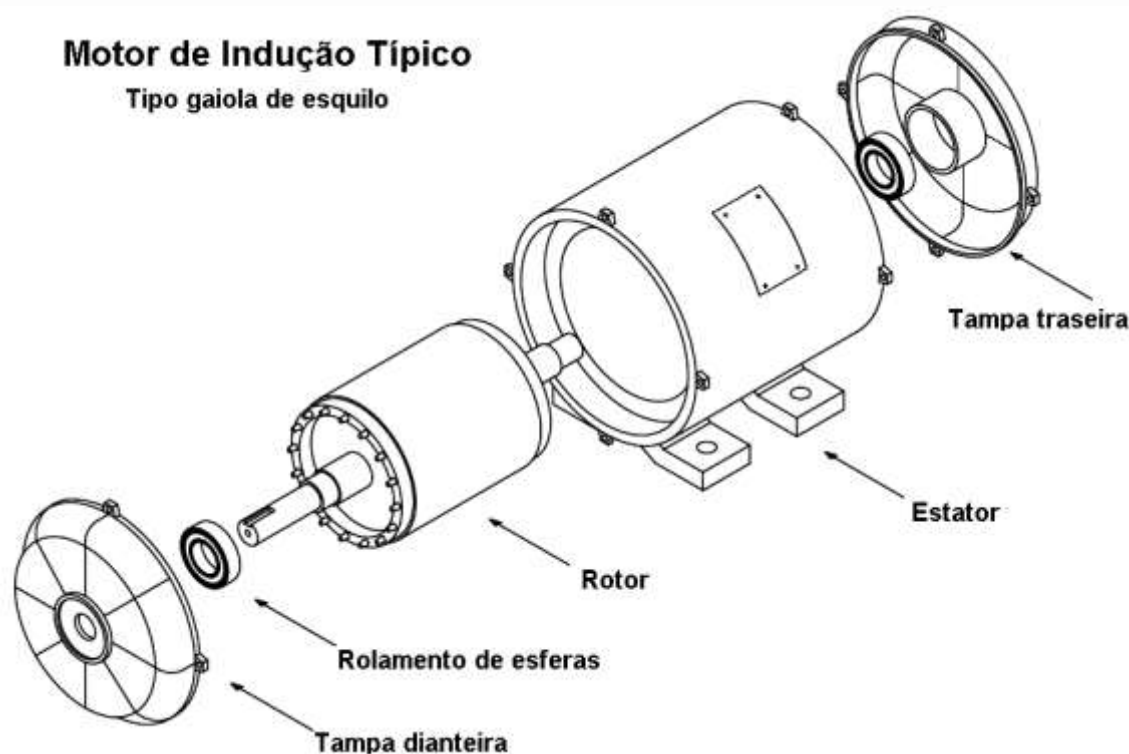


Figura 13.1

Na figura 13.1 podemos identificar os componentes básicos de um motor de indução, em que observamos de forma genérica todos os componentes que compõem um motor do tipo gaiola convencional. O conjunto, após montado alinha-se perfeitamente, de forma a permitir o movimento livre do rotor no interior do estator com um mínimo de atrito possível.

Os motores de indução se caracterizam pelo fato de somente o estator estar conectado à rede elétrica. O rotor não recebe tensão elétrica da rede e as correntes que circulam por sua estrutura são induzidas eletromagneticamente pelo bobinado do estator. Por essa razão esse dispositivo recebe o nome “Motor de Indução”.

O funcionamento de um motor de indução se baseia no “*Princípio do Campo Girante*”, que é obtido quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica alternada. Quando isso acontece um campo magnético é gerado e sua intensidade é proporcional à corrente elétrica que circula pela bobina.

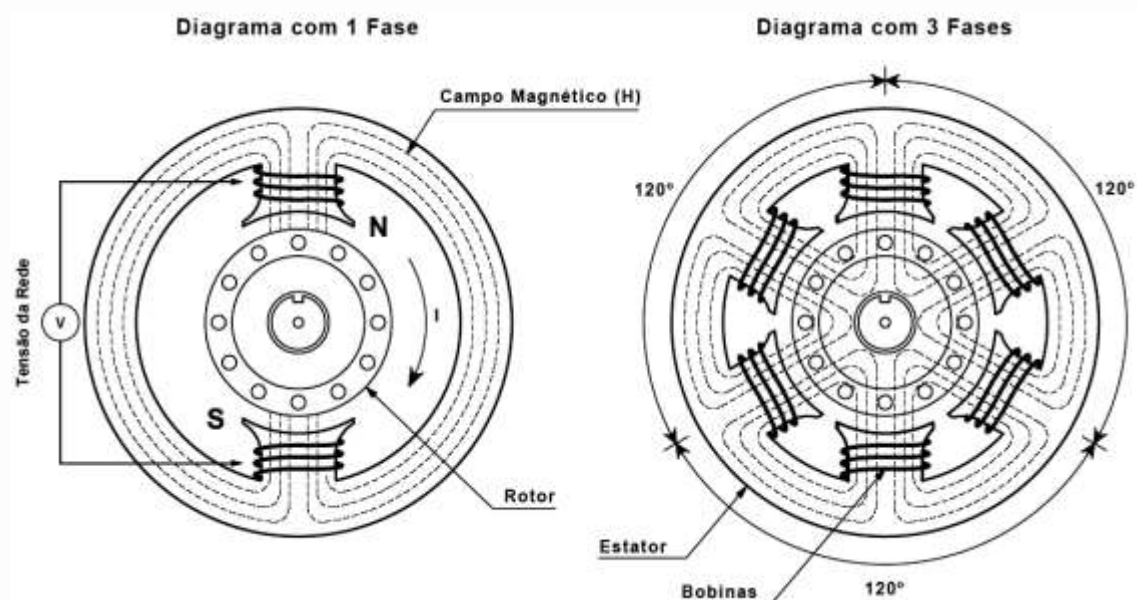


Figura 13.2

Na figura 13.2 podemos identificar um diagrama básico que ilustra como o fluxo magnético se distribui no sistema. No exemplo com somente uma fase de alimentação podemos observar que, quando uma corrente elétrica “I” circula pelo grupo de bobinas, um campo magnético “H” é gerado. Note que são necessários no mínimo dois grupos de bobinas para obtenção de pólos magnéticos com polaridades diferentes; Norte e Sul (ou positivo/negativo). Por essa razão só é possível a construção de motores de indução com um número par de bobinas, ou seja, número de pólos múltiplos de dois.

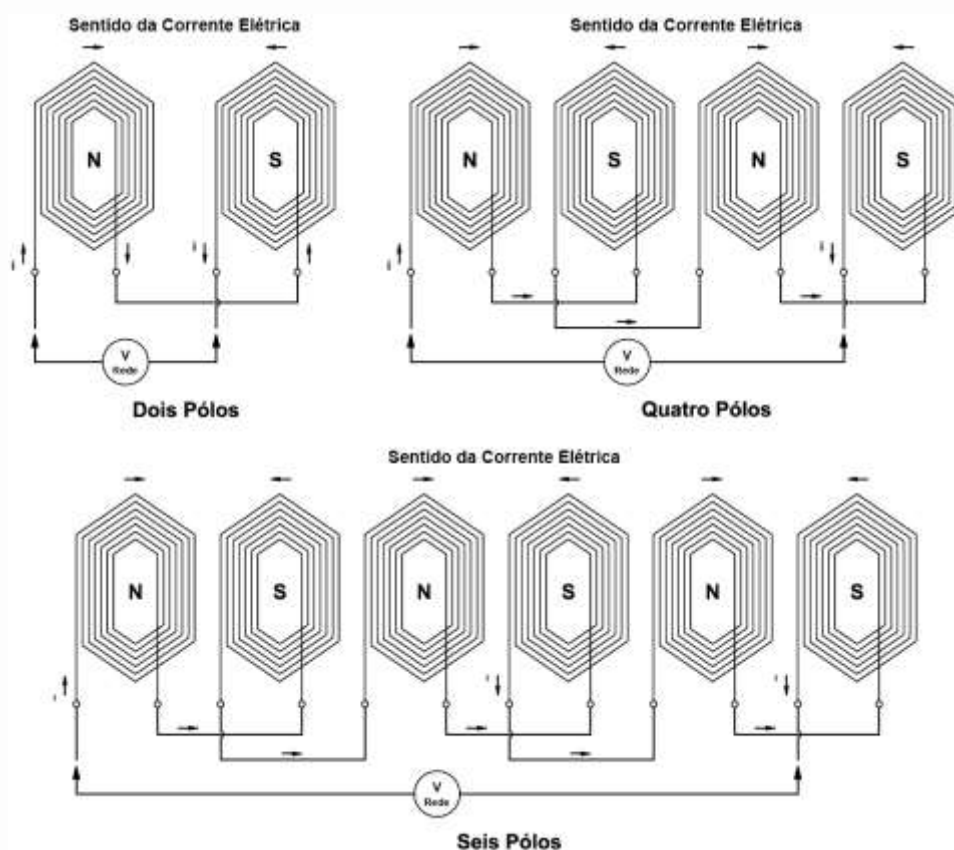


Figura 13.3

No diagrama de exemplo com três fases os princípios são os mesmos, a análise pode ser realizada considerando-se três circuitos monofásicos. A particularidade é a simetria física entre os pólos de cada fase, cada grupo de pólos é posicionado de modo que permaneça a 120° um do outro. Os campos magnéticos gerados individualmente por cada grupo de pólos se interagem e se somam proporcionalmente ao longo do tempo, suas intensidades são proporcionais à corrente elétrica que circula no sistema.

A inversão de polaridade da bobina oposta é obtida invertendo-se a entrada da corrente elétrica, isso é realizado na conexão física das bobinas no estator, onde a saída da bobina 1 é ligada à saída da bobina 2, e assim analogamente para todos os grupos de bobinas presentes no estator. A figura 13.3 demonstra essa ligação.

A inversão de polaridade é obtida simplesmente invertendo-se o sentido da corrente de cada pólo subsequente. A figura traz ainda o esquema de conexão para motores de 2, 4 e 6 pólos. Essa configuração é montada internamente no estator e somente as conexões de tensão de alimentação são posicionadas externamente para o fechamento final da ligação. Para motores de 8 ou 10 pólos, os princípios de ligação são os mesmos, bastando apenas inserção da quantidade de pólos desejada no diagrama.

Lembre-se, a quantidade de pólos definida para os motores é específica para cada fase de ligação. Nos motores trifásicos a quantidade de pares de pólos é multiplicada por três, ex: um motor trifásico de 4 pólos possui internamente:



$$4 \text{ pólos} \times 3 \text{ fases} = 12 \text{ grupos de pólos.}$$

Os terminais de ligação dos grupos de pólos são identificados por algarismos numéricos que seguem uma seqüência lógica. Esse padrão é conhecido como “*Padrão Americano*”, de maneira que:

- 1 → 4 Grupo de Pólos Fase 1
- 2 → 5 Grupo de Pólos Fase 2
- 3 → 6 Grupo de Pólos Fase 3

Outro padrão também muito comum utiliza letras minúsculas para a identificação do grupo de bobinas de um motor trifásico, é chamado de “*Padrão Alemão*”, e segue a seguinte ordem:

- u → x Grupo de Pólos Fase 1 (1 - 4)
- v → y Grupo de Pólos Fase 2 (2 - 5)
- w → z Grupo de Pólos Fase 3 (3 - 6)

No exemplo da figura 13.4, podemos identificar o diagrama de conexão dos grupos de bobinas de um motor trifásico de 2 pólos com 6 pontas de ligação. Note que a quantidade de pólos é referente a cada fase, portanto teremos 6 pontas de conexão com o sistema de tensão externo. Veja que a identificação de início de cada fase é atribuída a um algarismo seqüencial, ou seja, número 1 (u) para entrada do grupo de pólos da fase 1, número 2 (v) para entrada do grupo de pólos da fase 2 e o número 3 (w) para entrada do grupo de pólos da fase 3, seguindo uma seqüência lógica. Já para as saídas de cada grupo de pólos a seqüência lógica é mantida, sendo o número 4 (x) é atribuído para saída do grupo de pólos da fase 1, o número 5 (y) é atribuído para saída do grupo de pólos da fase 2 e o número 6 (z) é atribuído para saída do grupo de pólos da fase 3.

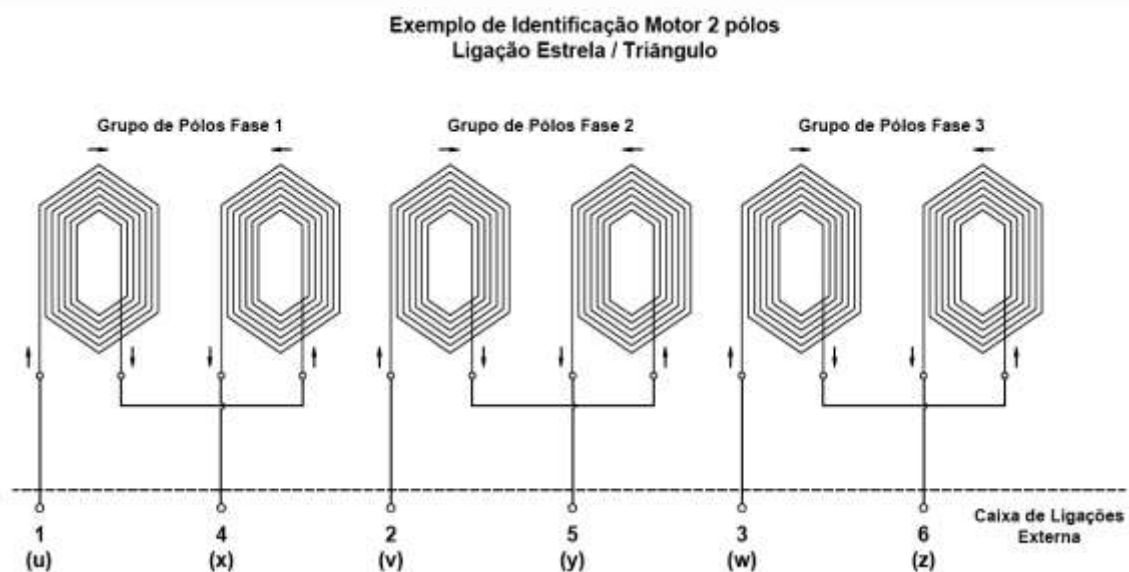


Figura 13.4



Não existe condutividade elétrica entre os pólos de fases distintas. Então, para um teste preliminar em um motor de 6 pontas, basta fazer uma medição de condutividade com os terminais desconectados entre os pontos 1/4 - 2/5 - 3/6, se for observada falha de condutividade entre os pontos ou condutividade em mais de dois pontos a condutividade do circuito do motor está interrompida ou em curto-circuito. O mesmo se aplica para o teste de isolamento; não poderá, em hipótese alguma, existir condutividade elétrica entre as pontas do motor e o seu chassi. Se em algum dos testes descritos forem observadas irregularidades, o motor deverá ser encaminhado para manutenção.

Maiores detalhes sobre as conexões e sistemas de alimentação dos motores serão abordados mais adiante no tópico 13.2.

Os motores de indução são especificados por meio de alguns dados básicos, que, aliados a suas características técnicas, definem como o dispositivo opera. O primeiro dado para especificação refere-se à potência fornecida à carga através do eixo do rotor, seguido pelo tipo de corrente elétrica de utilização, se monofásica ou trifásica, e a quantidade de revoluções fornecida à carga pelo rotor. Esses são dados básicos e sem tais informações não é possível o dimensionamento correto de um motor de indução. Outras características técnicas também devem ser observadas para um dimensionamento tecnicamente correto e eficiente de um motor, sendo: conjugado, categoria, fator de serviço, rendimento, classe de isolamento, regime e grau de proteção.

13.1.1 Potência Elétrica

A unidade que expressa a quantidade de potência fornecida é o CV, que é abreviatura do termo “*Cavalo-Vapor*”. Uma unidade de CV corresponde em termos elétricos a uma potência de 736W ou ainda em uma unidade mais usual 0,736 KW, outra unidade também muito conhecida pode ser utilizada para definição da potência fornecida por um motor de indução, trata-se do HP, que nada mais é do que a representação do termo em inglês “*Horse Power*”, que corresponde a um valor de potência elétrica equivalente a 746W ou 0,746 KW, dez watts a mais do que a definição cavalo-vapor. Portanto, ao definirmos que um motor possui uma potência de 3CV, por exemplo, estaremos lidando com uma carga elétrica de $3 \times 736W = 2.208 \text{ KW}$, e assim analogamente para a definição do HP, $3 \times 746W = 2.238 \text{ KW}$. Assim, com o conhecimento da proporção entre o termo CV/HP e a potência em Watts, podemos elaborar de forma simples uma relação matemática para conversão de $CV \rightarrow W$ ou $HP \rightarrow W$ e vice-versa.

$$Cv = \frac{\text{Potência [W]}}{736} \quad \therefore \text{Potência [W]} = CV \times 736$$

ou

$$Hp = \frac{\text{Potência [W]}}{746} \quad \therefore \text{Potência [W]} = Hp \times 746$$



13.1.2 Corrente Elétrica

Outro fator determinante para a definição de um motor de indução é o tipo de corrente elétrica em que ele será instalado, se monofásica ou trifásica. Motores monofásicos geralmente são utilizados para aplicações domésticas e não são fabricados em potências elevadas (maiores que 5 cv), já os motores fabricados para operação em sistemas trifásicos são mais comuns em meios industriais, e podem ser encontrados em potências que variam de 1/4 CV (184 W) até 500 CV (368 KW).

Um detalhe importante em relação aos motores trifásicos é a polivalência para operação em sistemas com níveis diferentes de tensão, ou seja, podem ser ligados nos vários padrões de tensão encontrados na planta industrial, 220Vca, 380Vca, 440Vca e 760Vca. A definição da faixa de tensão utilizada será definida logo adiante no tópico 13.2 “Tipo de Ligações”.

13.1.3 Revoluções por Minuto

O último detalhe a ser observado para o dimensionamento de um motor de indução é o número de revoluções fornecido pelo dispositivo à carga em um intervalo de tempo. A quantidade de revoluções para um motor de indução é definida pela quantidade de pares de pólos que possui, aliado ao tipo de motor utilizado, se síncrono ou assíncrono.

Motores Síncronos

Como visto anteriormente, de forma introdutória, no capítulo em que abordamos o tema Inversores de Frequência, vimos que os motores de indução se classificam em dois grupos básicos; os “motores síncronos” e “motores assíncronos”. A diferença entre os dois modelos é observada na rotação do eixo do rotor, um motor síncrono possui sua velocidade de rotação proporcional à frequência de sua alimentação aliado ao número de pares de pólos que o motor possui. Essa ligação pode ser expressa pela equação matemática:

Velocidade Síncrona

$$N = \frac{F \times 120}{P}$$

Onde :
N = Rotações por minuto [rpm]
F = Frequência da rede elétrica [Hz]
P = Número de pares de Pólos do motor

Motores Assíncronos

Já os motores assíncronos possuem sua velocidade de rotação ligeiramente menor do que a velocidade síncrona. Quando um motor elétrico



opera sem carga no eixo, ou seja, a vazio, a rotação obtida no eixo do rotor é muito próxima à rotação síncrona. Porém, quando uma carga é aplicada ao eixo, a movimentação do rotor se atrasa em relação ao campo girante. Isso demanda uma maior quantidade de corrente elétrica para que o sistema possa desenvolver um conjugado necessário para movimentação da carga imposta ao eixo. A essa defasagem de rotação do motor nessas condições chamamos de “escorregamento”, portanto a principal diferença entre um motor síncrono e um motor assíncrono é a influência do fator escorregamento na rotação do eixo do rotor.

De um modo geral, motores síncronos não são comuns em plantas industriais, somente são encontrados em aplicações especiais e específicas. A maioria das aplicações envolvem motores assíncronos, que possuem um custo relativamente baixo (quando comparado aos motores síncronos) e são encontrados com maior facilidade.

O fator escorregamento pode ser definido pela diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade real do eixo do rotor. Então, matematicamente, podemos dizer que a relação:

$$S = \frac{N - N_r}{N} \times 100$$

expressa o valor do escorregamento.

Onde : S = Escorregamento [%]
 N = Velocidade Síncrona [rpm]
 N_r = Velocidade real do rotor em carga plena [rpm]

O escorregamento é expresso em %, tendo como valores típicos a faixa de 1% a 5%, dependendo o tamanho do motor.

Exemplo: um motor elétrico de indução que possui os seguintes dados de projeto: frequência da rede 60 Hz; número de pares de pólos 4; escorregamento típico em plena carga 2,7 % . Pergunta-se:

- a) Qual a velocidade síncrona deste motor?
- b) Qual a velocidade assíncrona deste motor?

a) Velocidade Síncrona (N)

$$N = \frac{F \times 120}{p} \quad \therefore \quad N = \frac{60 \times 120}{4} \quad \therefore \quad N = 1800 \text{ rpm}$$

b) Velocidade Assíncrona (N_r)



$$S = \frac{N - Nr}{N} \times 100 \quad \therefore \quad 0,027 = \frac{1800 - Nr}{1800} \times 100 \quad \therefore \quad Nr = 1750 \text{ rpm}$$

...

Analisando o exemplo acima, podemos concluir que a velocidade assíncrona ou a velocidade real de um motor de indução convencional pode ser expressa pela equação:

Velocidade Assíncrona

$$Nr = \frac{F \times 120}{P} \times (1 - S)$$

De forma que: Nr = Rotações por minuto [rpm]

F = Frequência da rede elétrica [Hz]

P = Número de pares de pólos do motor

S = Escorregamento [%]

A partir dessas equações, podemos identificar facilmente os valores de rpm para motores de indução. Porém, na prática, os motores são fabricados com 2, 4, 6, 8 e 10 pares de pólos. Esse fator limita a rotação dos motores em cinco patamares fixos, são eles:

1. motores de 2 pólos 3400 rpm
2. motores de 4 pólos 1800 rpm
3. motores de 6 pólos 1200 rpm
4. motores de 8 pólos 900 rpm
5. motores de 10 pólos 720 rpm

No passado (e atualmente), para se conseguir valores diferentes de rotações, era necessária a construção de mecanismos para transformação de movimento (sistemas à base de polias ou engrenagens), pois, como a quantidade de pares de pólos é característica física e construtiva do motor e não pode ser alterada de forma fácil, os projetistas nessas situações só dispunham dessas alternativas. Hoje em dia, com o avanço da tecnologia, existem equipamentos capazes de manipular o sinal elétrico que é enviado ao motor (inversores de frequência). Esses equipamentos controlam os valores de frequência e tensão de alimentação do motor, proporcionando um controle linear e preciso dos valores de rotação, sem se preocupar efetivamente com a quantidade de pares de pólos existentes no motor.

13.1.4 Conjugado

O conjugado de um motor elétrico é definido como a força necessária para produção de movimento rotacional no eixo do rotor e, conseqüentemente, na carga. O conjugado também pode ser definido como torque ou momento



binário, e expressa uma medida de força e como tal pode ser mensurada em unidades padrões de força como Newtos/metro.

Para um melhor entendimento da definição do conjugado, devemos analisar um exemplo prático de como os esforços mecânicos são distribuídos sobre um sistema. Para isso observe a figura abaixo:

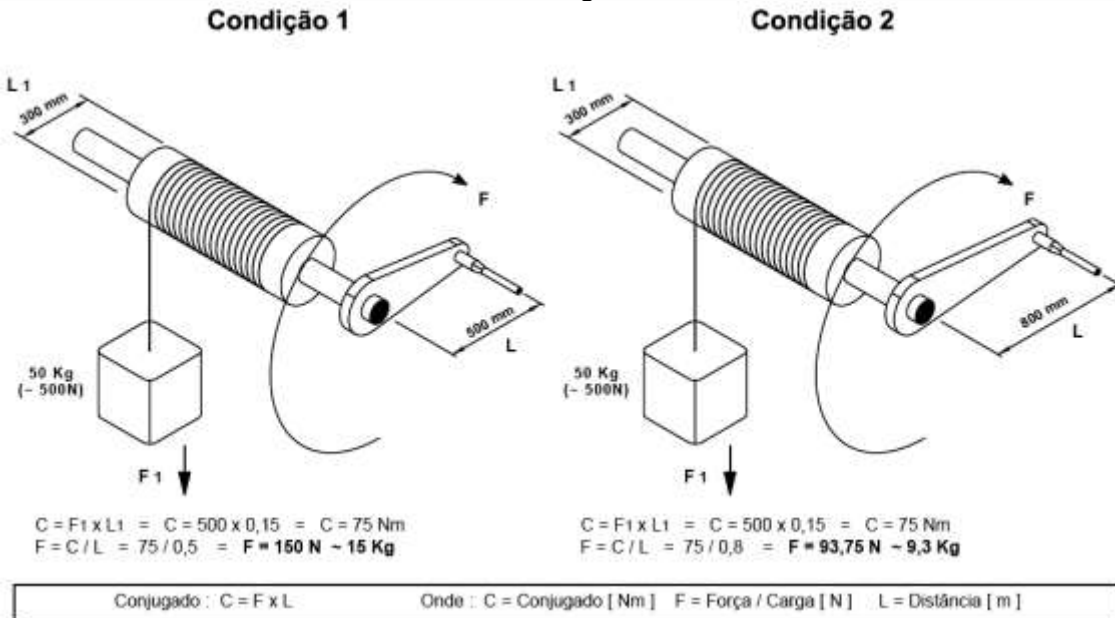


Figura 13.5

O desenho visto na figura 13.5 ilustra de forma simples o comportamento dos esforços envolvidos no sistema. Na condição 1 o sistema exemplifica a elevação de uma carga de 50Kg, aproximadamente 500N. Essa carga representada por F_1 será elevada por um cilindro com diâmetro de 300mm (0,3 m) L_1 . Desse modo, pela definição matemática do conjugado:

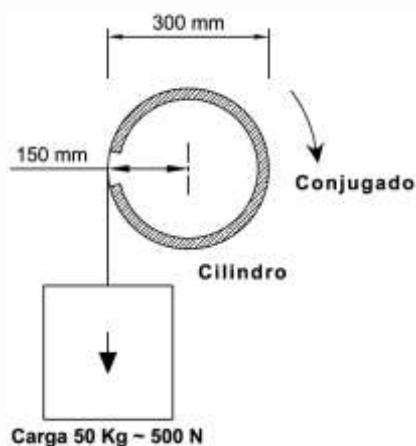
$$C = F \times L$$

Sendo: $C = \text{Conjugado [Nm]}$

$F = \text{Força / carga [N]}$

$L = \text{Distância entre o ponto de aplicação da força e a carga [m]}$

Podemos avaliar que o cilindro sofrerá um esforço mecânico que depende exclusivamente do valor da carga elevada (50 Kg) e da distância perpendicular ao centro do movimento, no exemplo metade do diâmetro do cilindro (150 mm). Portanto, se aplicarmos os valores na expressão matemática, obtemos:



$$C = F \times L \quad \therefore \quad C = 500 \text{ N} \times 0,15 \text{ m}$$

$$C = 75 \text{ Nm}$$



Figura 13.6

Agora, de posse dessas informações, podemos calcular a força necessária para elevação da carga de 50Kg se o movimento for aplicado no braço da alavanca, que, no exemplo condição 1 está a 500 mm (L) do centro do cilindro, utilizando novamente a definição de conjugado, podemos identificar que :

$$C = F \times L \quad \text{então} \quad F = \frac{C}{L}$$

$$F = \frac{C}{L} \quad \therefore \quad F = \frac{75 \text{ N}}{0,5 \text{ m}} \quad \therefore \quad F = 150 \text{ Nm} \quad \text{ou} \quad \approx 15 \text{ Kg}$$

Agora, analisando as mesmas condições do exemplo, porém com o braço de alavanca maior, 800 mm (L) condição 2, a quantidade de força aplicada para movimentação da mesma carga será menor, acompanhe:

$$F = \frac{C}{L} \quad \therefore \quad F = \frac{75 \text{ N}}{0,8 \text{ m}} \quad \therefore \quad F = 93,75 \text{ Nm} \quad \text{ou} \quad \approx 9,3 \text{ Kg}$$

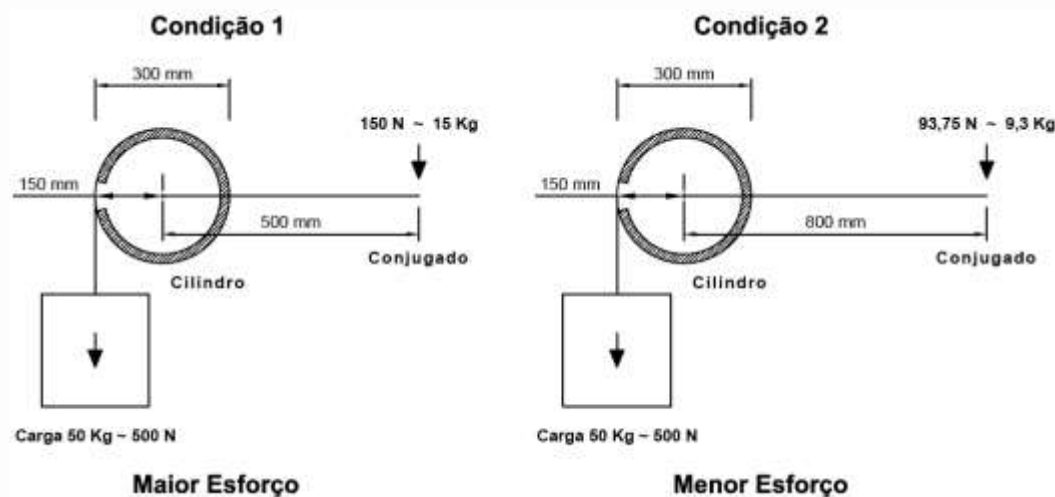


Figura 13.7

Portanto o “esforço” é medido pelo conjugado, que é o produto da força pela distância, $F \times L$, e quanto maior a distância menor o esforço empregado no sistema.

O conjugado de um motor elétrico influencia diretamente na potência do sistema. Quando a energia mecânica é aplicada pelo rotor em forma de movimento rotacional à carga, a potência fornecida é determinada pela



velocidade de rotação juntamente com o valor do conjugado. Matematicamente, essa relação pode ser expressa por:

- **Potência em função do conjugado**

Potência em CV (cavalo-vapor)

$$P (cv) = \frac{C [Nm] \times N [rpm]}{7024}$$

Potência em KW (watts x 1000)

$$P (kW) = \frac{C [Nm] \times N [rpm]}{9555}$$

- **Conjugado em função da potência**

Conjugado CV (cavalo-vapor)

$$C (Nm) = \frac{7024 \times P [cv]}{N [rpm]}$$

Conjugado kW (watts x 1000)

$$C (Nm) = \frac{9555 \times P [kW]}{N [rpm]}$$

Exemplo: calcule o conjugado nominal de um motor de indução com potência de 3cv 2,2kW, 4 pólos, 60Hz, com escorregamento típico de 4,16 % .

O primeiro passo é a identificação da velocidade real do motor em função de seu escorregamento e número de pólos. Para isso basta utilizar a expressão que representa a velocidade assíncrona do motor vista anteriormente:

$$Nr = \frac{F \times 120}{p} \times (1 - S) \quad \therefore \quad \frac{60 \times 120}{4} \times (1 - 0,0416) \quad \therefore \quad Nr = 1725 \text{ rpm}$$

Sendo: Nr = Rotações por minuto [rpm]
 F = Frequência da rede elétrica [Hz]
 P = Número de pares de pólos do motor
 S = Escorregamento [%]

Então, utilizando-se da expressão do conjugado em função da potência, podemos definir que:

$$C (Nm) = \frac{7024 \times P [cv]}{N [rpm]} \quad \therefore \quad \frac{7024 \times 3}{1725,12} \quad \therefore \quad C = 12,21 \text{ Nm}$$

Assim um motor de 3cv, 4 pólos, 60 Hz, 1725 rpm apresenta conjugado típico de **12,21 Nm**.

13.1.5 Categoria

De acordo com as características de conjugado em relação à velocidade e correntes de partida, os motores elétricos de indução são classificados em cinco categorias regulamentadas pela norma internacional NEMA. Cada



categoria especifica o tipo de aplicação em que o motor poderá ser utilizado para obtenção de seu melhor rendimento.

Categoria A - conjugado de partida normal; corrente de partida alta; escorregamento na faixa de 5 %. Utilizados em sistemas convencionais, em que o equipamento não apresente problemas de partida nem limitações de corrente.

Categoria B - conjugado de partida normal; corrente de partida normal; escorregamento baixo, na faixa de 2% a 3%. Representa a grande maioria dos motores utilizados na indústria, indicado para cargas comuns como bombas d'água e sistemas mecânicos em geral.

Categoria C - conjugado de partida alto; corrente de partida normal; escorregamento baixo. Indicado para cargas maiores ou equipamentos que demandam uma maior potência na partida como moinhos, esteiras transportadoras ou cargas de alta inércia.

Categoria D - conjugado de partida alto; corrente de partida normal; escorregamento elevado, acima de 5%. Indicado para sistemas em que a carga apresente variação de potência, como em prensas, trituradores, elevadores ou cargas semelhantes.

Categoria F - conjugado de partida baixo; corrente de partida baixa; escorregamento baixo. Indicado para cargas em sistemas em que a partida e paradas são constantes, sem a demanda de potência elevada na partida, equipamentos com limitação na corrente de partida.

13.1.6 Fator de Serviço

O termo fator de serviço refere-se à capacidade extra de potência do motor elétrico, ou seja, podemos dizer que é uma reserva extra de potência que o motor poderá operar em regime contínuo em condições específicas. Esse fator faz referência a capacidade do motor operar em sobrecarga contínua, esta característica é muito útil quando a carga sofre variações ou picos repentinos, o termo fator de serviço é observado na placa de identificação do motor pela sigla "FS" acompanhado de um valor numérico, que pode variar de 1.0 a 1.15 tipicamente, esse fator refere-se à quantidade de potência extra que o motor tem a fornecer, por exemplo, um motor com fator de serviço igual a 1.15 pode fornecer até 15% de potência extra. Exemplo:

- **Motor de 3 cv 2,2 kW com FS = 1.0**

Potência extra = 3 cv x 1.0 = 3cv 2,2 kW - Não possui potência extra disponível.

- **Motor de 3 CV 2,2 kW com FS - 1.15**

Potência extra = 3 CV x 1.15 = 3.45 CV 2,53 kW - possui uma reserva extra de 0,45 cv ou 0,33 kW.



Um motor com fator de serviço igual a 1.0 identifica que o motor não é especificado para operação continuamente acima de sua potência nominal, porém não indica que ele não possa sofrer sobrecargas momentâneas.

A norma NBR 7094 traz as especificações dos valores de “FS” relacionados com a potência do motor.

13.1.7 Rendimento

Todo o sistema mecânico ou elétrico que realiza trabalho ou demanda uma certa quantidade de energia para seu funcionamento traz intrinsecamente ao sistema o fator de perdas. Os motores por exemplo, apresentam perdas fixas e perdas variáveis. As perdas fixas podem ser relacionadas ao ferro, ruído ou atrito mecânico entre os mancais, já as perdas variáveis estão relacionadas ao carregamento do motor, como as perdas no cobre que evoluem de forma quadrática com a corrente de carga.

Quando o motor opera com cargas pequenas ou sobredimensionadas, o rendimento do motor é baixo, considerando que as perdas fixas são elevadas quando comparada à potência fornecida. Por outro lado, quando carregamos um motor elétrico, o rendimento tende a se elevar até a seu valor máximo que é definido no momento de equivalência entre as perdas fixas e variáveis. Após esse ponto com o motor sub-dimensionado, as perdas no cobre tendem a se elevar em relação às perdas fixas, provocando, portanto, a diminuição do rendimento.

De um modo claro, a definição de rendimento pode ser descrita como sendo a relação entre a potência fornecida ao sistema pela potência entregue, ou seja, é a soma de todas as perdas mecânicas ou elétricas envolvidas em um sistema.

O fator rendimento é expresso simbolicamente pela sigla “ η ”, dada em percentagem, a relação matemática entre a potência fornecida e a potência obtida é dada por:

$$\eta = 1 - \frac{\sum \text{Perdas}}{P_a}$$

sendo: η = Rendimento %

Σ Perdas = Somatório de todas as perdas do sistema

P_a = Potência solicitada da rede

Exemplo: um motor elétrico de indução, quando em funcionamento em regime contínuo carregado, solicita da rede elétrica uma potência de 2.4 kW, as perdas fixas observadas neste motor juntas equivalem a uma potência elétrica de 100W. Já as perdas variáveis são muito próximas de 300W, pergunta-se: qual o rendimento observado no sistema?

$$\eta = 1 - \frac{\sum \text{Perdas}}{P_a} \therefore 1 - \frac{100 + 300}{2400} \therefore 1 - 0,1666 \therefore 0,83 \approx 83\%$$



O rendimento observado é de $\approx 83\%$, portanto 17% da potência fornecida ao sistema é perdida no sistema.

13.1.8 Classe de Isolamento

Classe de isolamento indica as características de isolamento de um motor elétrico em relação à temperatura. Ela define o tipo de material isolante utilizado internamente para isolamento das bobinas e fiação do motor. Existem cinco classes distintas de isolamento, todas normalizadas e de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e podem ser identificadas pelas letras A - E - B - F - H, sendo:

- Classe "A" = 105 °C
- Classe "E" = 120 °C
- Classe "B" = 130 °C
- Classe "F" = 155 °C
- Classe "H" = 180 °C

Motores convencionais são fabricados nas classes de isolamento "B" e "F".

13.1.9 Regime

O termo regime diz respeito ao grau de regularidade da carga a que o motor é submetido. Normalmente os motores são especificados para operação em "regime contínuo", o motor opera com sua capacidade máxima de potência em todo o seu período de funcionamento, isto é, operação com capacidade máxima constante por tempo indefinido.

A identificação do tipo de regime em que um motor poderá operar é classificado em dez categorias, identificado pela siglas S1 - S2 ... S10. Cada sigla define um modelo diferente de operação, são elas:

S1 - Regime contínuo: o motor funciona com carga nominal até que se estabeleça o equilíbrio térmico do conjunto.

S2 - Regime de tempo limitado: o motor opera com carga nominal durante um período de tempo, que é inferior ao estabelecimento do equilíbrio térmico do conjunto.

S3 - Regime intermitente periódico: o motor opera em seqüência de ciclos iguais, com um período de funcionamento à carga constante e um período de repouso, sendo que o período em que o motor está em operação não seja suficiente para obtenção do equilíbrio térmico do sistema.

S4 - Regime intermitente periódico com partidas: o motor opera em seqüências de ciclos iguais, incluindo um ciclo de partida, um período de operação com carga constante e um período de repouso, sendo que os



períodos de partida e operação não sejam suficientes para obtenção do equilíbrio térmico do sistema.

S5 - Regime intermitente periódico com frenagem elétrica: o motor opera em seqüências de ciclos iguais, sendo um dividido em um ciclo de partida, período de operação com carga constante, um período de frenagem elétrica e um período de repouso, sendo que os períodos de partida e operação não sejam suficientes para obtenção do equilíbrio térmico do sistema.

S6 - Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente: o motor opera em seqüência de ciclos iguais, sendo um período de operação com carga constante e outro período de operação a vazio, sem período de repouso. Equilíbrio térmico do sistema obtido durante a operação.

S7 - Regime de funcionamento contínuo periódico com frenagem elétrica: o motor opera em seqüência de ciclos iguais, sendo um período de operação com carga constante e um período de frenagem elétrica, sem período de repouso. Equilíbrio térmico do sistema obtido durante a operação.

S8 - Regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga X velocidade de rotação: o motor opera em seqüência de ciclos iguais, compreendendo um período de partida e um período de operação em carga constante a uma velocidade de rotação prefixada, seguindo de um ou mais períodos de operação a outras cargas constantes, correspondentes a outras velocidades de rotação, sem período de repouso. O equilíbrio térmico do sistema é obtido em todos os ciclos de operação.

S9 - Regime com variações não periódicas de carga e de velocidade: o motor opera em ciclos em que a velocidade e a carga não variam de forma periódica dentro da faixa nominal, operação com freqüentes sobrecargas superiores à carga nominal. Equilíbrio térmico do sistema obtido durante a operação.

S10 - Regime com cargas constantes distintas: o motor opera constantemente em carga constante, incluindo no máximo quatro valores distintos de carga, cada ciclo de operação obtém o equilíbrio térmico do sistema. A carga mínima do sistema durante um ciclo de operação pode chegar a zero, ou seja, motor operando a vazio ou em repouso.

Fonte: WEG Motores

13.1.10 Grau de Proteção

O termo “grau de proteção” faz referência a um código padronizado que define o grau de proteção de um motor contra a entrada de água ou impurezas sólidas. Os códigos utilizados para identificação são definidos inicialmente pela sigla “IP”, seguido por dois algarismos identificadores da classe de proteção. O quadro abaixo ilustra essa codificação.

	IP			
--	----	--	--	--



Quadro 1	
0	Sem proteção
1	Protegido contra objetos sólidos maiores do que 50 mm
2	Protegido contra objetos sólidos maiores do que 12 mm
3	Protegido contra objetos sólidos maiores do que 2,5 mm
4	Protegido contra objetos sólidos maiores do que 1 mm
5	Protegido contra poeira
6	Totalmente protegido contra poeira
Quadro 2	
0	Sem proteção
1	Protegido contra quedas verticais de gotas d'água
2	Protegido contra quedas verticais de gotas d'água para uma inclinação máx. de 15°
3	Protegido contra água aspergida
4	Protegido contra projeções d'água
5	Protegido contra jatos d'água
6	Protegido contra ondas do mar
7	Protegido contra imersão
8	Protegido contra submersão

Tabela 13A

A tabela 13A define a codificação para os graus de proteção para motores, porém essa codificação é normatizada e utilizada para qualquer tipo de dispositivo elétrico, por exemplo:

- Um motor com grau de proteção IP 65

Dispositivo totalmente protegido contra poeira e jatos d'água.

- Um painel elétrico com grau de proteção IP 68

Painel totalmente protegido contra poeira e com proteção contra submersão em água.

13.2. Tipos de Ligações



Antes de abordarmos os tipos e métodos de ligação dos motores elétricos de indução, é necessário conhecermos os princípios básicos dos sistemas de distribuição e fornecimento de energia, bem como um entendimento prévio de como a energia elétrica chega ao consumidor final, seja doméstico, comercial seja industrial, juntamente com as configurações dos circuitos e ligações disponíveis.

No Brasil o sistema padronizado de fornecimento de energia elétrica é dividido em duas classes, monofásico e trifásico, ambos na frequência de 60 Hz corrente alternada (CA). O sistema monofásico é usualmente aplicado a consumidores domésticos e pequenos consumidores comerciais. Já o sistema trifásico é destinado a consumidores que demandam uma maior potência de consumo, como em alguns segmentos comerciais e os setores industriais. Nos tópicos 13.2.1 e 13.2.2 é apresentada uma introdução básica desses sistemas.

13.2.1 Sistema Monofásico

A tensão elétrica em corrente alternada "CA" disponível em nosso sistema de distribuição e conseqüentemente em nossas residências traz a característica de que energia varia ao decorrer do tempo, mudando do sentido positivo para o negativo alternadamente inúmeras vezes por segundo, daí a especificação "corrente alternada" ou simplesmente "CA". A quantidade de vezes que a corrente elétrica troca de polaridade é definida pelo termo frequência. A frequência é estabelecida medindo a alternância da corrente em um período de 1 segundo. No Brasil a frequência estabelecida é de 60 Hz, portanto nossa rede elétrica troca de polaridade 60 vezes por segundo.

Para que exista a troca de polaridade, a tensão varia de $-V$ a $+V$. Assim, se visualizarmos o comportamento da tensão de forma sistemática, obtemos um sistema senoidal, ou seja, o fator tempo aliado à variação da amplitude da energia caracteriza uma onda senoidal.

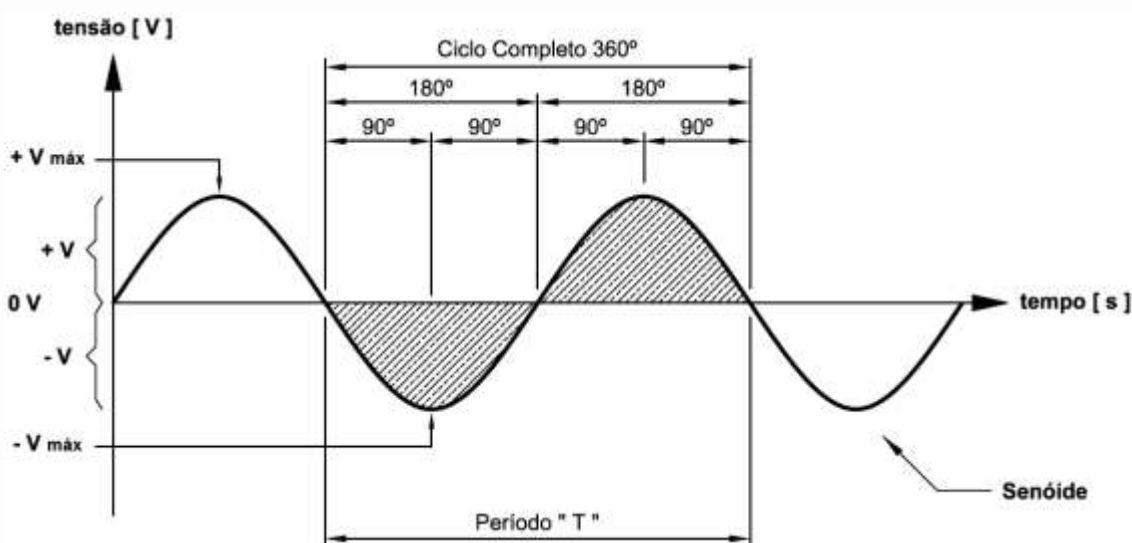


Figura 13.8



Na figura 13.8 visualizamos um ciclo de variação em que a tensão alterna de -V a +V, quando o ciclo é completado é iniciado novamente de forma contínua, um ciclo completo é definido como período “T” em segundos. O período completo de uma onda senoidal corresponde a 360°, subdividido em parcelas simétricas. Assim, a parcela negativa assume o intervalo de 0 a 180° e a parcela positiva o intervalo de 180° a 360°, ou vice-versa, dependendo da referência inicial adotada. Analisando cada parcela individualmente, podemos identificar que a 90° os valores chegam ao ponto máximo de -V máx e +V máx, a frequência é observada analisando quantos períodos completos temos em um intervalo de 1 segundo; em nosso caso 60.

A relação entre o período “T” e a frequência “f”, é expressa pela equação:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{ou} \quad f = \frac{1}{T}$$

Então, para nossa rede que oscila em 60 Hz, temos que uma fatia de tempo “T” é expressa por:

$$T = \frac{1}{f} \quad \therefore \quad T = \frac{1}{60} \quad \therefore \quad T = 0,01666 \text{ ou seja, } 16,6 \text{ milissegundos}$$

No sistema monofásico, a tensão alternada é aplicada entre dois fios, ao qual se conecta a carga, uma vez alimentando a carga com uma tensão alternada é gerada conseqüentemente uma corrente alternada, que pode estar em fase ou não com a tensão alternada aplicada. A forma de onda da corrente é muito semelhante à forma de onda da tensão, diferenciando-se somente nos valores de intensidade e fase angular.

13.2.2 Sistema Trifásico

O sistema trifásico é idêntico ao sistema monofásico, seguindo os mesmos princípios de variação no tempo e amplitude, porém com a característica de possuir três circuitos independentes defasados entre si em um ângulo de 120°, ou seja, os períodos correspondentes a cada ciclo de fase se iniciam com atraso de 120° em relação ao ciclo anterior.



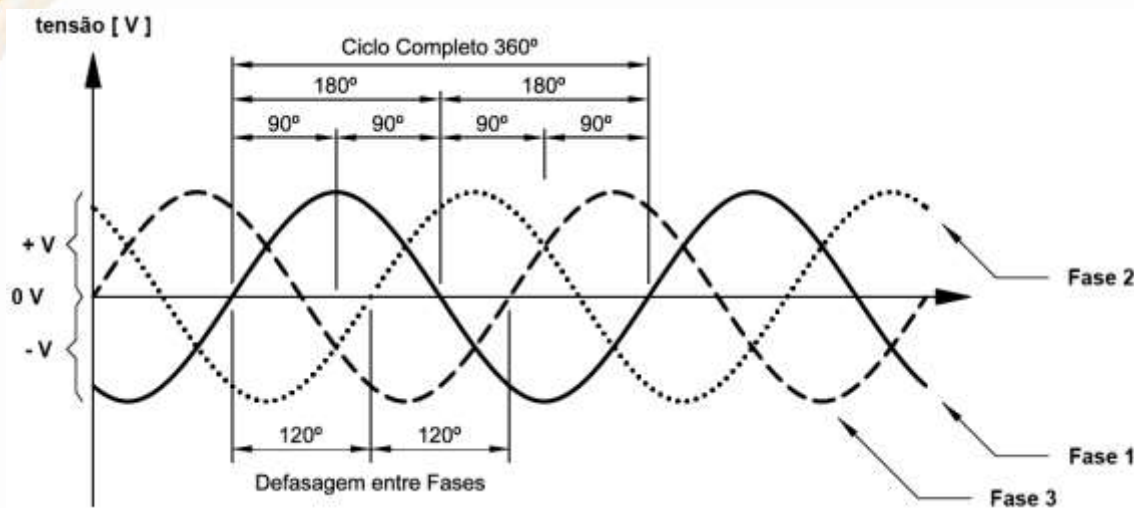


Figura 13.9

A seqüência de fases observada na figura 13.9 ilustra um sistema trifásico puro, o ponto de referência tomado para marcação das seqüências de fase 1, fase 2 e fase 3 é arbitrária. Como o sistema é simétrico, qualquer referência tomada para análise automaticamente reflete a defasagem de 120° entre as fases.

Vale lembrar que, quando esse sistema de tensão alimenta uma carga qualquer, obtemos conseqüentemente mais três sinais senoidais referentes à corrente elétrica, que podem estar defasados ou não em relação ao sinal de tensão, dependendo exclusivamente da característica da carga alimentada (circuito resistivo, capacitivo ou indutivo).

Nota: As características de um sistema monofásico ou trifásico de corrente alternada podem ser observadas com maiores detalhes em conteúdos referentes ao tema “Potência em Corrente Alternada”. O texto anterior serve apenas como referência inicial para o assunto.

. . .

Os valores padrões de tensão de fornecimento para maioria dos pequenos consumidores industriais e comerciais estão definidos na classe BT ou baixa tensão, e possuem os seguintes valores:

- Circuitos Monofásicos: 127 V (conhecido por 110 V) ou 220 V.
- Circuitos Trifásicos: 220V, 380V ou 440V

Em alguns casos em que a demanda de energia é muito elevada, o fornecimento pode ser realizado em classes de tensões mais altas, como em alguns consumidores industriais. Nesse caso o fornecimento é realizado somente na configuração trifásica em média ou alta tensão, e assume tipicamente os valores:

- Média tensão: 2.200 V, 4.160V ou 6.600 V
- Alta tensão: 13.200 V, 13.600 V ou 13.800V

O sistema monofásico pode ser obtido por meio da derivação de um sistema trifásico. Essa definição está relacionada à forma como o circuito está conectado ao secundário de um transformador rebaixador. Os transformadores rebaixadores podem ser observados por toda a parte na rede pública e são responsáveis pela interface elétrica entre o circuito de transmissão AT (alta tensão) para BT (baixa tensão). De um modo geral, os transformadores são os responsáveis pelo fornecimento final de energia elétrica ao consumidor, possuem sua interface secundária (BT) ligado em uma configuração que chamamos de “Ligação Estrela” ou simplesmente “Y”. É a partir desta configuração que obtemos os circuitos monofásicos e trifásicos.

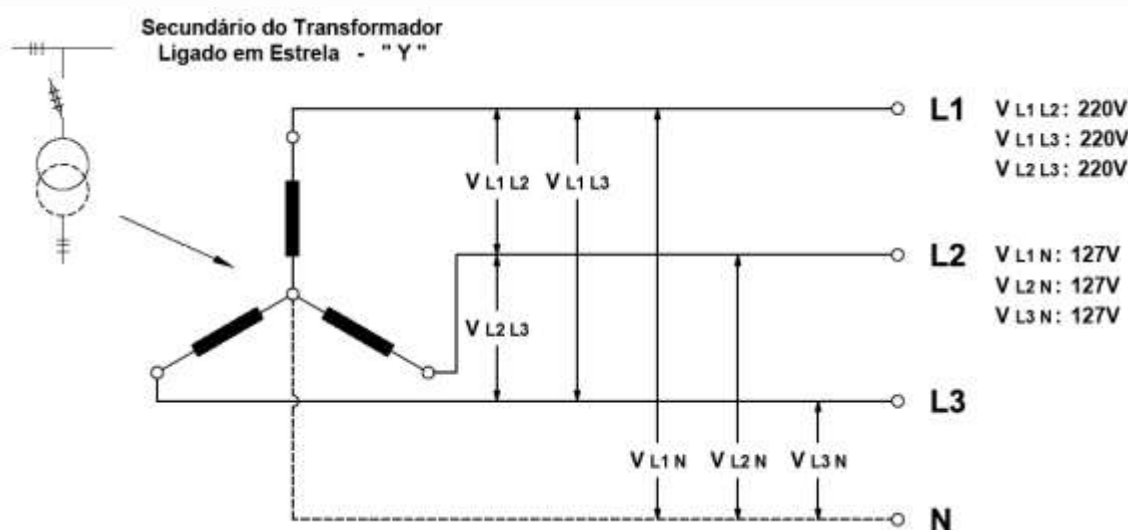


Figura 13.10

A figura 13.10 traz uma ligação típica de um transformador rebaixador em que obtemos os níveis de tensão para fornecimento ao consumidor em BT (baixa tensão), representadas pelas conexões L1 (fase 1), L2 (fase 2), L3 (fase 3) e N (neutro). Note que o circuito trifásico é referenciado pelas conexões a três fios: L1 - L2 - L3 que definem três fases distintas e onde respectivamente obtemos as tensões de 220V.

- $V_{L1L2} = 220 V$
- $V_{L1L3} = 220 V$
- $V_{L2L3} = 220 V$

Já em um circuito monofásico a ligação é definida pela conexão a dois fios.

- Para tensões monofásicas de 127 V:

$$V_{NL1} = 127 V \quad \text{ou} \quad V_{NL2} = 127 V \quad \text{ou} \quad V_{NL3} = 127 V$$

- Para tensões monofásicas de 220 V:

$$V_{L1L2} = 220 V \quad \text{ou} \quad V_{L1L3} = 220 V \quad \text{ou} \quad V_{L2L3} = 220 V$$

Obs: Essas configurações fazem referência à classe de tensão de 220/127V tipicamente a mais usual. Outras configurações também são encontradas como 380/220V ou 440/254V, seguindo a mesma metodologia.

Os motores elétricos de indução sem exceção devem estar preparados para operação nos níveis padrões de tensões disponíveis na rede pública. Por essa razão as conexões que estabelecem os níveis de tensão em que o motor irá operar são extraídas do interior do estator e deixadas à disposição para a conexão externa. Independentemente da quantidade de pólos observada em um motor de indução, os métodos de conexões são sempre os mesmos. Portanto, para motores trifásicos, a análise pode ser comparada a três sistemas monofásicos independentes.

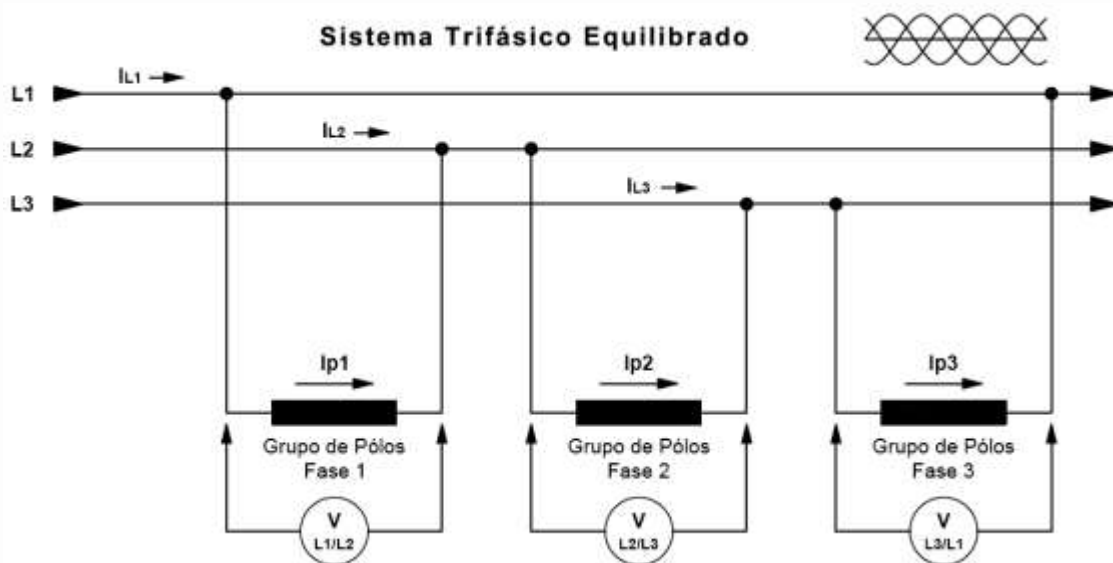
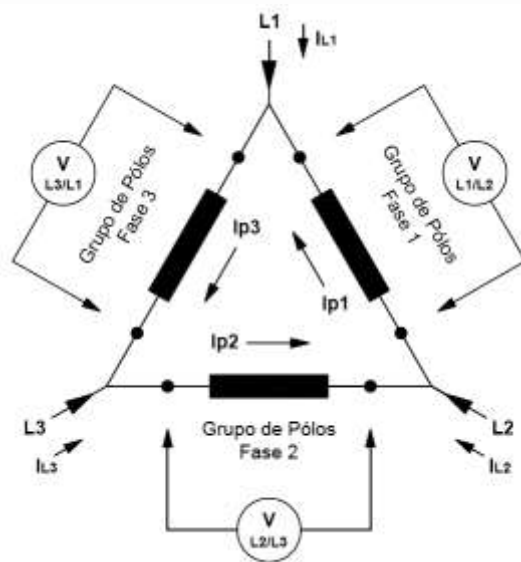


Figura 13.11

Observando a figura 13.11 identificamos os três grupos de pólos de um motor elétrico trifásico. Esses grupos estão conectados à rede elétrica de forma a manter o equilíbrio entre fases. A tensão nominal da rede é aplicada diretamente entre os pontos de conexão de cada grupo onde também é observada uma corrente elétrica equilibrada para cada grupo de pólo. Sendo $V_{L1/L2} = V_{L2/L3} = V_{L3/L1}$ e $I_{p1} = I_{p2} = I_{p3}$.

Redesenhando o circuito, é possível eliminar três fios, deixando apenas um em cada ponto de ligação sem alteração das características elétricas do circuito. Assim, o circuito ficará em função de L1, L2 e L3.

Analisando a malha do circuito redesenhada, podemos afirmar que a tensão da rede será a mesma em todas os grupos de pólos. Já a corrente elétrica da rede é dividida entre 2 grupos distintos, portanto:

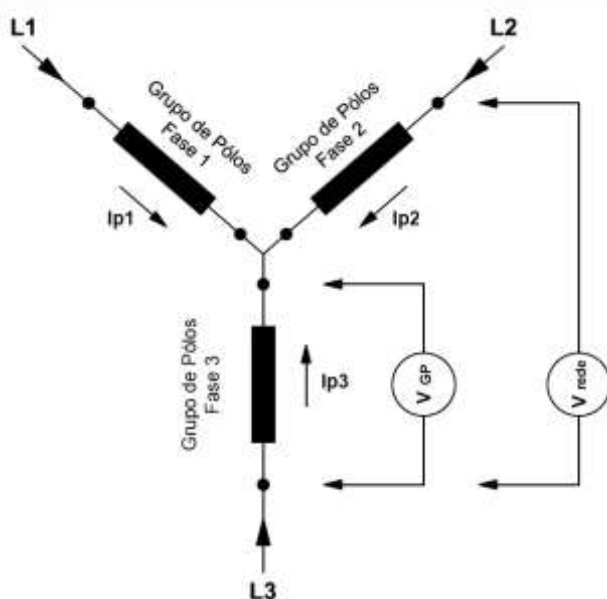


- Tensão de Linha = Tensão Grupo de Pólos
- Corrente de Linha = $\sqrt{3}$ x Corrente do Grupo de Pólos

Essa configuração é chamada de ligação em Triângulo - Δ

Figura 13.12

Verificando novamente o circuito, é possível reestruturá-lo para que a tensão seja distribuída em dois grupos de pólos ao invés da corrente elétrica. Dessa forma invertemos a relação, e o fator $\sqrt{3}$ passa a corrigir os valores de tensão e não mais a corrente como na ligação triângulo, acompanhe:



Observando esta nova configuração dos grupos de pólos de um motor elétrico trifásico, podemos afirmar que a tensão da rede agora é dividida entre 2 grupos de pólos distintos e a corrente elétrica será a da rede. Desse modo invertemos a relação entre a corrente e a tensão vista na ligação em triângulo, então:

- Tensão de linha = $\sqrt{3}$ x tensão grupo de pólos
- Corrente de linha = corrente do grupo de pólos

Figura 13.13

Essa configuração é chamada de ligação em estrela - Y

Os motores, de um modo geral, são especificados para operação em no mínimo dois valores de tensão. Existem motores específicos para ligações monofásicas e trifásicas, sendo os modelos monofásicos dedicados a baixas potências, já que essa configuração de rede é dedicada ao atendimento a pequenos consumidores domésticos.

Os motores monofásicos são utilizados comumente em máquinas, como lavadora de roupas, geladeiras, centrífugas, portões eletrônicos, enfim, na maioria dos equipamentos que necessitam de um elemento motriz com baixa potência para uso doméstico. A faixa de potência observada em motores monofásicos varia de 0,12 cv (0,9 kW) a 3,0 cv (2,2 kW), fabricados para conexões monofásicas de 127 V ou 220 V. Já os motores trifásicos são destinados a aplicações industriais em que a demanda de energia mecânica é maior. Os motores trifásicos podem ser encontrados com potências que variam de 0,16 cv (0,12 Kw) até 500 cv (370 Kw).

Ambos os motores, monofásicos e trifásicos, possuem configurações de ligações que lhes permitem a operação em níveis de tensões diferentes.



Essas ligações são definidas pela associação das bobinas internas do estator, sendo que a associação correta dos pólos proporciona a operação em diversos níveis de tensão. Para a realização dessas ligações, o bobinado interno do motor é construído de modo a fornecer seis ou doze pontas para fechamento (duas ou quatro pontas por fase), sendo que a configuração de doze pontas é resultante da divisão do bobinado de seis pontas em duas partes iguais. A figura abaixo ilustra a configuração dos dois tipos.

**Configuração do Bobinado de Motores Trifásicos
6 pontas / 12 pontas**

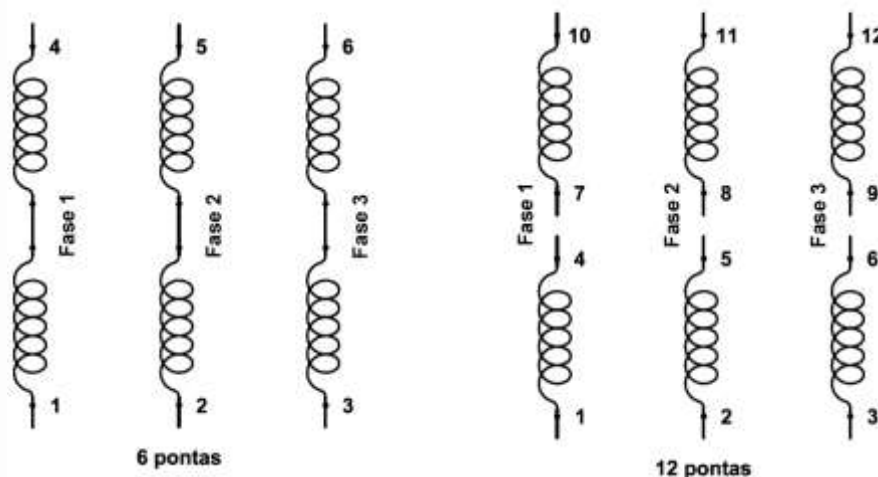


Figura 13.14

A partir do fechamento correto das pontas de conexão, as ligações podem ser definidas em oito grupos diferentes, equivalentes às várias classes de tensões disponíveis no sistema de distribuição, são elas:

- Ligação triângulo
- Ligação estrela
- Ligação série-paralela triângulo
- Ligação série-paralela estrela
- Ligação triângulo-paralela
- Ligação estrela-paralela
- Ligação triângulo-série
- Ligação estrela-série

Todas essas ligações fazem referência aos princípios da análise do comportamento das tensões e correntes elétricas observadas nas ligações triângulo “ Δ ” e estrela “Y”, abordadas anteriormente.

13.2.3 Ligação Triângulo

O método de ligação triângulo é aplicado exclusivamente em motores com seis terminais de conexão. Essa ligação define ao motor a condição de operação em uma tensão de 220V trifásico. Nessa configuração cada grupo de pólos receberá a tensão da linha (L1 L2 L3), a corrente elétrica de cada fase de



alimentação (If) se divide entre dois grupos de pólos a uma razão de $\sqrt{3}$ (1,73), estabelecendo então que a corrente que circula individualmente em cada pólo (Ip) seja : $I_p = I_f \times \sqrt{3}$.

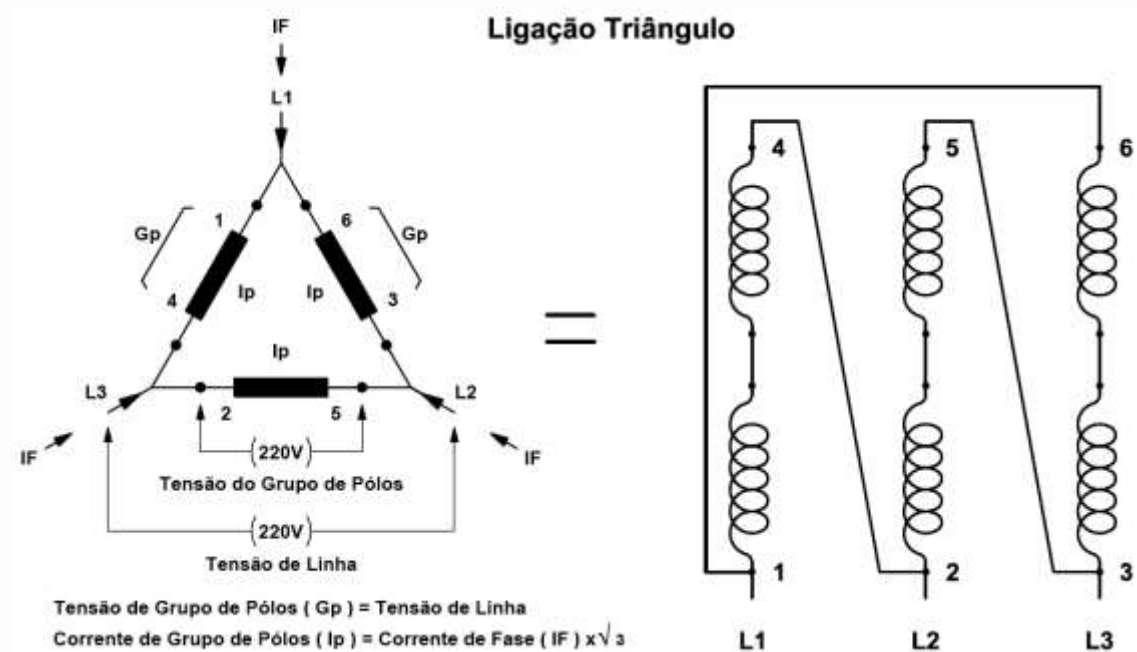


Figura 13.15

13.2.4 Ligação Estrela

A ligação em estrela é a segunda opção de ligação para um motor trifásico com seis terminais de conexão, ou seja, se o motor pode ser ligado em triângulo (fig 13.5), também pode ser ligado em estrela. Nessa ligação o motor poderá operar em redes com tensão igual a 380V. A tensão que cada grupo de pólos do motor (Gp) receberá é produto da tensão da rede pelo fator $\sqrt{3}$, por exemplo $220V \times \sqrt{3} = 380V$. Portanto, a tensão em que cada grupo de pólos estará submetida será a mesma da ligação em triângulo. A diferença do circuito é notada na corrente que circula individualmente em cada grupo de pólos (Ip), agora será igual à corrente de fase (If). A figura 13.16 ilustra essa ligação:

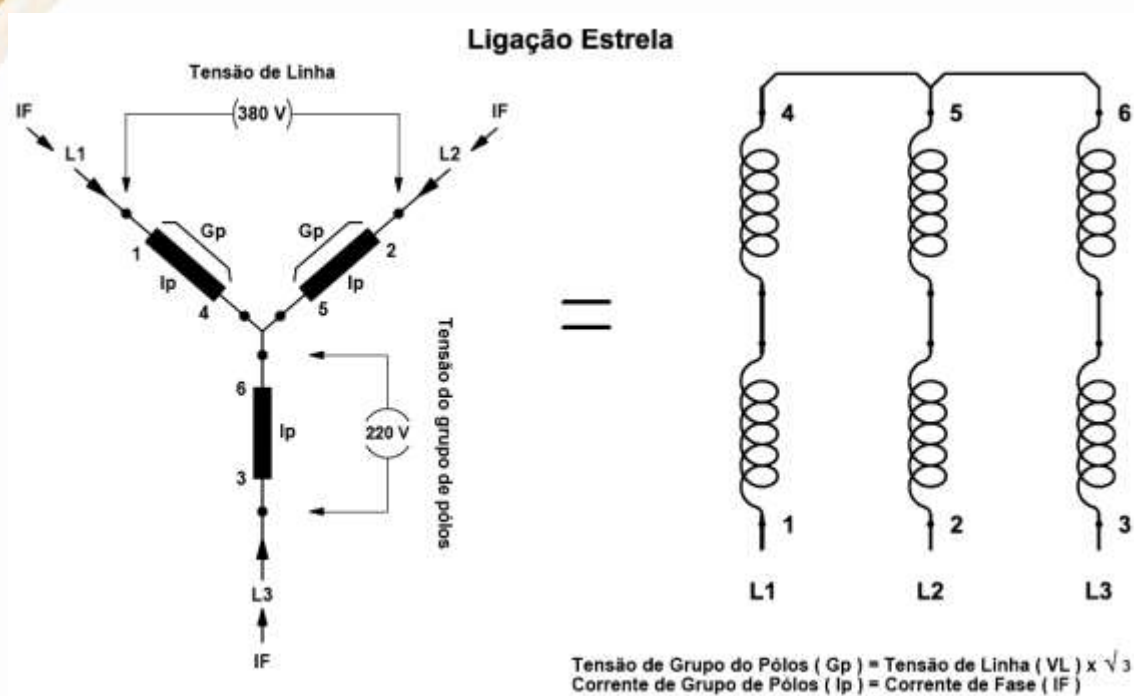


Figura 13.16

13.2.5 Ligação Série-Paralela Triângulo

A ligação série-paralela triângulo é caracterizada pela existência de nove pontas para conexão do motor. As nove pontas de conexão são obtidas a partir de uma configuração de doze pontas, ou seja, três pontas são conectadas internamente no estator e não estão disponíveis na caixa de ligação do motor. A figura abaixo ilustra essa configuração.

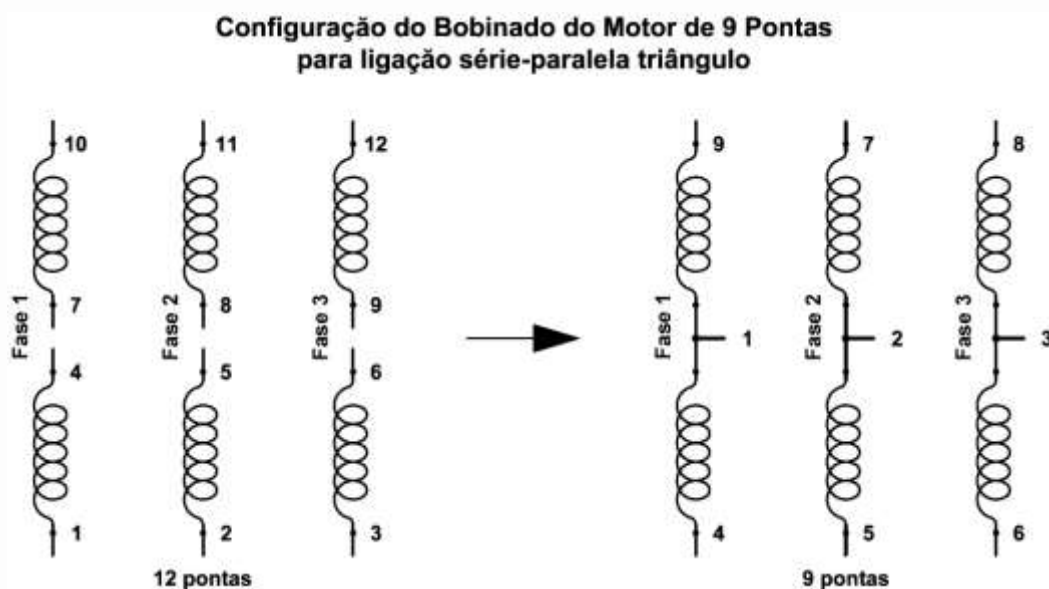


Figura 13.17

A configuração com nove pontas permite a operação do motor em duas classes de tensões diferentes, obedecendo à regra que a tensão maior seja o dobro da tensão menor, tipicamente 220/440V. Quando o motor é configurado



para operação em uma rede com tensão de 220V, a ligação do grupo de pólos é feita em paralelo. Mas quando a tensão de operação é 440V, a ligação definida para o grupo de pólos é série.

Ligação em Paralelo: 220V

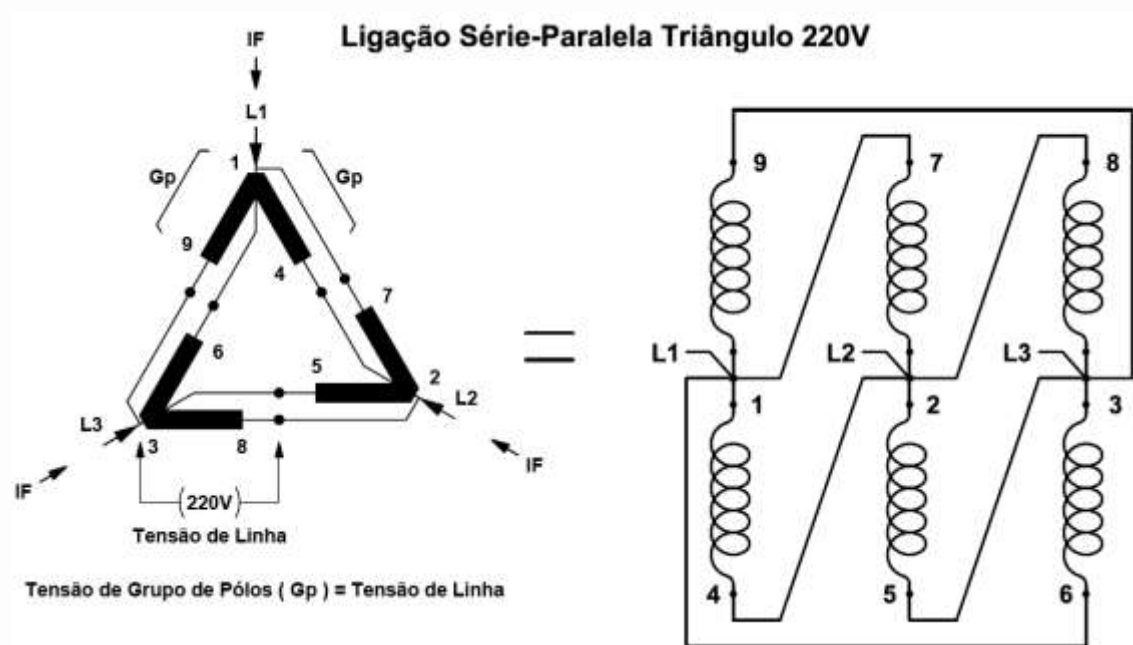


Figura 13.18

Ligação em série: 440V

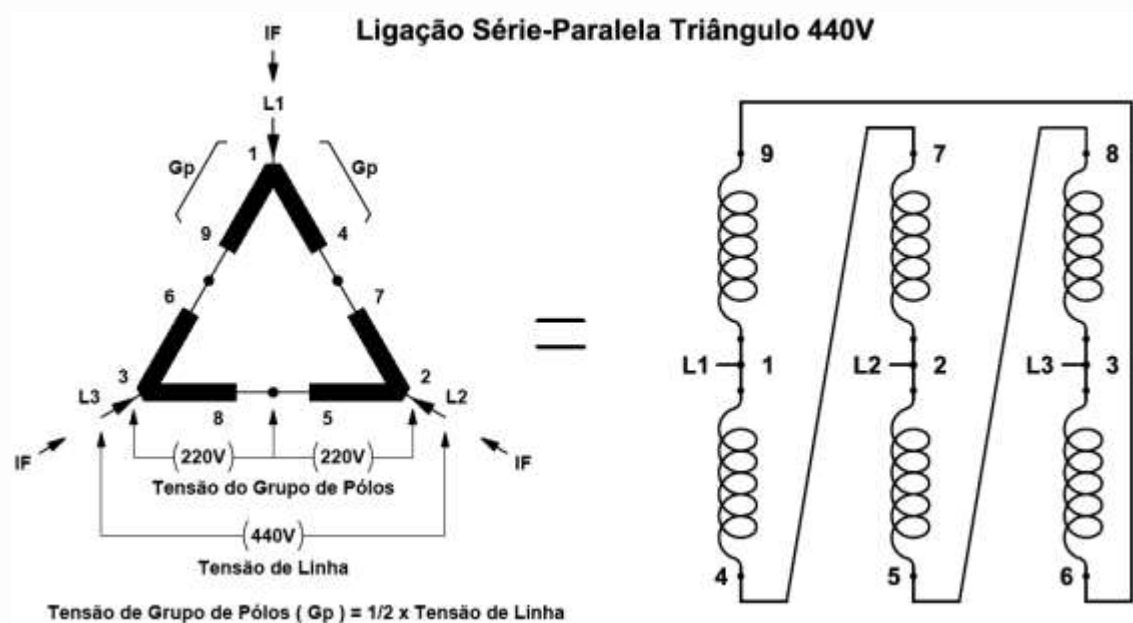


Figura 13.19

13.2.6 Ligação Série-Paralela Estrela



A ligação série-paralela estrela também é aplicada em motores construídos para operação em duas classes de tensões, observadas as condições segundo as quais o valor da maior tensão seja exatamente o dobro da tensão menor. Essa ligação é muito semelhante à ligação série-paralela triângulo, o motor possui nove pontas para ligação e as tensões típicas são 220/440V. As principais diferenças em relação à ligação anterior são as conexões internas ao estator (não disponíveis ao usuário). A figura 13.20 ilustra de forma simples o diagrama de conexões interno dos grupos de pólos.

**Configuração do Bobinado do Motor de 9 Pontas
para ligação série-paralela estrela**

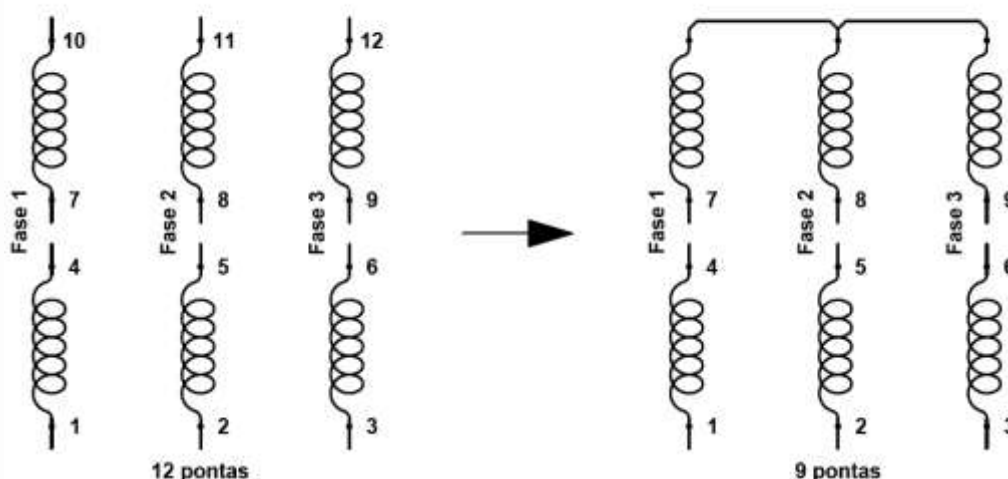


Figura 13.20

Veja que essa configuração caracteriza uma ligação em estrela no grupo de bobinas internas do motor. Desse modo são definidas nove pontas externas para conexão, e a associação correta dessas pontas proporciona a operação do motor em 220V ou 440V.

Ligação em paralelo: 220V

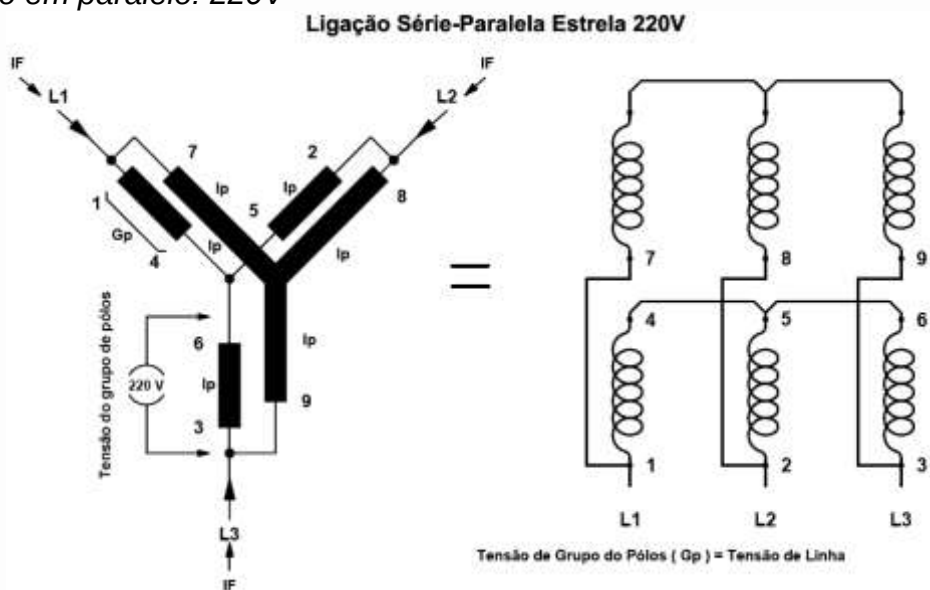


Figura 13.21



O bobinado original de doze pontas é dividido em duas partes iguais, e ligando as duas partes em paralelo o motor poderá ser ligado na tensão mais baixa (220V), por outro lado se a conexão entre as partes for em série o grupo poderá receber o dobro da tensão anterior (440 V). Esta configuração de ligação permite que em qualquer uma das ligações a tensão que cada grupo de pólos estará submetida será a mesma.

Ligação em série: 440V

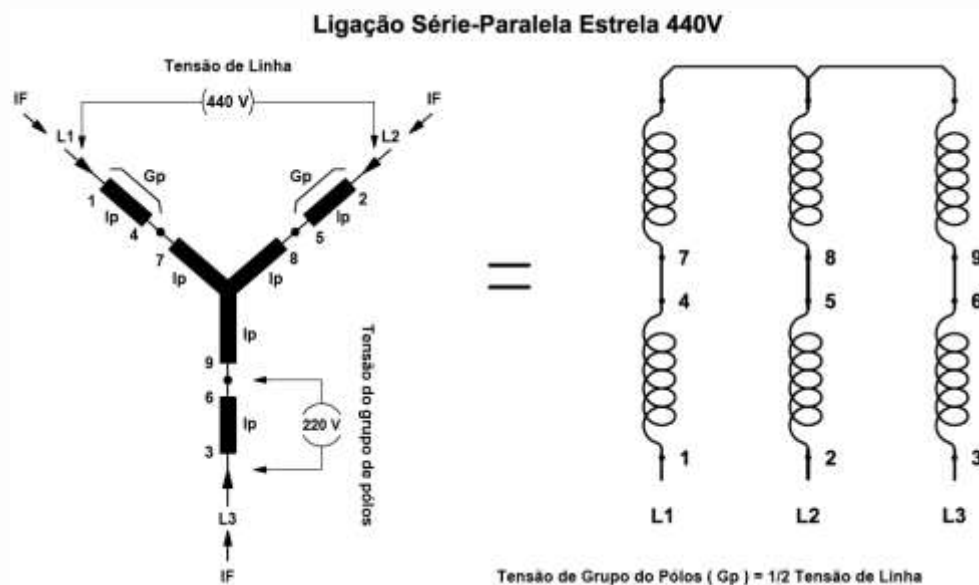


Figura 13.22

13.2.7 Ligação Triângulo-Paralela

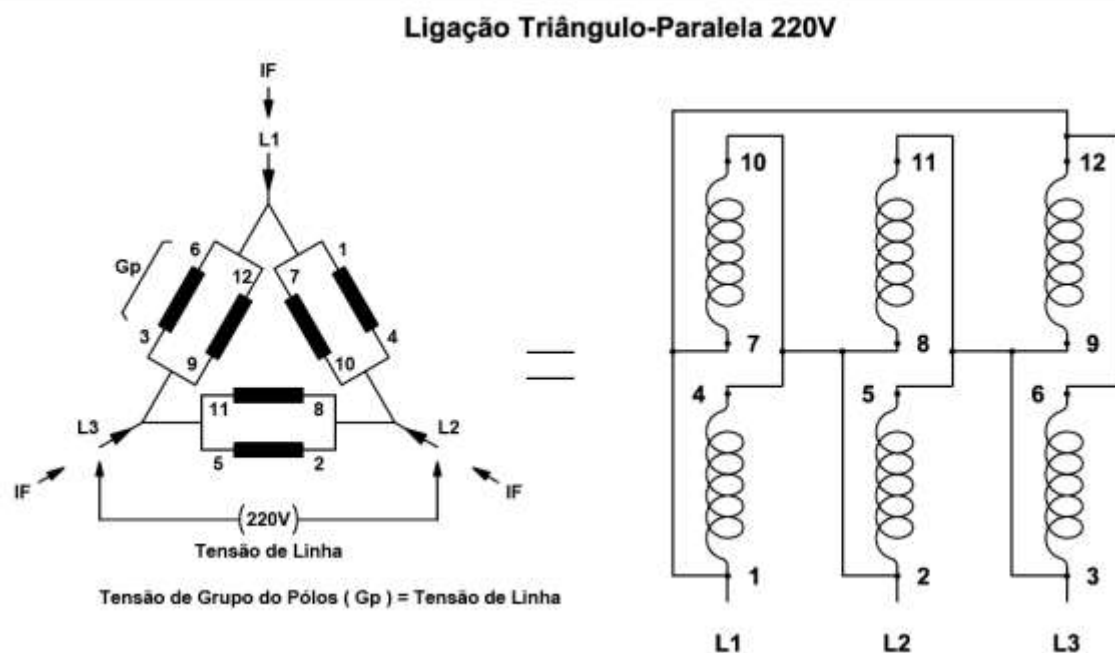


Figura 13.23



O método de ligação “*triângulo-paralelo*” ou “*duplo triângulo*”, como também é conhecida, é especificada para o fechamento de motores com doze pontas de conexão e operação em 220V. Esse modelo de ligação combina a ligação dos modelos anteriores e configura os dois grupos de bobinas que antes eram divididos em duas partes em um único grupo, ou seja, o motor é configurado como se tivesse seis pontas.

Tecnicamente, a numeração especifica o início e o fim da ligação de cada grupo de pólos. Então é correto afirmar que o número 1 e 4 são equivalentes ao 7 e 10. Os números 2 e 5 equivalentes ao 8 e 11 e finalmente 3 e 6 equivalentes a 9 e 12.

13.2.8 Ligação Estrela-Paralela

A ligação estrela-paralela é destinada à conexão de motores com doze pontas e define ao motor a operação na classe de tensão de 380V. Como na ligação triângulo-paralela, a associação entre os grupos de pólos de um motor com doze pontas define que cada grupo de pólos receberá a razão da tensão de linha $\times \sqrt{3}$, ou seja, cada grupo de pólos estará submetido a uma tensão de 220V, características idênticas à ligação estrela de um motor de seis pontas. Veja na figura abaixo o diagrama de interligação.

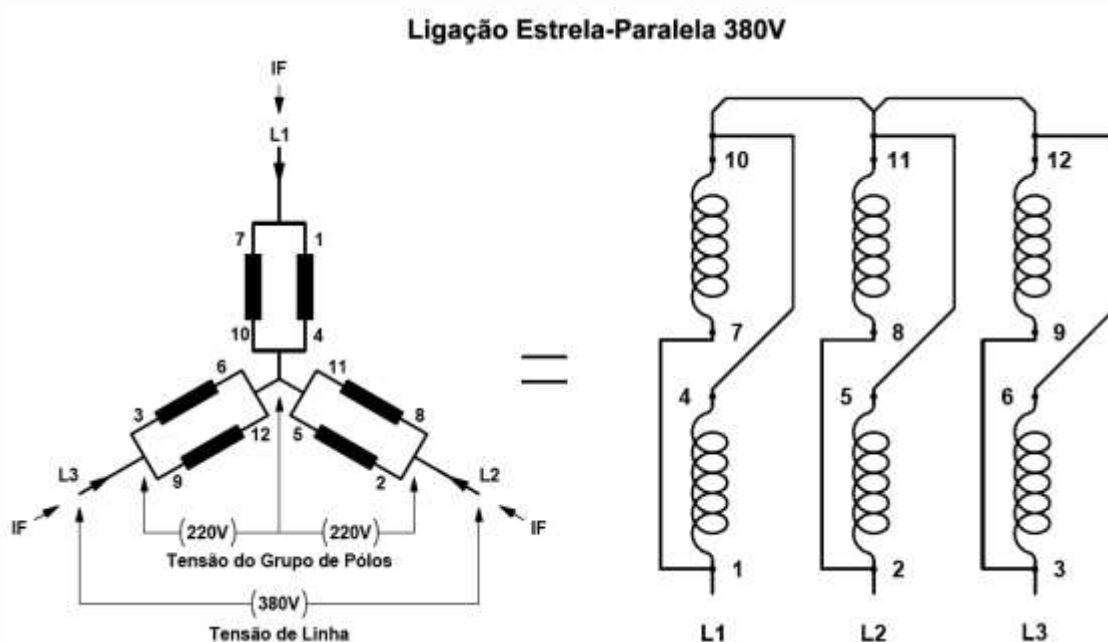


Figura 13.24

13.2.9 Ligação Triângulo-Série

A ligação triângulo-série é designada para conexão de motores trifásicos com doze pontas, em uma tensão de rede de 440V. Nessa situação cada grupo de pólos receberá a tensão de linha, no caso 440V, dividida por dois, ou seja, 220V. O modelo de conexão triângulo-série é uma derivação da ligação série-



paralela triângulo, observada anteriormente na ligação de motores com nove pontas. A figura 13.25 demonstra essa conexão.

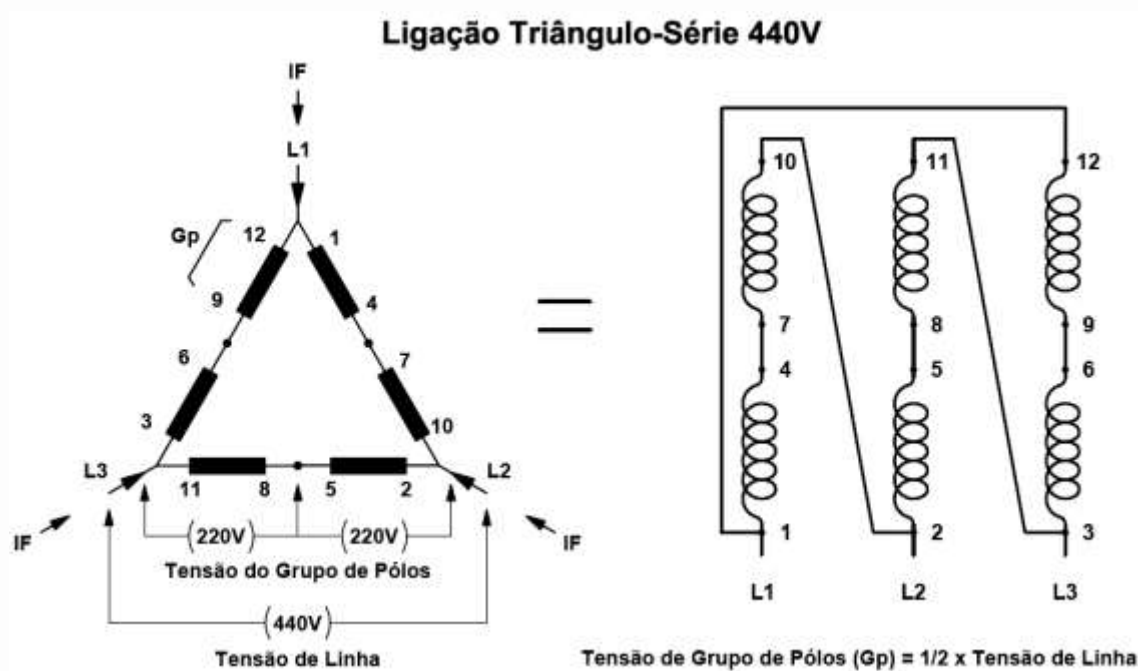


Figura 13.25

13.2.10 Ligação Estrela-Série

O método de conexão estrela-série configura um motor elétrico trifásico com doze pontas para operação em tensões de 760V. Contudo, para operação em tensões acima de 600V, os motores e dispositivos de partida devem prover isolamento adicional, fora dos padrões usuais de utilização. Por essa razão, a ligação estrela-série é utilizada somente em sistemas de partida, para motores de grandes potências. Não é utilizada na prática para alimentação de motores em regime normal de trabalho.

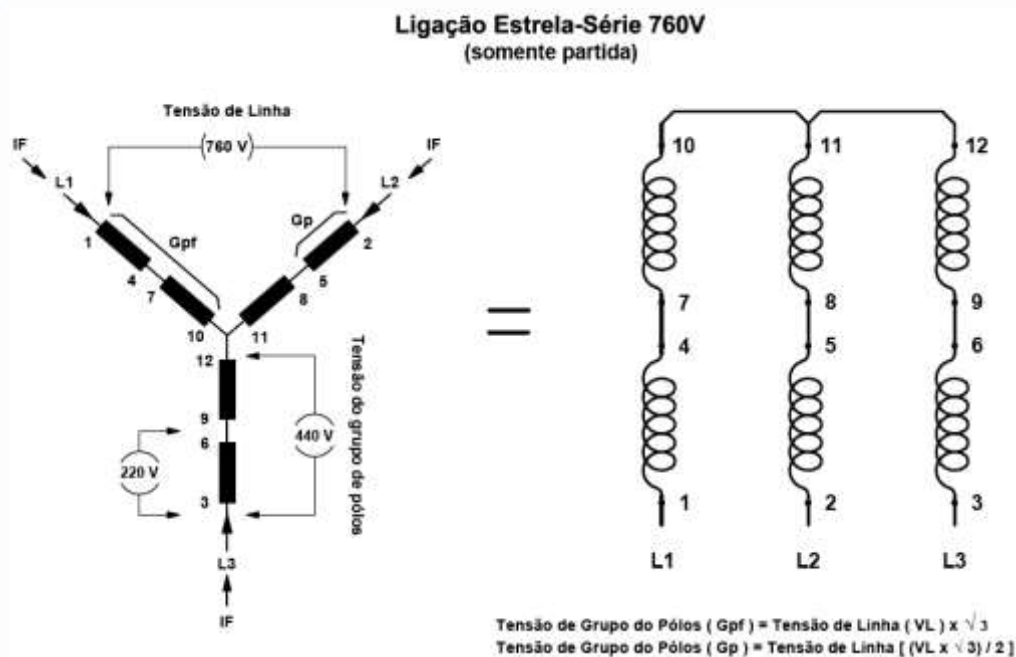


Figura 13.26

A ligação estrela-série, na sua essência, representa a ligação estrela para motores de seis pontas, ou seja, a tensão de cada grupo de pólos será o produto de $\sqrt{3}$ vezes a tensão aplicada na ligação triângulo-série (440V). A figura 13.26 ilustra essa conexão.

* Fonte WEG motores

13.3. Tipos de Acionamentos

Os motores elétricos de indução do tipo gaiola possuem uma característica indesejada para instalação. Ao serem ligados, demandam da rede elétrica uma potência extra, ou seja, necessitam de uma corrente elevada para que possam entrar em regime de operação contínua. Essa situação ocorre pelo simples fato de o rotor estar parado e não existir uma força contra-eletromotriz que faça oposição à corrente elétrica do estator. Quando o rotor começa a girar, o fluxo de corrente elétrica tende a diminuir, forçando a diminuição da corrente elétrica empregada e a estabilização em seu valor nominal. Em outras palavras, para que a força eletromagnética force o rotor a sair de sua inércia natural, uma grande quantidade de corrente elétrica é necessária.

Esse valor elevado de corrente elétrica, necessário para ligar um motor elétrico de indução é chamado de “corrente de partida”, e seu valor máximo varia em função do tipo de construção do motor e é função direta de sua potência. De modo geral, os valores da corrente de partida para motores elétricos de indução do tipo gaiola podem variar de três a sete vezes a corrente nominal do motor. Essa razão pode ser observada na placa de ligação e identificação do motor, e é definida pela sigla IP/IN, que define a relação entre a corrente de pico de partida e a corrente nominal do motor, por exemplo:

A definição de “corrente de pico de partida” ou “IP” também pode ser chamada de corrente de rotor bloqueado, e independe do número de pólos do motor. A relação é expressa em valores de potência aparente em razão da potência do motor, ou seja, kva/cv, que nada mais define do que a potência absorvida pelo sistema com o rotor bloqueado. Essa relação é descrita matematicamente pela equação a seguir:

$$K_{va}/C_v = \frac{\sqrt{3} \times I_p \times V_l}{P_{[C_v]} \times 1000} \quad ou \quad K_{va}/K_w = \frac{\sqrt{3} \times I_p \times V_l}{P_{[K_w]} \times 1000}$$

Os valores máximos de potência aparente com o rotor bloqueado devem seguir normas internacionais. As definições das normas NEMA e ABNT estipulam os valores máximos, segundo o seu tipo de utilização e padrão construtivo, e estão definidas por letras que indicam diretamente os valores em kva.

[illegible]

U	20,00 a 22,39
V	22,40

Tabela 13A

Em função dessas variações e características, é necessário que o sistema elétrico de partida seja apropriado e projetado para que um motor de indução possa partir sem problemas, e com o mínimo de estresse possível para a instalação. Para essas situações são adotados métodos de partidas, que, atualmente, são utilizados em todos os segmentos industriais, e estão definidos como padrões para partida e controle de motores de indução, são eles: partida direta, partida estrela-triângulo, partida compensada ou partida compensadora e, por fim, as partidas eletrônicas (partida suave ou soft-starter).

13.3.1 Partida Direta

O sistema de partida direta para motores de indução é o método mais simples utilizado para operação de motores elétricos. Nesse modelo o estator é conectado diretamente à rede elétrica por meio de uma chave tripolar, ou seja, um contator. No instante inicial após a energização, o conjunto pode ser comparado a um transformador, sendo o estator o primário e o rotor o secundário. Como o rotor possui baixa resistência e está em curto-circuito, a corrente induzida assume valores elevados, podendo chegar entre 5 e 7 vezes o valor da corrente nominal de regime. O mesmo acontece com o conjugado, que pode variar de 50 a 150% do conjugado nominal.

O método de partida direta é indicado para operação de motores de máquinas e equipamentos pouco complexos, que necessitem de alto torque de partida, operações rápidas aliados ao baixo custo de implantação.

Nos gráficos da figura 13.27 podemos visualizar o comportamento da corrente de partida e do conjugado de partida em motores que operam com esse método de partida, acompanhe:

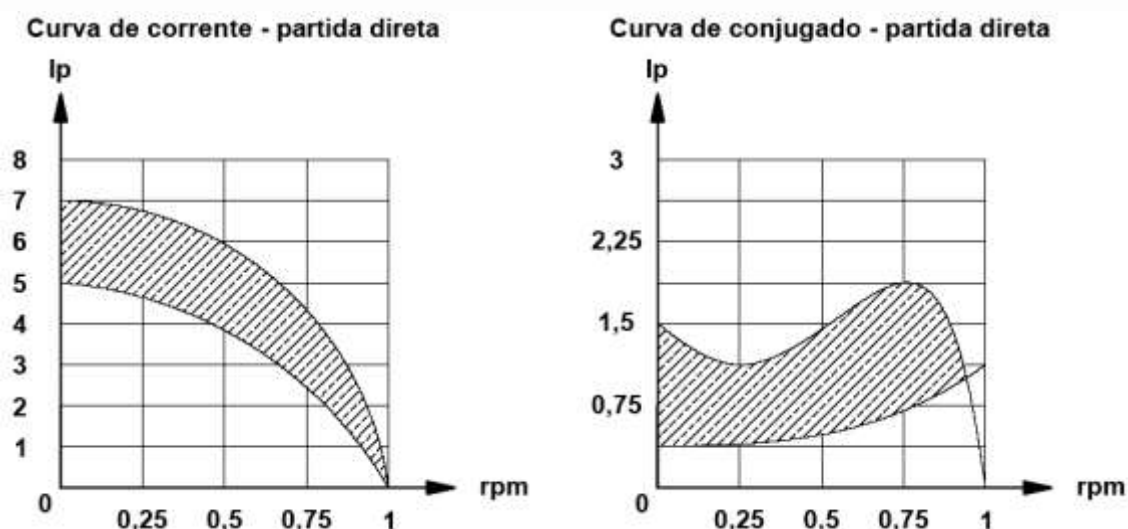


Figura 13.27



O método de partida direta é indicado para situações em que:

- O equipamento não possui limitações quanto à aceleração, ou seja, o motor pode ser iniciado diretamente em sua rotação nominal, ou a máquina possua dispositivos mecânicos que ameniza a partida abrupta, como um redutor, por exemplo.
- Quando a máquina exige um alto torque de partida.
- Em motores de baixas potências, geralmente até 7,5CV ou 5,5 kW.

Para implementação do método de partida direta, o instalador deverá utilizar para o desenvolvimento os seguintes componentes: um sistema de proteção, que pode ser um simples conjunto de fusíveis, ou um dispositivo de controle de sobrecorrente, um disjuntor para motor ou um relé de sobrecarga; um contator, para chaveamento da rede ao motor e por fim um conjunto de botões, para manobra do circuito. O diagrama de interligação é dividido em duas partes: o primeiro, de potência, demonstra como a tensão da rede elétrica flui pelo circuito até os terminais do motor, e o segundo, de comando, ilustra como a corrente elétrica é utilizada para controlar os dispositivos.

Abaixo (figura 13.28) visualizamos um exemplo do circuito de potência, ilustrando os três tipos de proteções citados, fusíveis, disjuntor para motor e relé de sobrecarga, seguido pelo diagrama de comando correspondente (figura 13.29).

Sistema de partida direta para motores

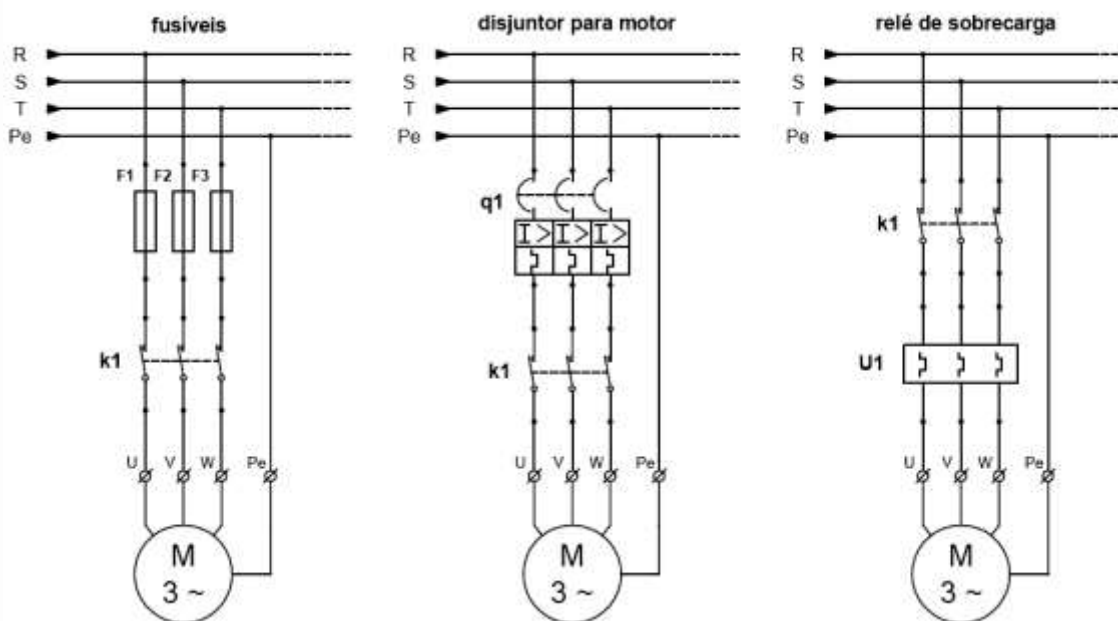


Figura 13.28



Diagrama de comando partida direta para motores

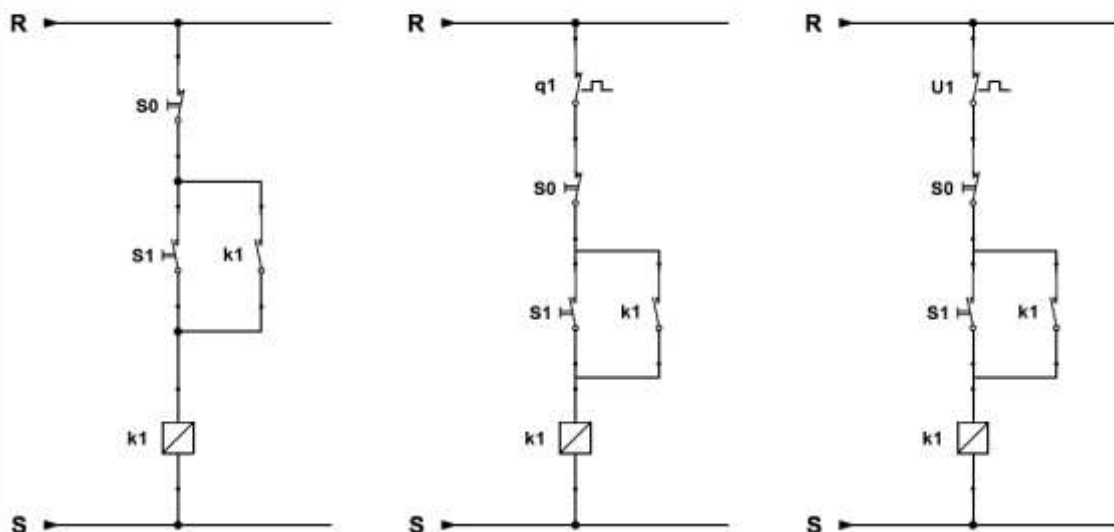


Figura 13.29

Em alguns casos, o método de partida direta pode não ser interessante. Devido a suas características, o motor entra em funcionamento em seu estado natural, isso pode ocasionar problemas na instalação, como queda de tensão excessiva, gerada pelo transiente de partida, ou quando o equipamento deve partir de forma suave, com aceleração progressiva sem movimentos abruptos, ou ainda em situações em que o sistema de proteção e fiação está sobredimensionada, gerando um aumento de custo para a instalação.

Quando esses fatores são identificados na instalação, devemos optar por um método de partida que amenize essas características. Os métodos mais utilizados são aqueles que diminuem a tensão no momento da partida. A diminuição da tensão no momento da ligação ameniza os efeitos da queda de tensão e alto conjugado de partida.

13.3.2 Partida Estrela Triângulo

O modelo de partida estrela triângulo consiste na diminuição da tensão no momento da partida. Isso é obtido conectando-se o estator a uma tensão superior à da rede no momento da partida, ou seja, o motor parte com ligação em estrela, e após atingir sua velocidade nominal, o circuito conecta o estator à ligação triângulo.

Como na ligação em estrela a tensão em que as bobinas estão submetidas é o produto pelo fator $\sqrt{3}$, o motor entra em operação com uma tensão menor do que aquela estabelecida pela ligação. A tensão da rede fornecida para o motor é dividida por $\sqrt{3}$. Dessa forma o pico de corrente de partida é dividido por três. Um motor 220/380V, conectado para operação em estrela 380V, e alimentado a uma tensão de 220V, absorverá uma corrente $\sqrt{3}$ vezes menor do que a ligação em triângulo 220V.



Já o conjugado é proporcional ao quadrado da tensão da rede de alimentação, portanto, como a tensão é dividida por três, o conjugado de partida também será reduzido à mesma proporção.

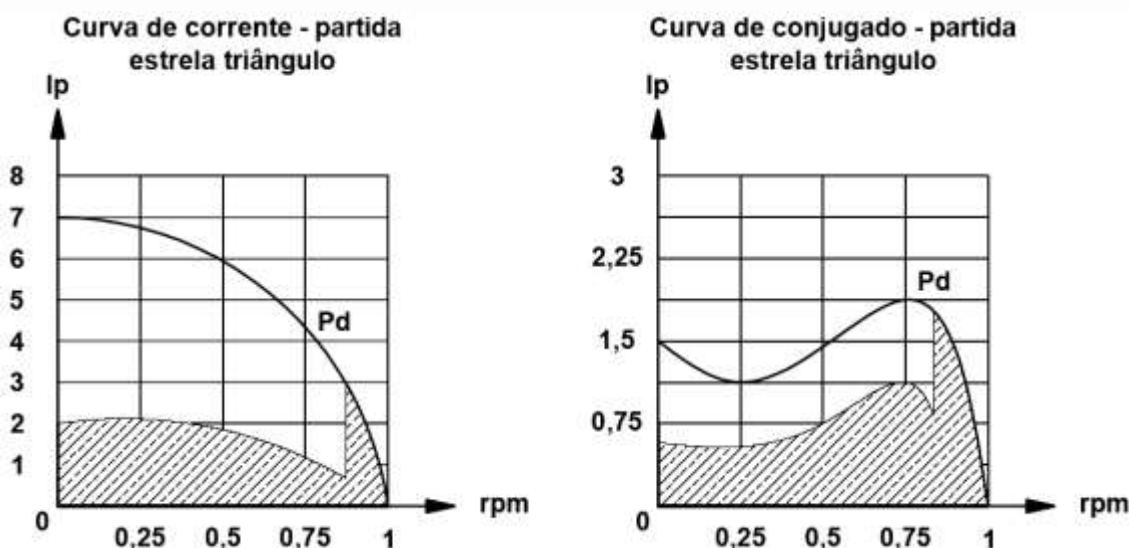


Figura 13.30

Quando o equilíbrio entre a resistência e o conjugado é estabelecido, a velocidade do motor estabiliza, isso acontece com valores acima de 75% da velocidade nominal do motor. Nesse ponto o sistema deverá conectar o estator à tensão nominal da rede, ou seja, o motor deverá ter seu fechamento conectado em triângulo, assim o motor assume seus valores nominais de potência e rotação.

O sistema de partida estrela triângulo é desenvolvido a partir dos seguintes dispositivos: um dispositivo de proteção (fusíveis, disjuntor para motor ou um relé de sobrecarga), três contatores tripolares (para chaveamento da tensão, manobra e fechamento das conexões estrela triângulo), e botões para controle e manobra do circuito. Como visto no modelo de partida direta, o sistema é descrito em dois diagramas, o primeiro, de potência, que ilustra a interconexão dos componentes e fiação, e o segundo, de comando, que identifica o circuito de manobra e intertravamento elétrico dos componentes. Veja no exemplo das figuras 13.31 e 13.32 os diagramas de um sistema de partida estrela triângulo. O exemplo ilustra um modelo de partida genérico, considerando um sistema de proteção com base em um disjuntor de motor.

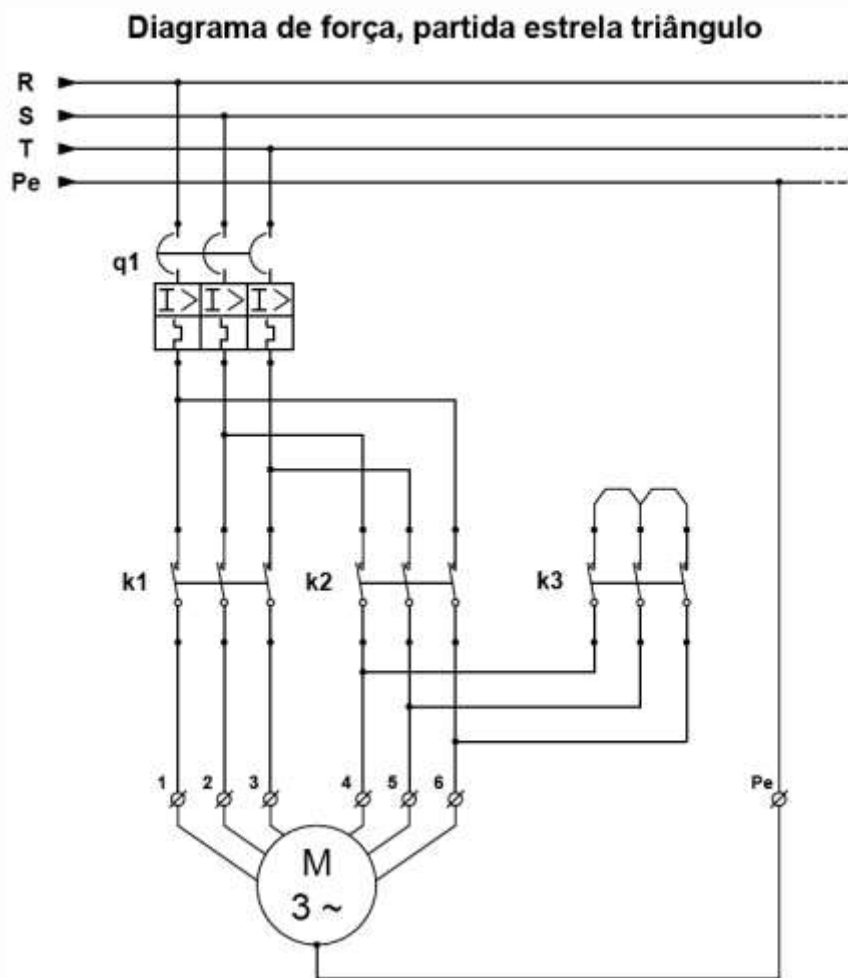


Figura 13.31

O diagrama da figura 13.31 ilustra as conexões entre os elementos de controle de potência do método de partida estrela triângulo. No diagrama, podemos notar que os contatores estão ligados de forma a proporcionar as duas ligações possíveis, estrela (380V) e triângulo (220V), ou seja, em um primeiro momento na partida entram em operação os contatores k1 e k3, sendo: o contator k1 alimenta os conectores 1, 2 e 3, o contator k3 conecta os terminais 4, 5 e 6. Nessa situação obtemos a ligação em estrela, ou seja, 380V (figura 13.16).

Após transcorrido o tempo de partida, o contator K3 é desligado e entra em operação o contator K2, alimentando os terminais 4, 5 e 6, fazendo, desse modo, a transição da ligação estrela para a triângulo, ou seja, 220V (figura 13.15).

Note que a seqüência de fases deve ser observada na ligação, ou seja, fase "R" alimenta os terminais 1 e 6, fase "S" alimenta os terminais 2 e 4 e por fim a fase "T" alimenta os terminais 3 e 5.



Diagrama de comando, partida estrela triângulo

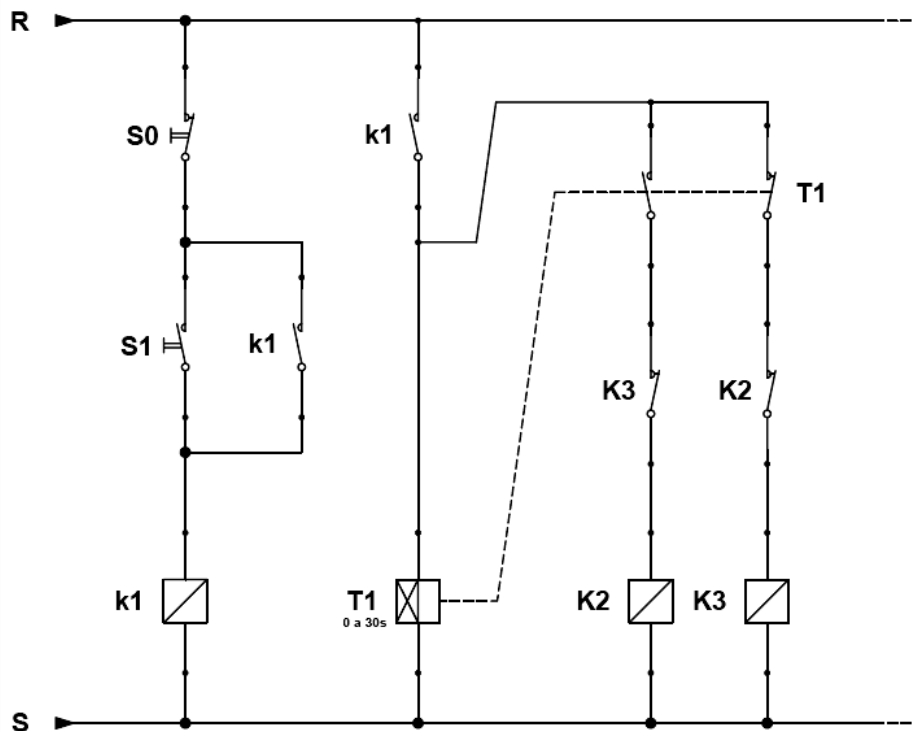


Figura 13.32

O diagrama de comando, observado na figura 13.32, ilustra as conexões entre os elementos do modelo de partida estrela triângulo, de forma a proporcionar aos elementos de potência a seqüência correta de ligação. Analisando o circuito, podemos concluir que:

- S0 e S1 e k1 emulam uma partida direta.
- Quando k1 entra em operação, garante a alimentação simultânea do relé de tempo T1, ajustado com o tempo necessário para a partida do motor.
- O contatoor k1, além de iniciar a contagem do relé de tempo T1, também fornece alimentação para os contatos reversíveis de T1. Com isso, k3, que está conectado ao contato normal fechado, entra em operação, proporcionando o início da partida do motor, ou seja, o motor inicia sua operação a partir de k1 e k3, definindo a ligação estrela.
- Depois de transcorrido o tempo préfixado em T1 (5 ~ 8 segundos), o contato reversível de T1 entra em operação, o contato normal fechado é acionado, interrompendo a condutividade elétrica da linha, e o contato normal aberto passa a conduzir. Nessa situação o contatoor k3 é desligado e o contatoor k2 é ligado, definindo a transição da ligação estrela para a ligação triângulo. E assim permanecendo em regime até o sistema ser desligado por meio de S0.

Observação: os contatores k2 e k3 estão intertravados eletricamente. Em outras palavras, quanto um estiver ligado, o outro obrigatoriamente deve estar desligado, e vice-versa. Isso é necessário, pois, em uma eventual falha



no sistema, evita que um curto-circuito seja gerado no circuito de potência. Se k2 entrar em operação com k3 ligado, um curto-circuito é estabelecido entre as três fases de alimentação.

O sistema de partida estrela triângulo só pode ser utilizado em motores projetados para trabalhar com duas tensões, e cuja tensão menor seja $\sqrt{3}$ vezes menor do que a maior tensão, geralmente motores com ligação a seis pontas, com capacidade de operação em tensões de 220/380V ou 380/660V.

Existem muitas vantagens de utilizar o método de partida estrela triângulo, entretanto podemos observar algumas desvantagens, quando avaliamos o sistema de uma forma mais crítica.

Vantagens:

- A corrente de pico de partida é reduzida em 3 vezes, reduzindo assim a sobrecarga no painel e componentes da instalação.
- Não possui quantidade máxima de manobras, o motor pode operar ligando e desligando inúmeras vezes e poucos intervalos de tempo.
- Possui baixo custo de montagem, quando comparado a outros modelos de partida com tensão reduzida.
- Ocupa um espaço reduzido no interior de painéis.
- Seu sistema de comando é relativamente simples.

Desvantagens:

- O motor deverá atingir acima de 80% de sua velocidade nominal para que a comutação da ligação estrela passe para a ligação triângulo. Caso contrário, o pico de corrente observado no sistema é muito próximo ao modelo de partida direta.
- A tensão de operação do motor em triângulo deverá ser igual à tensão da rede.
- O sistema só pode ser utilizado em motores com seis pontas de conexão.
- Como o sistema reduz a corrente de partida, o torque aplicado à carga no momento de partida também é reduzido. Em máquinas que necessitem de alto conjugado de partida, isso pode ser prejudicial.

13.3.3 Partida Compensada

O modelo de partida compensada é adotado para partida de motores com tensão reduzida. A diferença entre o modelo anterior, estrela triângulo, é observada no fato de não haver interrupção no fornecimento de corrente ao motor, isto é, não são alteradas fisicamente as conexões do motor elétrico. Essa particularidade evita o surgimento de transitórios, resultantes de uma interrupção física do circuito, além do fato de poder ser utilizada em qualquer tipo de motor de indução, seja com seis, nove ou doze terminais.



A redução de tensão na partida é obtida com um “autotransformador” ou também chamado de “autotrafo”. Esse transformador, trifásico, possui terminais (taps) que dividem a tensão em valores de 50%, 65% e 80% da tensão nominal da rede. O motor elétrico, partindo com o autotransformador, reduz a corrente de partida proporcionalmente ao valor da tensão aplicada, evitando sobrecarga no sistema, porém, com um conjugado suficiente para aceleração e partida do motor.

Nesse método, a corrente de partida e o conjugado variam a uma proporção de:

$$\left(\frac{\text{Tensão de rede}}{\text{Tensão reduzida}} \right)^2$$

Desse modo, obtemos a seguinte relação:

$I_a = 1,7 \sim 4$ a corrente de partida direta

$C_a = 0,5 \sim 0,85$ o conjugado de partida direta

A relação entre a corrente de partida e a corrente nominal, e a relação entre o conjugado de partida e o conjugado nominal, podem ser observadas nos gráficos da figura 13.33.

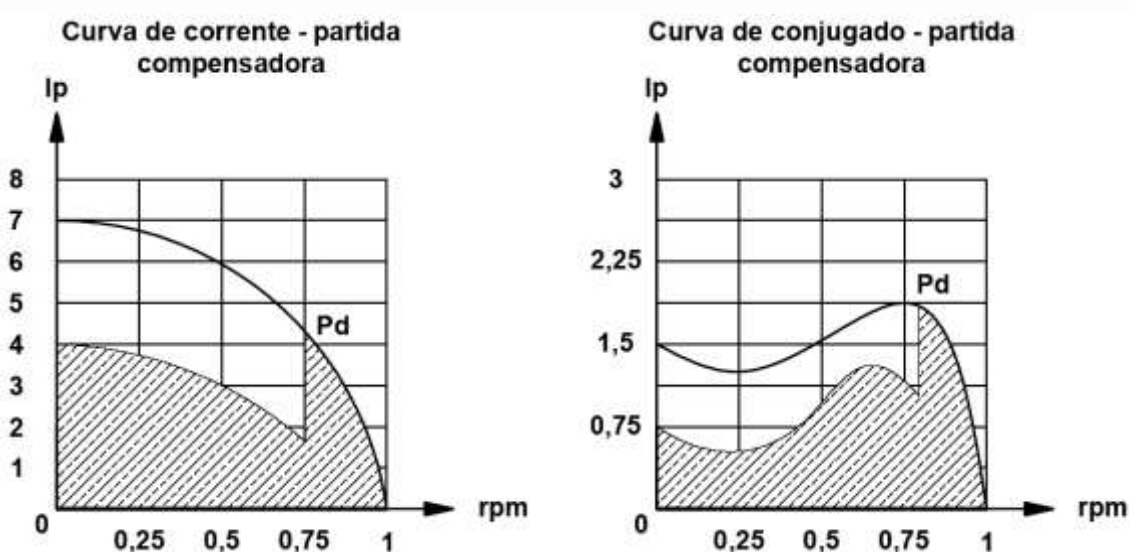


Figura 13.33

O modelo de partida por chave compensadora é usualmente aplicado para partida de motores com potências elevadas, acima de 15 cv, pois demanda um custo elevado para montagem, além de ocupar maior área de instalação em painéis devido às dimensões do autotransformador.

O modelo de partida compensadora ou partida compensada é desenvolvido a partir dos seguintes dispositivos: um dispositivo de proteção (fusíveis, disjuntor para motor ou um relé de sobrecarga), três contadores



tripolares (para chaveamento da tensão, manobra dos taps do autotransformador), e botões para controle e manobra do circuito.

Os diagramas de força e comando podem ser visualizados nas figuras 13.34 e 13.35, considerando um circuito com proteção baseada em disjuntor para motor.

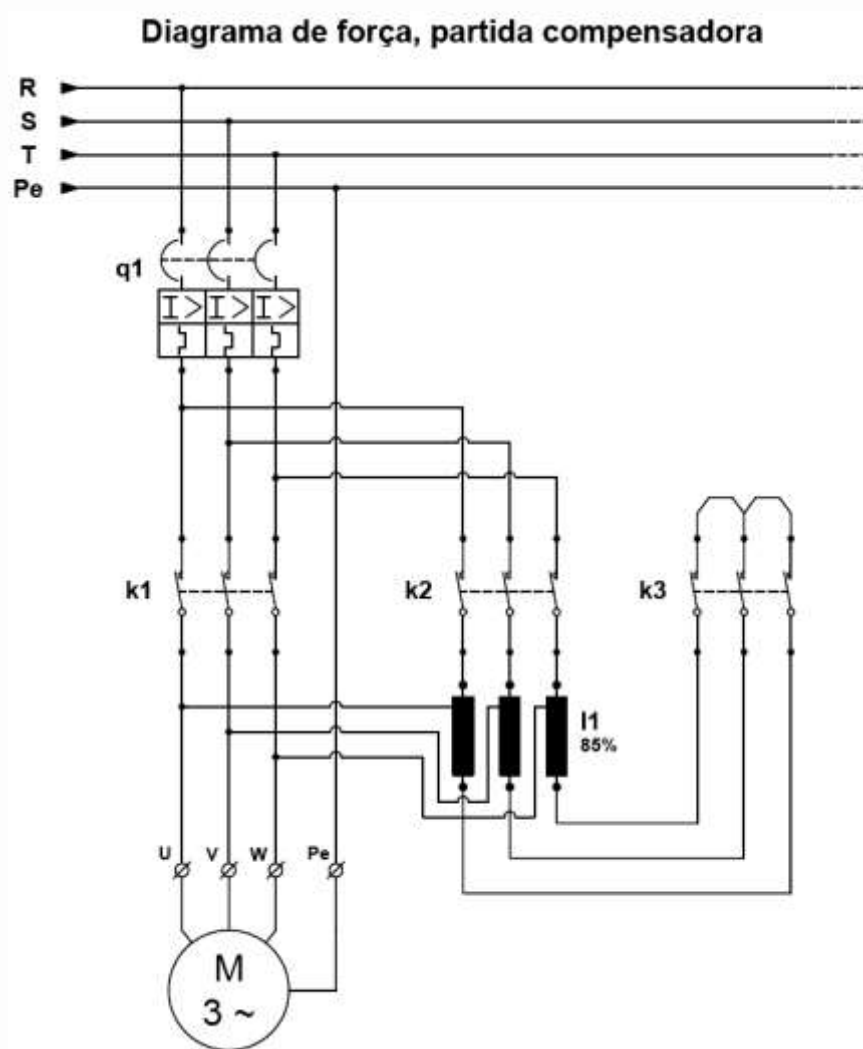


Figura 13.34

O diagrama da figura 13.34 ilustra as conexões entre os elementos de controle de potência do método de partida compensada. No diagrama, podemos notar que os contatores estão ligados de forma a proporcionar a inclusão do autotransformador no momento de partida do motor. No início de operação do motor, entram em operação os contatores k2 e k3, sendo: o contator k2 alimentação dos terminais de I1 (autotransformador), e o contator k3 conecta em estrela os terminais de I1. Os terminais de saída de I1 estão conectados diretamente aos terminais do motor. Desse modo, quando k2 e k3 derem início à operação, obtemos uma tensão reduzida nos terminais do motor. Essa redução é definida pelo tap de ligação de I1, e pode ser ajustada nos valores de 50%, 65% ou 85%.

Após transcorrido o tempo de partida, os contatores k2 e k3 são desligados, e entra em operação o contator k1, alimentando os terminais do motor com tensão plena da rede.

Note que a seqüência de fases deve ser observada na ligação entre os contatores k1 e k2, pois se a seqüência não estiver correta, o motor inverterá sua rotação na transição de partida.

Diagrama de comando, partida compensada

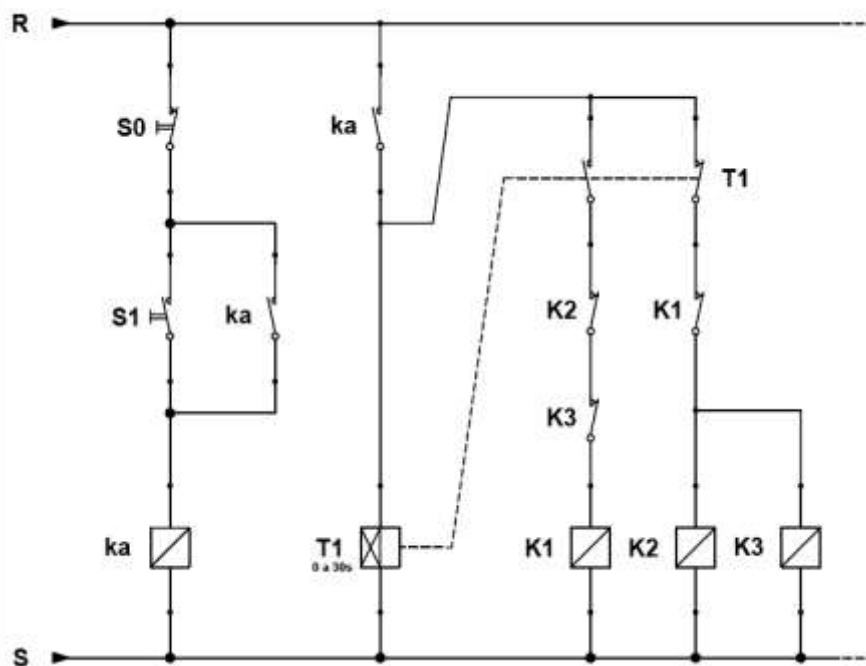


Figura 13.35

O diagrama de comando, observado na figura 13.35, ilustra as conexões entre os elementos do modelo de partida compensadora. Esse circuito de comando é muito parecido com o circuito do modelo estrela triângulo, com pequenas diferenças, observadas na conexão entre T1, e na inclusão de um contator auxiliar. Analisando o circuito, podemos concluir que:

- S0 e S1 e ka emulam uma partida direta.
- Quando ka entra em operação, garante a alimentação do relé de tempo T1, ajustado com o tempo necessário para a partida do motor.
- O contator ka, além de iniciar a contagem do relé de tempo T1, também fornece alimentação para os contatos reversíveis de T1. Com isso, k2 e k3, que estão conectados ao contato normal fechado de T1, entram em operação, definindo o início da partida do motor, ou seja, o motor inicia sua operação a partir de k2 e k3, com tensão reduzida, fornecida pelo autotransformador.
- Depois de transcorrido o tempo préfixado em T1 (5 ~ 8 segundos), o contato reversível de T1 entra em operação, o contato normal fechado é acionado, interrompendo a condutividade elétrica da linha, e o contato normal aberto passa a conduzir. Nessa situação os contatores k2 e k3 são desligados, e o contator k1 é ligado.



Observação: os contadores k1, k2 e k3 estão intertravados eletricamente. Em outras palavras, quando k2 e k3 estiverem ligados, k1 obrigatoriamente estará desligado e vice-versa.

Como no método de partida estrela triângulo, existem algumas vantagens e desvantagens em se utilizar o modelo de partida compensada, como exemplo:

Vantagens:

- Pode-se controlar o valor da redução da tensão aplicada na partida, entre 50%, 65% ou 80%, ajustado in loco. Para que a partida seja a mais satisfatória possível, os valores de aceleração e conjugado necessários podem ser ajustados avaliando o tipo de carga em que o motor está aplicado.
- Quando a tensão de partida é reduzida por volta de 65% da tensão nominal, as variáveis observadas na partida são muito semelhantes às variáveis do modelo de partida estrela triângulo. Contudo, no momento em que o motor assume velocidades acima de 75% da velocidade nominal, o sistema transfere a tensão plena da rede, o circuito não é desligado, desse modo o transiente de corrente observado é reduzido.

Desvantagens:

- O sistema possui custo elevado para montagem.
- São necessários espaços maiores para montagem do circuito, devido às dimensões do autotransformador.
- O número de partidas é reduzido, devido ao aquecimento do autotransformador em partidas consecutivas, basicamente uma partida a cada 15 minutos.
- Quando o sistema necessita de partidas e paradas consecutivas, o autotransformador deverá ser sobredimensionado.

13.3.4 Partida Eletrônica

Um novo método utiliza a tecnologia de estado sólido para partida de motores de pequenas e grandes potências. É chamado de estado sólido devido à utilização de dispositivos semicondutores (SCR's ou tiristores), que controlam o fornecimento de tensão ao motor. A definição do termo estado sólido vem da característica de não se utilizar elementos móveis (como chaves ou contatos) para o chaveamento elétrico. A condução é garantida através do controle de fluxo de elétrons em um elemento semicondutor. O dispositivo que reúne essas características é chamado de “partida suave” ou “soft starter”.

O soft starter consiste em fornecer ao motor níveis de tensão que variam de zero a tensão nominal, em um intervalo de tempo pré-determinado, obtendo, assim, uma rampa de aceleração suave e precisa. A variação de tensão é obtida controlando o ângulo de disparo dos semicondutores a cada ciclo da



onda senoidal. Dessa forma o circuito consegue uma variação suave de tensão e corrente, durante todo o ciclo de partida, e conseqüentemente um controle contínuo e preciso do conjugado no motor. No fim do ciclo de partida, o sistema comuta ao motor a tensão nominal plena da rede, por meio de contadores, chamados de by pass, ou simplesmente mantendo o chaveamento contínuo dos semicondutores a cada ciclo.

A figura 13.36 demonstra a forma da tensão aplicada ao motor em um ciclo de partida em uma fase.

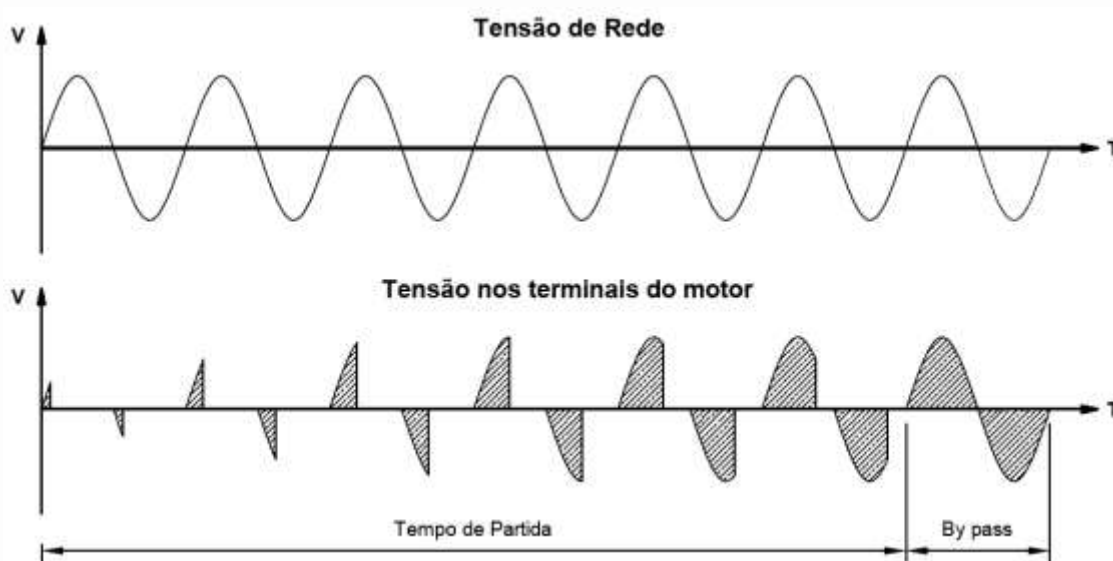


Figura 13.36

O motor é posto em funcionamento por meio de um aumento progressivo da tensão, o que garante uma partida suave sem esforços mecânicos exagerados. A taxa de tempo em que a tensão varia de zero a tensão plena da rede é definida pela rampa de aceleração, que, na maioria das vezes, é ajustada in loco, com o motor conectado à carga e com suas características nominais.

Esses equipamentos são ideais para partida e parada de motores elétricos. Podem ser encontrados em potências de até 500Cv (370kW) e, quando comparados com outros métodos de partida, são a melhor escolha. Na figura 13.37 podemos visualizar um gráfico comparativo sobre o comportamento da corrente elétrica entre os métodos de partida direta, estrela triângulo e o soft starter. Acompanhe:

Comparativo entre os métodos de partida para motores de indução

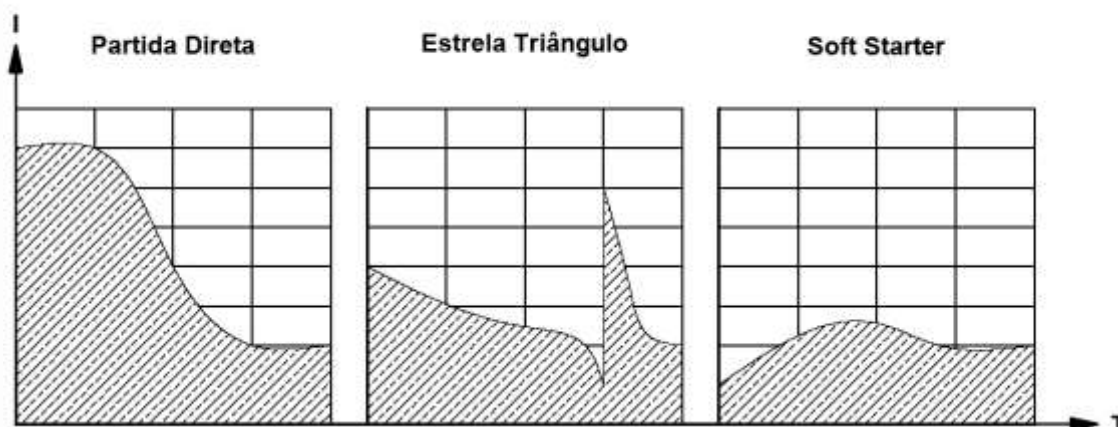


Figura 13.37

As vantagens de se utilizar o soft starter para a partida de motores elétricos de indução são inúmeras:

- Montagem simples e compacta.
- Sistema de proteção contra sobrecarga, falta de fase, curto-circuito e proteção térmica incorporadas em um mesmo instrumento.
- Controle de rampa de aceleração e desaceleração precisas.
- Facilidade de ajuste e operação, fácil integração com sistemas automatizados.
- Aumento da vida útil do sistema mecânico, por evitar golpes mecânicos acentuados etc.

Uma única desvantagem na utilização de um soft starter está relacionada ao seu aquecimento, em regimes de partidas e paradas em pequenos intervalos de tempo, o que pode acarretar falhas, devido à alta temperatura do circuito eletrônico. Contudo, para amenizar essa característica, o usuário pode assegurar um resfriamento forçado no circuito eletrônico ou o dimensionamento de equipamento em uma potência pouco maior do que a estabelecida pela carga.

A figura abaixo ilustra um diagrama típico de instalação de um dispositivo do tipo soft starter.



Diagrama de partida com soft starter

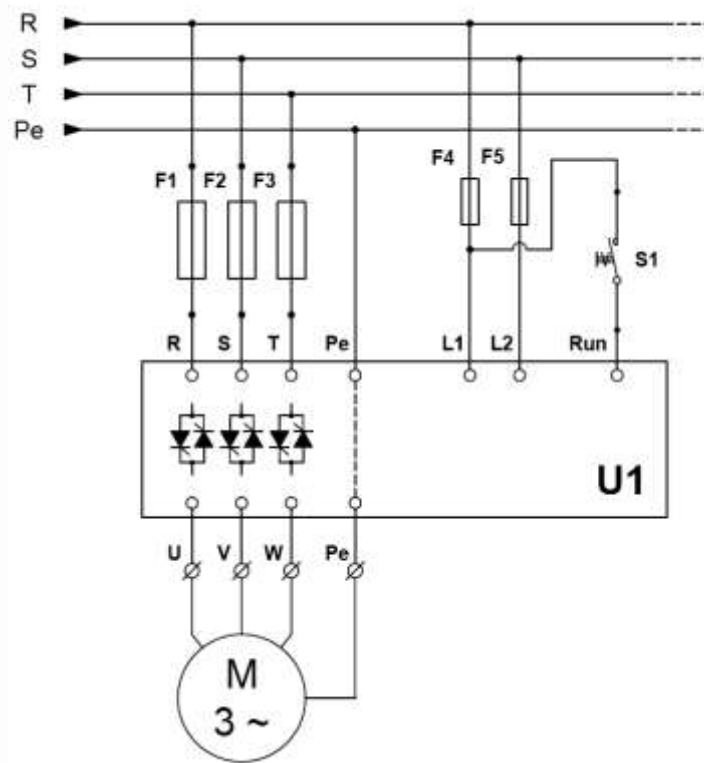


Figura 13.38

