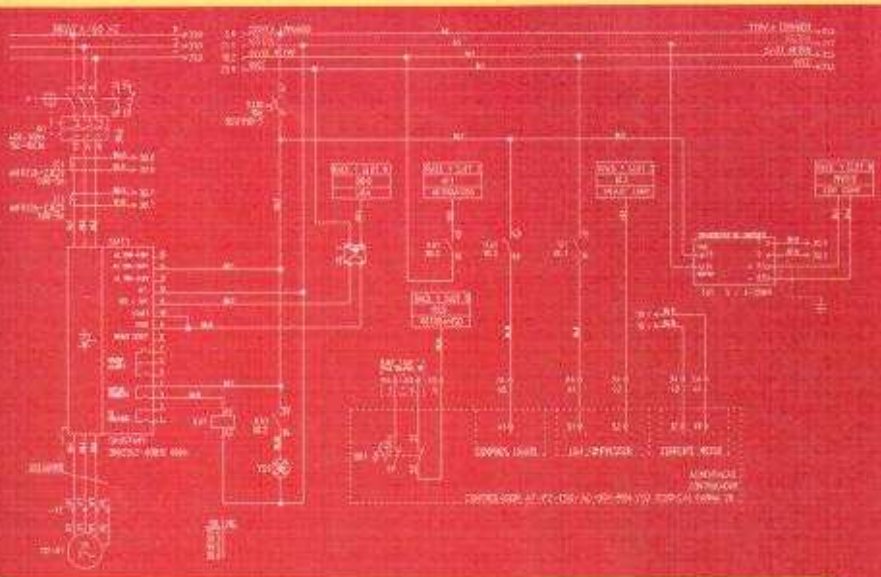
Claiton Moro Franchi

3ª EDIÇÃO



ACIONAMENTOS ELÉTRICOS

- Motores Elétricos
- Diagramas de Comando
- Chaves de Partida
- Inversores de Freqüência e Soft-Starters



ÉRICA

1259.

Acionamentos Elétricos



EDITORA AFILIADA

Claiton Moro Franchi

www.baixebr.org

Acionamentos Elétricos

4ª Edição

São Paulo
2008 - Editora Érica Ltda.

Siglas

AC (*alternating current*): corrente alternada.

CLP: controlador lógico programável.

CNC: controle numérico computadorizado.

CV (cavalo-vapor): potência elétrica equivalente a 736 watts.

DC (*direct current*): corrente contínua.

FT: relé de sobrecarga.

HP (*horse power*): potência elétrica equivalente a 746 watts.

IHM: interface homem/máquina.

K: contator.

KT: relé de tempo.

NA: contato normalmente aberto.

NF: contato normalmente fechado.

η: rendimento.

PID (proporcional integral derivativo): técnica de controle utilizada em processos industriais.

PWM (*pulse width modulation*): modulação por largura de pulso.

RPM: rotações por minuto.

***Setpoint*:** valor desejado.

SCR (*silicon controled rectifier*): retificador controlado de silício.

TC: transformador de corrente.

TP: transformador de potencial.

Vcc: tensão em corrente contínua.

Vf (tensão de fase): tensão elétrica entre fase e neutro.

VL (tensão de linha): tensão elétrica entre duas fases.

Índice Analítico

Capítulo 1 - Motores Elétricos 17
1.1 - Motores de indução 18
1.2 - Fatores de seleção 19
1.3 - Tipos de motores elétricos 19
1.3.1 - Motor com rotor gaiola de esquilo 20
1.3.2 - Motor com rotor bobinado 21
1.3.3 - Motor Dahlander 21
1.3.4 - Motor com dois enrolamentos separados 21
1.3.5 - Motor para três e quatro velocidades 22
1.4 - Constituição do motor de indução 22
1.5 - Motores de indução monofásicos 24
1.5.1 - Motor monofásico com dois terminais 26
1.5.2 - Motor monofásico com quatro terminais 26
1.5.3 - Motor monofásico com seis terminais 27
1.6 - Motores de indução monofásicos 28
1.6.1 - Motor de pólos sombreados (shaded pole) 28
1.6.2 - Motor de fase dividida (split phase) 30
1.6.3 - Motor de capacitor de partida (capacitor start) 31
1.6.4 - Motor de capacitor permanente (permanent split capacitor) 33
1.6.5 - Motor com dois capacitores (two value capacitor) 34
1.7 - Motor universal 35
1.8 - Identificação das bobinas de um motor monofásico 36
1.9 - Motores síncronos 38
1.9.1 - Utilização do motor síncrono para correção do fator de potência 40
1.9.2 - Desvantagens dos motores síncronos em relação aos motores de indução 41
1.9.3 - Vantagens dos motores síncronos em relação aos motores de indução 42
Exercícios propostos 43

Capítulo 2 - Motores Trifásicos 45
2.1 - Motor de indução com rotor gaiola de esquilo 45
2.2 - Motor de rotor bobinado 46
2.3 - Motor trifásico com freio (motofreio trifásico) 48
2.4 - Motores de alto rendimento 52
2.5 - Princípio de funcionamento de um motor trifásico 53
2.6 - Características dos motores trifásicos 56
2.6.1 - Rendimento 56
2.6.2 - Escorregamento 59
2.6.3 - Categoria de conjugado 59
2.6.4 - Tempo com rotor bloqueado 62
2.6.5 - Ventilação 65
2.6.6 - Rotação nominal 67
2.6.7 - Regime de serviço 67
2.6.8 - Fator de serviço (FS) 68
2.6.9 - Tensão nominal múltipla 69
2.6.10 - Corrente de partida 69
2.6.11 Número de rotações 69
2.6.12 - Sentido de rotação 70
2.6.13 - Grau de proteção de motores (IP) 71
2.6.14 - Motores à prova de explosão 73
2.6.15 - Formas construtivas 73
2.7 - Perdas no motor 74
2.8 - Conexão dos enrolamentos 75
2.8.1 - Configuração em estrela (Y) 75
2.8.2 - Ligação em triângulo 78
2.8.3 - Partida série paralelo 79
2.9 - Identificação das bobinas de um motor de indução trifásico 81
2.10 - Tabela de características elétricas de motores trifásicos 83
Exercícios propostos 84

Capítulo 3 - Definições de Potência Elétrica 85
3.1 Potência ativa 85
3.2 - Potência reativa 86

3.3 - Potência aparente 86
3.4 - Exemplos de cálculos de potência 89
3.5 - Fator de potência 90
3.5.1 - Causas do baixo fator de potência 91
3.5.2 - Vantagens da correção do fator de potência 91
3.5.3 - Métodos para melhorar o fator de potência 92
3.5.4 - Medição do fator de potência 100
3.5.5 - Ponto de localização dos capacitores 100
3.6 - Potência do transformador em função do fator de potência 104
3.7 - Potência de motores trifásicos 105
3.8 - Fator de potência dos motores 105
3.9 - Exemplo para determinação das características de potência de um motor trifásico 106
Exercícios propostos 108

Capítulo 4 - Diagramas de Comando 109
4.1 - Dispositivos elétricos 109
4.2 - Dispositivos de comando e de proteção 112
4.2.1 - Classificação dos dispositivos elétricos utilizados em baixa tensão 113
4.3 - Fusíveis 115
4.3.1 - Aspectos construtivos dos fusíveis 117
4.4 - Características dos fusíveis 119
4.4.1 - Tipo D 120
4.4.2 - Tipo NH 121
4.4.3 - Dimensionamento dos fusíveis 123
4.4.4 - Fusíveis ultra-rápidos 125
4.5 - Considerações finais sobre os fusíveis 125
4.6 - Relés de sobrecarga 126
4.6.1 - Representação dos relés de sobrecorrente 131
4.6.2 - Dimensionamento 131
4.7 - Disjuntores motores 132
4.7.1 - Características básicas 133
4.7.2 - Dispositivos de partida com disjuntor motor 134
4.8 - Contatores 134

4.8.1 - Categorias de emprego dos contatores 136
4.8.2 - Principais defeitos em contatores elétricos 141
4.9 - Dimensionamento do contator 142
4.10 - Vida útil do contator 143
4.11 - Blocos antiparasitas 144
4.12 - Principais características dos contatores 145
4.13 - Relés auxiliares 145
4.13.1 - Relè de tempo com retardo na energização 145
4.13.2 - Bloco temporizador pneumático 146
4.13.3 - Relé de tempo estrela-triângulo (Y–Δ) 146
4.13.4 - Relé de seqüência de fase 147
4.13.5 - Relé de proteção PTC 147
4.13.6 - Relés de falta de fase 149
4.13.7 - Relés de mínima e máxima tensão 150
Exercícios propostos 151

Capítulo 5 - Chaves de Partida 153
5.1 - Partida direta 154
5.1.1 - Esquema de ligação da chave de partida direta 156
5.1.2 - Exemplo de dimensionamento 157
5.2 - Partida estrela-triângulo 158
5.2.1 - Esquema de ligação da chave de partida estrela-triângulo 160
5.2.2 Equacionamento da chave de partida estrela-triângulo 161
5.2.3 - Vantagens da chave estrela-triângulo 167
5.2.4 - Desvantagens da chave estrela-triângulo 167
5.3 - Partida compensadora 167
5.3.1 - Autotransformador de partida 168
5.3.2 - Esquema de ligação da chave compensadora 170
5.3.3 - Equacionamento da chave de partida compensadora 171
5.3.4 - Determinação das correntes da chave compensadora 173
5.3.5 - Exemplo de dimensionamento de uma chave compensadora 176
5.3.6 - Vantagens da chave de partida compensadora 178
5.3.7 - Desvantagens da chave de partida compensadora 178
Exercícios propostos 179

Capítulo 6 - Chaves de Partida Eletrônicas 181
6.1 - Soft-starters 181
6.1.1 - Princípio de funcionamento 182
6.1.2 - Circuito de potência 183
6.1.3 - Circuito de controle 183
6.2 - Principais funções da soft-starter 183
6.2.1 - Proteções 189
6.2.2 - Descrição dos parâmetros 191
6.2.3 - Formas de ligação 192
6.3 - Inversor de freqüência 195
6.3.1 - Princípios básicos 197
6.4 - Classificação dos conversores de freqüência 202
6.4.1 - Conversores com controle escalar 202
6.4.2 - Conversores com controle vetorial 202
6.4.3 - Blocos componentes do inversor de freqüência 203
6.4.4 - Dimensionamento do inversor 206
6.4.5 - Sistemas de entrada e saída de dados 208
6.4.6 - Formas de variação de velocidade em um inversor de freqüência 209
6.4.7 - Conexões de entrada e saída do inversor de freqüência 211
6.4.8 - Transferência de configuração pela IHM 213
6.4.9 - Aplicação dos inversores de freqüência em controle 213
6.4.10 - Considerações finais sobre os inversores de freqüência 214
Exercícios propostos 217

Apêndice A - Esquemas Elétricos 219

Apêndice B - Simbologia Elétrica 233

Referências Bibliográficas 245

Índice Remissivo 247

1

MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico é um dispositivo que transforma energia elétrica em energia mecânica, em geral, energia cinética, ou seja, num motor, a simples presença da corrente elétrica, seja corrente contínua ou alternada, garante movimento em um eixo, que pode ser aproveitado de diversas maneiras, dependendo da aplicação do motor.

O acionamento de máquinas e equipamentos mecânicos por motores elétricos é um assunto de grande importância econômica. Estima-se que o mercado mundial de motores elétricos de todos os tipos seja da ordem de uma dezena de bilhões de dólares por ano. No campo dos acionamentos industriais, avalia-se que de 70 a 80% da energia elétrica consumida pelo conjunto de todas as indústrias seja transformada em energia mecânica por motores elétricos.



Figura 1.1 Motor elétrico de indução trifásico.

Isso significa que, admitindo-se um rendimento médio da ordem de 80% do universo de motores em aplicações industriais, cerca de 15% da energia

elétrica industrial transforma-se em perdas nos motores. No Brasil, a fabricação de motores elétricos é um segmento relevante da atividade econômica.

No início da década de 80, a indústria brasileira de motores produziu em torno de três milhões de unidades por ano, tendo mais do que 80 mil unidades acima de 20 cv. Entre o fabricante e o usuário final deve existir uma estreita comunicação, de forma que seja feita uma correta seleção do motor a ser utilizado em determinada aplicação.

De acordo com o tipo de fonte de alimentação os motores elétricos podem ser divididos em motores de corrente contínua e de corrente alternada.

Apresentamos a seguir algumas características básicas dos motores AC e DC:

- **Motores DC**: conhecidos por seu controle preciso de velocidade e por seu ajuste fino, portanto são largamente utilizados em aplicações que exigem tais características. Vale comentar que, graças à grande evolução da eletrônica de potência, fontes estáticas de corrente contínua com tiristores confiáveis, de baixo custo e manutenção simples, substituíram os grupos conversores rotativos. Com isso, motores de corrente contínua, apesar de seu custo elevado, passaram a constituir alternativa em uma série de aplicações que necessitem desse ajuste fino de velocidade.
- **Motores AC**: a maioria das aplicações tem sua configuração mais econômica com a utilização de motores de indução de gaiola. Estima-se que 90% (em unidades) dos motores fabricados sejam desse tipo.

Quando não há necessidade de ajuste e controle de velocidade e a potência é inferior a cerca de 500 cv, sua utilização é amplamente dominante. Pode-se dizer que outros tipos de motores são utilizados somente quando alguma peculiaridade determina tal opção.

Observação: *O constante desenvolvimento da eletrônica de potência deve levar a um progressivo abandono dos motores de corrente contínua. Isso porque fontes de tensão e freqüência controladas, que alimentam motores de corrente alternada, principalmente os de indução de gaiola, já estão se transformando em opções mais atraentes quanto ao ajuste e ao controle de velocidade.*

1.1 - Motores de indução

O motor de indução converteu-se no tipo mais usado na indústria, porque a maioria dos sistemas atuais de distribuição de energia elétrica é de corrente

alternada. Comparando com o motor de corrente contínua, o motor de indução tem como vantagem a sua simplicidade, que se traduz em baixo custo e máxima eficácia com manutenção mínima. O rendimento é elevado para médias e máximas cargas, e pode-se assegurar um bom fator de potência com uma seleção correta.

1.2 - Fatores de seleção

Na seleção do motor, vários fatores são determinantes. A importância desses fatores depende da utilização a que o motor está sujeito e das possibilidades do investidor. A seguir estão enumerados os principais fatores que devem ser levados em consideração no processo de seleção de um motor:

- **Fonte de alimentação**: tipo, tensão, freqüência, simetria, equilíbrio etc.;
- **Condições ambientais**: agressividade, periculosidade, altitude, temperatura etc.;
- **Exigências da carga e condições de serviço**: potência solicitada, rotação, esforços mecânicos, configuração física, ciclos de operação, confiabilidade etc.;
- **Consumo e manutenção**: varia com os interesses econômicos, perspectiva a curto ou longo prazo;
- **Controlabilidade**: posição, torque, velocidade, corrente de partida (de acordo com exigências da carga).

1.3 - Tipos de motores elétricos

Os motores elétricos são basicamente divididos em duas grandes categorias quando consideramos tipo de tensão: corrente contínua e corrente alternada. A figura 1.2 mostra uma descrição detalhada dos principais tipos de motores.

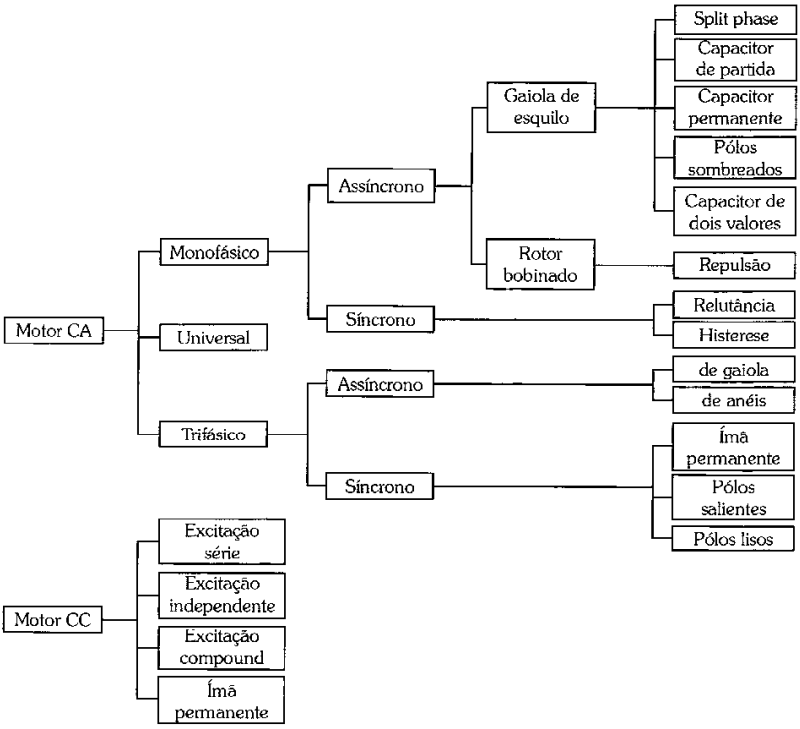


Figura 1.2 - Tipos de motores elétricos.

Serão abordados com maior profundidade os motores em corrente alternada, já que a maioria dos motores elétricos utilizados na indústria pertence a essa categoria.

Os motores assíncronos trifásicos são os mais utilizados em conjunto com comandos elétricos devido ao seu custo, robustez e facilidade para inversão do sentido de rotação. Existem dois tipos de rotores nesses motores. O mais comum é, sem dúvida, o ***rotor gaiola de esquilo***, conhecido também como rotor em curto-circuito ou rotor de gaiola. O segundo é o **rotor bobinado**.

1.3.1 - Motor com rotor gaiola de esquilo

O rotor gaiola de esquilo é o mais robusto de todos. Não exige o uso de escovas nem de comutadores, o que evita muitos problemas relacionados a desgaste e manutenção.

A forma mais simples do motor com rotor gaiola de esquilo apresenta um conjugado de partida relativamente fraco e o pico de corrente na partida alcança até dez vezes o valor da corrente nominal do motor. Esses aspectos podem ser melhorados parcialmente pela construção do próprio rotor. Em especial, as barras que formam a gaiola influem nessas características. Motores de melhor desempenho são equipados com rotores gaiola de barras altas, barras de cunha ou barras duplas.

1.3.2 - Motor com rotor bobinado

O rotor bobinado tem um enrolamento composto por três bobinas, semelhante ao estator do motor. Essas bobinas são ligadas normalmente em estrela, com os três terminais livres conectados a anéis deslizantes no eixo do rotor. Esses anéis permitem, por meio de escovas, a conexão de reostatos (resistores variáveis) no circuito das bobinas do rotor para manipular as características de partida, como, por exemplo, melhorar o conjugado de partida e diminuir o pico de corrente na partida.

Além de diferentes rotores, existem ainda vários tipos de enrolamentos nos estatores dos motores com a finalidade de obter mais de uma velocidade de regime para o mesmo motor.

1.3.3 - Motor Dahlander

O enrolamento Dahlander é o preferido para motores de duas velocidades, sendo uma velocidade maior e outra menor. O número de rotações em velocidade menor corresponde sempre à metade do número de rotações em velocidade maior. O rendimento do motor em velocidade maior é melhor do que em velocidade menor. A potência do motor em velocidade maior é 1.5 até 1.8 vez maior do que em velocidade menor.

O enrolamento Dahlander consiste em seis bobinas, que podem ser combinadas de duas formas. O motor possui seis terminais, como o motor para uma velocidade, porém não pode ser adaptado para duas tensões.

1.3.4 - Motor com dois enrolamentos separados

Nesse tipo de motor existem dois enrolamentos separados, o que possibilita duas velocidades em um só motor. Cada enrolamento é ligado para obter a respectiva velocidade, deixando o segundo enrolamento desligado e

vice-versa. Isso traz a desvantagem de que apenas metade do motor está ativa, o que diminui seu rendimento.

1.3.5 - Motor para três e quatro velocidades

Em motores de três velocidades une-se um enrolamento Dahlander a um enrolamento separado. Para obter quatro velocidades unem-se dois enrolamentos Dahlander separados em um só motor. A respeito das razões das velocidades e do rendimento, vale o que foi dito anteriormente para o caso do motor Dahlander.

1.4 - Constituição do motor de indução

O motor assíncrono é constituído, basicamente, pelos seguintes elementos:

- **Um circuito magnético estático**: composto de chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si, ao qual se dá o nome de estator, em que fica a carcaça que é a estrutura que também tem a função de suporte do conjunto. Possui uma construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e com aletas para a refrigeração.
- **Bobinas**: de acordo com o número de grupos que caracterizam o motor monofásico ou polifásico; localizadas em cavas abertas no estator e alimentadas pela rede de corrente alternada.
- **Rotor**: formado por um núcleo ferromagnético, também laminado, sobre o qual se encontra um enrolamento ou um conjunto de condutores paralelos, nos quais são induzidas correntes provocadas pela corrente alternada das bobinas do estator.

O rotor é apoiado em uma cavidade que transmite à carga a energia mecânica produzida. O entreferro (distância entre o rotor e o estator) é bastante reduzido, de forma a diminuir a corrente em vazio, que leva a perdas, mas também aumenta o fator de potência em vazio.

A figura 1.3 apresenta os diversos elementos que compõem o motor assíncrono de rotor em gaiola de esquilo:

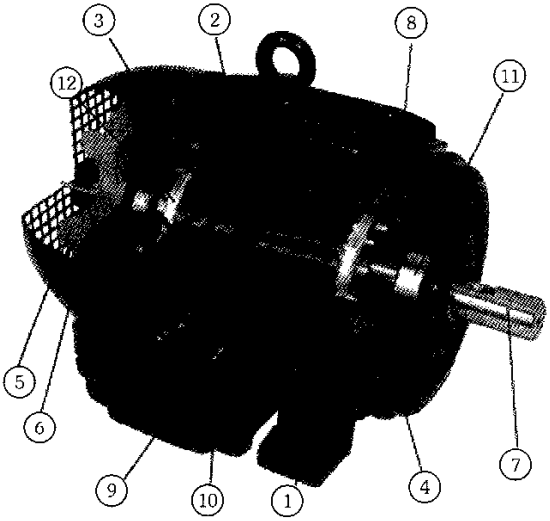


Figura 1.3 - Motor de indução gaiola de esquilo.
(Cortesia WEG)

A partir da figura 1.3 podemos dividir construtivamente o motor em duas partes:

Estator

- Carcaça (1)
- Núcleo de chapas (2)
- Enrolamento trifásico (8)

Rotor

- Eixo (7)
- Núcleo de chapas (3)
- Barras e anéis de curto-circuito (12)

Outras partes

- Tampa (4)
- Ventilador (5)
- Tampa defletora (6)

- Caixa de ligação (9)
- Terminais (10)
- Rolamentos (11)

Quando o motor é energizado, ele funciona como um transformador com secundário em curto-circuito, portanto exige da rede uma corrente muito maior do que a nominal, podendo atingir cerca de sete vezes o valor da corrente nominal. À medida que o campo girante arrasta o rotor, aumentando sua velocidade, a corrente diminui até atingir a corrente nominal, no tempo em que a rotação atinge seu valor nominal. O capítulo 2 descreve o funcionamento do motor elétrico.

1.5 - Motores de indução monofásicos

Os motores monofásicos são assim chamados porque os seus enrolamentos de campo são ligados diretamente a uma fonte monofásica.

Entre os vários tipos de motores elétricos monofásicos, os motores com rotor gaiola destacam-se pela simplicidade de fabricação e, principalmente, pela robustez, confiabilidade e manutenção reduzida.

Por terem somente uma fase de alimentação, não possuem um campo girante como os motores polifásicos, mas um campo magnético pulsante. Isso impede que tenham torque de partida, tendo em conta que no rotor se induzem campos magnéticos alinhados ao campo do estator.

Para solucionar o problema de partida, utilizam-se enrolamentos auxiliares, que são dimensionados e posicionados de forma a criar uma segunda fase fictícia, permitindo a formação do campo girante necessário para a partida. Assim, teremos um enrolamento de armadura com duas partes: um enrolamento principal, que é conectado diretamente à rede de alimentação. A outra parte é o enrolamento secundário ligado em série com um capacitor e esse circuito é ligado em paralelo com o circuito principal. Desta maneira, a corrente elétrica que circula pelo enrolamento auxiliar está adiantada em aproximadamente 90° da corrente do enrolamento principal.

Na figura 1.4 temos um motor monofásico de uso comercial.

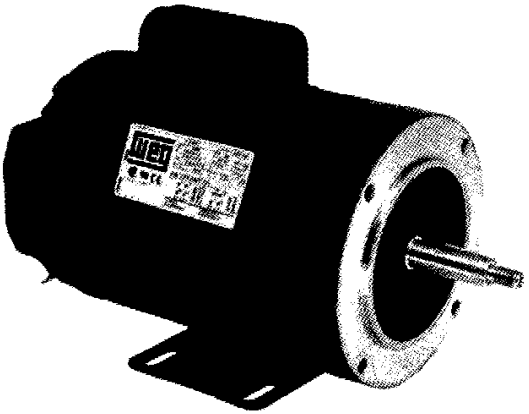


Figura 1.4 - Motor monofásico.
(Cortesia WEG)

Os motores de indução monofásicos são a alternativa natural aos motores de indução polifásicos, nos locais onde não se dispõe de alimentação trifásica, sendo empregados com freqüência em residências, escritórios, oficinas e em zonas rurais, em aplicações como: bombas d'água, ventiladores e meio de acionamento para pequenas máquinas. Não é recomendável o emprego de motores monofásicos maiores que 3 cv, pois estão ligados somente com uma fase da rede, provocando um considerável desbalanceamento de carga na rede.

O emprego de motores monofásicos se justifica pelos itens citados anteriormente, entretanto temos alguns inconvenientes desse tipo de motor:

- Levando-se em consideração o custo, o motor monofásico tem um custo mais elevado que um motor trifásico de mesma potência.
- O motor monofásico sofre desgaste mecânico do platinado (contato centrífugo necessário à partida do motor).
- O motor monofásico alcança apenas 60 a 70% da potência do motor trifásico do mesmo tamanho.
- O motor monofásico apresenta rendimento e fator de potência menores.
- Não é possível inverter diretamente o sentido de rotação de motores monofásicos.

A seguir, observe os três tipos de motores monofásicos mais utilizados na prática.

1.5.1 - Motor monofásico com dois terminais

É destinado apenas a um valor de tensão, e não pode ser adaptado a diferentes valores de tensão. Assim, a tensão aplicada na placa deve ser igual à tensão da rede de alimentação.

Outro inconveniente é o fato de não ser possível a inversão do seu sentido de rotação, pois ele tem somente dois terminais em que são ligados os condutores de fase (L1) e neutro (N). A inversão dos cabos de alimentação fase e neutro não provoca a inversão do sentido de giro.

1.5.2 - Motor monofásico com quatro terminais

Nesse tipo de motor o enrolamento é dividido em duas partes iguais. Torna-se possível a instalação do motor a dois valores de tensão, que são chamados de *tensão maior* e *tensão menor*.

O valor de tensão maior é sempre igual a duas vezes o valor de tensão menor, sendo que os valores mais utilizados são 220 V para o de maior tensão e 110 V para o de menor tensão. Não é possível inverter o sentido de rotação desse motor.

Pelo diagrama a seguir, os terminais 1 e 2 são conectados a uma metade e os terminais 3 e 4 à segunda metade do enrolamento. As duas partes do enrolamento devem ser ligadas em série se a tensão de alimentação for de 220 V. Se a tensão de alimentação for 110 V, as duas partes do enrolamento devem ser ligadas em paralelo, como mostra a figura 1.5.

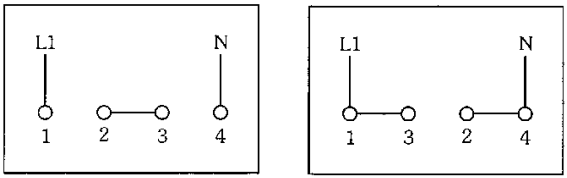


Figura 1.5 - Esquema de ligação de motor monofásico com quatro terminais.

1.5.3 - Motor monofásico com seis terminais

Com esse tipo de motor podemos efetuar a ligação em dois tipos de tensão de alimentação diferentes. Além disso, pode-se inverter o sentido de giro desse motor. É necessário ressaltar que não é possível fazer a inversão com o motor em movimento. Deve-se desligá-lo para que possa ser dada a partida em outra direção.

Os terminais 1 até 4 são conectados às duas metades do enrolamento, como nos motores de quatro terminais. Os terminais 5 e 6 estão ligados à parte e têm como função a inversão do sentido de rotação, bastando inverter a ligação dos terminais 5 e 6.

A ligação do motor a maior tensão (220 V) é feita como no motor de quatro terminais. A figura 1.6 mostra o esquema de ligação para a tensão maior. Para inverter o sentido de rotação, basta trocar as conexões dos terminais 5 e 6.

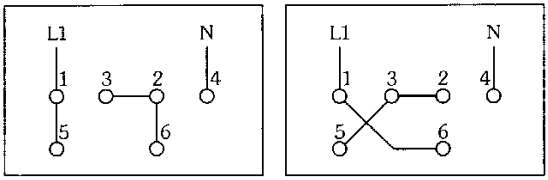


Figura 1.6 - Esquema de ligação de motor monofásico com seis terminais.

A figura seguinte mostra a ligação na menor tensão (110 V). Como no caso da maior tensão, para inverter a rotação, basta trocar a ligação dos terminais 5 e 6.

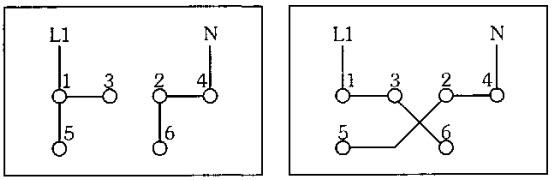


Figura 1.7 - Inversão de rotação de motor com seis terminais.

1.6 - Motores de indução monofásicos

Estão divididos nas categorias enumeradas a seguir:

- Motor de pólos sombreados (ou *shaded pole*)
- Motor de fase dividida (ou *split phase*)
- Motor de capacitor de partida (ou *capacitor start*)
- Motor de capacitor permanente (ou *permanent split capacitor*)
- Motor com dois capacitores (ou *two value capacitor*)

1.6.1 - Motor de pólos sombreados (shaded pole)

O motor de pólos sombreados, também denominado motor de campo distorcido (ou *shaded pole*), graças ao seu processo de partida, é o mais simples, confiável e econômico dos motores de indução monofásicos.

Construtivamente, existem diversos tipos, e uma das formas mais comuns é a de pólos salientes. Cada pólo tem uma parte (em geral 25% a 35%) abraçada por uma espira de cobre em curto-circuito, como é mostrado na figura 1.8.

A corrente induzida nessa espira faz com que o fluxo que a atravessa sofra um atraso em relação ao fluxo da parte não abraçada por ela. O resultado disso é semelhante a um campo girante que se move da direção da parte não abraçada para a parte abraçada do pólo. Isso produz o torque que fará o motor partir e atingir a rotação nominal.

O sentido de rotação, portanto, depende do lado em que se situa a parte abraçada do pólo. Conseqüentemente, o motor de campo distorcido apresenta um único sentido de rotação. Este, geralmente, pode ser invertido, mudando-se a posição da ponta de eixo do rotor em relação ao estator. Existem outros métodos para obter inversão de rotação, mas muito mais dispendiosos.

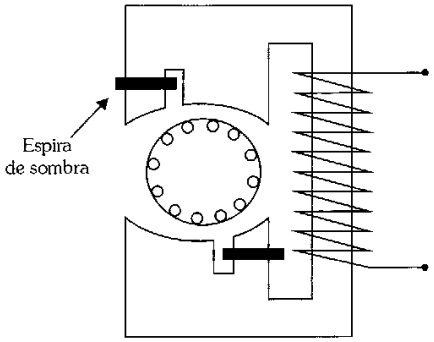


Figura 1.8 - Motor de pólos sombreados.

As espiras de sombra são anéis de cobre inseridos nas sapatas polares. Devido à indução magnética nos anéis, o campo magnético no entreferro sob eles terá uma defasagem em relação ao restante da região da sapata polar. Tudo ocorre como se houvesse um campo girante sob cada sapata polar.

Quanto ao desempenho, os motores de campo distorcido apresentam baixo torque de partida (15% a 50% do nominal), representado na figura 1.9, baixo rendimento e baixo fator de potência. Devido a esse fato, eles são normalmente fabricados para pequenas potências, que vão de alguns milésimos de cv a 1/4 cv. De forma geral, o controle de velocidade dos motores de campo distorcido consiste em reduzir a tensão de alimentação aplicada.

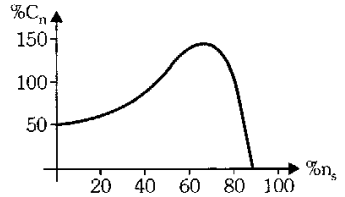


Figura 1.9 - Curva torque x rotação para o motor de pólos sombreados.

Pela sua simplicidade, robustez e baixo custo são ideais nas seguintes aplicações: movimentação de ar (ventiladores, exaustores, purificadores de ambiente, unidades de refrigeração, secadores de roupa e de cabelo, pequenas bombas e compressores, projetores de slides, gira-discos e aplicações domésticas).

1.6.2 - Motor de fase dividida (split phase)

Esse motor possui um enrolamento principal e um auxiliar (para a partida), ambos defasados de 90°, como mostra a figura 1.10. O enrolamento auxiliar cria um deslocamento de fase que produz o torque necessário para a rotação inicial e a aceleração. Quando o motor atinge uma rotação predeterminada, o enrolamento auxiliar é desligado da rede por meio de uma chave que normalmente atua por uma força centrífuga (chave ou disjuntor centrífugo) ou, em casos específicos, por relé de corrente, chave manual ou outros dispositivos especiais. Como o enrolamento auxiliar é dimensionado para atuar apenas na partida, se não for desligado logo após a partida, danifica-se.

O ângulo de defasagem que se pode obter entre as correntes do enrolamento principal e do enrolamento auxiliar é pequeno, assim o conjugado de partida é proporcional ao seno do ângulo entre as correntes nos enrolamentos principal e auxiliar, no instante da partida, por isso esses motores têm torque de partida igual ou pouco superior ao nominal, o que limita a sua aplicação a potências fracionárias e a cargas que exigem pouco torque de partida, tais como: máquinas de escritórios, ventiladores e exaustores, pequenos polidores, compressores herméticos, bombas centrífugas etc. Normalmente são construídos em potências fracionárias que não excedem ¾ de cv.

A chave centrífuga mantém em união um bloco de contatos com os contatos do enrolamento auxiliar através de molas, de modo que o circuito está fechado na partida. À medida que aumenta a velocidade do motor, pesos são deslocados para fora, superam a tensão das molas e afastam o bloco de contatos, abrindo o circuito do enrolamento auxiliar, o qual permanece aberto enquanto o motor estiver funcionando.

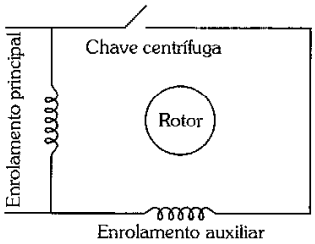


Figura 1.10 - Motor de fase dividida.

Para esse tipo de motor o enrolamento auxiliar é desconectado da rede por meio de chave centrífuga quando a rotação estiver situada entre 75% e 80% da velocidade síncrona, pois nesse intervalo de velocidades, o conjugado produzido pelo campo pulsante do enrolamento principal excede aquele desen-

volvido pelos dois enrolamentos combinados. A figura 1.11 mostra o comportamento do torque com a variação da velocidade do motor.

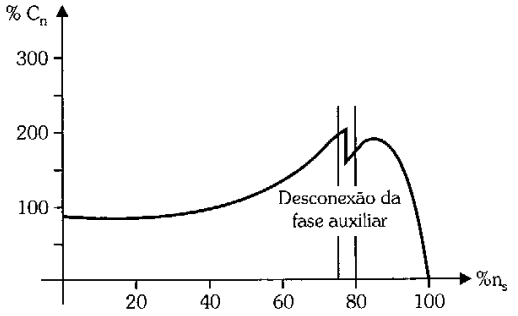


Figura 1.11 - Curva torque x rotação para o motor de fase dividida.

A corrente de rotor bloqueado varia entre cinco e sete vezes a corrente nominal, mas não constitui um problema. Uma vez que os rotores desse tipo de motor são de tamanho reduzido, apresentando uma baixa inércia mesmo quando ligados à carga, a corrente de partida relativamente elevada cai quase que instantaneamente.

Para inverter o sentido de giro do motor de fase dividida, é necessário inverter a polaridade dos terminais de ligação da rede em relação a um dos enrolamentos, principal ou auxiliar. A inversão do sentido de giro nunca pode ser feita em condições de funcionamento.

O controle de velocidade em motores de fase dividida deve ser realizado numa faixa bastante limitada, que se situa acima da velocidade de operação da chave centrífuga e abaixo da velocidade síncrona. Seu controle de velocidade é muito difícil, já que sua velocidade síncrona é determinada pela freqüência da rede e pelo número de pólos desenvolvidos pelo enrolamento principal.

1.6.3 - Motor de capacitor de partida (capacitor start)

É um motor semelhante ao de fase dividida. A principal diferença reside na inclusão de um capacitor eletrolítico em série com o enrolamento auxiliar de partida. O capacitor permite maior ângulo de defasagem entre as correntes dos enrolamentos principal e auxiliar, proporcionando elevados torques de partida. A figura 1.12 descreve o motor de capacitor de partida. Como no motor de fase dividida, o circuito auxiliar é desligado quando o motor atinge entre 75% e 80% da velocidade síncrona.

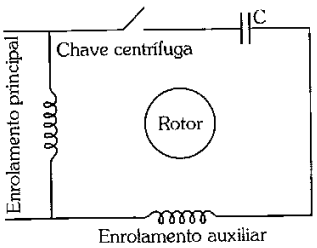


Figura 1.12 - Motor com capacitor de partida.

Nesse intervalo de velocidades, o enrolamento principal sozinho desenvolve quase o mesmo torque que os enrolamentos combinados. Para velocidades maiores, entre 80% e 90% da velocidade síncrona, a curva do torque com os enrolamentos combinados cruza a curva de torque do enrolamento principal, como mostra a figura 1.13. Desta forma, para velocidades acima deste ponto, o motor desenvolve menor torque, para qualquer escorregamento, com o circuito auxiliar ligado do que com ele desligado.

Devido ao fato de o cruzamento das curvas não ocorrer sempre no mesmo ponto e, ainda, o disjuntor centrífugo não abrir sempre exatamente na mesma velocidade, é prática comum fazer com que a abertura aconteça, na média, um pouco antes do cruzamento das curvas.

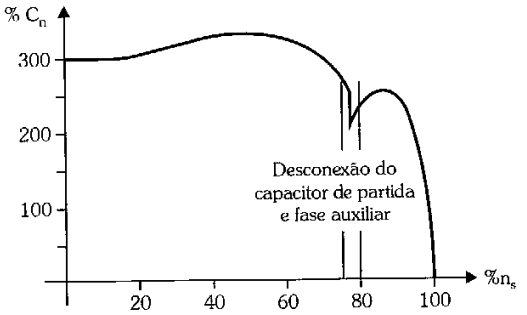


Figura 1.13 - Curva de torque x rotação para o motor com capacitor de partida.

Com o seu elevado torque de partida (entre 200% e 350% do torque nominal), o motor de capacitor de partida pode ser utilizado em uma grande variedade de aplicações e fabricado para potências que vão de ¼ cv a 15 cv.

Devido ao dimensionamento do enrolamento auxiliar e do capacitor de partida basear-se apenas no seu funcionamento intermitente, uma chave centrífuga de partida defeituosa pode causar danos não apenas aos enrolamentos do motor, mas também ao capacitor.

Igualmente aos motores de fase dividida, para inverter o sentido de giro dos motores de capacitor de partida, é necessário inverter a polaridade dos terminais de ligação da rede em relação a um dos enrolamentos. Isso torna possível realizar a inversão do sentido de giro com o motor em funcionamento.

1.6.4 - Motor de capacitor permanente (permanent split capacitor)

Nesse tipo de motor, o enrolamento auxiliar e o capacitor ficam permanentemente ligados, sendo o capacitor do tipo eletrostático, como indica a figura 1.14. O efeito desse capacitor é criar condições de fluxo muito semelhantes às encontradas nos motores polifásicos, aumentando, com isso, o torque máximo, o rendimento e o fator de potência, além de reduzir sensivelmente o ruído.

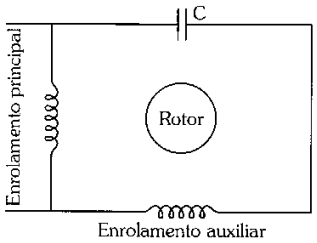


Figura 1.14 - Motor de capacitor permanente.

Construtivamente, são menores e isentos de manutenção, pois não utilizam contatos e partes móveis, como nos motores anteriores. Porém, o seu torque de partida é inferior ao do motor de fase dividida (50% a 100% do conjugado nominal), o que limita sua aplicação a equipamentos que não requerem elevado torque de partida, tais como máquinas de escritório, ventiladores, exaustores, sopradores, bombas centrífugas, esmeris, pequenas serras, furadeiras, condicionadores de ar, pulverizadores etc. São fabricados, normalmente, para potências de 1/50 a 1,5 cv. A figura 1.15 ilustra o comportamento do torque com a variação da velocidade.

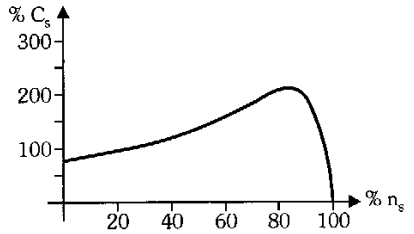


Figura 1.15 - Curva torque x rotação para o motor de capacitor permanente.

1.6.5 - Motor com dois capacitores (two value capacitor)

É um motor que utiliza as vantagens dos dois anteriores: partida como o do motor de capacitor de partida e funcionamento em regime idêntico ao do motor de capacitor permanente, como é ilustrado na figura 1.16. Devido ao seu alto custo, normalmente é fabricado apenas para potências superiores a 1 cv.

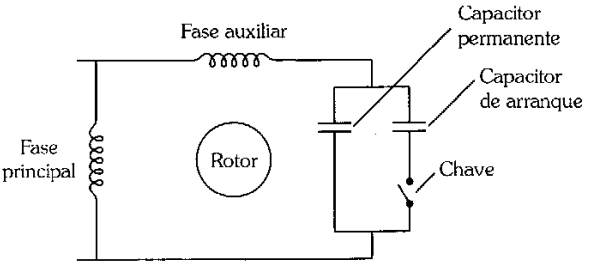


Figura 1.16 - Motor com dois capacitores.

Nesse tipo de motor, são utilizados dois capacitores durante o período de partida. Um deles é um capacitor eletrolítico de partida, de capacidade razoavelmente elevada, cerca de 10 a 15 vezes o valor do capacitor de funcionamento, que é desligado do circuito por meio de uma chave centrífuga quando a velocidade do motor atinge 75% a 80% da velocidade síncrona, mostrado na figura 1.17.

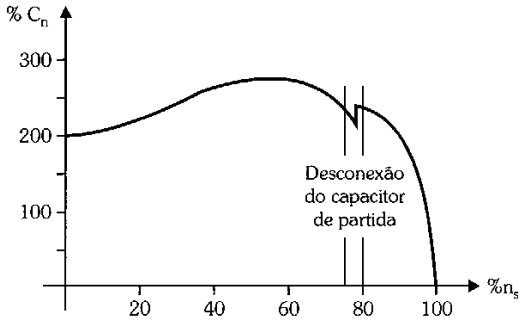


Figura 1.17 - Curva torque x rotação para o motor com dois capacitores.

Ele pode reverter o seu sentido de rotação, pois quando em funcionamento, se a polaridade dos terminais de ligação da rede é invertida em relação a um dos enrolamentos, o seu sentido de giro também se inverte.

Inversões freqüentes reduzem a vida útil da chave centrífuga. Assim, quando forem necessárias freqüentes reversões, deve-se dar preferência ao uso de um motor de capacitor permanente.

1.7 - Motor universal

Vários aparelhos eletrodomésticos, especialmente de cozinha, e diversas ferramentas portáteis utilizam outro tipo de motor monofásico, denominado universal, cujo princípio de funcionamento é completamente diferente do motor de indução. A denominação de motor universal deriva do fato de poder operar tanto sob alimentação CA como CC. A rigor, trata-se de um motor CC série. Para operação em CA, o estator e o rotor devem ser de chapas laminadas, para evitar perdas por histerese e correntes parasitas.

Trata-se de um motor de velocidade variável, com baixas velocidades para grandes conjugados e altas velocidades para pequenas cargas. O conjugado de partida também é elevado. Devido a isso, são usados comumente em pequenos eletrodomésticos, como furadeiras elétricas e lixadeiras, que requerem conjugado elevado, e em liquidificadores, aspiradores de pó e bombas centrífugas, que requerem alta velocidade.

Normalmente são fabricados para potências fracionárias de até 3/4 cv. Para potências acima de alguns poucos cv, funcionam precariamente em corrente alternada. Há um grande faiscamento nas escovas, e o rendimento e o fator de potência decrescem.

Tipicamente o estator é um conjunto de pólos salientes com bobinas enroladas sobre eles. O rotor é constituído por um enrolamento distribuído em ranhuras e ligado em série com as bobinas do estator, que recebe o nome de armadura. Os terminais das bobinas do rotor são soldados num anel coletor solidário ao eixo, e a conexão com o meio externo é feita por um conjunto de escovas de grafite. Na figura 1.18 temos a representação desse tipo de motor:

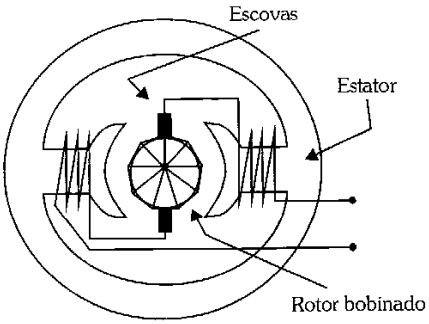


Figura 1.18 - Motor universal.

1.8 - Identificação das bobinas de um motor monofásico

Os motores monofásicos de fase auxiliar são os mais utilizados na prática. As suas bobinas são identificadas da seguinte forma:

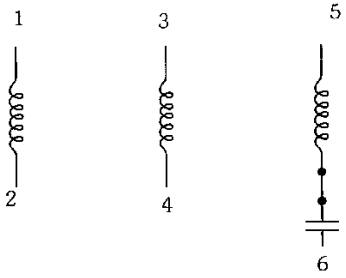


Figura 1.19 - Bobinas de um motor monofásico.

O enrolamento principal é representado por duas bobinas, sendo os seus inícios os números 1 e 3 e os seus finais 2 e 4 respectivamente. O enrolamento auxiliar é representado pelos bornes numerados com início da bobina em 5 e final em 6. Nesse enrolamento estão um capacitor e uma chave centrífuga, responsável pelo desligamento desse enrolamento quando o motor atingir 75% de sua velocidade nominal.

Para determinarmos os enrolamentos do motor monofásico, primeiramente com o auxílio de um ohmímetro, devemos medir o valor de resistência de cada uma das bobinas. A bobina que apresentar o maior valor de resistência será a auxiliar e as outras duas serão as bobinas principais.

O próximo passo é a polarização das bobinas principais em que se deve ligar as duas bobinas em série e aplicar a tensão nominal delas na associação e medir a corrente, como mostra a figura 1.20.

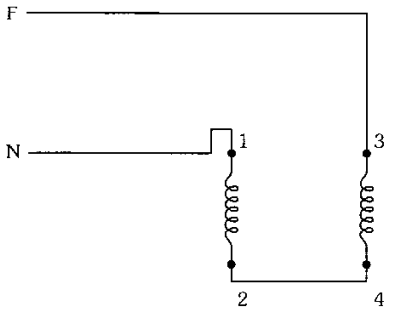


Figura 1.20 - Determinação da polaridade dos enrolamentos principais.

Inverte-se uma das bobinas e mede-se a corrente novamente, como indica a figura 1.21.

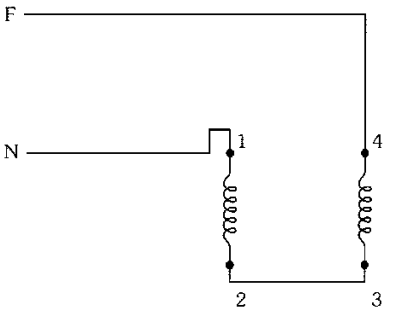


Figura 1.21 - Determinação da polaridade dos enrolamentos principais.

Deve-se aplicar os números 1, 2, 3 e 4, respectivamente, à ligação das bobinas que apresentar a menor corrente.

1.9 - Motores síncronos

São denominados motores síncronos porque a velocidade do seu rotor é sincronizada com o campo girante que é estabelecido no estator. A velocidade do motor síncrono é determinada pela equação:

$$Ns = \frac{120.f}{p}$$

Sendo:

Ns: velocidade síncrona em rpm

f: freqüência em hertz

p: número de pólos

Como podemos considerar a freqüência que alimenta o motor constante, bem como seu número de pólos, podemos considerar o motor síncrono CA uma máquina de velocidade constante.

Da mesma forma, o funcionamento dos motores síncronos requer a aplicação de uma tensão alternada no estator do motor, sendo a excitação do campo rotórico feita por meio de uma fonte de corrente contínua, que pode ser obtida diretamente de uma fonte externa, ou de uma excitatriz conectada ao eixo do motor. Uma pequena parcela do torque do motor será utilizada para gerar a corrente contínua para a excitação do campo.

As figuras 1.22 e 1.23 mostram, respectivamente, um esboço da estrutura de um motor síncrono comercial WEG.

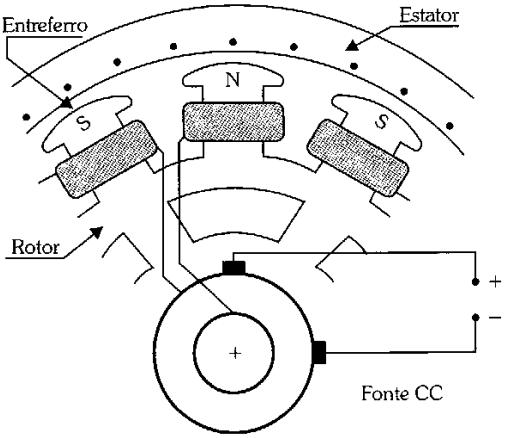


Figura 1.22 - Estrutura do motor síncrono.

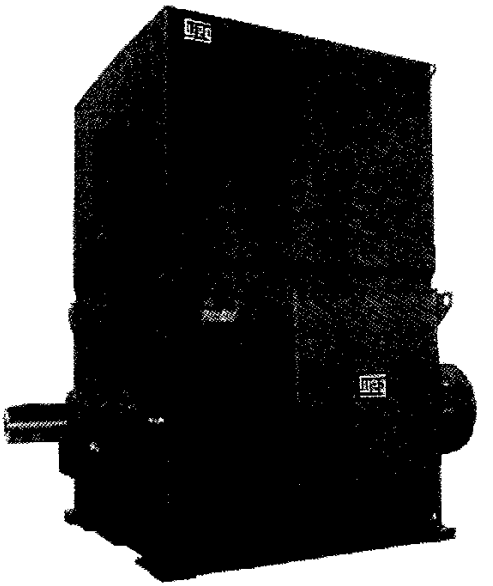


Figura 1.23 - Motor síncrono WEG.

1.9.1 - Utilização do motor síncrono para correção do fator de potência

Devido à possibilidade de variação da excitação do campo, o motor síncrono possui uma característica que nenhum outro possui, que é a possibilidade da variação do fator de potência.

Em um motor síncrono, quando uma carga é aplicada, há um deslocamento do ângulo de fase do rotor com relação ao campo. Apesar de a velocidade do motor continuar síncrona, teremos nestas condições um fator de potência em atraso. Para que o motor volte a operar em condições de fator de potência unitário, deve-se aumentar a corrente contínua de excitação. Se for mantido o aumento de corrente, o fator de potência ficará adiantado. Podemos afirmar que, para uma dada carga, o fator de potência é diretamente dependente da corrente de excitação.

Isso acontece porque, quando a corrente de excitação é de valor reduzido, a força eletromotriz induzida no estator é pequena, o que leva o estator a absorver da rede de alimentação uma potência reativa necessária para a formação do campo magnético, ocasionando baixo fator de potência. Se a corrente de excitação for aumentada, para a mesma carga, haverá uma elevação na força eletromotriz no estator, o que fará com que a corrente do estator, que estava anteriormente atrasada, possa ficar em fase com a tensão da rede, caracterizando um fator de potência unitário. Se o aumento da corrente de excitação prosseguir, teremos então uma corrente do estator adiantada, o que caracteriza um fator de potência adiantado.

Este comportamento pode ser verificado na figura 1.24 em que notamos que o fator de potência de um motor submetido a uma determinada carga, representada pelas diferentes curvas, depende da sua corrente de excitação, em que I_A representa a corrente do estator e I_F a corrente de excitação.

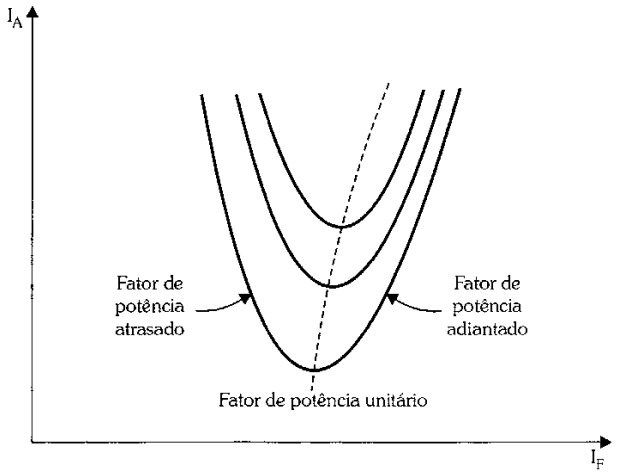


Figura 1.24 - Variação do fator de potência em função da variação da corrente de excitação.

Assim, o motor síncrono pode ser uma alternativa para a correção de fator de potência, com relação ao tradicional método do uso de capacitores, entretanto devem ser tomados alguns cuidados com relação ao tipo de carga utilizado, pois variações no conjugado produzem variações no fator de potência. Também não é aconselhável o uso de motores síncronos para correção de fator de potência com potência inferior a 50 cv.

1.9.2 - Desvantagens dos motores síncronos em relação aos motores de indução

Devido a suas peculiaridades, a aplicação de motores síncronos é bastante restrita, pois como foi citado anteriormente, precisam de uma fonte de excitação em corrente contínua, além de uma manutenção constante.

Uma outra desvantagem do motor síncrono com relação ao motor de indução é que ele não é capaz de partir somente com a aplicação de uma corrente alternada no estator, pois é necessário que o motor seja levado a uma velocidade suficiente próxima da velocidade síncrona para que ele possa entrar em sincronismo com o campo girante.

Para que a partida seja possível, devem ser utilizadas algumas técnicas. A utilização de um motor de corrente contínua acoplado ao eixo do motor e a utilização de enrolamento de compensação (enrolamentos amortecedores) são as mais comuns.

Quando se utilizam enrolamentos de compensação, que podem ser do tipo gaiola de esquilo ou rotor bobinado, o enrolamento de campo de corrente contínua é curto-circuitado, aplicando-se tensão da rede nos terminais do estator, levando o motor a vazio à condição de sincronismo, como se fosse um motor de indução. Após a partida, a ligação de curto-circuito é desfeita, sendo aplicada corrente contínua no circuito de excitação.

Também pode-se colocar o motor em movimento por meio de um pequeno motor de indução ou motor de corrente contínua acoplado ao seu eixo, assim quando o rotor se aproxima da velocidade síncrona, ele passa a ser energizado por uma fonte CC, a partir daí o rotor passa a acompanhar o campo girante e está apto a operar.

1.9.3 - Vantagens dos motores síncronos em relação aos motores de indução

Em seguida estão enumeradas algumas vantagens dos motores síncronos em relação aos motores de indução:

- Os motores síncronos, além de serem utilizados para fornecer força mecânica, têm a característica de corrigir o fator de potência.
- Possuem rendimentos maiores do que os motores de indução equivalentes, quando trabalham com fator de potência unitário.
- Os rotores dos motores síncronos permitem o uso de entreferros maiores, possibilitando menores tolerâncias.

Exercícios propostos

1. Quais requisitos devem ser levados em consideração para a seleção de um acionamento elétrico?
2. Quais são as características básicas dos motores AC e DC?
3. Por meio de um diagrama descreva os tipos de motores elétricos.
4. Por que os motores assíncronos trifásicos são os mais utilizados na indústria em acionamentos elétricos?
5. Dê as principais características de um motor com rotor gaiola de esquilo.
6. O que é motor com rotor bobinado?
7. Dê as principais características de um motor Dahlander.
8. Como é constituído um motor de indução?
9. Quais são as vantagens e desvantagens do emprego de motores monofásicos?
10. Com relação ao número de terminais, quais são os três tipos de motores monofásicos mais utilizados? Quais suas principais características?
11. Quais são os cinco principais tipos de motor monofásico? Quais são suas características, aplicações e faixa de potência de trabalho?
12. Descreva as principais características de um motor universal.
13. Caracterize o motor síncrono.
14. De que forma o motor síncrono pode ser usado para correção do fator de potência?
15. Cite três vantagens e três desvantagens do motor síncrono em relação ao motor de indução.

2

MOTORES TRIFÁSICOS

O motor de indução polifásico é o mais utilizado, tanto na indústria como no ambiente doméstico, porque os sistemas atuais de distribuição de energia elétrica normalmente são trifásicos de corrente alternada. O estudo recaiu essencialmente nos motores de indução trifásicos, já que na prática constituem o grande leque dos motores de indução polifásicos.

A utilização de motores de indução trifásicos é aconselhável a partir dos 2 kW. Para potências inferiores justifica-se o monofásico.

O motor de indução trifásico apresenta relativa vantagem com relação ao monofásico, já que possui partida mais fácil, o ruído é menor e é mais barato para potências superiores a 2 kW.

2.1 - Motor de indução com rotor gaiola de esquilo

Este é o motor mais utilizado na indústria atualmente. Tem a vantagem de ser mais econômico em relação aos motores monofásicos tanto na construção como na utilização. Além disso, escolhendo o método de partida ideal, tem um leque muito maior de aplicações.

Vamos analisar detalhadamente esse motor.

O rotor em gaiola de esquilo é constituído por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são colocadas barras de alumínio (condutores), dispostas paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores, também em alumínio, que provocam um curto-circuito nos condutores como ilustra a figura 2.1.

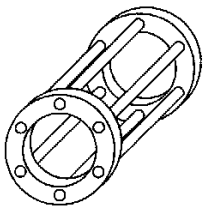


Figura 2.1 - Rotor gaiola de esquilo.

O estator do motor é também constituído por um núcleo ferromagnético laminado, nas cavas do qual são colocados os enrolamentos alimentados pela rede de corrente alternada trifásica.

A vantagem desse rotor em relação ao rotor bobinado é que resulta em uma construção do induzido mais rápida, mais prática e mais barata.

Trata-se de um motor robusto, barato, de rápida produção, que não exige coletor (órgão sensível e caro) e de rápida ligação à rede.

As barras condutoras da gaiola são colocadas geralmente com uma certa inclinação para evitar as trepidações e ruídos pela ação eletromagnética entre os dentes das cavas do estator e do rotor.

A principal desvantagem é que o torque de partida é reduzido em relação à corrente absorvida pelo estator. O motor de indução de rotor bobinado substitui o de rotor em gaiola de esquilo em potências muito elevadas, devido ao abaixamento da corrente de partida permitido pela configuração do rotor.

Apesar de ser utilizado em casos com velocidades constantes de serviço, aplica-se, preferencialmente, quando as velocidades de serviço são variáveis.

A figura 2.2 mostra um motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo.

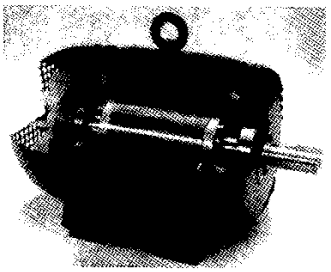


Figura 2.2 - Motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo. (Cortesia WEG)

2.2 - Motor de rotor bobinado

Difere do motor de rotor em gaiola de esquilo apenas quanto ao rotor, constituído por um núcleo ferromagnético laminado sobre o qual são alojadas as espiras que constituem o enrolamento trifásico, geralmente em estrela. Os três terminais livres de cada uma das bobinas do enrolamento trifásico são ligados a três anéis de deslizamento de escovas colocados no eixo do rotor e por meio de

escovas de grafite estacionadas no estator. Esses três anéis são ligados exteriormente a um reostato de partida constituído por três resistências variáveis, ligadas também em estrela. Desse modo, os enrolamentos do rotor também ficam em circuito fechado.

A função do reostato de partida, ligado aos enrolamentos do rotor, é reduzir as correntes de partida elevadas, no caso de motores de elevada potência.

À medida que o motor ganha velocidade, as resistências são, progressivamente, retiradas do circuito até ficarem curto-circuitadas (retiradas), quando o motor passa a funcionar no seu regime nominal, como mostra a figura 2.3.

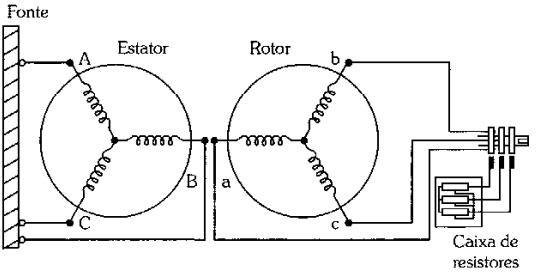


Figura 2.3 - Ligações do motor de rotor bobinado.

O motor de rotor bobinado também funciona com os elementos do rotor em curto-circuito (tal como o motor de rotor em gaiola de esquilo), quando atinge o seu regime nominal.

O motor de indução de rotor bobinado substitui o de rotor em gaiola de esquilo em potências muito elevadas devido ao abaixamento da corrente de partida permitido pela configuração do rotor. Os rotores bobinados são muito empregados quando se necessita de partida a tensão plena de armadura, com grande conjugado de partida e corrente de linha moderada na partida.

Por intermédio do dimensionamento, os resistores do reostato fazem o motor trabalhar com escorregamento muito maior que o convencional (> 5%), fazendo com que se consiga um conjugado de partida maior. As figuras 2.4 e 2.5 mostram, respectivamente, a vista explodida de um motor de indução com rotor bobinado e um motor de indução com rotor bobinado da empresa Weg.

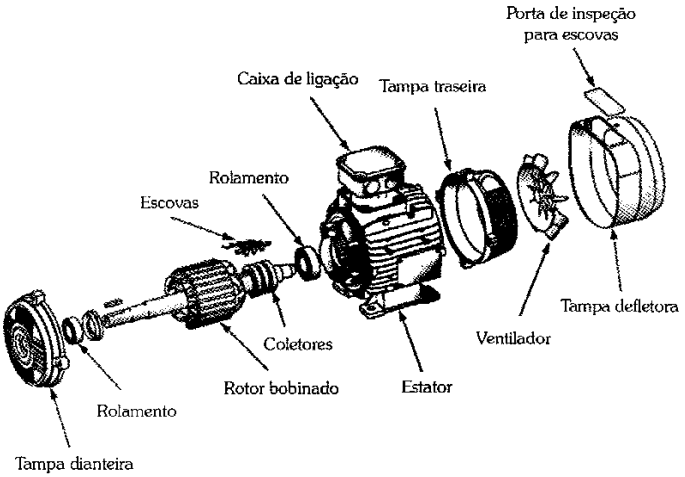


Figura 2.4 - Vista explodida de um motor com rotor bobinado.



Figura 2.5 - Motor de indução com rotor bobinado. (Cortesia WEG)

2.3 - Motor trifásico com freio (motofreio trifásico)

É formado por um motor trifásico de indução acoplado a um freio com disco. O motor é fechado, com ventilação externa e o freio é constituído de duas pastilhas e com o mínimo de partes móveis, provendo pouco aquecimento por atrito. O sistema de ventilação é responsável pelo resfriamento do motor, assim, o conjunto motor e freio forma uma unidade bastante compacta.

O freio é ativado por um eletroímã, cuja bobina opera normalmente dentro de uma faixa de tensão de ±10%, cuja alimentação é fornecida por uma fonte de corrente contínua constituída por uma ponte retificadora, alimentada diretamente pela rede elétrica local.

O circuito de alimentação do eletroímã é acionado pelo mesmo circuito de comando do motor. Assim, quando o circuito de comando do motor for desligado, a fonte de alimentação do eletroímã é interrompida, liberando as molas de pressão que pressionam as pastilhas de metal do disco de frenagem, rigidamente presas ao eixo do motor. As pastilhas são comprimidas pelas duas superfícies de atrito, sendo uma formada pela tampa e a outra pela própria armadura do eletroímã.

A figura 2.6 mostra o motofreio trifásico.

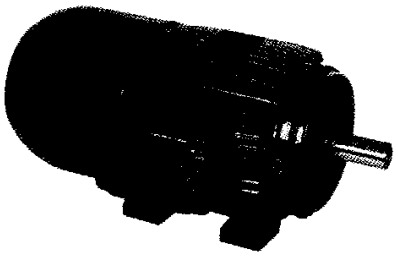


Figura 2.6 - Motofreio trifásico WEG.

Para que haja o deslocamento da armadura do eletroímã pela ação da mola, é necessário que a força eletromagnética seja inferior à força exercida pela mola, que ocorre quando o motor é desligado da rede. Da mesma maneira, quando o motor é acionado, o eletroímã é energizado, atraindo a sua armadura na direção oposta à força da mola, fazendo com que o disco de frenagem gire livre, sem atrito.

A aplicação do motofreio é restrita às atividades industriais, quando há necessidade de paradas rápidas para requisitos de segurança, bem como de precisão no posicionamento das máquinas, como, por exemplo, guindastes, elevadores, pontes rolantes, correias transportadoras, bobinadeiras etc.

Não é aconselhável a aplicação de motofreio em atividades que possam provocar a penetração de partículas abrasivas, bem como água, óleo, entre outros, de forma a reduzir a eficiência do sistema de frenagem ou mesmo danificá-lo. O calor gerado pelo atrito durante a operação de frenagem deve ser retirado pelo sistema de ventilação do motor.

De uma maneira geral, os motofreios podem se dividir em três diferentes categorias:

a) Ligação para frenagem lenta

Nesse tipo de ligação, a ponte retificadora é alimentada diretamente dos terminais do motor, sendo assim a corrente é enviada para a bobina do eletroímã, que é a forma de ligação padronizada de fábrica.

Na figura 2.7 observe o circuito que representa essa ligação:

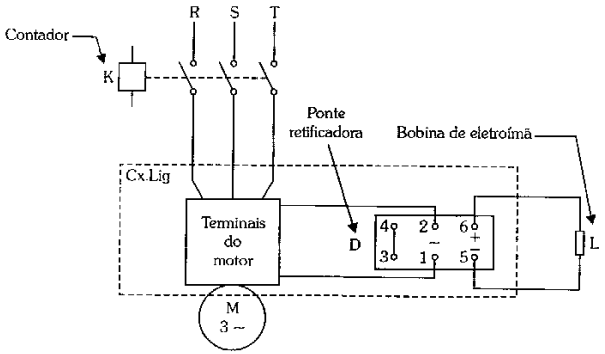


Figura 2.7 - Frenagem lenta do motofreio.

b) Ligação para a frenagem média

Nesse caso a ponte retificadora é alimentada a partir da rede local por meio de corrente alternada. Esse circuito deve ser conectado a um contato auxiliar do contator de comando do motor para que o freio seja ligado ou desligado juntamente com o motor, evitando desarmes dos elementos de proteção na partida. A figura 2.8 mostra a frenagem média do motofreio.

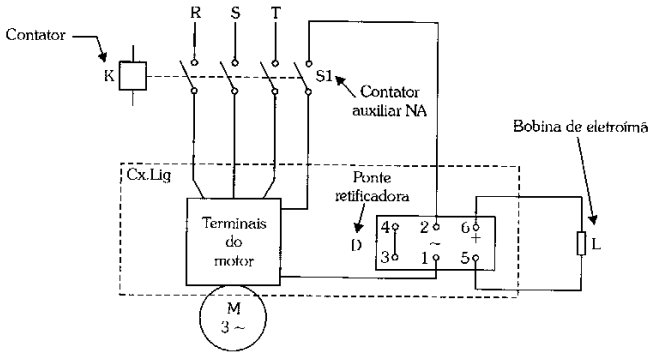


Figura 2.8 - Frenagem média do motofreio.

c) Ligação para frenagem rápida

A ponte retificadora é alimentada a partir da rede local de corrente alternada. Desta vez, o circuito de alimentação de corrente contínua da referida ponte é interligado a um contato auxiliar normalmente aberto do contator de comando do motor.

A figura 2.9 representa a frenagem rápida do motofreio.

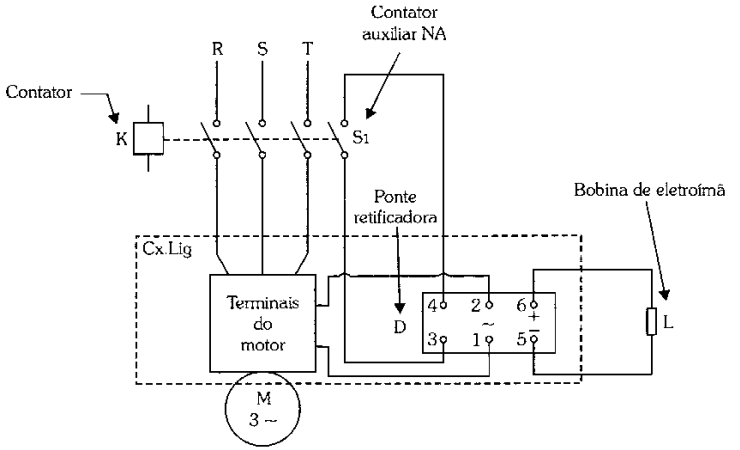


Figura 2.9 - Frenagem rápida do motofreio.

A seguir, temos uma tabela com as características nominais de motofreios trifásicos WEG.

Carcaça ABNT	Pólos	Tempo de atuação (ms)[1]			Conjugado de frenagem (N.m)	Potência máxima de frenagem P (W)	Consumo de potência pelo freio (W)	Corrente absorvida pelo freio (A)	Nº de operações até o próximo reajuste do entreferro
		Frenagem lenta	Frenagem média	Frenagem rápida					
71	II IV VI VIII	350 250 200 150	200	80	15	55 40 30 25	30	0,14	200.000 500.000 900.000 1.2000.000
80	II IV VI VIII	450 350 250 200	250	120	20	70 45 40 30	35	0,16	80.000 350.000 650.000 1.000.000
90S/L	II IV VI VIII	650 500 400 280	300	170	25	100 75 55 45	40	0,2	60.000 250.000 550.000 1.000.000
100L	II IV VI VIII	700 550 450 300	350	220	40	150 100 85 60	50	0,25	60.000 250.000 550.000 1.000.000

Carcaça ABNT	Pólos	Tempo de atuação (ms)[1]			Conjugado de frenagem (N.m)	Potência máxima de frenagem P (W)	Consumo de potência pelo freio (W)	Corrente absorvida pelo freio (A)	Nº de operações até o próximo reajuste do entreferro
		Frenagem lenta	Frenagem média	Frenagem rápida					
112M	II IV VI VIII	800 600 450 350	450	250	70	250 150 120 100	60	0,3	50.000 150.000 300.000 600.000
132S/M	II IV VI VIII	1000 800 600 400	600	300	80	400 250 170 150	100	0,5	30.000 110.000 250.000 450.000
160M/L	II IV VI VIII	1200 1000 850 600	800	370	160	550 300 230 200	120	0,55	20.000 80.000 150.000 320.000

[1] Tempo decorrido entre o instante da interrupção da corrente e o início da frenagem.

Tabela 2.1 - Características dos motofreios trifásicos WEG.

2.4 - Motores de alto rendimento

Esses motores utilizam materiais de melhor qualidade tanto no estator quanto no rotor e, para a mesma potência no eixo, consomem menos energia durante um mesmo ciclo de operação.

Os motores de alto rendimento são dotados de algumas características especiais.

Utilizam chapas magnéticas de aço silício de qualidade superior, o que proporciona uma redução da corrente de magnetização e, por conseqüência, aumenta o rendimento do motor.

É utilizada maior quantidade de cobre nos seus enrolamentos, o que acarreta uma redução nas perdas por aquecimento em função da corrente elétrica (efeito Joule).

Apresentam um alto fator de enchimento das ranhuras, que tem como benefício melhor dissipação do calor gerado pelas perdas internas.

O rotor, devido ao tratamento térmico, tem uma redução das perdas suplementares.

As ranhuras do rotor e os anéis de curto-circuito possuem um dimensionamento adequado, que acarreta redução das perdas por efeito Joule.

Devido aos fatores citados anteriormente e ao seu sistema de ventilação bem elaborado, os motores de alto rendimento permitem operar com temperaturas inferiores às dos motores convencionais, o que torna possível maior capacidade de sobrecarga, possibilitando um fator de serviço geralmente superior a 1,10.

Hipoteticamente, o rendimento dos motores pode crescer e atingir um número muito próximo à unidade, entretanto o seu custo é, algumas vezes, maior que o do motor de indução convencional, o que é compensado pela redução do seu custo operacional.

2.5 - Princípio de funcionamento de um motor trifásico

Quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, cria-se um campo magnético dirigido conforme o eixo da bobina e com seu valor proporcional à corrente.

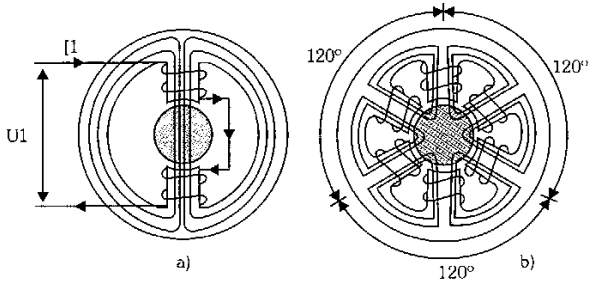


Figura 2.10 - Enrolamento de motor monofásico (a) e enrolamento de motor trifásico (b).

A figura 2.10a exibiu um enrolamento monofásico atravessado por uma corrente I, e o campo H é criado por ela. O enrolamento é constituído por um par de pólos (norte e sul) cujos efeitos se somam para estabelecer o campo H. O fluxo magnético atravessa o rotor entre os dois pólos e se fecha através do núcleo do estator.

Se a corrente I é alternada, o campo H também é e o seu valor, a cada instante, é representado pelo mesmo gráfico da figura 2.11, inclusive invertendo o sentido a cada meio ciclo.

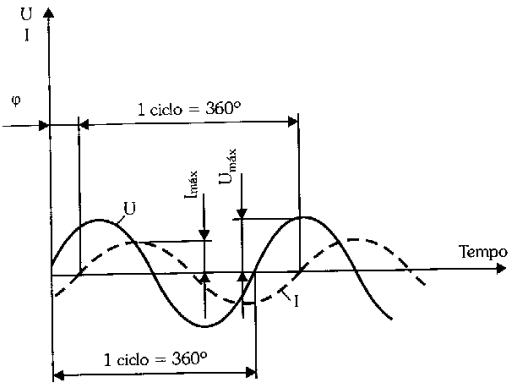


Figura 2.11 - Gráfico da corrente e tensão alternadas de um circuito monofásico.

O campo H torna-se pulsante, pois sua intensidade varia proporcionalmente à corrente sempre na direção norte-sul.

A figura 2.10b indica um enrolamento trifásico feito com três enrolamentos monofásicos defasados entre si de 120°. Se esse enrolamento for alimentado por um sistema trifásico, as correntes I_1, I_2, I_3 criarão, do mesmo modo, os seus próprios campos magnéticos H_1, H_2, H_3, sendo esses campos também espaçados de 120°. Além disso, como são proporcionais às respectivas correntes, tornam-se defasados no tempo de 120° entre si e podem ser representados por um gráfico igual ao da figura 2.12.

O campo total resultante a cada instante é igual à soma gráfica dos três campos H_1, H_2 e H_3 num dado instante.

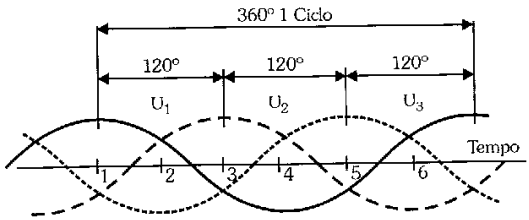


Figura 2.12 - Gráfico da corrente e tensão alternadas de um circuito trifásico.

No instante 1, a figura 2.12 mostra que o campo H_1 é máximo e o campo H_2 é de valor igual a 0,5. Os três campos são representados na figura 2.13 na parte superior, levando-se em conta que o campo negativo é representado por uma seta de sentido oposto ao normal.

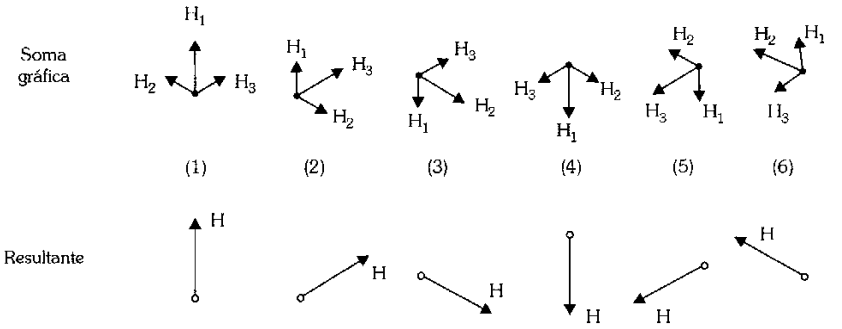


Figura 2.13 - Soma gráfica dos campos magnéticos em um circuito trifásico.

Repetindo a construção nas próximas figuras, observamos que o campo resultante H tem intensidade constante, porém sua direção gira completando uma volta no fim do ciclo.

Assim, quando um enrolamento trifásico é alimentado por correntes trifásicas, cria-se um campo girante como se houvesse um único par de pólos girantes com intensidade constante. Esse campo girante, criado pelo enrolamento trifásico do estator, induz tensões nas barras do rotor (linhas de fluxo cortam as barras do rotor) as quais geram correntes e, conseqüentemente, campo no rotor de polaridade oposta à do campo girante. Como campos opostos se atraem e o campo girante do estator é rotativo, o rotor tende a acompanhar a rotação desse campo desenvolvendo um conjugado motor que faz com que o rotor gire.

O motor elétrico transforma a potência elétrica fornecida em potência mecânica e uma reduzida percentagem em perdas, como ilustra a figura 2.14.

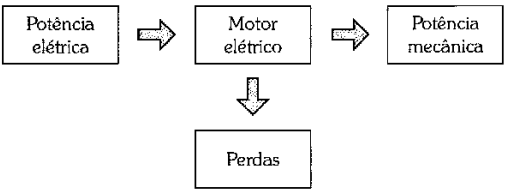


Figura 2.14 - Conversão da potência em um motor elétrico.

As perdas, que são inerentes ao processo de transformação, são quantificadas por meio do rendimento (mais à frente analisamos melhor os vários tipos de perdas nos motores). Assim, o seu rendimento (η) é dado pela relação entre a potência mecânica fornecida e a potência elétrica absorvida, como mostra a equação seguinte:

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

A potência mecânica traduz-se, basicamente, no binário que o motor gera no rotor. O binário (torque) é conseqüência direta do efeito originado pela indução magnética do estator em interação com a do rotor, sendo expressa pela seguinte equação:

$$T = K \, . \, Best \, . \, Brot \, . \, sen \, \theta$$

Sendo:

T: binário dado em newtons por metro (N.m)

K: constante característica do motor

Best: indução magnética criada pelo estator em Wb/m^2

Brot: indução magnética criada pelo rotor em Wb/m^2

θ: ângulo entre B_{est} e B_{rot}

2.6 - Características dos motores trifásicos

2.6.1 - Rendimento

É a relação entre a potência ativa fornecida pelo motor e a potência ativa solicitada pelo motor à rede, sendo expresso pela seguinte equação:

- η = potência ativa fornecida pelo motor/potência solicitada pelo motor à rede
- η = Psaída/Pentrada



À medida que é aplicada carga ao motor, o rendimento aumenta e pode chegar a 96% nas máquinas de grande potência. Assim, devemos levar em consideração duas curvas para analisarmos o rendimento das máquinas.

2.6.1.1 - Rendimento do motor em função de sua potência nominal

Devido a características relativas à massa de ferro e à espessura do entreferro, embora com baixos carregamentos, a máquina de indução trifásica possui uma considerável corrente de armadura. Em razão de os condutores terem suas resistências ôhmicas próprias, isso leva a consideráveis valores para as perdas no cobre do enrolamento de armadura.

Com pouca carga no motor, o rotor possui baixíssimo escorregamento, fazendo com que as correntes induzidas no enrolamento retórico sejam de pequenas intensidades e as perdas, aí localizadas, sejam pequenas.

A massa de ferro do rotor, apesar de apreciável, quando sob pequenos escorregamentos, conduz a pequenas perdas. Então, podemos concluir que, quando a máquina está em vazio, as perdas presentes devem-se, unicamente, ao estator: núcleo de ferro e enrolamento.

Se a potência nominal da máquina for pequena, comparativamente, tem perdas elevadas, conduzindo a rendimentos relativamente menores. Deduzimos que, de maneira geral, o rendimento aumenta quando a potência nominal aumenta, como podemos observar na figura 2.15.

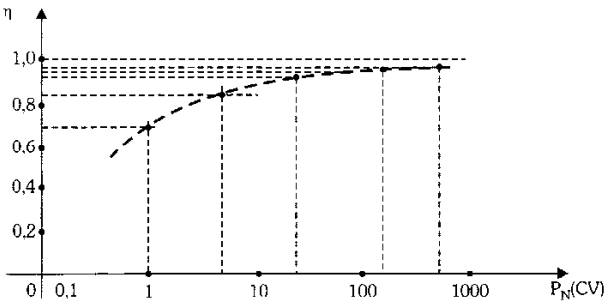


Figura 2.15 - Rendimento do motor em função de sua potência nominal.

A tabela 2.2 apresenta o rendimento do motor para diversas potências:

Potência nominal (cv)	Rotação (RPM)	Rendimento	Fator de potência
1,0	1705	69%	0,66
5,0	1730	83%	0,80
25,0	1750	90%	0,84
125,0	1770	92%	0,88
500,0	1785	95%	0,91

Tabela 2.2 - Rendimento em função da potência nominal.
(Fonte: Máquinas de Indução Trifásicas: Gilio Aluisio Simone)

2.6.1.2 - Rendimento do motor em função da potência no seu eixo

À medida que se aplica carga no eixo do motor, temos um aumento no seu rendimento. Assim, quanto mais próximo da carga nominal, maior é o rendimento da máquina. O gráfico seguinte mostra uma curva de rendimento x potência no eixo para um motor de indução trifásico de 5 cv e 3470 rpm.

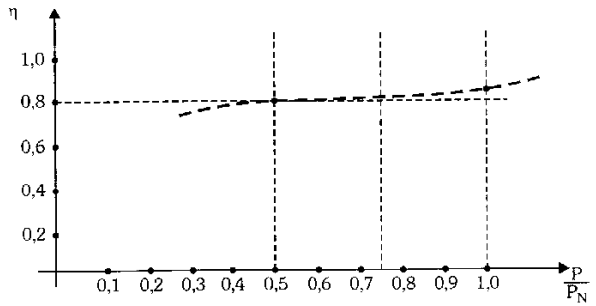


Figura 2.16 - Rendimento em função da potência aplicada ao motor.
(Fonte: Máquinas de Indução Trifásicas: Gilio Aluisio Simone)

2.6.2 - Escorregamento

Se o motor gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona, ou seja, diferente da velocidade do campo girante, o enrolamento do rotor corta as linhas de força magnética do campo e, pelas leis do eletromagnetismo, circulam correntes induzidas.

Quanto maior a carga, maior terá que ser o conjugado necessário para acioná-la. Para obter o conjugado, a diferença de velocidade terá que ser maior para que as correntes induzidas e os campos produzidos sejam maiores. Portanto, à medida que a carga aumenta, cai a rotação do motor.

Quando a carga do motor é zero (motor vazio), o rotor gira praticamente com a rotação síncrona.

Outra característica importante que devemos levar em consideração é que o escorregamento diminui à medida que a potência nominal do motor aumenta. Por exemplo, um motor de 10 cv e quatro pólos tem um escorregamento de 2,78%, ao passo que um motor de 500 cv com o mesmo número de pólos possui um escorregamento de 0,83%.

A diferença entre a velocidade do motor e a velocidade síncrona n_s chama-se escorregamento s, que pode ser expresso em rpm, como fração da velocidade síncrona ou como porcentagem desta:

$$S(rpm) = n_s - n$$

$$S(\%) = 100^* (n_s - n)/n_s$$

Exemplo:

Qual é o escorregamento de um motor de quatro pólos 60 Hz se sua velocidade é 1730 rpm?

$S(\%) = 100^* (1800 - 1730) / 1800$

$S(\%) = 3,88\%$

2.6.3 - Categoria de conjugado

De acordo com a carga mecânica a ser acionada, há uma curva de conjugado resistente associada. Em cargas de ventilação, por exemplo, o conjugado resistente é proporcional ao quadrado da velocidade, ao passo que,

em guindastes, talhas e pontes rolantes, o conjugado resistente é praticamente constante, ocorrendo um aumento de torque na região próxima do repouso.

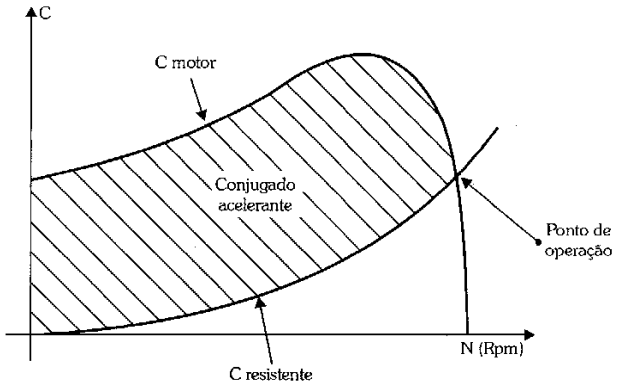


Figura 2.17 - Curva torque x velocidade para motor trifásico.

De acordo com a figura, o ponto de operação do motor ocorre onde a curva de conjugado do motor encontra a curva do conjugado resistente da carga, e esta será a velocidade nominal, com o escorregamento nominal do motor.

O conjugado acelerante é o responsável pela aceleração do motor na fase da partida e ele é igual à diferença entre o conjugado do motor e o conjugado resistente. No ponto de operação, o conjugado acelerante é nulo, pois os conjugados do motor e resistente são iguais. Assim, o motor não varia a velocidade.

Quando a tensão do motor é menor que a tensão aplicada, por exemplo, quando usamos uma chave de partida com redução de tensão, como, por exemplo, estrela-triângulo, a curva do conjugado motor desce o eixo do torque e é possível a curva interceptar a curva do conjugado resistente precocemente, o que definiria o ponto de operação do motor em um ponto de velocidade bem menor do que a esperada. O resultado disso é que, quando a tensão nominal do motor for aplicada, haverá uma nova reaceleração do motor até o ponto de partida nominal. Nestas condições, a chave não está adequada à partida do motor.

Além disso, com a redução do conjugado motor, o conjugado de aceleração também se reduz, acarretando maior tempo de partida.

A norma NBR 7094 classifica os motores de gaiola em cinco categorias, conforme as características de conjugado em relação à velocidade e à corrente de partida:

- **Categoria N**: conjugado de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento. A maior parte dos motores encontrados no mercado enquadra-se nesta categoria. Utilizado para acionamento de cargas normais com baixo conjugado de partida, como bombas, máquinas operatrizes etc.
- **Categoria NY**: possui as mesmas características anteriores, mas tem a previsão de uma partida estrela-triângulo.
- **Categoria H**: conjugado de partida alto, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Utilizado para cargas que exigem maior conjugado de partida, como transportadores carregados, moinhos etc.
- **Categoria HY**: possui as mesmas características anteriores, porém tem a previsão de uma partida estrela-triângulo.
- **Categoria D**: conjugado de partida alto, corrente de partida normal e alto escorregamento (s > 5%). Utilizado em prensas e máquinas semelhantes, em que a carga apresenta picos periódicos e em elevadores onde a carga necessita de alto conjugado de partida.

A figura 2.18 mostra as curvas características conjugado x rotação para as três categorias N, H e D:

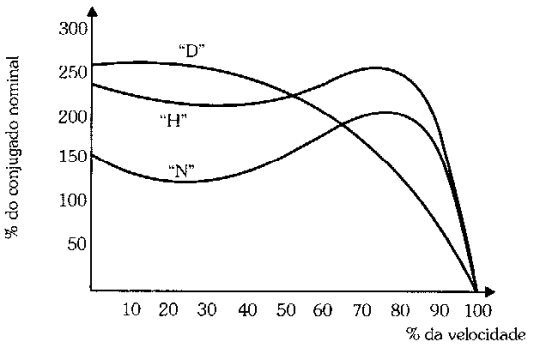


Figura 2.18 - Curvas: conjugado x rotação.

Cada categoria terá uma forma geométrica definida, figura 2.19.

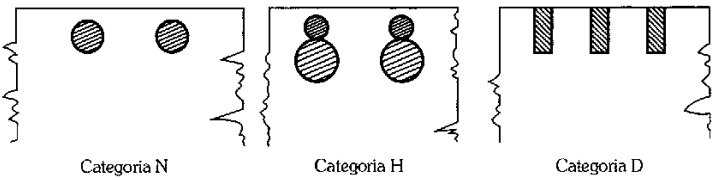


Figura 2.19 - Formas geométricas das barras de um rotor gaiola de esquilo.

Para a categoria N temos uma forma geométrica simples com um desenho circular, ao passo que na categoria H o desenho geométrico é mais complexo, podendo a gaiola praticamente se dividir em duas, uma de pequena seção mais superficial e outra de maior seção reta. Deste modo as correntes induzidas na partida vão para a gaiola superficial, e como essa gaiola tem uma seção reta menor, a sua resistência elétrica é maior, portanto o conjugado de partida é maior do que a categoria N, pois as correntes parasitas ficam limitadas pela alta resistência da gaiola externa. À medida que o motor ganha velocidade, as correntes, sob o efeito das características dinâmicas do circuito, distribuem-se na superfície total da barra.

Nos motores da categoria D as barras da gaiola de esquilo são formadas por barras estreitas que nascem na periferia do rotor, aprofundando-se gradativamente. Essas gaiolas possuem uma elevada resistência elétrica. A grande dissipação de calor nas resistências das barras do rotor exige uma capacidade de ventilação maior para o motor se ele trabalhar em regime contínuo.

2.6.4 - Tempo com rotor bloqueado

Define-se como o tempo máximo admissível pelo motor sob corrente de rotor bloqueado (corrente de partida).

Na prática, adota-se esse tempo como o de partida do motor.

2.6.4.1 - Classe de isolamento

Todo condutor atravessado por corrente elétrica dissipa energia na forma de calor por meio do efeito Joule, conhecido pela seguinte equação:

$$P\ (calor) = R \cdot I^2$$



Sendo:

P: potência elétrica em watts

R: resistência elétrica em Ohms

I: corrente elétrica em ampères

Tanto as bobinas do enrolamento do estator como as do rotor, ou suas barras, caso se trate de um rotor de gaiola, dissipam calor. O fluxo variável que atua no núcleo magnético estator-rotor também induz correntes indesejáveis nas chapas de aço, posto que elas também são material condutor. Essas correntes são chamadas de parasitas, ou correntes de Foucault. Elas também são fonte de aquecimento por efeito Joule.

Os núcleos do estator e do rotor são laminados, isto é, feitos de chapas muito finas, justamente para minimizar essas correntes. Por isso, as lâminas são feitas na direção do fluxo para reduzir a área sujeita à indução e aumentar a resistência elétrica do circuito parasita. A histerese magnética, devido à alternância do fluxo, também é uma fonte de geração de calor interna do motor.

O motor é utilizado para fornecer trabalho mecânico por meio da conversão de energia elétrica, assim, o calor é uma forma de energia que não é aproveitada para produzir trabalho mecânico, sendo considerada energia perdida. Quanto maiores as perdas, menor será o rendimento do motor.

Normalmente, os motores de indução trifásicos para aplicação normal são inteiramente fechados e o calor gerado internamente acaba promovendo uma elevação de temperatura interna. Devido à diferença de temperatura estabelecida entre o interior do motor e o meio exterior, ocorre um processo de transferência de calor.

O calor gerado internamente é dissipado por meio da carcaça, que é aletada para facilitar a troca de calor com o ambiente, como mostra a figura 2.20. Atrás da tampa traseira da carcaça existe um ventilador acionado pelo próprio eixo do motor, que tem a finalidade de aumentar a circulação de ar pelas aletas. Uma tampa defletora de aço ou ferro fundido serve para direcionar o fluxo de ar. Esta é a configuração do motor totalmente fechado com ventilação externa. Existem também os motores que são abertos e com ventilação interna.

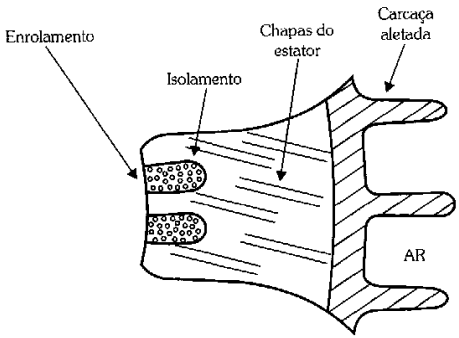


Figura 2.20 - Localização dos enrolamentos do motor.

O enrolamento constitui-se na parte mais crítica do motor sob o ponto de vista térmico, em que os fios das bobinas são isolados. Os fios são recobertos com esmalte sintético de natureza orgânica, sendo colocado no enrolamento ainda um reforço do isolamento pela impregnação de verniz. Se a temperatura das bobinas ultrapassar determinado valor, o material isolante de recobrimento dos fios acaba se queimando, colocando as bobinas em curto-circuito.

Se o motor trabalhar dentro de seus limites de temperatura, o isolante deve ter uma vida útil ilimitada. Havendo uma elevação da temperatura das bobinas, mesmo que insuficiente para causar a queima, ela contribui para a degradação do isolante, até que ele seja perdido em algum ponto. Uma regra prática nos diz que a cada 10°C de elevação além do limite de temperatura do enrolamento, a vida útil do motor é reduzida à metade.

A maior temperatura do motor localiza-se no interior da ranhura onde estão colocados os enrolamentos. A impregnação com verniz e a compactação das bobinas devem ser perfeitas, pois o ar é um mau condutor de calor e a existência de espaços vazios dificulta a extração do calor e a temperatura aumenta, prejudicando a vida útil do enrolamento.

Um ponto mais quente no interior do enrolamento pode comprometer o motor, ainda que a temperatura média do enrolamento como um todo permaneça abaixo do limite máximo de temperatura.

A classe de isolamento é definida pela norma NBR 7034 e representa o limite máximo de temperatura que o enrolamento do motor pode suportar continuamente sem que haja redução de sua vida útil.

Veja a seguir as principais classes de isolamento:

- **Classe A**: 105°C
- **Classe E**: 120°C

- **Classe B**: 130°C
- **Classe F**: 155°C
- **Classe H**: 180°C

Pela norma, motores para aplicação normal são instalados em temperaturas ambientes máximas de 40°C. Acima disso, as condições de trabalho são consideradas especiais. A temperatura máxima nas ranhuras deve ser a admitida pela classe, subtraída a temperatura ambiente. Além disso, a temperatura nunca é uniforme no enrolamento. A norma considera uma diferença entre a temperatura média do enrolamento e o ponto de temperatura máxima para cada classe de isolamento. Para as classes B e F esse valor é de 10°C e para a classe H, 15°C. As classes B, F e H são as mais comuns para motores de aplicação normal.

Para a proteção dos enrolamentos dos motores utilizam-se sensores térmicos inseridos nas cabeças das bobinas. Os mais comumente utilizados são termorresistores, termistores, termostatos e protetores térmicos.

Os fabricantes fornecem um dado muito importante sobre a resistência térmica de um motor. É o chamado tempo com rotor bloqueado a quente (Trb). Esse tempo indica quantos segundos o motor pode suportar uma situação com o rotor bloqueado, considerando que ele estivesse operando em condições nominais. Trata-se de uma situação extremamente crítica, pois a corrente torna-se muito elevada e não existe ventilação. Tipicamente, esse tempo varia de 5 a 30 segundos, dependendo do motor.

2.6.5 - Ventilação

É o processo pelo qual é realizada a troca de calor entre o interior do motor e o meio externo. Os tipos de ventilação mais usados em motores de indução são: motor aberto e motor totalmente fechado.

2.6.5.1 - Motor aberto

Nesse tipo de ventilação o ar ambiente circula no interior do motor retirando calor das partes aquecidas da máquina. A figura 2.21 indica como o fluxo de ar atravessa o motor:

A carcaça desses motores é lisa. São fabricados nas potências de 1/3, 1/2, 3/4, 1, 1 ½, 2 e 3 cv. Tipicamente, o grau de proteção mais comumente encontrado para esses motores é o IP 21. A figura 2.22 mostra esse tipo de motor.

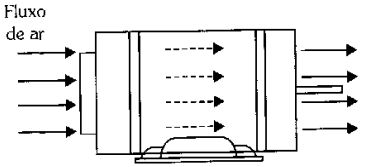


Figura 2.21 - Fluxo de ar no motor aberto.

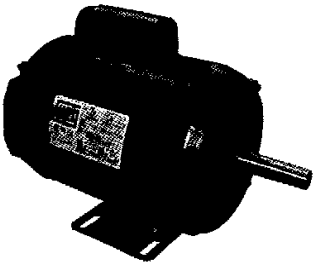


Figura 2.22 - Motor de indução aberto. (Cortesia WEG)

2.6.5.2 - Motor totalmente fechado

No motor totalmente fechado não há troca entre o meio interno ao motor e o exterior. No motor existem folgas nas gaxetas que permitem a saída do meio refrigerante interno quando ele entra em operação, aquecendo-se. Essas folgas também permitem a penetração do meio refrigerante externo quando é desligado e inicia o seu processo de resfriamento. A troca de calor desses motores é feita por transferência de calor através de aletas colocadas na sua carcaça. A figura 2.23 mostra como se processa o fluxo de ar no motor:

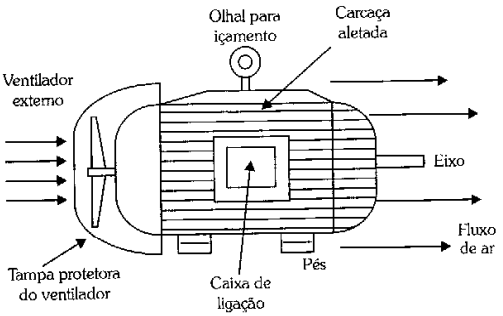


Figura 2.23 - Fluxo de ar no motor totalmente fechado.

São fabricados numa faixa de potência de 1/6 cv até 500 cv. Nessa família de motores que possuem carcaça aletada de ferro fundido existe uma caixa de ligação, em que é feita a conexão com a rede elétrica, que está localizada na lateral da carcaça. A figura 2.24 apresenta um motor de indução com ventilação totalmente fechado.

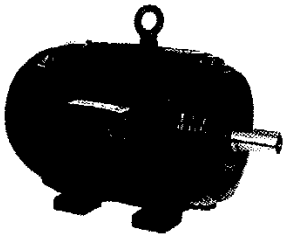


Figura 2.24 - Motor totalmente fechado.
(Cortesia WEG).

2.6.6 - Rotação nominal

Rotação do eixo do motor sob carga nominal.

2.6.7 - Regime de serviço

O regime de serviço é definido como a regularidade de carga a que o motor é submetido. O principal fator limitante da potência desenvolvida é a temperatura máxima que o motor atinge. A elevação de temperatura do motor não é imediata; ela acontece segundo uma função exponencial. Da mesma forma, ao desligar o motor, a temperatura diminui de forma exponencial. Se o regime de funcionamento do motor for intermitente, ou seja, variável, importa saber qual é a temperatura máxima, posto que ela define a potência nominal do motor a ser especificado.

Existem situações em que o motor, durante o seu ciclo de trabalho, fica efetivamente desligado. Um exemplo desse fato é um motor que aciona uma bomba de água de um sistema de abastecimento usualmente ligado por um longo período sob carga constante. Um motor que aciona o sistema de elevação de automóveis para troca de óleo num posto de gasolina tem um tempo de funcionamento muito curto em relação ao tempo total que fica parado. Na prática, existem infinitos ciclos de trabalho aos quais o motor pode ser submetido.

A NBR 7094 padroniza dez diferentes tipos de regime de serviço. Evidentemente, eles não traduzem todas as situações reais encontradas na prática. Por isso, uma situação real deve ser aproximada a uma das situações padronizadas que seja mais severa que a real. Normalmente, os motores são projetados para um regime contínuo, isto é, carga constante atuando por um tempo indefinido, igual à potência nominal do motor. Esse regime é classificado como regime contínuo (S1).

O motor não é um equipamento que pode ser submetido a constantes partidas e paradas, como liga/desliga de um pisca-pisca. É muito comum que a carga mecânica exigida do eixo seja variável, desde uma situação "sem carga" até situações de sobrecarga. Por isso, é recomendável que haja uma pequena folga de potência, além daquela estabelecida pelo fator de serviço, para vencer pequenas sobrecargas.

A tabela 2.3 mostra os demais regimes normalizados:

Regime de serviço	Característica
S2	Regime de tempo limitado
S3	Regime intermitente periódico
S4	Regime intermitente periódico com partida
S5	Regime intermitente periódico com frenagem elétrica
S6	Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente
S7	Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente
S8	Regime de funcionamento contínuo periódico com mudanças correspondentes de carga e velocidade
S9	Regime com variações não periódicas de carga e velocidade
S10	Regime com cargas constantes e distintas

Tabela 2.3 - Regimes de serviço para motores de indução.

***Observação**: Motores para os regimes de serviço S2 a S10 devem ser encomendados diretamente aos fabricantes, e não são considerados motores para aplicação normal.*

2.6.8 - Fator de serviço (FS)

Chama-se fator de serviço (FS) o fator que, aplicado à potência nominal, indica a sobrecarga permissível que pode ser aplicada continuamente ao motor sob condições especificadas.

Exemplo: F.S. = 1,15; o motor suporta continuamente 15% de sobrecarga acima de sua potência nominal.

O fator de serviço é uma capacidade de sobrecarga contínua, isto é, uma reserva de potência que dá ao motor condições de funcionamento em situações desfavoráveis.

Observação: *Fator de serviço não deve ser confundido com capacidade de sobrecarga momentânea.*

2.6.9 - Tensão nominal múltipla

A grande maioria dos motores é fornecida com terminais do enrolamento religáveis, de modo a poderem conectar-se em redes de, pelo menos, duas tensões diferentes (exemplo: 220 V/380 V).

2.6.10 - Corrente de partida

No instante da partida, a corrente do motor costuma variar na faixa de seis a oito vezes a corrente nominal do motor. Na placa do motor temos o fator Ip/In que indica quantas vezes a corrente de partida é maior que a nominal. Na figura 2.26 temos para tensão de 220 V (In = 8,4 A). Desta forma a corrente de partida (Ip), será:

$$Ip = \frac{Ip}{In} \times In = 6{,}7 \times 8.4 = 56{,}28\,A$$

2.6.11 - Número de rotações

O número de rotações de um motor de indução trifásico depende de três parâmetros:

- Freqüência da rede;
- Número de pólos;
- Escorregamento.

A freqüência da rede é 60 Hz e é praticamente constante. Para variar a velocidade de motores por meio de variação da freqüência, são necessários equipamentos eletrônicos, como, por exemplo, conversores de freqüência.

O número de pólos de cada motor é invariável. Exceções são motores Dahlander ou de dois enrolamentos separados, que dispõem de dois, três ou quatro números de pólos diferentes. Esses tipos de motores podem ser ligados através de comandos elétricos apropriados para girar em diferentes velocidades.

A equação seguinte mostra a relação entre a freqüência da rede, o número de pólos e o número de rotações:

$$N = 120.f/p$$

Sendo:

N: número de rotações em rpm (rotações por minuto)

F: freqüência da rede em Hz

P: número de pólos do motor

A equação anterior não leva em conta o escorregamento, assim, o número de rotações será sempre 2% a 4% menor que o calculado mediante a aplicação de carga.

O número de pólos é sempre um múltiplo de dois e considerando a freqüência de 60 Hz da rede, temos os seguintes números de rotação para motores assíncronos:

Número de pólos	Rotação
2 pólos	3600 rpm
4 pólos	1800 rpm
6 pólos	1200 rpm
8 pólos	900 rpm
10 pólos	720 rpm

Tabela 2.4 - Rotação dos motores com relação ao número de pólos.

O uso de motores com mais de seis pólos é bastante raro, e a sua aquisição deve ser feita sob encomenda. Devido à produção em um número muito pequeno, quanto maior o número de pólos do motor, maior é o seu preço.

2.6.12 - Sentido de rotação

A mudança no sentido de rotação de motores trifásicos é bastante simples. Basta inverter duas fases, como mostra a figura 2.25, não importa qual das fases será trocada.

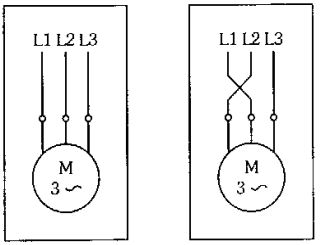


Figura 2.25 - Inversão do sentido de rotação de um motor de indução trifásico.

2.6.13 - Grau de proteção de motores (IP)

A carcaça faz o papel do invólucro de proteção do motor ou, mais precisamente, do conjunto estator-rotor. A exigência do grau de **Proteção Intrínseca** (***I**ntrisic **P**rotection*, em inglês = proteção própria do dispositivo) depende diretamente do ambiente no qual o motor é instalado.

Um motor instalado ao tempo, sujeito a sol e chuva, deve exigir um grau de proteção superior a um motor instalado no interior de uma sala limpa e seca. Os ambientes considerados agressivos para motores são aqueles com presença de pó, poeira, fibras, particulados etc. Assim como os ambientes molhados ou sujeitos a jato de água são considerados agressivos.

A carcaça, como invólucro, deve oferecer eficaz proteção ao motor no meio em que ele opera. A NBR 6146 estabelece diversos graus de proteção para os invólucros elétricos. Em geral, o grau de proteção dos motores elétricos é normalmente expresso em dois dígitos. O primeiro indica proteção contra corpos sólidos, o segundo dígito indica proteção contra água.

Dígito	Indicação do primeiro dígito
0	Não é protegido
1	Protegido contra objetos sólidos maiores que 50 mm
2	Protegido contra objetos sólidos maiores que 12 mm
3	Protegido contra objetos sólidos maiores que 2,5 mm
4	Protegido contra objetos sólidos maiores que 1,0 mm
5	Protegido contra poeira prejudicial ao motor
6	Totalmente protegido contra poeira

Tabela 2.5 - Primeiro dígito do grau de proteção dos motores.

Dígito	Indicação do segundo dígito
0	Não protegido
1	Protegido contra quedas verticais de gotas de água
2	Protegido contra queda de gotas de água para uma inclinação máxima de 15°
3	Protegido contra água aspergida de um ângulo de 60° na vertical (chuva)
4	Protegido contra projeções de água de qualquer direção
5	Protegido contra jatos de água de qualquer direção
6	Protegido contra ondas do mar ou de água projetada em jatos potentes
7	Protegido contra imersão em água, sob condições definidas de tempo e pressão
8	Protegido contra submersão contínua em água, nas condições especificadas pelo fabricante

Tabela 2.6 - Segundo dígito do grau de proteção dos motores.

Os motores de indução trifásicos totalmente fechados para aplicação normal são fabricados, normalmente, com os seguintes graus de proteção:

- **IP54**: proteção completa contra toque e contra acúmulo de poeiras nocivas. Proteção contra respingos de todas as direções. São utilizados em ambientes muito empoeirados.
- **IP55**: proteção completa contra toque e acúmulo de poeiras nocivas. Proteção contra jatos de água em todas as direções. São utilizados nos casos em que os equipamentos são lavados periodicamente com mangueiras.
- **IP(W)55**: idêntico ao IP 55, porém são protegidos contra intempéries, chuva e maresia. São utilizados ao ar livre. Também denominados motor de uso naval.

Os motores de indução trifásicos abertos para aplicação normal são fabricados, quase sempre, com grau de proteção IP 21. São protegidos contra toque com os dedos e contra corpos estranhos sólidos com dimensão acima de 12 mm (2). Também apresentam proteção contra pingos na vertical (1).

A NBR 5410 considera que os motores para aplicações normais devem operar adequadamente em temperatura ambiente de até 40°C e em altitudes de até 1000 m.

A seguir veja uma placa de um motor com todas as suas características:

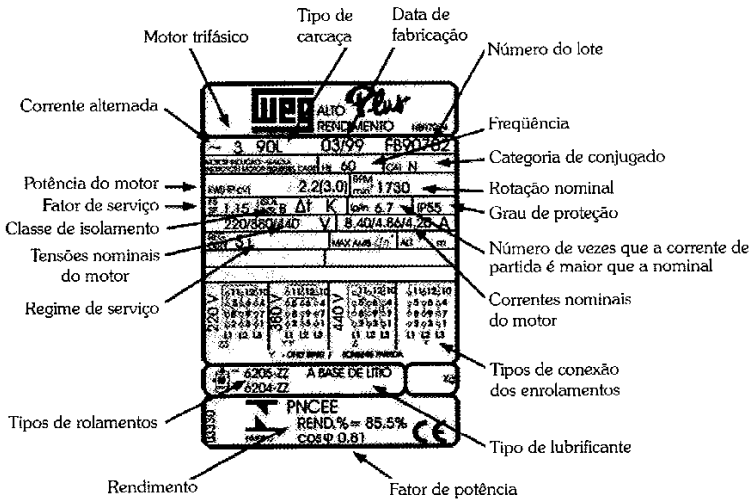


Figura 2.26 - Dados de placa de um motor trifásico.

2.6.14 - Motores à prova de explosão

Devem ser utilizados em áreas classificadas, onde se trabalha com materiais inflamáveis de alto risco, como combustíveis, ou locais onde haja perigo de explosão devido à presença de gases altamente inflamáveis, como túneis de armazéns. Esses motores devem suportar esforços mecânicos, pois qualquer dano na isolação pode ocasionar acidentes de grandes proporções.

São dimensionados com carcaça e estrutura altamente robustas, juntamente com todos os elementos: parafusos, juntas etc., compatíveis com os esforços aplicados. As vedações devem ser impecáveis, pois uma pequena faísca pode detonar uma explosão. São fechados com ventilação externa, com tampas e caixa de ligação reforçadas. Seu controle de produção e qualidade é muito rigoroso.

2.6.15 - Formas construtivas

Para a construção de um motor, um dos itens mais importantes é a maneira de fixação, que é feita de acordo com o projeto mecânico da máquina a ser acionada. A norma brasileira, baseada na IEC, define as seguintes formas, identificadas pelas letras IM (de *International Mounting System*), seguidas de uma letra e um ou dois números característicos. A figura 2.27 apresenta as principais formas construtivas dos motores:

Formas construtivas NBR 5031/DIN IEC 34 a

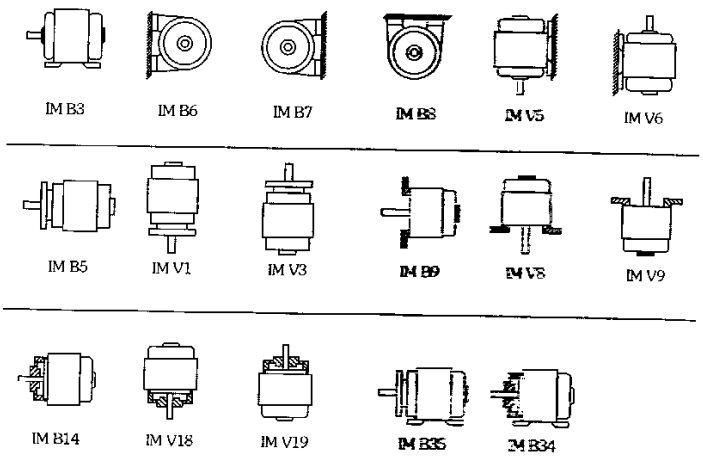


Figura 2.27 - Formas construtivas dos motores.

2.7 - Perdas no motor

As perdas que ocorrem num motor dividem-se em quatro diferentes tipos:

- Perdas elétricas
- Perdas magnéticas
- Perdas mecânicas
- Perdas parasitas

Perdas elétricas são do tipo {R}. aumentam acentuadamente com a carga aplicada ao motor. Essas perdas, por efeito Joule, podem ser reduzidas, aumentando a seção do estator e dos condutores do rotor.

As **perdas magnéticas** ocorrem nas lâminas de ferro do estator e do rotor devido ao efeito de histerese e às correntes induzidas (neste caso, correntes de Foucault), e variam com a densidade do fluxo e a freqüência. Podem ser reduzidas por meio do aumento da seção do ferro no estator e rotor, com o uso de lâminas delgadas e o melhoramento dos materiais magnéticos.

As **perdas mecânicas** ocorrem devido à fricção dos rolamentos, ventilação e perdas pela oposição do ar. Podem ser reduzidas, usando rolamentos com baixa fricção e com o aperfeiçoamento do sistema de ventilação.

As **perdas parasitas** são resultado das fugas do fluxo, distribuição de corrente não-uniforme, imperfeições mecânicas nas aberturas para escoamento do ar e irregularidades na densidade do fluxo do ar ao ser escoado pelas aberturas. Podem ser reduzidas com a otimização do projeto do motor e ainda de uma produção ou fabrico cuidadoso.

Apresentamos seguidamente a distribuição das perdas no motor. As perdas parasitas não são representadas por terem um valor insignificante.

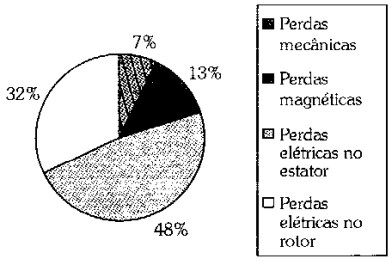


Figura 2.28 - Distribuição das perdas nos motores.

2.8 - Conexão dos enrolamentos

Nos circuitos trifásicos existem dois tipos de configuração (ligação) tanto para geradores e transformadores como para cargas: ligações em estrela (Y) e em triângulo ou delta (Δ).

2.8.1 - Configuração em estrela (Y)

Nesse tipo de ligação, os terminais F_1, F_2 e F_3 são ligados em um ponto interno comum (0 - também denominado de neutro) e os terminais 1, 2 e 3 das partes iniciais S_1, S_2 e S_3 dos enrolamentos ficam acessíveis para a conexão da carga (3ϕ - 3 fios).

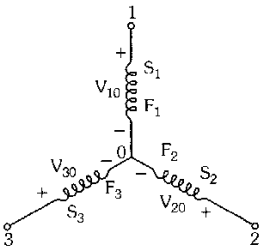


Figura 2.29 - Ligação dos enrolamentos em estrela.

Mais comumente, essa ligação pode ser representada por (3 ϕ - 4 fios):

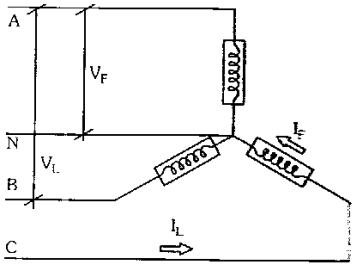


Figura 2.30 - Ligação dos enrolamentos em estrela com quatro fios.

- A conexão estrela se caracteriza por ter tensões de fase diferentes das de linha.
- As tensões entre os terminais 1, 2 e 3 em relação ao neutro correspondem às tensões de fase do gerador (V_F ou V_{AN}), ou seja, V_{F1}, V_{F2} e V_{F3}. As tensões entre dois terminais 1-2, 2-3 e 3-1 correspondem às tensões de linha (V_L ou V_{AB}) do gerador, ou seja, V_{L12}, V_{L23} e V_{L31}.

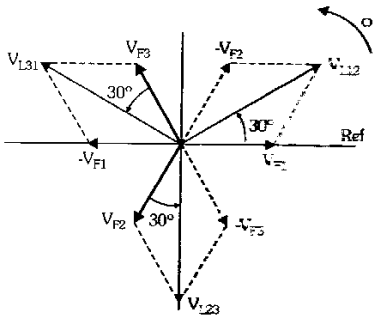


Figura 2.31 - Representação gráfica das tensões no enrolamento.

$$V_{L12}=V_{F1} - V_{F2} = V_F \angle 0° - V_F \angle -120° = V_F - V_F \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = V_F \cdot \left(-\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$V_{L12} = V_{F1} - V_{F2} = \sqrt{3}\, V_F \angle 30°$$

$$V_{L23} = V_{F2} - V_{F3} = \sqrt{3}\, V_F \angle -90°$$

$$V_{L31} = V_{F3} - V_{F1} = \sqrt{3}\, V_F \angle 150°$$

Desta forma quando é realizada a ligação em estrela, cada bobina recebe uma tensão três vezes menor do que a tensão de alimentação, e a corrente circulante possui valor igual à corrente de linha. A figura 2.32 ilustra a conexão das bobinas de um motor de indução trifásico em estrela, em que L1, L2 e L3 representam as fases R, S e T respectivamente.

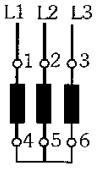


Figura 2.32 - Conexão dos enrolamentos em estrela.

2.8.1.1 - Vantagens da ligação estrela

- Duas tensões diferentes para a carga (V_L e V_F).
- A corrente no condutor neutro é a soma fasorial das correntes de linha: se a carga é equilibrada (três impedâncias iguais), a corrente no neutro é nula (neste caso não é necessário instalar o neutro, porém é recomendado pelo fato de a sua função ser de proteção a cargas desequilibradas). Caso contrário, o neutro é necessário para cargas desequilibradas (e usualmente ligado ao terra), ou seja, conectando um dos cabos de cada sistema monofásico a um ponto comum aos três, os três fios restantes formam um sistema trifásico em estrela, como na figura 2.33, em que temos um quarto cabo ligado ao ponto comum das três fases.

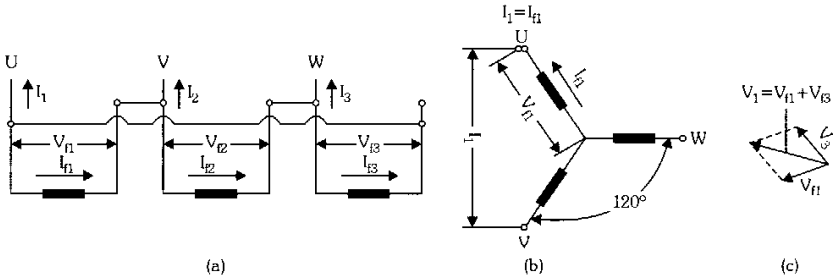


Figura 2.33 - Conexão dos enrolamentos em estrela.

Analisando a ligação anterior, verificamos que:

- A corrente de cada fio da linha é a mesma corrente da fase que está ligada, ou seja, IL = IF.
- A tensão entre dois cabos quaisquer do sistema trifásico é a soma gráfica das tensões das duas fases às quais estão ligadas, ou seja:

$$VL = Vf.\sqrt{3}$$

2.8.2 - Ligação em triângulo

Nesse tipo de ligação, sempre é ligado o princípio de um enrolamento com o final do enrolamento subseqüente, conforme a figura 2.34.

A partir dessa ligação podemos descrever graficamente as tensões aplicadas nos enrolamentos.

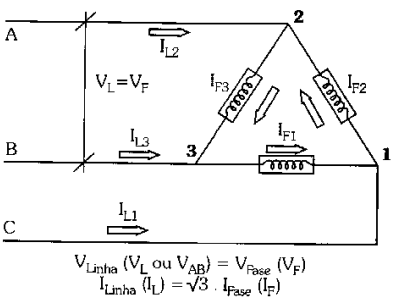


Figura 2.34 - Ligação dos enrolamentos em triângulo.

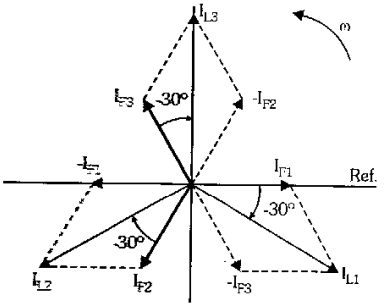


Figura 2.35 - Representação gráfica das tensões nos enrolamentos dos motores.

Assim teremos:

$$I_{L1} = I_{F1} - I_{F3} = \sqrt{3}\, I_F \angle -30°, \quad I_{L2} = I_{F2} - I_{F1} = \sqrt{3}\, I_F \angle -150° \text{ e } I_{L3} = I_{F3} - I_{F2} = \sqrt{3}\, I_F \angle 90°$$

Se a carga for desequilibrada, as correntes de linha serão diferentes em módulo e/ou em fase, ou seja:

Considerando tensões/correntes de fase, as tensões e correntes de cada um dos três sistemas monofásicos considerados são indicadas por Vf e If. Se ligarmos os três sistemas monofásicos entre si, como indica a figura 2.36, podemos eliminar três fios, deixando apenas um em cada ponto de ligação e o sistema trifásico fica reduzido a três condutores: U,V e W.

A tensão entre dois quaisquer desses três fios chama-se tensão de linha (Vl) que é a tensão nominal do sistema trifásico. A corrente em qualquer um dos fios chama-se corrente de linha (Il).

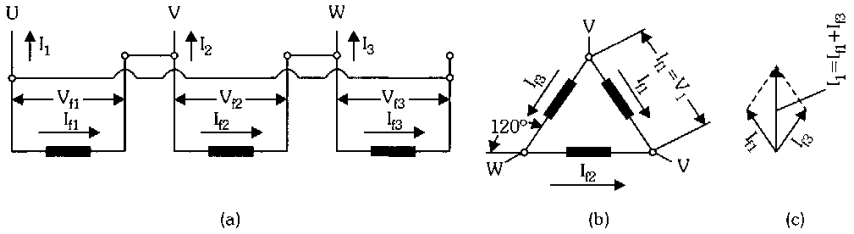


Figura 2.36 - Conexão dos enrolamentos em triângulo.

Examinando a ligação, observamos que:

- A cada carga é aplicada a tensão de linha Vl que é a própria tensão do sistema monofásico, ou seja, Vl = Vf.
- A corrente em cada cabo de linha, ou corrente de linha, é a soma das correntes das duas fases ligadas a esse cabo, ou seja, IL = IF1 + IF3, como as correntes estão defasadas graficamente IL = IF x $\sqrt{3}$.

A figura 2.37 ilustra a conexão das bobinas de um motor de indução trifásico em triângulo.

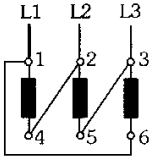


Figura 2.37 - Conexão dos enrolamentos em triângulo.

Também existem outros tipos de conexões de enrolamento estudados em seguida.

2.8.3 - Partida série paralelo

Nessa partida, o motor parte com tensão reduzida em suas bobinas. A chave série paralelo proporciona uma redução de corrente de 25% do seu valor. Sua aplicação é em partidas a vazio, pois o conjugado de partida fica reduzido em um quarto de seu valor de tensão nominal. Esse tipo de partida pode ser feito em motores de quatro tensões e no mínimo nove cabos, e são divididas em:

- **Triângulo série paralelo (Δ-ΔΔ)**: chave para motor com enrolamento nas tensões 220/380/440/660 V ou 220/440 V. Para esses casos a tensão da rede deve ser 220 V. Na partida, faz-se a ligação triângulo série (Δ) que estaria pronta a receber 440 V e se aplica à tensão de triângulo paralelo 220 V. Após partir, o motor é ligado em triângulo paralelo (ΔΔ) e suas bobinas recebem a tensão de 220 V da rede. As figuras 2.38 e 2.39 ilustram essas ligações.

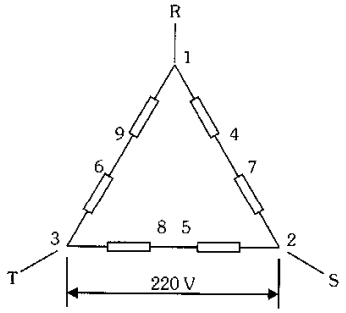


Figura 2.38 - Ligação triângulo série.

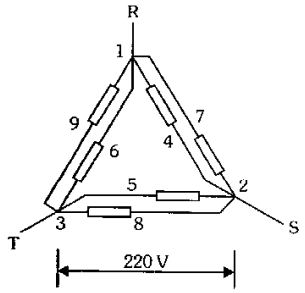


Figura 2.39 - Ligação triângulo paralelo.

- **Estrela série paralelo (Y-YY)**: chave de partida para motores com enrolamentos em 220/380/440/760 V ou 380/760 V. A tensão da rede deve ser de 380 V.

No momento da partida, o motor está ligado em estrela para receber 760 V e aplica-se uma tensão de estrela paralelo 380 V. Após a partida o motor deve ser ligado em estrela paralelo (YY), assim, as bobinas recebem a tensão nominal da rede de 380 V. As figuras 2.40 e 2.41 mostram essas ligações.

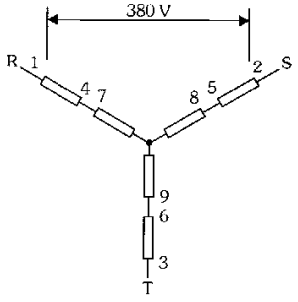


Figura 2.40 - Ligação estrela série.

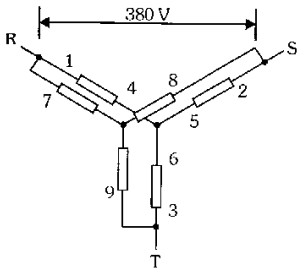


Figura 2.41 - Ligação estrela série paralelo.

2.9 - Identificação das bobinas de um motor de indução trifásico

Ao se deparar com motor sem identificação dos seus terminais, não se pode ligar as bobinas aleatoriamente, correndo o risco de danificar o motor. Assim, deve-se fazer testes de continuidade para identificar as bobinas e polaridade para ligá-las.

As bobinas de um motor trifásico são representadas da seguinte maneira:

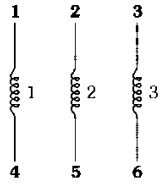


Figura 2.42 - Bobinas de um motor trifásico.

Primeiramente é preciso fazer um teste de continuidade, ligando uma das pontas do ohmímetro a um dos terminais do motor e testar nos outros terminais até encontrar a continuidade. Com isso, define-se a primeira bobina como 1 e 4, repetindo os procedimentos com os números 2 e 5 para a segunda bobina e 3 e 6 para a terceira bobina, conforme a figura 2.43.

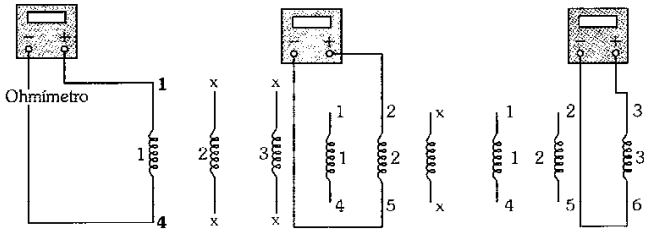


Figura 2.43 - Identificação das bobinas do motor trifásico.

O próximo passo é verificar a polarização das bobinas do motor. Primeiramente verifica-se a polarização das bobinas 1 e 2. Liga-se a bobina 1 (terminal 1 e 4) em série com a bobina 2 (terminais 2 e 5) e liga-se uma lâmpada aos terminais 3 e 6. A figura 2.44 mostra essa ligação.

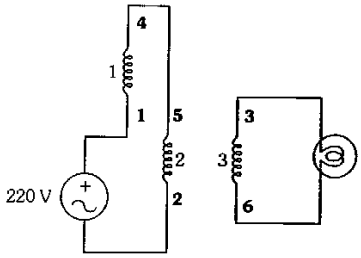


Figura 2.44 - Verificação da polarização das bobinas do motor.

Se a lâmpada ligada nos terminais da bobina 3 acender, a bobina 1 está com a polaridade invertida. Nesse caso, deve-se trocar 1 por 4. Se a lâmpada permanecer apagada, as bobinas 1 e 2 estão polarizadas corretamente.

Agora, deve-se verificar a polaridade da bobina 3. É preciso interligar as bobinas 2 e 3 em série com a fonte de 220 V e ligar uma lâmpada na bobina 1 (terminais 1 e 4). A figura 2.45 exibe as ligações.

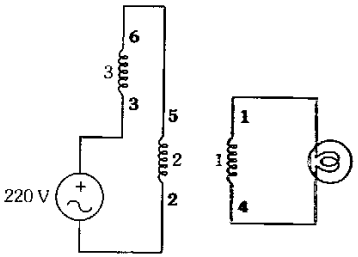


Figura 2.45 - Verificação da polarização das bobinas do motor.

Se a lâmpada que está colocada nos terminais da bobina 1 acender, a polarização está invertida. Assim, deve-se trocar 3 por 6 e verificar se a lâmpada continua apagada. Em caso afirmativo, confirmar a numeração das bobinas do motor.

Observação: *A lâmpada a ser utilizada deverá ser de 12 V, é possível também utilizar um voltímetro para fazer o teste.*

2.10 - Tabela de características elétricas de motores trifásicos

A tabela 2.7 apresenta as principais características de motores trifásicos de quatro pólos, 60 HZ, IP 55, da WEG:

Potência		Carcaça	RPM	Corrente nominal em 220V (A)	Corrente com rotor bloqueado I_p/I_n	Conjugado nominal C_n (kgf.m)	Conjugado com rotor bloqueado C_p/C_n	Conjugado máximo C_m/C_n	Rendimento η %			Fator de potência Cos φ			Fator de serviço F.S.	Momento de inércia (kgm²)	Tempo máx. com rotor bloqueado (frio) a plena	Nível médio de pressão sonora dB(A)	Peso aprox. (kg)
									% da potência nominal										
CV	kW								50	75	100	50	75	100					
0,16	0,12	63	1720	0,89	4,5	0,07	3,2	3,4	45,0	52,0	57,0	0,48	0,55	0,62	1,15	0,00045	31	48	7
0,25	0,18	63	1710	1,14	4,5	0,10	2,8	3,0	53,0	60,0	64,0	0,47	0,57	0,65	1,15	0,00056	18	48	8
0,33	0,25	63	1710	1,44	4,5	0,14	2,9	2,9	59,0	64,0	67,0	0,48	0,59	0,68	1,15	0,00067	20	48	8
0,50	0,37	71	1720	2,07	5,0	0,21	2,7	3,0	56,0	64,0	68,0	0,48	0,59	0,69	1,15	0,00079	10	47	10
0,75	0,55	71	1705	2,90	5,5	0,31	3,0	3,2	62,0	69,0	71,0	0,49	0,60	0,70	1,15	0,00096	10	47	11
1,0	0,75	80	1720	3,02	7,2	0,42	2,5	2,9	72,0	77,5	79,5	0,62	0,74	0,82	1,15	0,00294	8	48	15
1,5	1,1	80	1720	4,43	7,8	0,62	2,9	3,2	72,0	77,0	79,5	0,60	0,73	0,82	1,15	0,00328	5	48	16
2,0	1,5	90S	1740	6,12	6,4	0,82	2,5	3,0	77,0	81,0	82,5	0,60	0,72	0,78	1,15	0,00560	7	51	21
3,0	2,2	90L	1725	8,70	6,8	1,25	2,6	2,8	79,0	82,0	83,0	0,64	0,75	0,80	1,15	0,00672	6	51	23
4,0	3,0	100L	1725	11,8	7,5	1,66	2,6	2,8	82,0	83,0	83,5	0,61	0,73	0,80	1,15	0,00918	7	54	31
5,0	3,7	100L	1715	14,0	7,6	2,09	2,9	3,1	82,5	84,3	85,5	0,63	0,75	0,81	1,15	0,00995	7	54	33
6,0	4,5	112M	1745	16,7	7,4	2,46	2,2	2,8	85,0	86,0	86,2	0,66	0,77	0,82	1,15	0,01741	11	58	44
7,5	5,5	112M	1740	20,0	7,0	3,09	2,2	2,8	86,5	87,5	88,0	0,63	0,74	0,82	1,15	0,01741	11	58	44
10	7,5	132S	1760	26,6	8,0	4,07	2,2	3,0	86,0	88,0	89,0	0,66	0,77	0,83	1,15	0,04662	5	61	62
12,5	9,2	132M	1755	33,3	8,7	5,10	2,5	2,9	86,3	87,8	88,5	0,62	0,73	0,82	1,15	0,05427	5	61	69
15	11	132M	1755	39,3	8,3	6,12	2,3	2,8	86,8	88,2	88,5	0,66	0,80	0,83	1,15	0,05615	5	61	72
20	15	160M	1760	52,6	6,3	8,14	2,3	2,2	88,0	89,3	90,2	0,69	0,79	0,83	1,15	0,09535	13	69	114
25	18,5	160L	1755	64,3	6,3	10,2	2,3	2,4	89,0	90,0	91,0	0,70	0,79	0,83	1,15	0,11542	15	69	128
30	22	180M	1765	75,5	7,5	12,2	2,8	2,8	89,3	90,0	91,0	0,70	0,80	0,84	1,15	0,16145	12	68	158
40	30	200M	1770	101	6,6	16,2	2,3	2,5	89,5	90,5	91,7	0,72	0,82	0,85	1,15	0,27579	19	71	216
50	37	200L	1770	122	6,6	20,2	2,3	2,3	90,2	91,5	92,4	0,75	0,83	0,86	1,15	0,33095	16	71	252
60	45	225S/M	1775	146	7,2	24,2	2,3	2,7	91,0	92,2	93,0	0,75	0,84	0,87	1,00	0,69987	20	75	363
75	55	225S/M	1775	176	7,4	30,3	2,2	2,7	90,3	92,0	93,0	0,76	0,84	0,88	1,00	0,80485	15	75	386
100	75	250S/M	1780	242	8,6	40,2	3,2	3,2	92,0	93,0	93,5	0,74	0,83	0,87	1,15	1,15478	12	75	486
125	90	280S/M	1780	293	7,3	50,3	2,2	2,5	91,5	92,9	93,8	0,75	0,83	0,86	1,00	1,92710	25	80	658
150	110	280S/M	1785	353	8,0	60,2	2,6	2,7	91,5	93,5	94,1	0,78	0,84	0,87	1,00	2,56947	20	80	753
175	132	315S/M	1785	433	7,5	70,2	2,5	2,5	91,0	93,0	94,1	0,79	0,83	0,85	1,00	2,81036	14	82	859
200	150	315S/M	1785	484	7,5	80,2	2,4	2,6	90,5	93,0	94,5	0,75	0,83	0,86	1,00	3,21184	19	82	924
250	185	315S/M	1785	597	8,3	100	2,8	2,8	91,0	93,0	94,5	0,76	0,84	0,86	1,00	3,77391	22	82	1010
300	220	355M/L	1790	691	7,0	120	2,2	2,3	93,0	94,5	95,0	0,79	0,85	0,88	1,00	6,33813	48	83	1428
350	260	355M/L	1790	815	7,3	140	2,3	2,4	92,9	94,6	95,1	0,77	0,85	0,88	1,00	7,45663	32	83	1544
400	300	355M/L	1790	939	8,6	160	2,1	2,1	93,3	94,7	95,3	0,81	0,86	0,88	1,00	9,32079	37	83	1723
450	330	355M/L	1790	1030	7,1	180	2,1	2,1	93,8	94,8	95,4	0,77	0,85	0,88	1,00	10,25287	39	83	1837
500	370	355M/L	1790	1160	8,6	200	2,1	2,2	93,9	95,0	95,4	0,79	0,85	0,88	1,00	11,18495	31	83	1923

Tabela 2.7 - Características elétricas dos motores trifásicos IP 55 WEG.

Exercícios propostos

1. Relacione as vantagens e desvantagens de um motor de indução gaiola de esquilo.
2. Quais são as principais características de um motor de rotor bobinado?
3. O que é um motofreio trifásico? Quais são os três tipos de freio existentes?
4. O que é um motor de alto rendimento? Quais são as suas principais características?
5. Defina rendimento de um motor trifásico.
6. Como varia o rendimento em função da potência nominal? E com relação à potência no eixo?
7. Defina escorregamento.
8. Descreva a curva de operação torque x velocidade para um motor de indução trifásico.
9. Segundo a NBR 7094, quais são as cinco categorias de conjugado existentes? Dê as suas características.
10. Defina classe de isolamento.
11. Quais são os dois tipos de ventilação que podem existir em motores elétricos?
12. Defina regime de serviço.
13. O que é fator de serviço?
14. Como é calculado o número de rotações em um motor trifásico?
15. Conceitue grau de proteção de motores trifásicos.
16. Quais são os tipos de perda que podem ocorrer em um motor?
17. Por meio de diagramas, represente as ligações triângulo e estrela, enumerando suas características.

3

DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA ELÉTRICA

Sempre que uma carga for ligada a um dado circuito elétrico, há três tipos de potência a serem considerados: potência ativa, reativa e potência aparente.

3.1 - Potência ativa

É a transformação da energia elétrica em qualquer forma de energia útil, como, por exemplo: luminosa, térmica, entre outras, sem a necessidade de uma transformação intermediária de energia.

Exemplos de potência ativa:

- Chuveiros
- Resistores
- Aquecedores

A potência ativa em corrente alternada é dada pelas seguintes equações:

Circuito monofásico:

$$P = V.I.Cos\ \varphi$$

Circuito trifásico:

$$P = 1,73.V.I.Cos\varphi$$

Unidade: watt (W)

3.2 - Potência reativa

É a energia intermediária necessária para qualquer equipamento, como, por exemplo: motores, transformadores, reatores, capacitores, entre outros. Ela é indispensável para que esses equipamentos possam excitar o seu campo magnético ou elétrico, tornando possível a utilização da energia que efetivamente realiza o trabalho, a energia ativa.

A potência reativa é trocada entre o gerador e a carga, não sendo consumida efetivamente. Os consumidores de corrente reativa são: transformadores, reatores, motores de indução, motores síncronos subexcitados. Também são fornecedores de corrente reativa: capacitores e motores síncronos superexcitados, sendo o capacitor o elemento mais utilizado para esta finalidade.

Exemplos de equipamentos consumidores de potência reativa indutiva:

- Motores de indução
- Transformadores
- Máquinas de solda
- Lâmpadas de descarga

A potência reativa em corrente alternada é representada pelas seguintes equações:

Circuito monofásico:

$$Q = V.I.\text{sen}\,\varphi$$

Circuito trifásico:

$$Q = 1{,}73.V.I.\text{sen}\varphi$$

Unidade: volt ampère reativo (VAr)

3.3 - Potência aparente

É a soma vetorial da potência ativa com a potência reativa. Em função dessa potência são dimensionados os equipamentos, como: transformadores, condutores, entre outros.

A potência aparente em corrente alternada é representada pelas seguintes equações:



Circuito monofásico:

$$S = V.I$$

Circuito trifásico:

$$S = 1{,}73.V.I$$

Unidade: volt ampère (VA)

Antes de iniciar o estudo sobre fator de potência, é necessário fazer uma revisão dos conceitos fundamentais da trigonometria, em que temos as relações entre os lados e os ângulos do triângulo retângulo exibidas na figura 3.1.

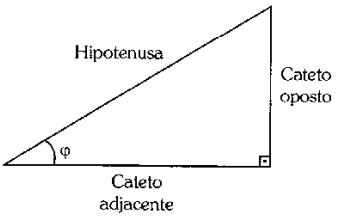


Figura 3.1 - Triângulo retângulo.

Sendo:

H: hipotenusa

Co: cateto oposto

Ca: cateto adjacente

Pelo Teorema de Pitágoras define-se que a hipotenusa ao quadrado representa o quadrado da soma dos quadrados dos catetos segundo a equação seguinte:

$$H^2 = Co^2 + Ca^2$$

Temos as seguintes razões trigonométricas, que relacionam os ângulos do triângulo retângulo, sendo caracterizadas pelas relações de seno, co-seno e tangente, como a seguir:

Senφ: Co/h (seno do ângulo φ)

Cosφ: Ca/h (cosseno do ângulo φ)

Tgφ: Co/Ca (tangente do ângulo φ)

Podemos fazer uma representação gráfica das potências no chamado triângulo das potências, representado a seguir:

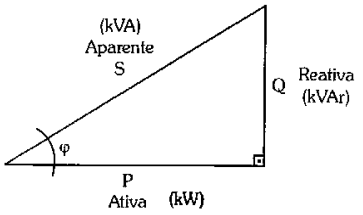


Figura 3.2 - Representação do triângulo das potências.

A potência aparente S é a soma geométrica da potência ativa P com a potência reativa Q, caracterizando o triângulo retângulo com Q, sendo o cateto oposto a φ e P o cateto adjacente a φ.

Desta forma, temos a relação entre as potências, dada pelo Teorema de Pitágoras, em que:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Com isso, obtemos as equações das potências por meio dos conceitos de trigonometria, em que:

Senφ = kvar/kva, sendo kvar = kva.senφ (potência reativa)

Cosφ = kW/kva, sendo kva = kW/cosφ (potência aparente)

Tgφ = kvar/kW, sendo kW = kvar/tg (potência ativa)

Podemos definir o fator de potência (cosφ) como o cosseno do ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão. Se o circuito for indutivo, ou seja, consumidor de energia reativa, com a tensão adiantada da corrente, o fator de potência é considerado em atraso. Na figura 3.3 há um exemplo de carga aplicada a um circuito puramente indutivo, em que a tensão está adiantada em 90° da corrente.

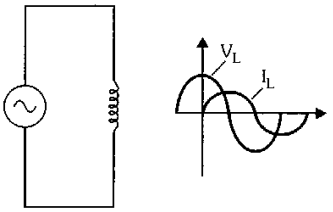


Figura 3.3 - Circuito puramente indutivo.

Se o circuito for capacitivo, ou seja, fornecedor de energia reativa, é considerado em avanço. A seguir, observe um exemplo de carga aplicada a um circuito puramente capacitivo, em que a tensão está atrasada em 90° da corrente:

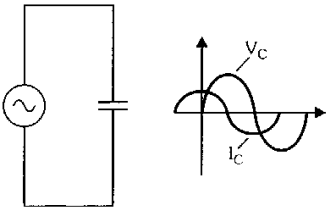


Figura 3.4 - Circuito puramente capacitivo.

***Observação**: Em um circuito puramente resistivo, a tensão está em fase com a corrente, assim não existe defasagem entre tensão e corrente.*

Sendo:
$\varphi = 0^0$ *e* $Cos\varphi = 1$
$P = V.\ I\ .\ Cos\varphi$
$P = V.I$

Como:
$S = V.I$
$P = S$

Concluímos que a potência aparente (S) é igual à potência ativa (W) em um circuito puramente resistivo.

3.4 - Exemplos de cálculos de potência

1. Um motor com potência de 35 kW tem um fator de potência (FP) de 0,85. Encontre a potência aparente e a potência reativa.

Solução:

Considerando:

FP= Cosφ e P = V.I.Cos φ = S. Cos φ, teremos:

Potência aparente:

$$S = P/FP = 35/0,85 = 41,17 \text{ kva}$$

Potência reativa:

$$Q^2 = S^2 - P^2$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{41,17^2 - 35^2} = 21,69 \text{ kvar}$$

2. Um dispositivo possui uma potência aparente de 100 kva e potência ativa de 79 kW. Calcule seu fator de potência e sua potência reativa.

Solução:

Considerando:

P = S. Cos φ, teremos:

Fator de potência:

$$\text{Cos } \varphi = FP = P/S = 79/100 = 0,79$$

Potência reativa:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{100^2 - 79^2} = 61,31 \text{ kvar}$$

3.5 - Fator de potência

É indispensável que uma determinada indústria tire o maior ganho possível por determinado custo de energia. Por intermédio da análise do fator de potência de uma determinada instalação de força e luz é possível saber se ele está sendo utilizado de forma eficiente para que se tenha maior viabilidade econômica, evitando desperdício e gastos desnecessários de energia elétrica. Um baixo fator de potência causa grandes problemas à instalação elétrica, como: sobrecarga nos cabos e transformadores, aumento da queda de tensão, além do aumento do valor a ser pago na conta de energia elétrica.

De acordo com o estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) reiterou-se a obrigatoriedade de se manter o fator de potência o mais próximo possível da unidade (1,00), tanto pelas concessionárias quanto pelos consumidores, recomendando, ainda, o estabelecimento do limite de referência para o fator de potência indutivo e capacitivo, bem como a forma de avaliação e de critério de faturamento da energia reativa excedente a esse limite. A legislação pertinente, estabelecida pela ANEEL, determina os seguintes aspectos relevantes:

Limite mínimo do fator de potência de 0,92; das 6 às 24 horas, o fator de potência deve ser, no mínimo, 0,92 para a energia e demanda de potência reativa indutiva fornecida, e das 24 até as 6 horas no mínimo 0,92 para energia e demanda de potência reativa capacitiva recebida.

A ANEEL também determina que a ocorrência de excedente de reativo seja verificada pela concessionária por meio do fator de potência mensal ou do fator de potência horário. O fator de potência mensal é calculado com base nos valores mensais de energia ativa ("kWh") e energia reativa ("kvarh"). O fator de potência horário é calculado com base nos valores de energia ativa ("kWh") e de energia reativa ("kvarh") medidos de hora em hora.

3.5.1 - Causas do baixo fator de potência

As principais causas do baixo fator de potência estão enumeradas a seguir:

- Motores superdimensionados ou com pouca carga;
- Lâmpadas de descarga: fluorescentes, vapor de sódio, vapor de mercúrio e outras (com reatores de baixo fator de potência);
- Instalações de ar condicionado;
- Máquinas de solda;
- Equipamentos eletrônicos;
- Transformadores superdimensionados.

3.5.2 - Vantagens da correção do fator de potência

Melhoria da tensão: a corrente relativa à potência reativa aparece somente na reatância indutiva. Como essa corrente é reduzida pelos capacitores, a queda de tensão total é reduzida a um valor igual à corrente do capacitor multiplicada pela reatância. Portanto, é necessário apenas conhecer a potência nominal do capacitor e a reatância do sistema para se conhecer a

elevação de tensão ocasionada pelos capacitores, que é na ordem de 4 a 5%. Embora os capacitores elevem os níveis de tensão, é inviável instalá-los em estabelecimentos industriais apenas para esse fim. A melhoria da tensão deve ser considerada um benefício adicional dos capacitores.

Redução das perdas: as perdas RI^2 (efeito Joule) variam de 2,5 a 7,5% dos kWh da carga, dependendo das horas de trabalho à plena carga, bitola dos condutores e comprimento dos alimentadores e circuitos de distribuição. As perdas são proporcionais ao quadrado da corrente e, como a corrente é reduzida na razão direta da melhoria do fator de potência, as perdas são inversamente proporcionais ao quadrado do fator de potência.

Devido à melhoria dos fatores citados, temos as seguintes vantagens:

- Redução significativa do custo de energia elétrica;
- Aumento da eficiência energética da empresa;
- Aumento da capacidade dos equipamentos de manobra;
- Aumento da vida útil das instalações e equipamentos;
- Redução do efeito Joule;
- Redução da corrente reativa na rede elétrica.

Além dessas vantagens para a empresa, para a concessionária de energia elétrica existem os seguintes benefícios: potência reativa deixa de circular no sistema de transmissão e distribuição, redução das perdas pelo efeito Joule, aumento da capacidade do sistema de transmissão e distribuição de potência ativa, que é a que realmente gera trabalho, diminuição dos custos de geração.

3.5.3 - Métodos para melhorar o fator de potência

A compensação da energia reativa em uma instalação deve ser analisada com o devido cuidado, evitando-se soluções imediatistas que podem conduzir a resultados técnicos e/ou econômicos não-satisfatórios. É necessário critério e experiência para efetuar uma compensação adequada, analisando individualmente cada caso, uma vez que não há uma solução padronizada. Em princípio, o aumento do fator de potência pode ser conseguido:

- Por meio do aumento do consumo de energia ativa;
- Utilizando máquinas síncronas;
- Por meio de capacitores.

Independentemente do método a ser utilizado, o fator de potência ideal, tanto para a instalação (isto é, para o consumidor) como para a concessionária, seria o unitário, o que significa a inexistência de potência reativa na instalação. No entanto, essa condição geralmente é inviável do ponto de vista econômico e o valor (0,95) é considerado satisfatório.

O aumento do consumo de energia ativa, isto é, da demanda ativa média da instalação, pode ser conseguido pela adição de novas cargas com alto fator de potência ou pelo aumento do período de cargas cujos fatores de potência sejam elevados.

Esse método é recomendado para instalações que tenham jornada de trabalho fora do período de ponta de carga (aproximadamente de 18 a 20 horas) do sistema elétrico.

Além de atender às necessidades de produção da indústria, a carga ativa que vai aumentar o consumo de energia ativa deve ser cuidadosamente escolhida para não ultrapassar a demanda máxima contratada, o que acarretaria um aumento na conta da energia elétrica.

Por outro lado, não se pode esquecer que essa solução não deve chocar-se com a necessidade de conservação de energia elétrica. Assim, por exemplo, não é conveniente substituir um forno a óleo por um forno elétrico (cujo $\cos\varphi$ é praticamente igual a 1) apenas para aumentar o fator de potência. No entanto, se a indústria possuir dois fornos, um elétrico e outro a óleo, funcionando alternadamente, ampliar os períodos de uso do forno elétrico pode ser uma boa opção para corrigir o fator de potência da indústria, desde que se obtenha benefício econômico.

As máquinas síncronas também podem funcionar como "geradores" de potência reativa, seja acionando cargas mecânicas, seja funcionando em vazio (nesse caso, chamadas de "compensadores síncronos"). Essa propriedade é controlada pela excitação. Quando subexcitados, eles não geram potência reativa suficiente para suprir suas próprias necessidades e, conseqüentemente, devem receber do sistema uma potência reativa adicional. Quando superexcitados (funcionamento normal) suprem suas próprias necessidades de reativos e também fornecem reativos ao sistema.

É preciso considerar que a compensação por esse método nem sempre é compensadora do ponto de vista econômico, sendo apenas recomendada quando são acionadas cargas mecânicas de grande porte, com potências superiores a 200 cv (caso, por exemplo, de grandes compressores) e funcionando por períodos longos (superiores a oito horas por dia). Nesses casos, o motor síncrono exerce a dupla função de acionar a carga e aumentar o fator de potência da instalação.

Os "compensadores síncronos" não são utilizados em instalações industriais, sendo, geralmente, usados por concessionárias em subestações.

O método dos capacitores é o mais utilizado nas instalações industriais, sendo, em geral, o mais econômico e o que permite maior flexibilidade de aplicação. Os capacitores usados, chamados de "capacitores de potência", são caracterizados por sua potência nominal, sendo fabricados em unidades monofásicas e trifásicas, para alta e baixa tensão, com valores padronizados de potência, tensão e freqüência, ligados internamente em delta e com potências de, no máximo, 50 kvar.

Os capacitores de alta tensão são monofásicos com potências não superiores a 100 kvar e, em suas aplicações, são ligados externamente em estrela, quando o neutro é aterrado e em triângulo para as demais aplicações. Nas figuras 3.5 e 3.6 temos a representação de alguns tipos de ligações de capacitores utilizados na indústria.

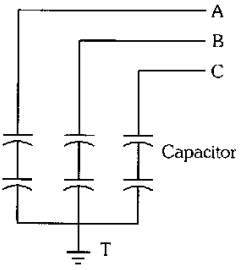


Figura 3.5 - Ligação de capacitores estrela série.

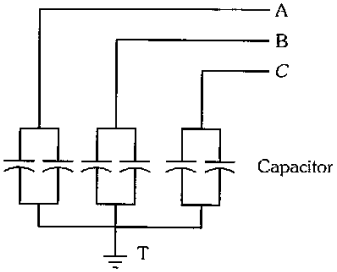


Figura 3.6 - Ligação de capacitores estrela paralelo.

3.5.3.1 - Parâmetros dos capacitores

O capacitor é um dispositivo elétrico utilizado para introduzir capacitância em um circuito. É constituído por um sistema de condutores e dielétricos que têm a propriedade de armazenar energia elétrica quando submetidos a um campo elétrico. Um capacitor é caracterizado por:

- **Capacitância nominal**: valor da capacitância atribuído pelo fabricante (μF).
- **Tensão nominal**: valor eficaz da tensão senoidal entre os seus terminais, para a qual um capacitor é projetado (V, kV).

- **Corrente nominal**: valor eficaz da corrente correspondente a sua potência nominal, quando aplicada ao capacitor a sua tensão nominal sob freqüência nominal.
- **Potência nominal**: potência reativa sob tensão e freqüência nominais, para a qual o capacitor é projetado (kvar).
- **Carga de um capacitor**: é o acúmulo de cargas elétricas no dispositivo, resultando em elevação da tensão entre suas placas; por extensão, o termo também significa o valor de carga elétrica acumulada.

Os capacitores possuem um dispositivo de descarga que é elétrico (basicamente um resistor) ligado entre os terminais do capacitor ou a ele incorporado, ou ligado entre os condutores de alimentação. Eles reduzem praticamente a zero a tensão entre os seus terminais, quando o capacitor é desligado da fonte de alimentação. A figura 3.7 mostra um capacitor utilizado para a correção do fator de potência.

Um banco de capacitores é um conjunto de capacitores de potência, estruturas de suporte e com os necessários dispositivos de manobra, controle e proteção, montado de modo a constituir um equipamento completo, como é ilustrado na figura 3.8.

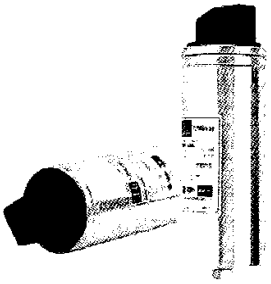


Figura 3.7 - Capacitor utilizado para correção do fator de potência. (Cortesia WEG)

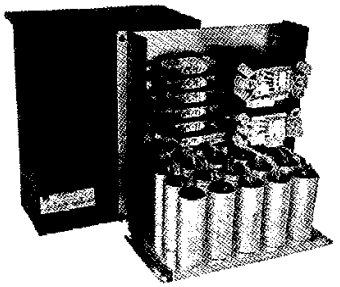


Figura 3.8 - Banco de capacitores utilizado para correção do fator de potência. (Cortesia WEG)

Os capacitores são normalmente determinados pela sua potência nominal reativa dada em Var (volt ampère reativo).

A potência nominal de um capacitor é absorvida do sistema quando é ele submetido à tensão e freqüências nominais a uma temperatura ambiente igual a 20°C. Assim, por meio da equação seguinte podemos determinar a capacitância:

$$C = \frac{1.000 \times P_c}{2 \times \pi \times F \times V_n^2}$$

Sendo:

$\mathbf{P_c}$: potência nominal do capacitor em kvar;

F: freqüência nominal em HZ;

$\mathbf{V_n}$: tensão nominal em kV;

C: capacitância em μF.

A tabela 3.1 mostra as características elétricas básicas de capacitores Weg em 60 Hz.

Tensão (V)	Potência reativa (kvar)	Capacitância (μF) (ligação Δ)	Corrente nominal (A)	Fusível gL/gG (A)	Cabo (mm^2)	Tamanho (mm)	Massa (Kg)
220 V	0,50	9,1 x 3	1,31	2	1,5	3	0,460
	0,75	13,7 x 3	1,97	4	1,5	3	0,460
	1,00	18,3 x 3	2,62	4	1,5	3	0,460
	1,50	27,4 x 3	3,94	6	1,5	3	0,460
	2,00	36,6 x 3	5,25	10	1,5	3	0,460
	2,50	45,7 x 3	6,56	10	1,5	3	0,460
	3,00	54,8 x 3	7,87	16	1,5	4	0,660
380 V	0,50	3,1 x 3	0,76	2	1,5	4	0,660
	0,75	4,6 x 3	1,14	2	1,5	3	0,460
	1,00	6,1 x 3	1,52	4	1,5	3	0,460
	1,50	9,2 x 3	2,28	4	1,5	3	0,460
	2,00	12,3 x 3	3,03	6	1,5	3	0,460
	2,50	15,3 x 3	3,80	6	1,5	3	0,460
	3,00	18,4 x 3	4,56	10	1,5	3	0,460
	5,00	30,6 x 3	7,60	16	1,5	4	0,660
440 V	0,50	2,3 x 3	0,66	2	1,5	3	0,460
	0,75	3,4 x 3	0,98	2	1,5	3	0,460
	1,00	4,6 x 3	1,31	2	1,5	3	0,460
	1,50	6,9 x 3	1,97	4	1,5	3	0,460
	2,00	9,1 x 3	2,62	4	1,5	3	0,460
	2,50	11,4 x 3	3,28	6	1,5	3	0,460
	3,00	13,7 x 3	3,94	6	1,5	3	0,460
	5,00	22,9 x 3	6,56	10	1,5	4	0,660

Tensão (V)	Potência reativa (kvar)	Capacitância (μF) (ligação Δ)	Corrente nominal (A)	Fusível gL/gG (A)	Cabo (mm^2)	Tamanho (mm)	Massa (Kg)
480 V	0,50	1,9 x 3	0,60	2	1,5	3	0,460
	0,75	2,9 x 3	0,90	2	1,5	3	0,460
	1,00	3,8 x 3	1,20	2	1,5	3	0,460
	1,50	5,8 x 3	1,80	4	1,5	3	0,460
	2,00	7,7 x 3	2,41	4	1,5	3	0,460
	2,50	9,6 x 3	3,01	6	1,5	3	0,460
	3,00	11,5 x 3	3,61	6	1,5	3	0,460
	5,00	19,2 x 3	6,01	10	1,5	4	0,660

Tabela 3.1 - Características elétricas dos capacitores Weg modelo UCW-T.

Para tensões de até 660 V a potência nominal normalmente não é superior aos 50 kvar em unidades trifásicas e 30 kvar em unidades monofásicas.

3.5.3.2 - Compensação do fator de potência

Como foi citado anteriormente, a utilização de capacitor tem como função a melhoria do fator de potência, pois todas as instalações que possuem motores, transformadores etc., possuem uma potência reativa que não realiza trabalho. O capacitor tem por finalidade diminuir a quantidade de potência reativa que os geradores precisam fornecer.

Temos como exemplo uma instalação em que se deseja melhorar o fator de potência de cos φ_1 para cosφ_2, ou seja, reduzir a quantidade de potência reativa indutiva de $kvar_1$ para $kvar_2$. Nesse caso, temos:

$$kvar1 = kW.\ Tg\varphi1$$

$$kvar2 = kW.\ Tg\varphi2$$

A diferença entre as duas potências dá:

$$kvar1 - kvar2 = kW(tg\varphi1 - tg\varphi2)$$

O que irá resultar no seguinte diagrama de correção de fator de potência ilustrado a seguir:

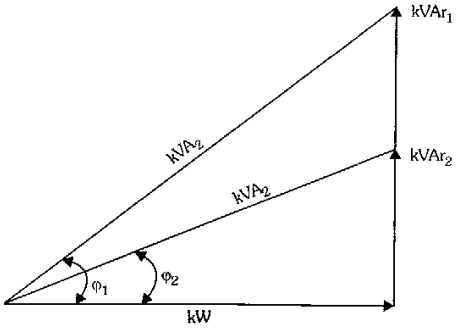


Figura 3.9 - Diagrama de representação da correção do fator de potência.

Desta forma, temos a quantidade de potência reativa necessária para corrigir a instalação dada por:

$$Ckvar = kW.\ \Delta.tg\varphi$$

3.5.3.3 - Exemplos de cálculo de correção de fator de potência

1. Corrigir o fator de potência de uma instalação elétrica cuja carga instalada é de 150 kW. Possui um fator de potência atual de 0,7 e deseja corrigi-lo para 0,92.

   Solução:

   Como: FP = Cosφ, teremos os seguintes ângulos:

   Para o fator de potência atual:

   $$Cos\varphi = 0,7 \text{ e } \varphi = 45,57^0 \text{ e } tg45,57^0 = 1,02$$

   Para o fator de potência desejado:

   $$Cos\varphi = 0,92 \text{ e } \varphi = 23,07^0 \text{ e } tg23,07^0 = 0,42$$

   Assim calculamos quantos kvar serão necessários para a correção com a seguinte equação:

   $$Ckvar = kW.\ \Delta.tg\varphi$$

   $$Ckvar = 150(1,02 - 0,42) = 90 \text{ kvar}$$

2. Dada a seguinte instalação elétrica, calcule o fator de potência da instalação e corrija para 0,92.

   a) Dois motores de 10 cv com FP = 0,85

   b) Um motor de 15 cv com FP = 0,85

   c) Dois motores de 30 cv com FP = 0,87

   Solução:

   Para a resolução deste problema primeiramente deve-se calcular as potências ativas e aparentes do grupo de motores.

   Soma das potências ativas:

   a) 2 x 10 x 736 = 14720 W

   b) 1 x 15 x 736 = 11040 W

   c) 2 x 30 x 736 = 44160 W

   Potência ativa total = 14720 + 11040 + 44160 = 69920 W

   Soma das potências aparentes totais:

   Como S = P/FP, teremos:

   a) S1 = P1/FP1 = 14720/0,85 = 17318,64 VA

   b) S2 = P2/FP2 = 11040/0,85 = 12988,23 VA

   c) S3 = P3/FP3 = 44160/0,87 = 50758,62 VA

   Potência aparente total = 17318,64 + 12988,23 + 0758,62 = 81065,49 VA

   Desta forma, o fator de potência atual será obtido pela relação:

   $$FP = Ptotal/Stotal = 69920/81065,49 = 0,86$$

   Como FP = Cosφ, teremos os seguintes ângulos:

   Para o fator de potência atual:

   $$Cos\varphi = 0,86 \text{ e } \varphi = 30,68^0 \text{ e } tg30,68^0 = 0,59$$

Para o fator de potência desejado:

$$Cos\varphi = 0,92 \text{ e } \varphi = 23,07^0 \text{ e } tg23,07^0 = 0,42$$

Assim, calculamos quantos kvar serão necessários para a correção pela seguinte equação:

$$Ckvar = kW.\ \Delta.tg\varphi$$

$$Ckvar = 69920(0,59 - 0,42) = 11886,4 \text{ var} = 11,88 \text{ kvar}$$

3.5.4 - Medição do fator de potência

A medição do fator de potência pode ser feita direta ou indiretamente. O cossenofímetro é o instrumento responsável pela leitura direta do fator de potência. O método de leitura indireta é o mais utilizado pelas concessionárias e pode ser feita por meio de um wattímetro + kvar-metro ou varímetro, sendo a última opção a mais utilizada. Assim, o fator de potência é obtido pelas seguintes equações de acordo com o tipo de instrumento utilizado:

$$f \cdot p = kW/kva$$

$$tg\varphi = kvar/kW$$

3.5.5 - Ponto de localização dos capacitores

Os capacitores podem estar localizados em quatro posições mostradas a seguir:

- Correção na entrada da energia de alta tensão;
- Correção na entrada da energia de baixa tensão;
- Correção localizada;
- Correção mista.

A figura 3.10 fornece a representação da localização dos capacitores, sendo:

- **C1**: capacitor instalado diretamente na carga (correção individual de fator de potência);



- **C2**: capacitor instalado no quadro principal de baixa tensão;
- **C3**: capacitor instalado em um quadro secundário de baixa tensão;
- **C4**: capacitor instalado na entrada de alta tensão.

O método mais eficaz de correção do fator de potência é a instalação de capacitores junto com cada equipamento, fazendo a correção do fator de potência localizada, pois com esse tipo de correção teríamos:

- Redução das perdas por efeito Joule em toda a instalação;
- Diminuição da carga nos circuitos de alimentação dos equipamentos;
- Único acionamento para o equipamento e o capacitor;
- Geração de energia reativa capacitiva somente quando for necessário.

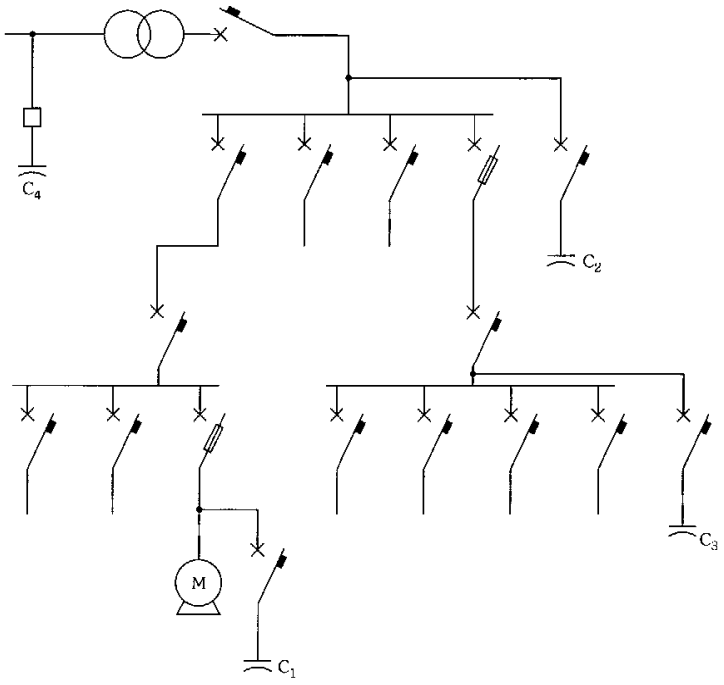


Figura 3.10 - Localização dos capacitores.

De acordo com o tipo de instalação, esse metodo torna-se economicamente inviável.

A correção do fator de potência na entrada de alta tensão corrige somente o fator de potência visto pela concessionária, permanecendo internamente todos os inconvenientes citados anteriormente. Além disso, no momento em que ocorrem manobras, surge uma série de problemas com o centelhamento e grande probabilidade de sobretensão, pois é inviável a instalação de capacitores variáveis. Portanto, a instalação de banco de capacitores de alta tensão somente é recomendável em grandes unidades consumidoras, pois além de todos os problemas citados o custo é elevado.

A melhor solução técnica e econômica é a correção na entrada da energia de baixa tensão, aliada à correção localizada, caracterizando a correção mista.

Na correção mista, faz-se uso de um banco automático de capacitores que insere capacitores no sistema somente quando houver necessidade, pois como foi citado anteriormente, um fator de potência baixo pode causar sobretensão e multas da concessionária de energia elétrica.

Também são instalados capacitores fixos no secundário do transformador para fazer a correção do fator de potência quando ele estiver vazio ou com pouca carga, conforme a tabela seguinte:

Transformador kva	**Corrente de excitação io%**	**kvar**	
		Calculado	**Nominal**
15	5,7	0,81	0,75
30	4,8	1,37	1,25
45	4,3	1,84	1,75
75	3,6	2,57	2,5
112,5	3,2	3,42	3,5
150	3,0	4,28	4,0
225	2,7	5,77	5,0
300	2,5	7,13	7,5
500	1,5	7,13	7,5
750	1,4	9,98	10,0
1000	1,3	12,35	12,5
1500	1,0	14,25	15,0

Tabela 3.2 - Valores típicos de capacitores a serem instalados no secundário do transformador.

***Nota**: O valor calculado é para F.P. = 0,95 indutivo.*

Capacitores também são instalados junto com os equipamentos para efetuar a correção pontual do fator de potência, quando temos motores trabalhando a vazio ou com carga reduzida. Assim, motor e capacitor são comandados pelo mesmo dispositivo, evitando o excesso ou falta de energia reativa em determinados momentos, havendo uma redução de perdas em toda a instalação.

Nessa correção individual, devem ser levados em conta alguns fatores como o aparecimento de harmônicos durante a partida dos motores e a corrente do capacitor, que deve ser inferior à corrente de magnetização do motor, em que a potência do capacitor com tensão nominal não deve ser superior a 90% da potência absorvida pelo motor vazio, como indica a tabela 3.3.

Potência do motor (cv)	Velocidade síncrona do motor em rotações por minuto (rpm)					
	3.600	1.800	1.200	900	720	600
	kvar	kvar	kvar	kvar	kvar	kvar
5	2	2	2	3	4	4,5
7,5	2,5	2,5	3	4	5,5	6
10	3	3	3,5	5	6,5	7,5
15	4	4	5	6,5	8	9,5
20	5	5	6,5	7,5	9	12
25	6	6	7,5	9	11	14
30	7	7	9	10	12	16
40	9	9	11	12	15	20
50	12	11	13	15	19	24
60	14	14	15	18	22	27
75	17	16	18	21	26	32,5
100	22	21	25	27	32,5	40
125	27	26	30	32,5	40	47,5
150	32,5	30	35	37,5	47,5	52,5
200	40	37,5	42,5	47,5	60	65
250	50	45	52,5	57,5	70	77,5
300	57,5	52,5	60	65	80	87,5
400	70	65	75	85	95	105
500	77,5	72,5	82,5	97,5	107,5	115

Tabela 3.3 - Valores típicos de capacitores a serem instalados para compensação individual. (Fonte: Instalações Elétricas Industriais: João Mamede Filho)

Deve-se ter o cuidado de evitar o uso de capacitores para correção de fator de potência em motores nos seguintes casos:

- Motores sujeitos à reversão de rotação;
- Sujeito a partidas excessivas;
- Acionamento de elevadores ou guindastes;
- Que trabalhem em mais de uma velocidade.

3.6 - Potência do transformador em função do fator de potência

A potência ativa de um transformador está diretamente ligada ao seu fator de potência, pois a energia reativa, ao sobrecarregar uma instalação elétrica, não utiliza toda a capacidade disponível do transformador, impossibilitando a instalação de novas cargas. Os investimentos em ampliação das instalações estão relacionados, principalmente, aos transformadores e condutores necessários.

O transformador a ser instalado deve atender à potência total dos equipamentos utilizados, mas devido à grande quantidade de potência reativa, a sua capacidade fica bastante reduzida. A tabela 3.4 mostra a potência total que deve ter o transformador, para atender a uma carga útil em kW para fatores de potência crescentes.

tgϕ	cosϕ	Potência nominal do transformador (kva)										
		15	**30**	**45**	**75**	**112,5**	**150**	**225**	**300**	**500**	**750**	**1.000**
2,29	0,40	6	12	18	30	45	60	90	120	200	300	400
1,99	0,45	6,8	13,5	20,3	33,8	50,6	67,5	101,3	135	225	337,5	450
1,73	0,50	7,5	15	22,5	37,5	56,3	75	112,5	150	250	375	500
1,52	0,55	8,3	16,5	24,8	41,3	61,8	82,5	123,8	165	275	412,5	550
1,33	0,60	9	18	27	45	67,5	90	135	180	300	450	600
1,17	0,65	9,8	19,5	29,3	48,8	73,1	97,5	146,3	195	325	487,5	650
1,02	0,70	10,5	21	31,5	52,5	78,8	105	157,5	210	350	525	700
0,88	0,75	11,3	22,5	33,8	56,3	84,4	112,5	168,8	225	375	562,5	750
0,75	0,80	12	24	36	60	90	120	180	240	400	600	800
0,70	0,82	12,3	24,6	36,9	61,5	92,3	123	184,5	246	410	615	820
0,64	0,84	12,6	25,2	37,8	63	94,5	126	189	252	420	630	840
0,62	0,85	12,8	25,5	38,3	63,8	95,6	127,5	191,3	255	425	637,5	850
0,54	0,88	13,2	26,4	39,6	66	99	132	198	264	440	660	880
0,48	0,90	13,5	27	40,5	67,5	101,3	135	202,5	270	450	675	900
0,42	0,92	13,8	27,6	41,4	69	103,5	138	207	276	460	690	920
0,36	0,94	14,1	28,2	42,3	70,5	105,8	141	211,5	282	470	705	940
0,33	0,95	14,3	28,5	42,8	71,3	106,9	142,5	213,8	285	475	712,5	950
0,29	0,96	14,4	28,8	43,2	72	108	144	216	288	480	720	960
0,21	0,98	14,7	29,4	44,1	73,5	110,3	147	220,5	294	490	735	980

Tabela 3.4 - Potência ativa de um transformador de acordo com a variação do fator de potência.

Com base nesta tabela podemos concluir que, quanto mais baixo o fator de potência, menor a sua capacidade de liberação de potência ativa. À medida que aumentamos o fator de potência, temos um acréscimo proporcional de potência ativa sem efetuar a troca do transformador.

3.7 - Potência de motores trifásicos

A potência realmente absorvida pelo motor trifásico está representada a seguir, independente do esquema de ligação do motor:

$$Pn = I.Vl\ Cos\varphi.\eta.1,73$$

Sendo:

Pn: potência nominal do motor em watts

Vl: tensão entre duas fases em volts

I: corrente em cada linha do motor em ampères

Cosφ: fator de potência

η: rendimento

3.8 - Fator de potência dos motores

Assim como qualquer carga ligada à rede elétrica, os motores de indução trifásicos possuem um fator de potência característico. A tendência do fator de potência é ser maior à medida que a potência nominal da máquina aumenta. O gráfico seguinte apresenta esta relação entre cosφ x potência nominal:

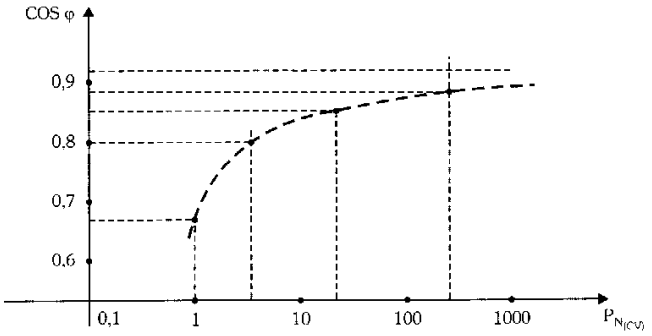


Figura 3.11 - Curva fator de potência x potência nominal.
(Fonte: Máquinas de Indução Trifásicas: Gilio Aluisio Simone)

À medida que se aplica carga ao rotor da máquina, a corrente da armadura cresce e a defasagem entre a tensão aplicada nos terminais e a corrente que circula na armadura diminui. Assim, conforme o motor recebe carga, o seu fator de potência aumenta, como indica o gráfico seguinte:

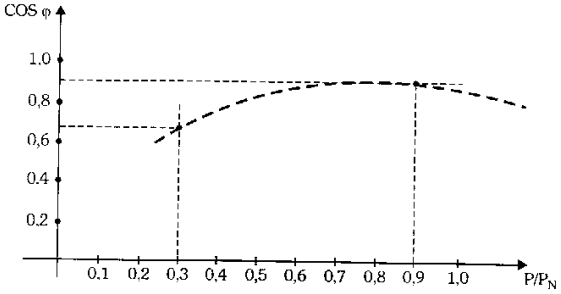


Figura 3.12 - Curva fator de potência x potência solicitada ao rotor.
(Fonte: Máquinas de Indução Trifásicas: Gilio Aluisio Simone)

A tendência de o fator de potência aumentar com o acréscimo da carga no eixo do motor observa-se praticamente em todos os motores trifásicos. Ela é mais acentuada nos motores de pequeníssimas potências e menos acentuada nos motores de maior potência.

3.9 - Exemplo para determinação das características de potência de um motor trifásico

Determinar a corrente que circula pela rede que alimenta um motor de 20 cv, 220 V, Ip/In = 6,3 ligado em Δ com rendimento de 89,3% e fator de potência de 0,79, com uma carga de 75%.

Primeiramente é necessário converter a potência em cv na potência em watts:

$P(w) = P(cv) \times 736$

$P(w) = 20 \times 736 = 14720\ W$

Esta é a potência de saída do motor disponível no eixo do motor.

Levando em consideração o rendimento do motor, temos a seguinte potência elétrica:

$$\eta = P(w)/P_{EL}$$

Sendo:

P(W): potência disponibilizada no eixo do motor

$\mathbf{P_{EL}}$: potência elétrica consumida da rede

η: rendimento do motor

$$P_{EL} = P(w) / \eta = 14720/ 0.893 = 16483,76 \text{ W}$$

A potência aparente nos terminais do motor é dada por: $Fp = P_{EL}/S$

Sendo:

Fp: fator de potência

PEL: potência elétrica consumida (potência ativa)

S: potência aparente (VA)

Assim:

$$S = P_{EL}/ 0,79 = 20865,52 \text{ VA}$$

Corrente nominal do motor: $S = 1,73. Vl.Il$

Sendo:

Vl: tensão de linha de alimentação

Il: corrente de linha de alimentação

Então, temos:

$$Il = 20865,52 /(1,73 \times 220) = 54,82 \text{ A}$$

E a sua corrente de partida (Ip) será:

$$Ip = Il \times Ip/In$$

Assim:

$$Ip = 54,82 \times 6,3 = 345,36 \text{ A}$$

Exercícios propostos

1. Defina potência ativa, reativa e aparente.
2. Construa o triângulo das potências e demonstre as relações entre as potências ativa, reativa e aparente.
3. Um equipamento tem potência ativa de 500 kW com fator de potência de 0,5. Calcule suas potências aparente e reativa.
4. Defina fator de potência.
5. Quais são as causas de um baixo fator de potência?
6. Quais as vantagens da correção do fator de potência?
7. Calcule e corrija o fator de potência das seguintes instalações:
   a) Trinta motores de 10 cv com FP = 0,85
   b) Cem motores de 50 cv com FP = 0,87
   c) Três motores de 150 cv com FP = 0,88
8. Quais são os métodos para a melhoria do fator de potência?
9. De que forma podem ser ligados os capacitores e quais parâmetros dos capacitores devem ser levados em consideração?
10. Como é feita a medição do fator de potência?
11. Cite e descreva os possíveis pontos de localização dos capacitores para correção do fator de potência.
12. Relacione a potência de um transformador em função de seu fator de potência.
13. Como varia o fator de potência de um motor em função de sua potência nominal?
14. Descreva o comportamento do fator de potência em um motor com relação à variação da potência em seu eixo.



4

DIAGRAMAS DE COMANDO

4.1 - Dispositivos elétricos

Os dispositivos elétricos são componentes de um sistema automatizado que recebem os comandos do circuito elétrico, acionando as máquinas elétricas.

As chaves auxiliares botoeiras são comandadas manualmente e têm a finalidade de interromper ou estabelecer momentaneamente, por pulso, um circuito de comando para iniciar, interromper ou comandar um processo de automação.

- As botoeiras possuem cores definidas por normas de acordo com a sua função:
- **Vermelho**: parar, desligar ou botão de emergência;
- **Amarelo**: iniciar um retorno, eliminar uma condição perigosa;
- **Verde ou preto**: ligar, partida;
- **Branco ou azul**: qualquer função diferente das anteriores.

Quanto à instalação, devem estar dispostas com espaçamento correto e padrão, e o botão "desliga" deve ficar sob o botão "liga" na posição vertical. Na posição horizontal, o botão "desliga" geralmente está à direita do botão "liga".

Dispositivos de comando: elementos de comutação que permitem ou não a passagem da corrente elétrica entre um ou mais pontos do circuito.

Chave impulso (ou sem retenção): só permanece acionada mediante aplicação de força externa. Cessada a força, o dispositivo volta à posição inicial. Dentro das chaves existem dois tipos de contato: normalmente aberto e normalmente fechado.

Contato normalmente aberto (NA): sua posição original é aberta, ou seja, permanece aberto até que seja aplicada uma força externa. Também é freqüentemente chamado, na maioria das aplicações industriais, de contato NO (do inglês: *normally open*).

Contatos de alta capacidade de corrente de comutação são chamados de contatos de carga, contatos de força ou contatos principais. São destinados à aplicação em ramais de motores ou de carga, onde existem altas intensidades de corrente elétrica.

Os contatos a serem usados nos próprios comandos são chamados auxiliares. Eles suportam baixas intensidades de corrente, e não podem ser aplicados em circuitos de carga. A sua marcação é feita por meio de dois dígitos. O primeiro dígito representa o número seqüencial do contato, o segundo representa o código de função, que no caso dos contatos auxiliares NA são 3 e 4.

Contato normalmente fechado (NF): sua posição original é fechada, ou seja, permanece fechado até que seja aplicada uma força externa. Também é freqüentemente denominado na maioria das aplicações industriais de contato NC (do inglês : *normally closed*). No caso dos contatos NF, a marcação é feita por dois dígitos. O primeiro dígito representa o número seqüencial do contato, o segundo representa o código de função, que no caso dos contatos auxiliares NF são 1 e 2.

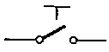
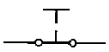
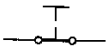
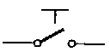
Chave de impulso	Desligado	Acionado
NA		
NF		

Figura 4.1 - Contatos normalmente aberto (NA) e normalmente fechado (NF) sem retenção.

Chave com retenção (ou trava): uma vez acionada, seu retorno à situação anterior somente acontece com um novo acionamento, como é ilustrado na figura 4.2.

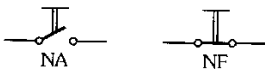


Figura 4.2 - Contatos normalmente aberto (NA) e normalmente fechado (NF) com retenção.

Chaves de contatos múltiplos com ou sem retenção: são chaves com vários contatos NA e/ou NF agregados. A figura 4.3 exibe dois conjuntos de contatos, em que a linha tracejada representa um acoplamento mecânico entre os contatos, ou seja, os contatos são acionados simultaneamente, juntamente com alguns modelos de botões utilizados em acionamentos elétricos.

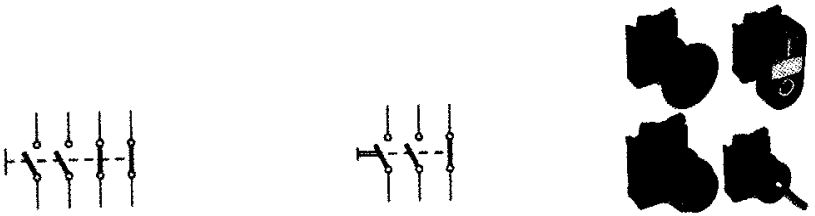


Figura 4.3 - Chave impulso (2 NA + 2 NF) e chave trava (2 NA + 1 NF).

Chave seletora: possui duas ou mais posições e permite selecionar uma entre várias posições em um determinado processo com (C) ponto de contato comum. Também pode ser chamada de chave comutadora, contato *three-way* ou contato paralelo. Esse tipo de chave representa uma função composta, sendo a parte superior um contato NF e a inferior um NA.

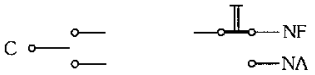


Figura 4.4 - Chave impulso (três posições) e chave trava (duas posições).

Interruptores fim de curso: são dispositivos auxiliares de comando, de acionamento, que atuam num circuito com função bastante diversificada, como:

- Comando de contatores;
- Comando de circuitos de sinalização para indicar a posição de um determinado elemento móvel.

As chaves auxiliares fim de curso são basicamente constituídas por uma alavanca ou haste, com ou sem roldanas na extremidade, que transmite o movimento aos contatos que se abrem ou se fecham de acordo com a sua função, que pode ser:

Controle: sinaliza os pontos de início ou de parada de um determinado processo.

Segurança: desliga equipamentos quando há abertura de porta ou equipamento e alarme.

4.2 - Dispositivos de comando e de proteção

Dentro de um dispositivo de partida de um motor ficam todos os componentes necessários ao comando e proteção de um motor elétrico. A seleção dos componentes para constituir um dispositivo está diretamente relacionada com o desempenho da instalação.

Dispositivos de comando (manobra) e de proteção podem ser classificados em:

- **Dispositivo de baixa tensão (BT)**: empregado em circuitos cuja tensão da linha é > 1000 V.
- **Dispositivo de alta tensão (AT)**: empregado em circuitos cuja tensão da linha é > 1000 V.

Desses dispositivos, distinguem-se três tipos de circuito:

- **Circuito principal**: constitui o conjunto de todos os circuitos associados, em que os dispositivos de comando ou proteção têm a função de fechar ou abrir.
- **Circuito de comando**: comanda a operação de fechamento, abertura ou ambas.
- **Circuito auxiliar**: diferente dos dois primeiros, usado também para outras finalidades, tais como sinalização, intertravamento etc.
- **Pólo**: é uma parte do circuito principal de um dispositivo de manobra associada apenas a uma fase do circuito.
- **Operação**: é o movimento dos contatos móveis do circuito principal do dispositivo de manobra, de uma posição para outra.
- **Operação do dispositivo - ponto de vista elétrico**: estabelecer ou interromper corrente.
- **Operação do dispositivo - ponto de vista mecânico**: abrir ou fechar os contatos.
- **Ciclo de operação**: sucessão de operações de uma posição à outra e a volta à posição inicial.
- **Seqüência de operações**: sucessão de operações especificadas em determinados intervalos de tempo.

4.2.1 - Classificação dos dispositivos elétricos utilizados em baixa tensão

As funções de um dispositivo de partida de motor são classificadas dentro das seguintes categorias:

- Seccionamento;
- Proteção contra curtos-circuitos e contra sobrecargas;
- Comutação.

4.2.1.1 - Seccionamento

Para intervir com toda a segurança nas instalações, ou nas máquinas e nos equipamentos elétricos, é necessário dispor de meios para isolar eletricamente os circuitos de potência e de comando da alimentação geral. O seccionamento consiste em isolar eletricamente uma instalação da rede que a alimenta, de acordo com os critérios de segurança definidos pelas normas.

Em um equipamento que inclua diversos dispositivos de partida de motor, como é o caso de um CCM (Centro de Comando de Motores), nem sempre é necessário equipar cada um dos dispositivos com um seccionador. Deve-se prever um isolamento geral para que seja possível desligar totalmente o equipamento da energia elétrica. Pode-se, então, considerar dois grandes grupos de equipamentos responsáveis pelo seccionamento:

Seccionadores: são constituídos fundamentalmente por um bloco de contatos e por um dispositivo de comando frontal ou lateral, sendo o fechamento e a abertura comandados manualmente por manopla.

A velocidade de fechamento e abertura depende da ação do operador. A seccionadora **nunca deve ser manobrada com carga** e a corrente deve ser interrompida previamente no circuito de utilização pelo aparelho de comutação previsto para esse efeito (contator ou disjuntor).

Como proteção, os seccionadores podem possuir um contato auxiliar de pré-fechamento ligado em série com a bobina do contator. Abre antes e fecha depois dos pólos do seccionador. Em caso de manobra acidental em carga, interrompe a alimentação da bobina do contator antes que os pólos do seccionador abram. O estado dos contatos deve ser indicado claramente pela posição do dispositivo de comando, por um indicador mecânico independente (interrupção aparente), ou pela visibilidade dos contatos (interrupção visível).

Não deve ser possível, de forma nenhuma, efetuar o travamento com cadeado do seccionador na posição "fechado".

Interruptor: conforme a norma internacional IEC, "o interruptor é um aparelho mecânico de manobra capaz de estabelecer, suportar e interromper correntes nas condições normais do circuito, inclusive nas condições especificadas de sobrecarga em serviço, e de suportar, durante um tempo determinado, correntes em condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito".

A abertura e o fechamento rápido do interruptor são assegurados por um mecanismo ligado ao dispositivo de comando manual, garantindo o fechamento e a abertura brusca dos contatos independentemente da velocidade da manobra do operador. O interruptor é, portanto, um aparelho concebido para ser manobrado em carga com toda a segurança. As suas características são dadas em função de categorias de emprego, que indicam os circuitos cuja alimentação é mais fácil ou mais difícil de estabelecer e interromper, conforme a categoria das cargas que alimentam.

Assim como o seccionador, o interruptor pode ser equipado com um dispositivo de cadeados para travas e com fusíveis.

Dentro dos interruptores também existe a possibilidade de se acrescentar blocos adicionais a um aparelho de base. Assim, é possível completar ou modificar a composição de um aparelho para adaptá-lo exatamente a uma necessidade operacional.

4.2.1.2 - Proteção

Todos os equipamentos que estão conectados a uma rede elétrica estão sujeitos a alguma falha elétrica ou de circunstância que acarreta problemas na rede elétrica. A seguir, temos enumerados alguns tipos de falha que podem ocorrer:

- **Sobretensão, queda de tensão, desequilíbrio ou falta de fases**: causam um aumento da corrente absorvida pelo circuito.
- **Curtos-circuitos**: podem ser de intensidade muito elevada e devem ser controlados a tempo para evitar graves avarias nos componentes do circuito.
- **Rotor bloqueado**: sobrecarga momentânea ou prolongada de origem mecânica que provoca um aumento da corrente absorvida pelo motor e um aquecimento perigoso nos enrolamentos.

Para evitar que esses incidentes causem avarias nos componentes e perturbações na rede de alimentação, os dispositivos de partida dos motores devem ser providos de:

- **Proteção contra curtos-circuitos**: para detectar e interromper o mais rápido possível correntes anormais inferiores a dez vezes a corrente nominal (In).
- **Proteção contra sobrecargas**: para detectar aumentos da corrente até 10In e interromper a partida antes que o aquecimento do motor e dos condutores provoque a deterioração dos isolantes.

De acordo com o tipo de circuito, podem ser previstas proteções complementares, tais como: controle de defeito de isolação, de inversão de fases, falta de fases, de temperatura dos enrolamentos, entre outras. As proteções são feitas pelos seguintes equipamentos: fusíveis, disjuntores, relés de proteção térmica, relés de proteção eletrônica, relés de medição ou aparelhos que integrem múltiplas funções.

4.2.1.3 - Comutação

A comutação consiste em estabelecer, interromper e, no caso da variação de velocidade, regular o valor da corrente absorvida por um motor.

Conforme as necessidades, essa função é assegurada pelos seguintes componentes:

- **Eletromecânicos**: contatores, disjuntores-motor;
- **Eletrônicos**: relés e contatores estáticos, partidas progressivas, conversores de freqüência.

4.3 - Fusíveis

São componentes de circuito de alimentação, que têm como função a **proteção contra curto-circuito**. Além de protegerem as linhas alimentadoras, protegem os próprios dispositivos de comando em caso de um curto-circuito interno, atuando também como limitadores das correntes de curto-circuito. Sua operação é baseada em um elemento fusível devidamente projetado que abre o circuito, interrompendo-o na ocorrência de uma falha.

O curto-circuito é caracterizado como uma ligação de baixa impedância entre duas potências elétricas diferentes, e em corrente alternada pode ser entre fases, entre fase e neutro ou entre fase e terra. Pode ser originado por diversos fatores, como: falta de aperto de componentes, ruptura ou falha de isolação de condutores ou cabos, penetração de água ou outros líquidos condutores, entre outros.

O elemento fusível é basicamente um fio ou uma lâmina, geralmente de cobre, prata, estanho, chumbo ou liga, alocado no interior do corpo do fusível, em geral, de porcelana e hermeticamente fechado. A maioria dos fusíveis possui um indicador que permite verificar a integridade do elo fusível, sendo composto por um fio, geralmente de aço, ligado em paralelo com o elemento fusível e que libera uma mola após sua operação, liberando um sinalizador externo preso ao corpo do fusível.

No seu interior, os fusíveis possuem um material granulado chamado extintor, onde geralmente se usa areia de quartzo de granulometria conveniente. Na figura 4.5 há uma representação de um fusível genérico:

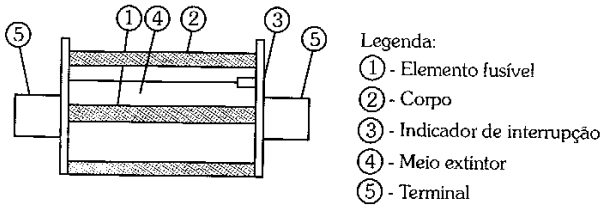


Figura 4.5 - Elementos de um fusível.
(Fonte: Instalações Elétricas: Ademaro Cotrim)

O elemento fusível pode assumir diversas formas, de acordo com a sua corrente nominal, e pode ser composto por um ou mais fios de lâminas em paralelo, com trechos de seção reduzida. No fusível há um ponto de solda em que a temperatura de fusão é menor que a do elemento fusível.

Quando o fusível está operando em regime permanente, o condutor e o elemento fusível são percorridos por uma mesma corrente que produz aquecimento. A temperatura do condutor atinge um valor de θ_1. Por possuir uma alta resistência elétrica, o fusível tem um aquecimento maior θ_2, resultando em uma alta temperatura no ponto médio do elemento fusível, como mostra a figura 4.6.

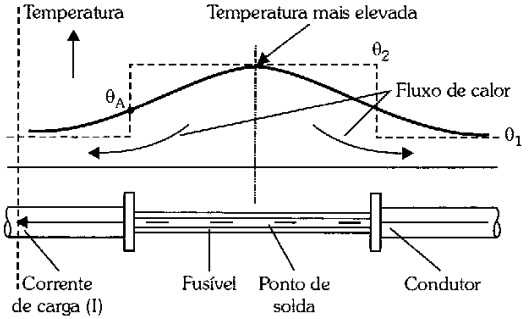


Figura 4.6 - Característica de temperatura no interior de um fusível. (Fonte: Instalações Elétricas: Ademaro Cotrim)

A temperatura decresce desde o ponto médio até as extremidades do elemento fusível. Os pontos de conexão não estão submetidos à mesma temperatura do ponto médio, entretanto possuem uma temperatura maior que a dos condutores. A temperatura θ_A não deve ultrapassar um valor determinado por norma para não prejudicar a vida útil da isolação dos condutores. A corrente que pode percorrer o fusível sem que esse valor seja ultrapassado chama-se *corrente nominal do fusível*. Um valor acima do nominal causa um rompimento do elemento fusível de acordo com a sua curva de atuação, ocasionando a abertura do circuito.

Quando a corrente que percorre o fusível é muito superior à nominal, como, por exemplo, dez vezes, o trecho de seção reduzida do elo fusível funde antes do ponto de solda em razão da alta corrente que o percorre.

Quando ocorre a fusão, o elemento fusível está interrompido mecanicamente, porém a corrente não é interrompida plenamente, sendo mantida por um arco elétrico. A fusão e o arco elétrico provocam a evaporação do material metálico do elo. O arco é envolvido pelo elemento extintor, vaporiza e o vapor do metal é empurrado contra a areia, onde a grande parte do arco é extinta. A areia penetra e retira a energia calorífica do arco, extinguindo-o.

4.3.1 - Aspectos construtivos dos fusíveis

Para especificar corretamente um fusível, deve-se fundamentar a escolha na descrição de cada um dos seus componentes:

Base: nos desenhos podemos notar que a corrente circulante entra pela base e circula até o contato externo do fusível através de uma superfície de contato entre os metais do contato da base e do contato externo do fusível.

Deve-se ter um cuidado especial com essas superfícies no que diz respeito à oxidação, pois se assim estiverem, a corrente que circula por elas acarreta uma elevação de temperatura que mascara **a curva tempo x corrente** que, obrigatoriamente, caracteriza um fusível.

É fundamental a escolha de um metal ou liga metálica utilizada na construção dos respectivos contatos, de modo que é preciso usar **metais que não oxidem**, ou que oxidem muito lentamente. Uma das soluções é a da **prateação** das peças de contato, pois sabemos que a prata é o melhor condutor elétrico e que sua oxidação é lenta.

Elemento fusível: para evitar a alteração do seu valor nominal, esse elemento é encapsulado, sendo garantida a segurança de sua atuação conforme previsto em projeto. Para isso, o fusível é todo envolvido por um corpo externo cerâmico, com fechamento metálico nas suas duas extremidades.

Quando a circulação da corrente de curto-circuito (cujo valor, como vimos, é 10 a 15 vezes superior a In), através do elemento fusível, atinge uma temperatura de fusão superior à do metal utilizado na construção desse componente, ato em que se abre um arco elétrico com uma temperatura superior a 5000°C, precisa ser rapidamente extinto. O elemento fusível, para desempenhar sua ação de interrupção de acordo com uma característica de fusão tempo x corrente perfeitamente definida, deve ser fabricado de um metal que permita a sua calibração com alta precisão.

O metal deve ser homogêneo, de elevada pureza e de dureza apropriada.

Corpo cerâmico: é responsável pelo envolvimento de todas as partes internas do fusível. Como tal, fica sujeito ao aquecimento que ocorre no instante da fusão.

O material usado no corpo cerâmico deve ser isolante **e permanecer isolante após a fusão do elemento fusível**; caso contrário, pode se formar um novo circuito condutor de corrente, após a fusão do elemento fusível. O material também deve suportar elevadas temperaturas, sem alterar as suas propriedades isolantes, pois alguns materiais, quando submetidos a altas temperaturas, perdem as suas características isolantes. Também deve suportar bem as pressões de dentro para fora, que aparecem no ato da fusão do elemento fusível proveniente da dilatação do meio extintor e de gases internos, sendo recomendáveis **cerâmicas isolantes do tipo porcelana ou esteatita**.

4.4 - Características dos fusíveis

Além da corrente nominal, os fusíveis têm como classificação a faixa de interrupção ou classe de função representadas pelas letras minúsculas ***g*** e ***a*** (categoria de utilização representada por letras maiúsculas). As classes de função são descritas a seguir:

- **g**: fusíveis que suportam a corrente nominal por tempo indeterminado e são capazes de operar a partir do menor valor de sobrecorrente até a corrente nominal de desligamento. Eles atuam na menor intensidade de sobrecorrente, sendo considerados **fusíveis de faixa completa**.

- **a**: fusíveis que suportam a corrente nominal por tempo indeterminado e são capazes de desligar a partir de um determinado múltiplo do valor da corrente nominal até a corrente nominal de desligamento. Esse tipo de fusível reage a partir de um valor elevado de sobrecorrente, sendo considerado **fusível de faixa parcial.**

As classes de objetos protegidos são:

- **L-G**: cabos e linhas/proteção geral;
- **M**: equipamentos eletromecânicos;
- **R**: semicondutores;
- **B**: instalações em condições pesadas (minas).

Os fusíveis devem ser especificados por **classes de serviço**, que são compostas de classe de função e classe de objeto protegido e são representados por duas letras:

- **gL**: proteção total de cabos e linhas;
- **aM**: proteção parcial de equipamentos eletromecânicos;
- **aR**: proteção parcial de equipamentos eletrônicos;
- **gR**: proteção total de equipamentos eletrônicos;
- **gB**: proteção total de equipamentos em minas.

Geralmente se empregam fusíveis da classe de serviço aM, pois a característica dessa proteção é ter um efeito atrasado já que a corrente de partida de um motor é diversas vezes a corrente nominal.

4.4.1 - Tipo D

O diametral (*Diazed/Simens*) é utilizado em residências ou na indústria. É indicado para correntes nominais de 2 a 63 A, capacidade de ruptura de 50 kA e tensão máxima de 500 V.

Na figura 4.7 temos a representação de um fusível diametral.

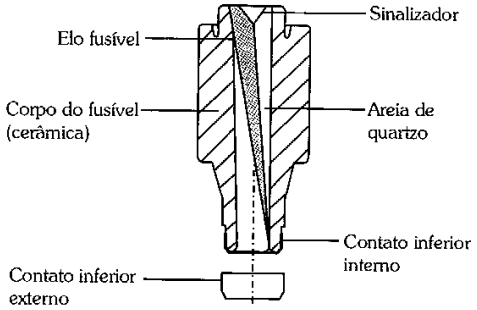


Figura 4.7 - Representação de um fusível diametral.

4.4.1.1 - Partes constituintes do fusível D

Fusível: parte substituível após a sua operação que contém o elo fusível que se funde quando percorrido por uma corrente maior que um valor de referência durante um tempo especificado. O fusível também possui extremidades metálicas em uma das quais está localizada a espoleta que indica que ocorreu a fusão.

Base: parte fixa do dispositivo constituída de porcelana em que é conectada a entrada/saída de energia por meio de contatos e terminais e aloja todos os componentes da segurança D.

Tampa: de porcelana com um corpo metálico roscado. Sua função é fixar o fusível à base.

Anel de proteção: elemento de porcelana num formato de anel que tem por função evitar a possibilidade de um contato acidental na troca do fusível.

Parafuso de ajuste: dispositivo de porcelana com parafuso metálico que faz a união de entrada de energia elétrica para o fusível e tem como função impedir o uso de fusível de capacidade de corrente superior à indicada.

Sinalizador: como o fusível D é encapsulado, existe uma aparente dificuldade em verificar se está perfeito ou danificado devido ao invólucro. Essa dificuldade é superada pela verificação do posicionamento do sinalizador de fusão. Quando o indicador de fusão está retraído na sua posição de montagem, o fusível está perfeito e quando está ejetado (no caso do tipo D), o fusível está "queimado" e precisa ser substituído.

A figura 4.8 apresenta as partes do fusível D.

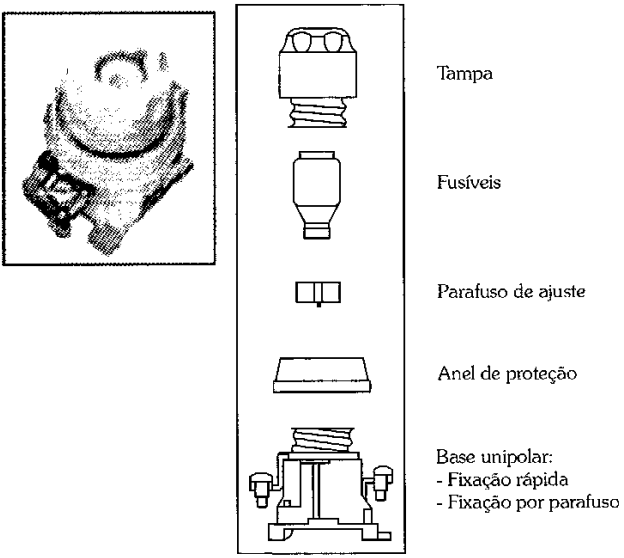


Figura 4.8 - Partes constituintes do fusível D.

4.4.2 - Tipo NH

É um fusível de alta capacidade para uso industrial. É construído para corrente normalizada de 4 a 630 A, capacidade de ruptura de 120 kA e tensão máxima de 500 V. São próprios para proteger os circuitos que, em serviço, estão sujeitos a sobrecargas de curta duração, como, por exemplo, na partida direta de motores trifásicos com rotor em gaiola, mantendo as suas características conforme as suas curvas tempo x corrente resistentes à fadiga quando submetidos a sobrecargas pequenas de longa duração.

Outra característica importante é a limitação da intensidade das correntes de curto-circuito em virtude do seu pequeno tempo de fusão (< 4 ms).

O termo NH é de origem alemã, e as letras representam:

- **N**: *Niederspannung* - baixa tensão;
- **H**: *Hochleistung* - alta capacidade.

Segue tabela com seus respectivos códigos e capacidades de interrupção de corrente:

Código do fusível	Capacidade de interrupção (A)
NH 00	4 a 160 A
NH 1	50 a 250 A
NH 2	125 a 400 A
NH 3	315 a 630 A

Tabela 4.1 - Capacidades de interrupção de corrente em relação aos códigos do fusível NH.

4.4.2.1 - Partes constituintes do fusível NH

Base: material de construção à base de esteatita. Possui contatos em forma de garras prateadas pressionadas por molas.

Fusível: corpo retangular de porcelana com extremidades metálicas em forma de faca. No interior do corpo de porcelana encontram-se o elo fusível e o elo indicador de queima, imersos em areia especial de granulometria adequada que tem como função a extinção do arco voltaico.

Os fusíveis NH também contam com acessórios, como punho saca-fusível e placa divisória para facilitar o manuseio e garantir a proteção, como indica a figura 4.9.

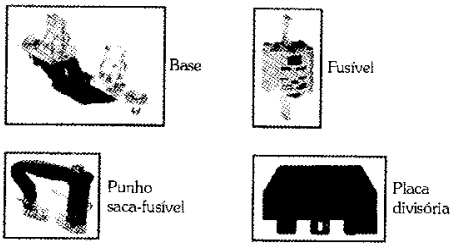


Figura 4.9 - Partes constituintes do fusível NH.

O fusível é composto de:

Elo fusível: feito de cobre em forma de lâminas vazadas em determinados pontos a fim de reduzir a seção condutora.

Elo indicador de queima: constituído por um fino fio ligado em paralelo com o elo fusível. Quando o elo fusível se funde, este também se funde, provocando o desprendimento da espoleta.

A figura 4.10 exibe um fusível NH com seus principais elementos.

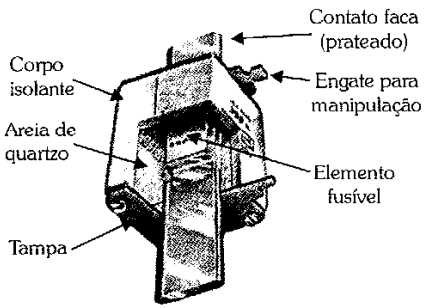


Figura 4.10 - Fusível NH.
(Cortesia WEG)

4.4.3 - Dimensionamento dos fusíveis

No dimensionamento dos fusíveis retardados, deve-se levar em consideração os seguintes aspectos:

1. **Tempo de fusão virtual (exemplo para um motor: tempo e corrente de partida)**: os fusíveis devem suportar sem fundir o pico de corrente de partida (Ip) durante o tempo da partida do motor (Tp). Com os valores de Ip e Tp entramos na curva para dimensionar o fusível.
2. $\mathbf{I_{Fusível} = 1,2 \cdot I_{Nominal}}$: deve-se dimensionar para uma corrente no mínimo 20% superior à corrente nominal (In) do motor que protege, evitando que um envelhecimento prematuro ocorra, aumentando a sua vida útil.
3. **Quanto ao critério dos contatores e relés:** $\mathbf{I_{Fusível} <= I_{Fmáx}}$: os fusíveis de um circuito de alimentação devem também proteger os contatores e relés de sobrecarga. Essa verificação é feita em tabelas de contatores de relés de sobrecarga.

4.4.3.1 - Exemplo de cálculo

Dimensionar os fusíveis para proteger o motor de 5 cv, 220 V/60 Hz de quatro pólos, supondo que o seu tempo de partida seja de cinco segundos (partida direta):

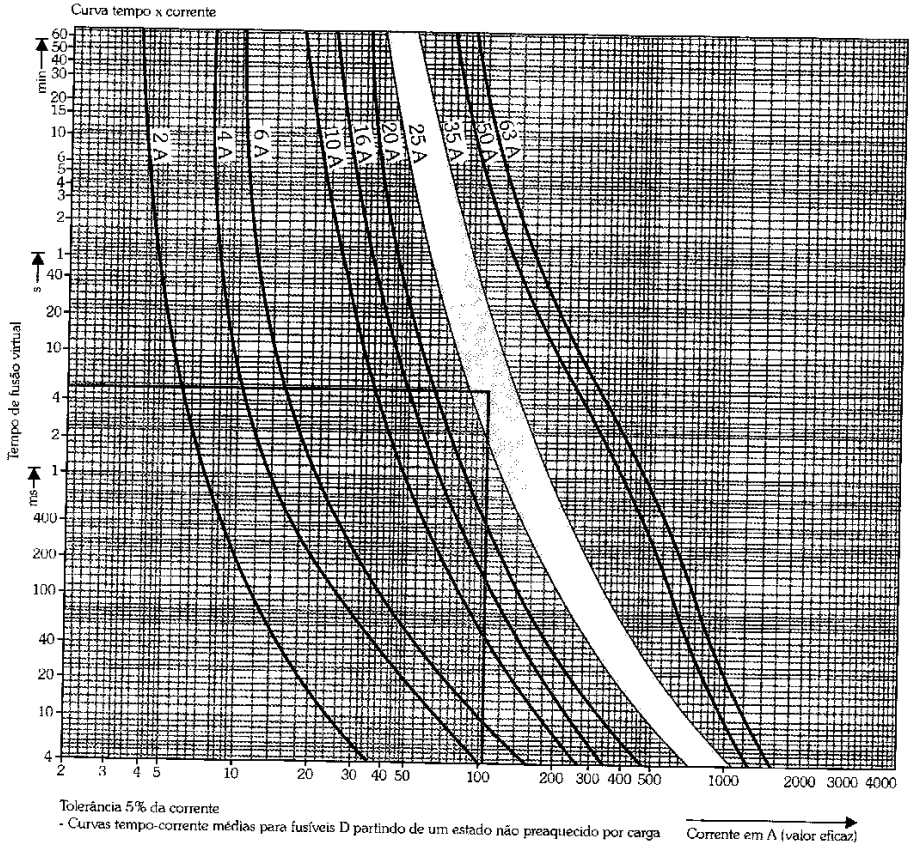
Resolvendo:

Pelo catálogo temos:

$$Ip/In = 8,2 \qquad In = 13,8\ A$$

$$Ip = 8,2 \times 13,8\ A = 113,16\ A$$

Seguimos a curva característica do fusível de posse dos valores de Ip e Tp:



a) Com o valor de 113,16 A e o tempo de partida de cinco segundos, observamos que o valor do fusível é de 35 A.

b) Levando em consideração o segundo critério:

If >= 1,2 x In Logo, If >= 16,56 A

Assim, o fusível de 35 A atende ao segundo critério.

4.4.4 - Fusíveis ultra-rápidos

Os fusíveis ultra-rápidos são indicados para a proteção de diodos e tiristores, sendo na prática recomendados para retificadores e conversores de freqüência.

A proteção de conversores estáticos contra sobrecorrentes durante períodos prolongados é feita por dispositivos de proteção convencionais, como relés bimetálicos, disparadores rápidos de sobrecorrente e relés de sobrecorrentes de tempo inverso.

A proteção dos diodos e tiristores em equipamentos retificadores, principalmente contra curto-circuito, é feita por meio de fusíveis ultra-rápidos. A atuação dos fusíveis pode-se dar por três fatores:

- **Curto-circuito interno**: um componente defeituoso produz um curto-circuito no conversor.
- **Curto-circuito externo**: uma falha no consumidor pode produzir um curto-circuito no conversor.
- **Defeito durante a operação (frenagem regenerativa)**: no caso de falhas do sistema de controle do conversor atuando como inversor (que ocasionam falhas de comutação) a ponte retificadora dá origem à configuração similar à de um curto-circuito entre a rede corrente trifásica e a malha de corrente contínua.

A instalação dos fusíveis deve ser feita entre o ramal de alimentação e os dispositivos a serem protegidos.

4.5 - Considerações finais sobre os fusíveis

As correntes nominais dos fusíveis expressas em ampères devem ser escolhidas entre os seguintes valores:

Correntes nominais dos fusíveis (A)												
2	4	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50	63
80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	100	1250

Tabela 4.2 - Valores comerciais dos fusíveis.

Assim, podemos resumir as principais características dos fusíveis:

- Operação simples;
- Geralmente de baixo custo;
- Não possuem capacidade de realizar manobras, sendo então associados a chaves;
- São dispositivos unipolares suscetíveis a causar danos a motores pela possibilidade de operação desequilibrada;
- Possuem característica tempo-corrente não-ajustável, sendo possível a alteração somente pela troca do fusível por outro de corrente nominal distinta, ou tipo de fusível;
- Não são de operação repetitiva e devem ser trocados após a atuação;
- Constituem fundamentalmente proteção contra correntes de curto-circuito, sendo mais rápidos que os disjuntores para sobrecorrentes elevadas e lentos para pequenas sobrecorrentes;
- Podem apresentar defeitos sob a ação de correntes elevadas que sejam interrompidas (por outros dispositivos) antes de provocar a sua fusão. Nessas condições, existe a possibilidade de atuação indevida, sob a ação de uma corrente após esse evento, podendo interromper desnecessariamente o circuito;
- Não têm uma curva tempo x corrente bem definida, mas uma faixa provável de atuação.

4.6 - Relés de sobrecarga

A sobrecarga é o defeito que se produz mais freqüentemente nas máquinas. Definida como uma situação que leva a um superaquecimento por perda Joule, que os materiais utilizados somente suportam até um determinado valor e por tempo limitado. A determinação de ambas as grandezas é feita em norma técnica do referido produto.

Ocorrendo devido a um aumento da corrente absorvida pelo motor e por efeitos térmicos, sempre que a temperatura limite de funcionamento é ultrapassada, o tempo de vida útil do motor é reduzido por envelhecimento prematuro dos isolantes. Por exemplo: o tempo de vida de um motor é reduzido em 50% se a temperatura de funcionamento for superior a 10°C, em regime permanente, à temperatura definida pela classe de isolamento. Então, uma sobrecarga que provoque um aquecimento superior ao normal não terá efeitos imediatos se for limitada no tempo e pouco freqüente. Para tanto, é necessário uma parada do motor e restabelecer as condições normais de funcionamento.

Quando ultrapassados esses valores, o isolante inicia um processo de deterioração, o que significa perder suas características iniciais, sua rigidez dielétrica, que define a capacidade de isolação. É função do relé de sobrecarga atuar antes que esses limites de deterioração sejam atingidos, garantindo uma vida útil apropriada aos componentes do circuito.

O relé de sobrecarga pode ser definido como um dispositivo de proteção cuja operação é baseada em um método indireto de detecção de sobrecarga em motores, em que é criado um modelo térmico do motor a ser protegido por um elemento térmico. Um relé térmico tripolar tem três bimetálicos, sendo cada um deles constituído por dois metais unidos por laminação com diferentes coeficientes de dilatação e um enrolamento de aquecimento em volta de cada bimetálico. Cada um dos enrolamentos de aquecimento está ligado em série com uma das fases do motor. O aquecimento dos enrolamentos provoca uma deformação nos bimetálicos.

A figura 4.11 exibe o princípio de funcionamento dos relés:

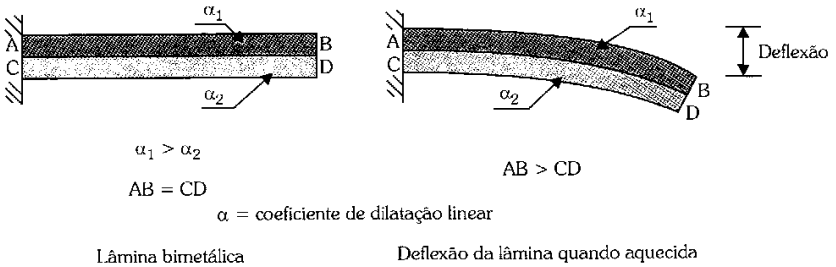


Figura 4.11 - Princípio de funcionamento do relé de sobrecorrente.

A deformação é maior ou menor, conforme o valor da corrente. A atuação do dispositivo é produzida pelo movimento relativo de elementos mecânicos com diferentes coeficientes de dilatação (termopares - dilatação dos metais de acordo com a variação da temperatura), sob a ação de determinados

valores de correntes de entrada (sobrecorrente), em que duas lâminas de metais diferentes estão ligadas através de solda ou sob pressão e quando aquecidas, dilatam-se diferentemente, curvando o conjunto, que provoca dois efeitos:

Liberação do dispositivo de trava: que ocasiona a abertura dos contatos principais do relé de sobrecarga.

Abertura de um contato fechado: que causa a abertura do circuito de comando de um acionamento do motor.

São utilizados para proteger motores e transformadores de possíveis superaquecimentos ocasionados por:

- Sobrecarga mecânica;
- Tempo de partida muito alto;
- Rotor bloqueado;
- Falta de fase;
- Elevada freqüência de manobra;
- Desvio de tensão e de freqüência.

Para supervisionar o motor, é colocado um elemento térmico em cada condutor de fase, assim o modelo térmico de motores trifásicos consiste em três elementos térmicos, sendo um para cada fase.

O relé térmico não protege a linha em caso de curto-circuito e deve ser associado a fusíveis de proteção para prover a proteção completa da partida do motor.

Um relé disparado uma vez não volta à sua posição de repouso automaticamente, devendo ser rearmado manualmente. Isso é fundamental para evitar uma alimentação inesperada do motor após ser desligado pela ação do relé térmico. Também existem dispositivos que permitem o desligamento e rearme remoto dos relés térmicos. O rearme só pode ser feito quando os bimetálicos estiverem suficientemente frios.

Os fabricantes dos contatores já oferecem os relés térmicos que encaixam mecanicamente nos contatores por eles fabricados, sendo as três entradas das respectivas fases dos relés térmicos ligadas diretamente nos contatos de carga do contator. Este é o tipo mais comum de conexão do rele térmico.

Compensação da temperatura ambiente: a deformação dos bimetálicos resulta do aquecimento provocado pela corrente que circula nas fases e também das variações da temperatura ambiente. Para minimizar esse efeito, existe um bimetálico de compensação, influenciado unicamente pelas variações de temperatura do ar ambiente. Somente a deformação originada pela corrente pode modificar a posição dos bimetálicos e provocar o disparo do relé. De uma maneira geral, um relé térmico compensado é insensível às variações de temperatura ambiente entre -40°C e + 60°C.

Classes de desligamento térmico: os relés térmicos protegem os motores contra sobrecargas, porém na partida temos um pico de corrente e os relés devem deixar passar a sobrecarga temporária resultante do pico de corrente de partida e disparar unicamente se esse pico, isto é, o tempo de partida, for prolongado. Dependendo das aplicações, o tempo normal de partida dos motores pode variar de alguns segundos (partida a vazio, baixo conjugado resistente da máquina, entre outros) a algumas dezenas de segundos (máquinas com uma grande inércia). Sendo assim, são necessários relés adaptados ao tempo de partida de acordo com as seguintes classes de disparo:

- **Relés classe 10**: aplicações com tempo de partida inferior a 10 segundos;
- **Relés classe 20**: aplicações com tempo de partida de até 20 segundos;
- **Relés classe 30**: aplicações com tempo de partida de até 30 segundos.

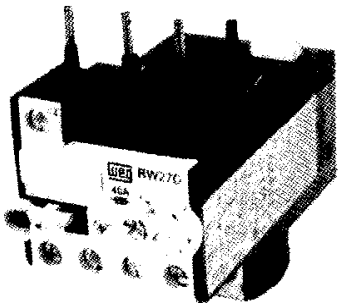


Figura 4.12 - Relé de sobrecorrente.
(Cortesia WEG)

Os relés de sobrecorrente possuem os seguintes elementos:

1. Botão de rearme;
2. Contatos auxiliares;
3. Botão de teste;
4. Lâmina bimetálica auxiliar para compensação de temperatura;
5. Cursor de arraste;
6. Lâmina bimetálica principal;
7. Ajuste de corrente.

A figura 4.13 mostra com detalhes esses elementos.

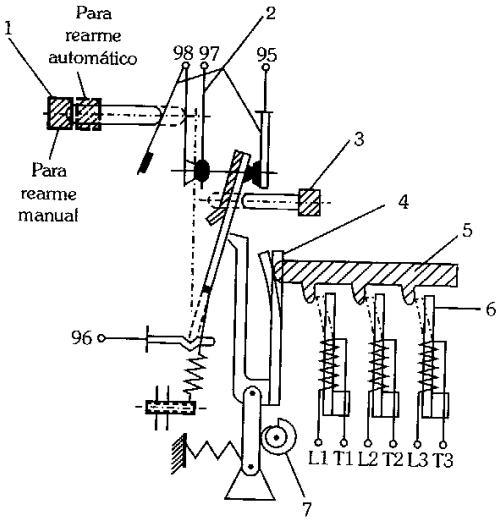


Figura 4.13 - Elementos de um relé de sobrecorrente.

Além dos elementos mostrados anteriormente, por meio de um botão localizado na parte frontal do relé, é possível parametrizar a sua atuação de acordo com as seguintes funções:

- **A**: somente rearme automático;
- **Auto**: rearme automático e possibilidade de teste;
- **Hand**: rearme manual e possibilidade de teste;
- **H**: somente rearme manual.

A figura 4.14 mostra um detalhe desse modo de parametrização.

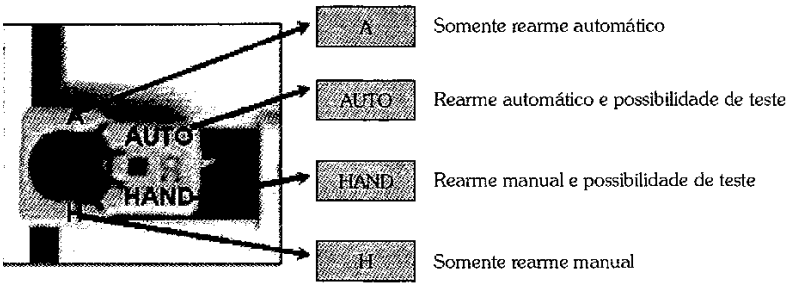


Figura 4.14 - Parametrização do relé de sobrecorrente.

4.6.1 - Representação dos relés de sobrecorrente

Além dos contatos de força, os relés possuem contatos auxiliares para interrupção da corrente no circuito de comando, conforme a figura 4.15.

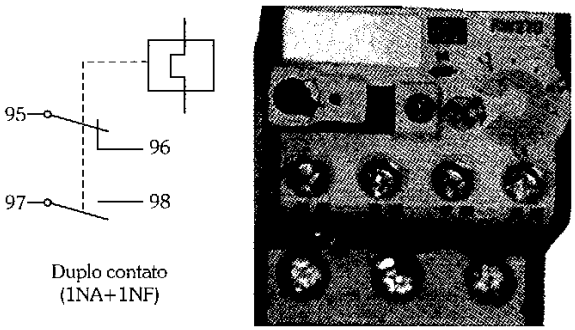


Figura 4.15 - Contatos auxiliares de um relé de sobrecorrente.

4.6.2 - Dimensionamento

Os relés devem ser dimensionados de forma que contenham em sua faixa de ajuste a corrente nominal (In) que circula pelo trecho onde está ligado, sendo o ajuste feito por um botão que gira atuando sobre o alongamento ou sobre a curvatura das lâminas bimetálicas. Cada relé cobre apenas uma faixa de corrente determinada, assim, cada fabricante fornece uma grande variedade de relés de proteção.

O relé não deve ser dimensionado com a corrente nominal do circuito situada no extremo superior de sua faixa de ajuste, pois se houver necessidade de o motor ser usado com fator de serviço acima de 1, o relé não permitirá tal corrente mesmo que o motor suporte essa situação. O ajuste de corrente nos relés deve ser feito da seguinte maneira:

$$Ir = 1,15 \text{ até } 1,25.In$$

Sendo:

In: corrente nominal do motor

Ir: corrente de ajuste do relé térmico

No caso de motores com fator de serviço igual ou superior a 115% ou motores com uma elevação de temperatura admissível de 40°C, o ajuste pode ser até 125% da corrente nominal (1,25.In). Nos demais casos, os relés térmicos devem ser ajustados em 115% da corrente nominal (1,15.In).

Também deve ser feita esta análise relativa ao extremo inferior em que o relé teria dificuldades para detectar falta de fase quando o motor estivesse trabalhando abaixo de 60% de sua corrente nominal, portanto devemos regular o relé para a corrente de trabalho do motor.

4.7 - Disjuntores motores

Os disjuntores motores são simultaneamente dispositivos de proteção e manobra, exercendo as seguintes funções:

- São empregados para efetuar a proteção elétrica do circuito com a detecção de sobrecorrentes e da abertura do circuito.
- Permitem comandar, por meio da abertura e fechamento voluntário sob cargas, seus respectivos circuitos em que são instalados.

A figura 4.16 mostra um disjuntor motor comercial.

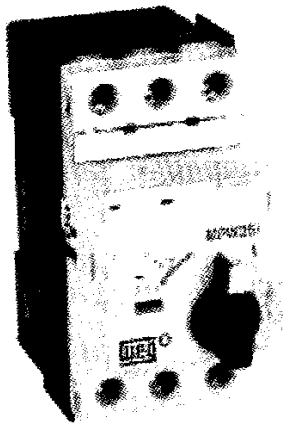


Figura 4.16 - Disjuntor motor.
(Cortesia WEG)

4.7.1 - Características básicas

- Ao contrário dos fusíveis, apresentam atuação multipolar, evitando a operação desequilibrada nos equipamentos trifásicos, como no caso do fusível, de ocorrer a queima de um único elemento.
- Oferecem larga margem de escolha de correntes nominais, e em muitos casos podem admitir ajustes nos disparadores, o que, além de ampliar a margem de escolha, simplifica a coordenação com outros dispositivos de proteção.
- Operação repetitiva, isto é, podem ser religados após terem atuado, sem necessidade de substituição.
- Sua característica tempo x corrente, além de ajustável em muitos casos, não é afetada por correntes que provocaram outros disparos.
- Em alguns casos, permite comando a distância.

Os disjuntores possuem como via de regra dois níveis de proteção:

- Contra sobrecorrentes pequenas e moderadas através de disparadores magnéticos ou térmicos;
- Contra correntes de curto-circuito através de disparadores eletromagnéticos.

4.7.2 - Dispositivos de partida com disjuntor motor

É recomendado o uso do disjuntor motor em partidas de motores somente nos seguintes casos:

- Comando deve ser local;
- Freqüência de operação é baixa;
- Pouco espaço, pois o disjuntor atende às necessidades de comutação e proteção de sobrecargas e curtos-circuitos.

***Observação**: É recomendável, sempre que possível, a associação do disjuntor motor com o contator.*

4.8 - Contatores

Os contatores são os elementos principais de comandos eletromecânicos, que permitem o controle de elevadas correntes por meio de um circuito de baixa corrente. O contator é caracterizado como uma chave de operação não-manual, eletromagnética, com uma única posição de repouso, capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito. É constituído de uma bobina que, quando é alimentada, cria um campo magnético no núcleo fixo que atrai o núcleo móvel que fecha o circuito. Cessando a alimentação da bobina, é interrompido o campo magnético, provocando o retorno do núcleo por molas. Assim, podemos distinguir as quatro principais partes de um contator:

Bobina: representa a entrada de controle do contator que, ao ser ligada a uma fonte de tensão, circula na mesma corrente elétrica que cria um campo magnético que envolve o núcleo de ferro.

As bobinas são partes dos contatores que devem ser escolhidas de acordo com a tensão e o tipo de energia de alimentação (CC ou CA) dos circuitos de controle dos comandos elétricos. Há uma grande variedade de bobinas à disposição com diversas tensões (24 V a 660 V) tanto para corrente contínua quanto para corrente alternada.

O consumo de energia das bobinas é relativamente baixo. Ocorre um pico de corrente no momento da energização (aproximadamente dez vezes a corrente de retenção), sendo o consumo da bobina estimado em 6,5 VA e 25 VA, dependendo do tipo de contator. A bobina possui um cosφ de aproximadamente 0,3.

Núcleo de ferro: atraído para dentro da bobina pelo campo magnético, está acoplado ao contato e, conseqüentemente, o movimento do núcleo aciona o contato.

Contato: é acionado pelo núcleo de ferro e está acoplado a uma mola que tende a levá-lo à posição de repouso, porém quando a bobina é energizada, a força do campo magnético é maior que a da mola, fazendo com que o núcleo fixo atraia o núcleo móvel.

Mola: elemento responsável por levar de volta o contato à posição de repouso quando a bobina é desconectada da fonte, quando cessa o campo magnético e a mola torna-se mais forte que o núcleo.

A figura 4.17 representa o esboço de um contator.

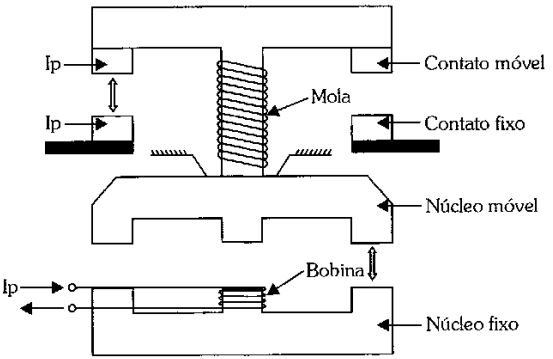


Figura 4.17 - Contator.

A figura 4.18 mostra a simbologia de um contator utilizada em diagramas multifilares. Observe que contém o símbolo de atuação eletromecânica (tracejado), linha de acoplamento direto e contatos de força:

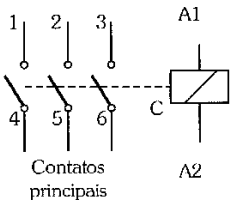


Figura 4.18 - Simbologia do contator.

A denominação dos terminais da bobina é sempre A1/A2 e a dos contatos depende da sua finalidade. Nesse caso, temos a numeração 1, 2, 3, 4, 5 e 6 para os contatos de força.

Cada contator é geralmente equipado com três, quatro ou cinco contatos, sejam eles de força, auxiliares ou mistos. Os terminais pertencentes a um mesmo elemento de contato devem ser marcados com o mesmo número de seqüência e todos os contatos de mesma função devem ter um número diferente de seqüência, como na figura 4.19.

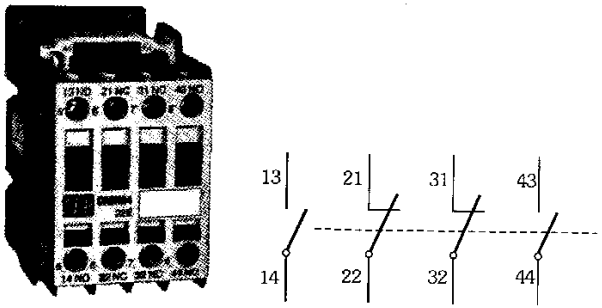


Figura 4.19 - Contator e sua representação de contatos.

Além disso, existe a possibilidade de acrescentar blocos adicionais de contatos auxiliares para aumentar o número de contatos auxiliares disponíveis. Assim, podemos definir os dois tipos principais de circuitos utilizados em acionamentos eletromecânicos:

- **Circuito principal**: formado pelos contatos principais e terminais. Tem a função de conduzir a corrente de operação quando os contatos principais estiverem em estado fechado.
- **Circuito auxiliar**: aciona os dispositivos de manobra. É utilizado para fins de comando, trava e sinalização. Seus principais componentes são a bobina e o contato auxiliar que é acionado mecanicamente pelo contator.

4.8.1 - Categorias de emprego dos contatores

Os contatores de força devem ser compatíveis com a potência de carga, pois a capacidade de conduzir e comutar corrente é a sua principal função. Sendo assim, os contatores devem ser escolhidos de acordo com o tipo de carga que vão acionar; caso contrário, terão a sua vida útil reduzida. A classificação

dos contatores é feita de acordo com categorias de emprego dos contatores, que dependem dos seguintes fatores:

- **Natureza do receptor controlado**: motor de gaiola ou anéis, resistências;
- **Condições nas quais se efetuam os fechamentos e aberturas**: motor em regime ou com rotor bloqueado, inversão do sentido de rotação.

A seguir, temos elencadas as categorias de emprego dos contatores.

4.8.1.1 - Categorias de emprego em corrente alternada

As cargas elétricas ou eletromecânicas, conectadas a um circuito elétrico, apresentam características elétricas distintas.

Podemos classificar as cargas em três grandes grupos dos quais um sempre predomina em cada componente/equipamento com relação ao outro. São elas:

Cargas essencialmente indutivas: como, por exemplo, motores elétricos. Embora exista a presença de um certo efeito resistivo, manifestado pela existência das perdas Joule, comprova-se que, ao lado dessa carga indutiva, coexiste uma com menor magnitude que é a carga resistiva.

Cargas essencialmente resistivas: como, por exemplo, em fornos elétricos e lâmpadas incandescentes.

Cargas essencialmente capacitivas: como as encontradas nos capacitores, apesar da presença, em menor intensidade, de cargas indutivas ou resistivas nesse componente.

A seguir há uma análise mais detalhada de cada uma das três formas de curvas de carga.

Cargas indutivas: têm como característica uma corrente de partida, algumas vezes maior que a nominal. A corrente reduz sua intensidade à medida que o tempo é transcorrido; no caso do motor, quando ele começa a adquirir velocidade.

No gráfico temos, no eixo dos tempos, a unidade de medida "segundo", e no eixo das correntes, o múltiplo da corrente nominal (x*In*). Essa corrente maior é conseqüência da necessidade de uma potência maior no início do funcionamento do motor, para vencer as inércias mecânicas ligadas ao seu eixo,

que em última análise são as apresentadas pela máquina mecânica que o motor deve movimentar. Assim que for vencida a inércia, o motor reduz a corrente e alcança o seu valor nominal (*In*).

Devido ao fato de a corrente de partida ser maior que a nominal, surgem **perdas elétricas e flutuações na rede**, que precisam ser controladas.

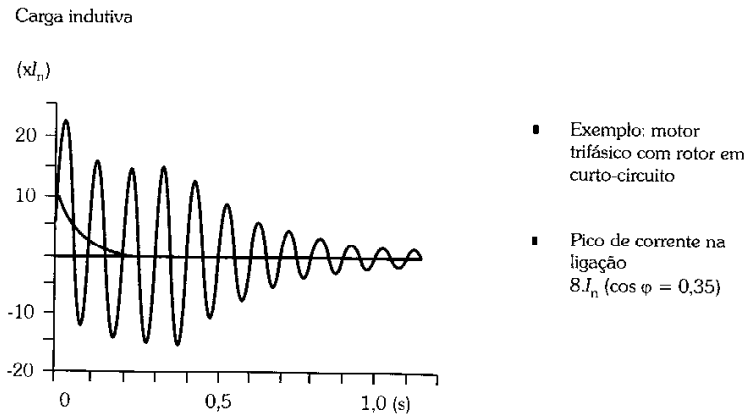
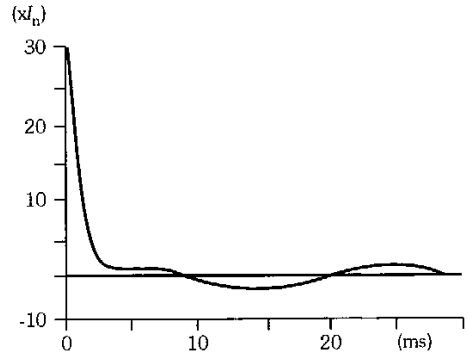


Figura 4.20 - Comportamento de carga indutiva.

Cargas resistivas: nesse tipo de carga temos a evolução da relação tempo x corrente de um modo totalmente diferente do que ocorre em cargas indutivas.

De acordo com o gráfico, no eixo dos tempos a escala é de milissegundos, o que mostra que a duração de um pico inicial de corrente é muitíssimo menor. Portanto, serão menores os efeitos daí resultantes, como é o caso do aquecimento, no eixo da corrente, que novamente é o múltiplo da corrente nominal (x*In*). Entretanto, o pico de corrente é bem maior, chegando a valores da ordem de 20 vezes o valor nominal.

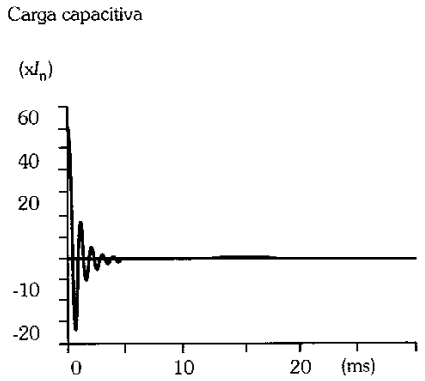
Apesar disso, o produto corrente x tempo se apresenta bem menos crítico do que no caso das cargas indutivas. Quando verificarmos as informações relativas à capacidade de manobra de contatores, o valor numérico da corrente *Ie*/AC-1 de um dado contator é sensivelmente maior do que perante cargas motoras (*Ie*/AC-2 e AC-3), como mostrado na figura 4.21.



- Exemplo: resistência para aquecimento
- Pico de corrente na ligação $20.I_n$ (em poucos milissegundos)

Figura 4.21 - Comportamento de carga resistiva.

Cargas capacitivas: na curva de carga desse tipo teremos, sobre eixos de coordenadas, referências de tempo e corrente similares ao caso anterior, alguns picos de sobrecorrente maiores, porém de curta duração. Assim, o efeito de aquecimento e o dinâmico sobre os componentes do dispositivo são relevantes, com um pico de 60 x *In*, o que pode comprometer uma manobra nessa etapa de carga. Por esse motivo os dispositivos de manobra para capacitores precisam ser de tipo especial ou o usuário deve consultar o fabricante sobre o dispositivo de manobra adequado.



- Exemplo: banco de capacitores
- Pico de corrente na ligação (muito elevado) $60.I_n$

(Os contatores básicos devem ser adaptados à manobra de capacitores, diminuindo o efeito de pico através de resistência ou indutâncias ligadas em série).

Figura 4.22 - Comportamento de carga capacitiva.

As diversas categorias de emprego, segundo a norma **IEC 947**, são designadas, em corrente alternada, por AC_. Classificação semelhante é normalizada para corrente contínua por DC_. Para cada uma dessas categorias define-se a capacidade de manobra que um determinado contator apresenta.

AC 1: aplica-se para aparelhos em CA com fator de potência $\geq 0,95$, ou seja, utiliza-se para manobras leves com cargas ôhmicas ou pouco indutivas. Exemplos de aplicação: aquecedores, lâmpadas incandescentes, lâmpadas fluorescentes com fator de potência corrigido etc.

AC 2: esta categoria deve ser utilizada para motores com manobras leves e pode ser utilizada para controlar partida e desligamento em regime e frenagem por contracorrente, bem como partida para motores de anéis coletores.

No fechamento, o contator pode estabelecer a corrente de partida próxima a duas vezes e meia a corrente nominal do motor, sendo que, na abertura, é capaz de interromper a corrente de partida com uma tensão próxima à da rede. Exemplos de aplicação: guinchos, bombas, compressores.

AC 3: esta categoria se aplica aos motores de indução gaiola de esquilo, com interrupção com o motor em regime. No fechamento, o contator suporta a corrente de partida que é de cinco a sete vezes a corrente nominal do motor. Na abertura, interrompe a corrente nominal absorvida pelo motor quando, neste momento, a tensão nos bornes de seus pólos é de aproximadamente 20% da tensão da rede. Exemplos de aplicação: bombas, ventiladores etc.

AC 4: utilizado para manobras pesadas, como partir motores à plena carga, comando intermitente, reversão à plena carga, paradas por contra-corrente (ponte rolantes etc.).

4.8.1.2 - Categorias de emprego em corrente contínua

DC 1: os contatores dessa categoria destinam-se a operar aparelhos com constante de tempo igual ou inferior a 1 mS. Assim, esses contatores devem ser utilizados para acionar cargas ôhmicas ou pouco indutivas.

DC2/DC3: essa categoria de contatores deve ser utilizada para acionamento de motores de corrente contínua com excitação do tipo paralelo (*shunt*). No desligamento, o contator deve ser capaz de interromper a corrente de duas vezes e meia a corrente nominal sob a tensão nominal e, quando ligar, estabelecer a mesma corrente.

DC4/DC5: os contatores desta categoria são aplicados para a partida de motores de corrente contínua com excitação série. No desligamento o contator deve ser capaz de interromper a corrente de duas vezes e meia a corrente nominal sob a tensão nominal e quando ligar, estabelecer a mesma corrente.

4.8.1.3 - Categoria de emprego para circuitos de comando

Corrente alternada

Categoria	Aplicações
AC 12	Acionamento de cargas resistivas e cargas de estado sólido com isolamento por meio de acopladores ópticos
AC 13	Controle de cargas de estado sólido com transformadores de isolação
AC 14	Controle de pequenas cargas eletromagnéticas (≤ 72 VA)
AC 15	Acionamento de cargas eletromagnéticas (≥ 72 VA)

Tabela 4.3 - Categoria de emprego para circuitos de comando em corrente alternada.

Corrente contínua

Categoria	Aplicações
DC 12	Acionamento de cargas resistivas e cargas de estado sólido com isolamento através de acopladores ópticos
DC 13	Acionamento de eletroímãs
DC 14	Controle de pequenas cargas eletromagnéticas

Tabela 4.4 - Categoria de emprego para circuitos de comando em corrente contínua.

4.8.2 - Principais defeitos em contatores elétricos

A tabela 4.5 enumera os principais defeitos e causas ocorridos em contatores elétricos, em função do desvio nas condições nominais de operação.

Defeito	Causa
Ruído de vibração - Perda de massa nos contatos; - Degradação dos contatos; - Danificação da bobina.	- Subtensão no comando - Transformador de comando subdimensionado; - Tensão de comando derivada do circuito de força; - Falha na condução.
Soldagem leve (separável) - Área de brilho fosco.	Capacidade de ligação e condução.
Perda acelerada de massa nos contatos - Destruição das partes adjacentes aos contatos.	Capacidade de interrupção.
Destruição das partes adjacentes aos contatos: - Soldagem intensa (não separável).	Durabilidade elétrica.
Soldagem leve (separável) - Área de brilho fosco.	Freqüência de manobras.
Perda de massa com pingos de derretimento - Destruição das partes adjacentes aos contatos.	Curto-circuito.

Tabela 4.5 - Principais defeitos ocorridos em contatores elétricos.

4.9 - Dimensionamento do contator

Os contatores devem ser dimensionados levando-se em conta os seguintes critérios:

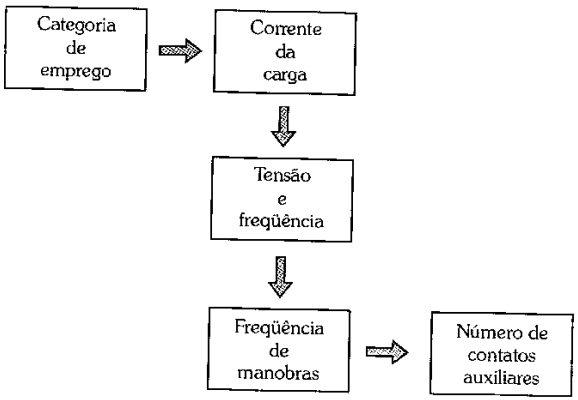


Figura 4.23 - Parâmetros para o dimensionamento de um contator.

4.10 - Vida útil do contator

A vida útil do contator está diretamente relacionada com a vida elétrica dos seus contatos, que depende da intensidade de corrente e é determinada pelo seu número de manobras. De acordo com o número de manobras estimado por uma determinada faixa de tempo é possível estimar a vida útil do comando, expressa segundo aspectos mecânicos e elétricos.

A vida útil **mecânica é um valor fixo**, definido pelo projeto e pelas características de desgaste dos materiais utilizados. Seu valor varia de 10 a 15 milhões de manobras para contatores de pequeno porte. O número de manobras está indicado no catálogo do fabricante.

Considerando os aspectos elétricos, a vida útil é um valor variável, sendo função da freqüência de manobras da carga à qual o contator está conectado, ao número total de manobras que o contator é capaz de fazer, à sua categoria de emprego e aos efeitos do arco elétrico, que dependem da tensão e da corrente elétrica.

Tipicamente, considerando condições de desligamento com corrente nominal na categoria de emprego AC-3, esse valor varia de 1 a 1,5 milhão de manobras.

Essas variáveis estão indicadas no gráfico da figura 4.24, no qual podemos observar os seguintes aspectos:

- No eixo horizontal está a **corrente de desligamento**, que não é necessariamente a corrente nominal, portanto o seu valor deve ser **determinado** ou **medido** em cada carga ligada ao contator.
- No eixo vertical, há indicação de dois dos possíveis valores de tensão nominal, e sobre as escalas indicadas é escolhido um dos valores de tensão. Obteremos, então, o valor total das manobras que o contator é capaz de realizar em regime AC-3, que é mais utilizado nas instalações industriais. Em outras palavras, a **durabilidade elétrica do contator**.

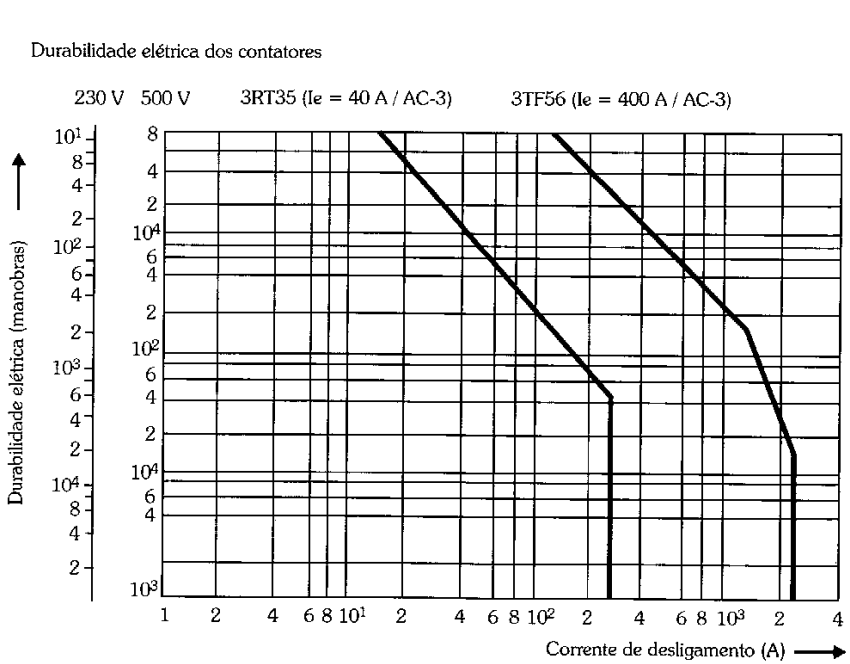


Figura 4.24 - Durabilidade de um contator.

Essas informações são fundamentais para que se possa montar um plano de manutenção de uma indústria, para planejar adequadamente a aquisição de peças de reposição e o período melhor para a troca de alguns elementos.

Todas as indicações a respeito do número de manobras podem ser obtidas diretamente com o fabricante do contator.

4.11 - Blocos antiparasitas

A bobina do contator representa uma reatância indutiva, atravessada por corrente quando é energizada. A passagem do estado ligado para desligado representa uma mudança de intensidade de corrente muito brusca, provocando um excesso de tensão.

Cria-se um arco voltaico no contato que comuta a corrente da bobina, danificando-o. Além disso, são emitidos sinais eletromagnéticos indesejados que interferem em equipamentos eletrônicos.

Para reduzir a ação desse defeito, pode-se utilizar blocos antiparasitas, ligados em paralelo às bobinas dos contatores. Esses blocos são opcionais aos contatores. O bloco antiparasita nada mais é do que um resistor de 100 Ω a 220 Ω ligado em série com um capacitor de 0,1 μF a 0,22 μF. Deve colocar essa associação em paralelo com a bobina por condutores mais curtos possíveis.

4.12 - Principais características dos contatores

- Ligação rápida e segura do motor;
- Controle de alta corrente por meio de baixa corrente;
- Comando local ou a distância;
- Possibilidade de construir chaves de partida;
- Proporciona proteção efetiva do operador;
- Garantia de desligamento do motor em caso de sobrecarga;
- Possibilidade de simplificação do sistema de operação e supervisão de instalação.

4.13 - Relés auxiliares

Dentro dos circuitos de acionamento de máquinas, é comum o uso de relés para controle de acionamentos, alarme, proteção etc. A seguir, enumeramos os tipos de relés mais comuns utilizados na prática.

4.13.1 - Relé de tempo com retardo na energização

Comuta seus contatos. Após transcorrido o tempo selecionado, a temporização inicia quando os terminais A1 e A2 do relé são energizados.

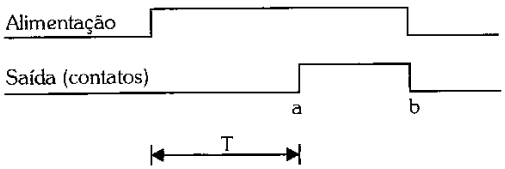


Figura 4.25 - Diagrama de tempo do relé com retardo na energização.

Sendo:

a: instante da comutação

b: retorno ao estado inicial

T: tempo selecionado

4.13.2 - Bloco temporizador pneumático

Montado diretamente na parte frontal dos contatores, serve como um temporizador com retardo na energização e desenergização. Pode ser combinado com blocos de contatos auxiliares frontais e laterais.

Esse tipo de temporizador apresenta as seguintes vantagens:

- Reduz o espaço ocupado em painéis;
- Não possui bobina;
- Flexibilidade para execução de circuitos.

4.13.3 - Relé de tempo estrela-triângulo (Y–Δ)

Foi especialmente desenvolvido para a utilização em chaves de partida estrela-triângulo. Possui dois circuitos de temporização em separado. Um tem por função o controle do contator estrela e o outro, com tempo fixo de aproximadamente 100 ms, para controle do contator que faz a ligação das bobinas em triângulo. Esse relé funciona da seguinte maneira: aplicando-se tensão aos terminais A1-A2, o contato de saída da temporização estrela comuta. Passado o tempo da temporização e selecionado o contato de saída da estrela, ele volta ao seu estado inicial, começando a contagem do tempo fixo de 100 ms que, após ser transcorrido, fecha o contato de saída triângulo. O esquema da figura 4.26 mostra os instantes de tempo de cada etapa da temporização.

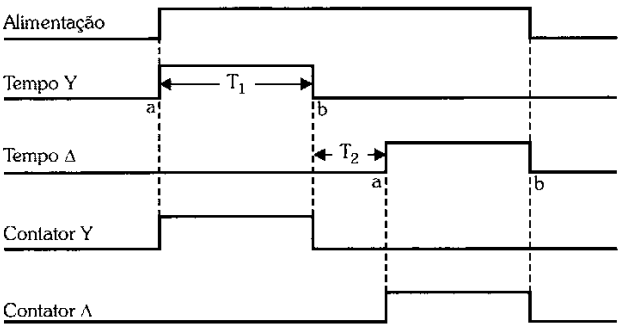


Figura 4.26 - Diagrama de tempo do relé estrela-triângulo.

Sendo:

a: início da comutação

b: retorno ao repouso

T1: tempo ajustável para ligação estrela

T2: tempo fixo de 100 ms para ligação em triângulo

4.13.4 - Relé de seqüência de fase

Utilizado em controle de seqüência de fase em sistemas trifásicos para detecção da inversão na seqüência de fases R, S, T. O relé de seqüência de fase atua no caso de inversão de fases, e seu contato de saída não comuta, bloqueando o comando do sistema.

4.13.5 - Relé de proteção PTC

Utilizado em motores que usam sondas PTC (*Positive Temperature Coeficient*), um termistor cuja resistência aumenta bruscamente para um valor definido de temperatura. Sofre uma variação brusca no valor de sua resistência, conforme o gráfico da figura 4.27.

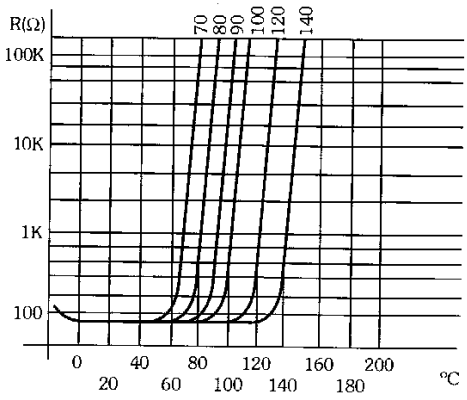


Figura 4.27 - Curvas características do PTC.

A instalação do PTC é feita entre as espiras, no início das bobinas, sempre no lado oposto ao ventilador. Geralmente, é instalado um PTC por fase e ligado em série.

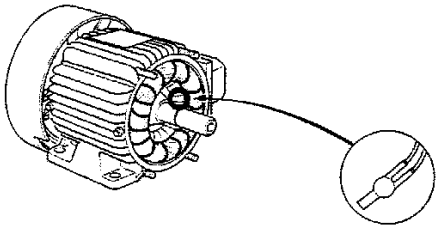


Figura 4.28 - Localização do PTC no motor.

O relé PTC deve ser dimensionado de acordo com a temperatura de proteção. Ele compara um sinal de referência com o sinal enviado pelo PTC. Devido ao aquecimento, a temperatura da sonda aumenta além do normal e sua resistência também aumenta. Assim, o relé PTC protege o motor contra qualquer tipo de aquecimento no enrolamento, como: sobrecarga, elevação da temperatura ambiente, falha na ventilação, freqüência de partidas demasiadamente elevadas, partida muito longa, entre outras. O relé PTC atua fazendo com que o contato de saída abra, e só retorna se a temperatura voltar ao normal, diminuindo a sua resistência. A seguir temos um diagrama que mostra a atuação do relé PTC.

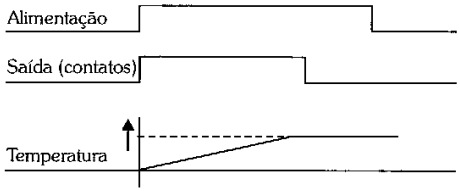


Figura 4.29 - Diagrama de funcionamento do PTC.

***Observação**: Quando se deseja um controle de temperatura em que é possível visualizar toda a faixa de temperaturas e atuar antes que ela atinja limites de trabalho, deve-se usar uma resistência calibrada que varia linearmente com a temperatura, chamada termorresistência ou, popularmente, PT-100. Essas termorresistências têm sua operação baseada na característica de variação de resistência com a temperatura e os elementos mais utilizados são platina e níquel, pois possuem resistência de 100 Ω a 0 °C e o cobre com 10 Ω a 0 °C.*

4.13.6 - Relés de falta de fase

Supervisiona redes trifásicas em que há defasagem entre as fases de 120°. Detecta a falta de uma ou mais fases do neutro e desliga um contato quando a falta ocorre. Esse relé tem um retardo de aproximadamente cinco segundos para que não opere sem necessidade na partida de um motor ou uma falta de fase em um instante muito breve.

Existem dois tipos de relé de falta de fase: com a ligação do neutro e sem a ligação do neutro.

A seguir, há um diagrama que mostra o funcionamento dos dois tipos de relé de falta de fase:

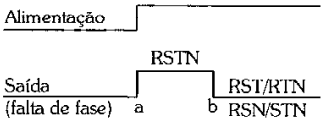


Figura 4.30 - Diagrama de funcionamento de um relé de falta de fase com neutro.

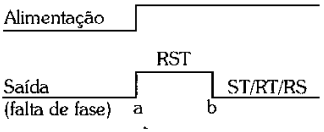


Figura 4.31 - Diagrama de funcionamento de um relé de falta de fase sem neutro.

4.13.7 - Relés de mínima e máxima tensão

Utilizados como proteção em redes monofásicas e trifásicas. Dada uma variação de tensão na rede fora dos limites estabelecidos em dois potenciômetros, um para tensão máxima e outro para tensão mínima, fecham um contato de saída para sinalização. Assim, o relé é energizado dentro da faixa ajustada e desenergizado abaixo dela. Eles também atuam por falta de fase e podem ter um retardo de cinco segundos, como os relés de falta de fase.

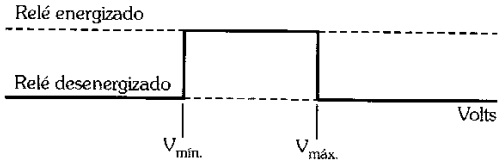


Figura 4.32 - Diagrama de funcionamento de um relé de mínima e máxima tensão.

Exercícios propostos

1. O que é contato normalmente aberto (NA) e contato normalmente fechado (NF)?
2. Quais as funções de um dispositivo de partida de motor?
3. Descreva a operação de seccionamento.
4. Quais são os tipos de falha que podem ocorrer na partida de um motor elétrico? Conceitue-as.
5. Defina proteção contra curto-circuito e proteção contra sobrecarga.
6. O que é comutação?
7. Qual a função dos fusíveis?
8. Cite as partes constituintes de um fusível.
9. O que são classes de função e classes de objeto de um fusível?
10. O que é fusível do tipo D? Descreva seus aspectos de funcionamento e construtivos.
11. O que é fusível do tipo NH? Descreva seus aspectos de funcionamento e construtivos.
12. Que aspectos devem ser levados em consideração no dimensionamento de um fusível?
13. Onde são utilizados os fusíveis ultra-rápidos?
14. Quais são as principais características dos fusíveis?
15. Conceitue relé de sobrecarga. Qual é a sua aplicação?
16. Quais são as classes de relé de sobrecarga existentes?
17. Como devem ser dimensionados os relés de sobrecorrente?
18. O que é um disjuntor motor e quais são suas aplicações?
19. Descreva o funcionamento de um contator e suas principais partes.
20. O que é categoria de emprego de um contator?
21. Como é definida a vida útil de um contator? Descreva os tipos de carga que os contatores podem acionar.

22. Quais são os tipos de carga que podem ser acionados pelo contator?
23. Quais são as principais características dos contatores?
24. Descreva o relé de tempo com retardo na energização.
25. Descreva o funcionamento do relé de tempo estrela-triângulo.
26. Qual a função do relé de seqüência de fase?
27. Para que é utilizado o relé de proteção PTC?
28. Qual a finalidade de usar um relé de falta de fase?

5

CHAVES DE PARTIDA

Um dos instantes mais críticos é a partida de motores elétricos, pois nesse momento, os motores solicitam uma corrente muito maior do que em serviço contínuo, devido à mudança de um estado de inércia do motor. A isso chamamos de pico de corrente. No instante da partida, essa corrente costuma variar na faixa de seis a oito vezes a corrente nominal do motor.

A amplitude e o tempo do pico da corrente inicial dependem das condições de partida. Se for uma partida sob carga, o pico será maior do que se for em vazio. Pode-se chegar até dez vezes do valor normal. Essa alta corrente pode até disparar os dispositivos de proteção dos circuitos e comandos. Além disso, sobrecarrega a rede alimentadora de uma forma prejudicial.

Na figura 5.1 veja uma curva que relaciona a corrente de partida com a velocidade angular:

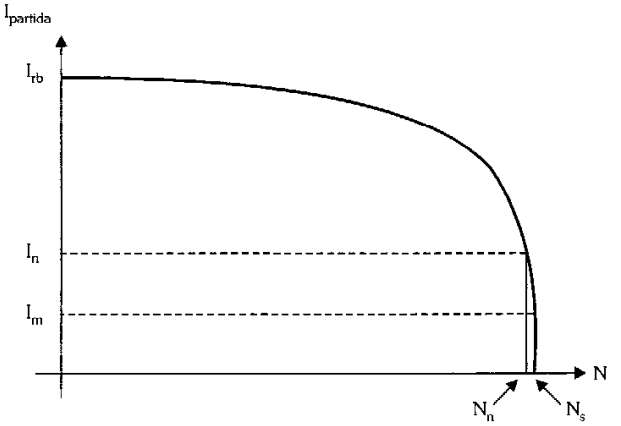


Figura 5.1 - Relação entre corrente de partida e velocidade angular do motor.

Podemos notar que, na partida, quando a velocidade do motor é praticamente nula, temos a corrente máxima que se mantém neste patamar até um valor próximo da velocidade de trabalho do motor nominal. Com isso, podemos afirmar que a corrente consumida por um motor é função da tensão aplicada nele, como mostram os gráficos, assim, a função das chaves de partida é a redução da tensão durante a partida do motor e depois a aplicação de tensão nominal, quando o motor já estiver na velocidade de trabalho.

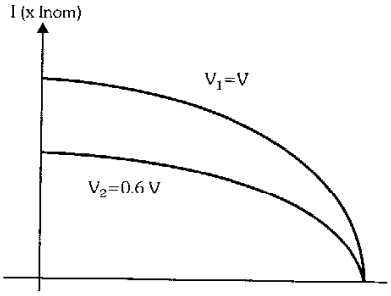


Figura 5.2 - Variação da corrente do motor devido à redução da tensão.

Existem diferentes chaves de partida para melhorar este quadro, que apresentamos em seguida.

5.1 - Partida direta

A partida direta é a forma mais simples de partir um motor elétrico, na qual as três fases são ligadas diretamente ao motor, ocorrendo um pico de corrente.

A partida de um motor trifásico direta deve ser executada sempre que possível. Por imposição da concessionária, só podem ser partidos motores abaixo de 5 cv em partidas diretas e abaixo de 10 cv em instalações industriais.

A partida direta deve ser utilizada nos seguintes casos:

- Baixa potência do motor de modo a limitar as perturbações originadas pelo pico de corrente.
- A máquina movimentada não necessita de uma aceleração progressiva e está equipada com um dispositivo mecânico (redutor) que evita uma partida muito rápida.
- O conjugado de partida é elevado.

Assim, fica fácil enumerar as vantagens de uma chave de partida direta:

- Equipamentos simples e de fácil construção e projeto;
- Conjugado de partida elevado;
- Partida rápida;
- Baixo custo.

Na partida direta, a elevada corrente de partida do motor tem as seguintes desvantagens:

- Acentuada queda de tensão no sistema de alimentação da rede, que ocasiona interferências em equipamentos instalados no sistema.
- Os sistemas de acionamento (dispositivos, cabos) devem ser superdimensionados, elevando os custos do sistema.
- Imposição das concessionárias que limitam a queda de tensão na rede.

Observações

1. Na partida direta, a corrente de partida é diretamente proporcional à tensão de alimentação e diminui à medida que a velocidade aumenta, como mostra a figura 5.3.

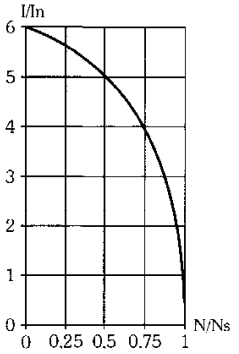


Figura 5.3 - Gráfico I/In x N/Ns.

2. O conjugado de partida varia proporcionalmente ao quadrado da tensão de alimentação, como ilustra a figura 5.4.

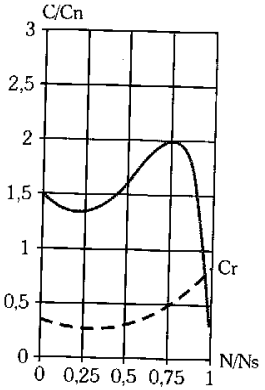


Figura 5.4 - Variação do conjugado em função da tensão de alimentação.

5.1.1 - Esquema de ligação da chave de partida direta

A seguir está o diagrama de comando juntamente com o diagrama de força da chave de partida direta:

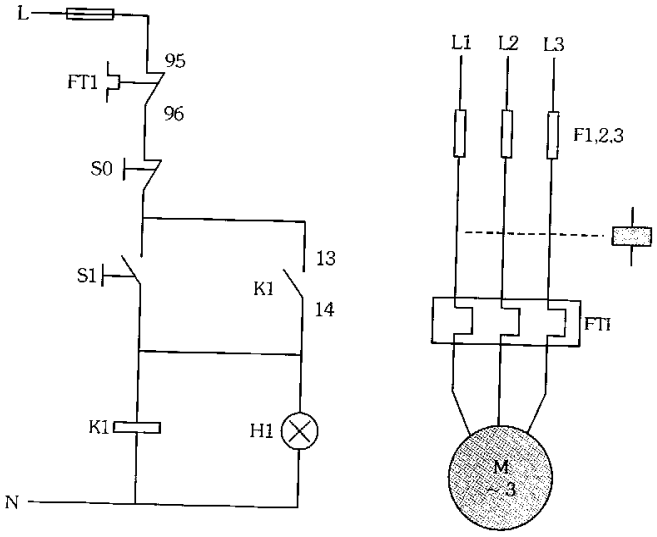


Figura 5.5 - Diagramas de força e de comando de uma partida direta.

No diagrama de força, as três fases L1, L2 e L3 são protegidas por um fusível por fase (F1, F2, F3), sendo ligadas então ao contator K1, que está diretamente acoplado ao relé térmico FT1, que interliga os cabos até o motor.

Na representação do diagrama de comando, há uma alimentação (L-N) e a energia vem através dessa fase que está protegida por um fusível e, logo abaixo, está representado um contato do relé térmico (95/96-FT1) que interrompe o circuito no caso de uma falha. Assim, a parte lógica do circuito funciona da seguinte maneira:

Ao ser pressionado, o botão de impulso S1 energiza a bobina do contator K1 que fecha o contator 13/14 – K1, realizando o selo do contator K1 com o contator fechado. O motor é alimentado com as três fases. Em paralelo com o contator 13/14 K1 existe uma lâmpada (H1) de sinalização que indica o fechamento do contator. Ao ser pressionado o botão de impulso S0, o circuito da bobina do contator K1 é desligado e desenergizado.

5.1.2 - Exemplo de dimensionamento

Dimensionar uma chave de partida direta para um motor de 20 cv, seis pólos, 380 V/60 Hz, com comando em 220 V, Tp = 2 s.

Dados de placa do motor:

$$In(380\ V) = 32{,}35\ A$$

$$Ip/In = 7{,}5$$

Assim, temos:

$$Ip = 244{,}07\ A$$

- **Dimensionamento do contator K1**

Para o dimensionamento do contator K1 devemos levar em conta a corrente nominal do circuito (In) para fazer o dimensionamento em função da corrente nominal do contator (Ie). Desta forma, temos:

$$Ie(K1) \geq In \Rightarrow Ie \geq 32{,}54$$

Basta localizar no catálogo do fabricante o contator que tenha esta faixa de corrente.

- **Dimensionamento do relé de sobrecarga FT1**

O relé deve ter uma faixa de ajuste em que a corrente nominal do motor esteja incluída. Assim, basta localizar no respectivo catálogo do fabricante o contator que possua a referida faixa de ajuste.

- **Dimensionamento dos fusíveis**

Tomando como base a corrente e o tempo de partida, tem-se:

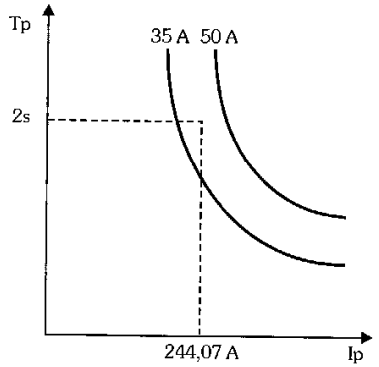


Figura 5.6 - Esboço da curva característica do fusível.

Portanto, o fusível encontrado é $\mathbf{I_F = 50\ A}$:

Ao final, a corrente do fusível (If) deve satisfazer as seguintes condições:

- **If ≥ 1,2 In**
- **If ≤ IfmáxK1**: a corrente nominal do fusível deve ser inferior à corrente máxima do fusível dimensionado para o contator.
- **If ≤ IfmáxFT1**: a corrente nominal do fusível deve ser inferior à corrente máxima do fusível dimensionado para o relé de sobrecorrente.

5.2 - Partida estrela-triângulo

Consiste na alimentação do motor com uma redução de tensão nas bobinas durante a sua partida. O motor parte em estrela, isto é, com uma tensão de 58% da tensão nominal, e após um certo tempo a ligação é convertida em triângulo, assumindo a tensão nominal.

Essa chave proporciona uma redução na corrente de partida de aproximadamente 33% de seu valor, como mostra a figura 5.7. Deve ser usada em aplicações que tenham um conjugado resistente (conjugado da carga) de até um terço do conjugado de partida.

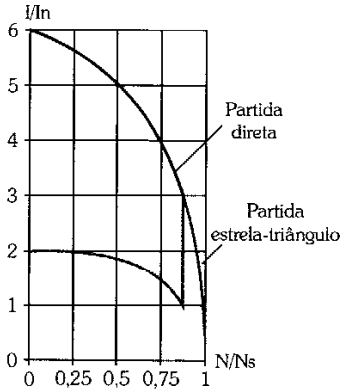


Figura 5.7 - Corrente de partida na chave estrela-triângulo.

A chave estrela-triângulo, na prática, é utilizada quase que exclusivamente para partidas de máquinas a vazio, isto é, sem carga. Uma vez que o conjugado de partida é proporcional ao quadrado da tensão de alimentação, teremos um conjugado de mais ou menos 20 a 50% do conjugado nominal. Somente depois de ter atingido a tensão nominal é que a carga pode ser aplicada.

A velocidade do motor estabiliza-se quando os conjugados motor e resistente se equilibram, geralmente entre 75% e 85% da velocidade nominal. Os enrolamentos são ligados em triângulo e o motor recupera as suas características nominais. A passagem da ligação estrela para a ligação em triângulo é controlada por um temporizador. A seguir, temos um gráfico que mostra o conjugado para esse tipo de partida:

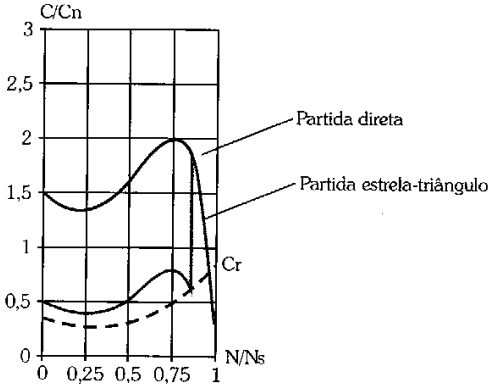


Figura 5.8 - Conjugado de partida na chave estrela-triângulo.

Para ser possível a ligação em estrela-triângulo, os motores devem ter a possibilidade de ligação em dupla tensão (220/380 V, 380/660 V). **Os motores devem ter no mínimo seis bornes de ligação.**

5.2.1 - Esquema de ligação da chave de partida estrela-triângulo

A seguir veja o diagrama de ligação de comando e de força da chave de partida estrela-triângulo.

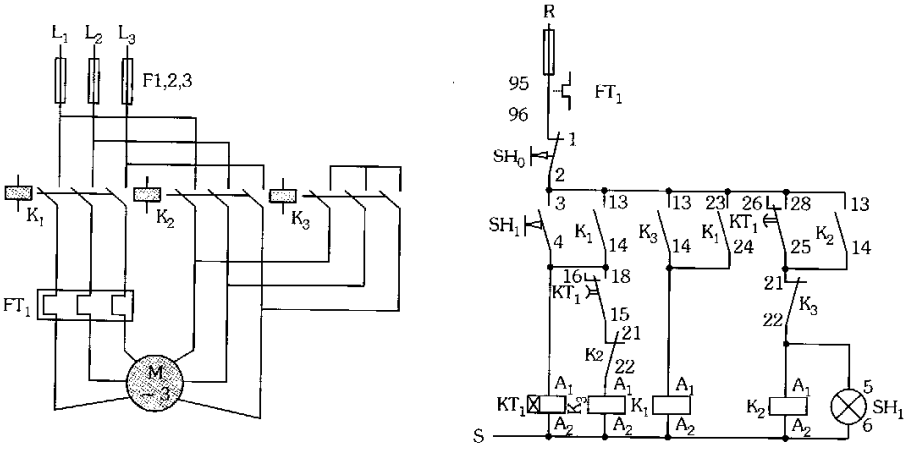


Figura 5.9 - Diagrama de ligação da chave estrela-triângulo.

Quando o botão pulsador SH1 é pressionado, ele aciona o relé de tempo KT1 que, através de seu contato 18-15, alimenta a bobina do contator K3 que, com seu contato aberto 13-14, energiza a bobina de K1. O contator se retém pelo contato 13-14. Como o contato 13-14 energiza o relé KT1, o motor inicia a sua partida em estrela.

Após decorrido o tempo que foi selecionado em KT1, o contato 15-18 é aberto e, decorrido um tempo fixo de 100 ms, o contato 25-28 do relé de tempo fecha, energizando o contator K2 que abre o seu contato 21-22, interrompendo a alimentação do contator K3. Através de seu contato 13-14, o contator K2 é mantido energizado. Ao ser pressionado o botão de impulso SH0, os circuitos das bobinas dos contatores K1 e K2 são desligados, sendo desenergizado o circuito.

***Observação**: A passagem da ligação estrela para a ligação triângulo é controlada pelo temporizador estrela-triângulo. O fechamento do contator triângulo se dá com um atraso de 30 a 100 mS (tempo fixo) para evitar um curto-circuito entre as fases, pois os contatores não podem ficar fechados simultaneamente.*

5.2.2 - Equacionamento da chave de partida estrela-triângulo

Sendo Vn a tensão nominal de cada uma das fases do enrolamento do motor, o conjugado desenvolvido é dado pela seguinte equação:

$$T_{\Lambda} = K.\ Vn^2$$

Sendo:

T_{Λ}: torque desenvolvido na ligação Δ

K: constante do motor

Vn: tensão nominal de cada uma das fases

$$Vn = V_L(Rede)$$

Assim:

$$T_{\Delta} = K.\ V_L(Rede)^2$$

Quando é feita a ligação em estrela, temos a tensão de fase (Vf) aplicada ao motor e essa tensão é dada por:

$$Vf = V_L \text{ (Rede)} / 1{,}73$$

Temos:

$$T_Y = K. (V_L \text{ (Rede)} / 1{,}73)^2 \quad e$$

$$T_Y = K. (V_L \text{ (Rede)}^2 / 3$$

O que resulta em:

$$T_Y = T_\Delta / 3$$

Como o motor parte em Y, temos uma redução de um terço do conjugado na partida do motor.

5.2.2.1 - Determinação das correntes da chave estrela-triângulo

Para determinarmos as correntes nos circuitos da chave estrela-triângulo, primeiramente consideramos o diagrama unifilar do circuito de força que está representado a seguir:

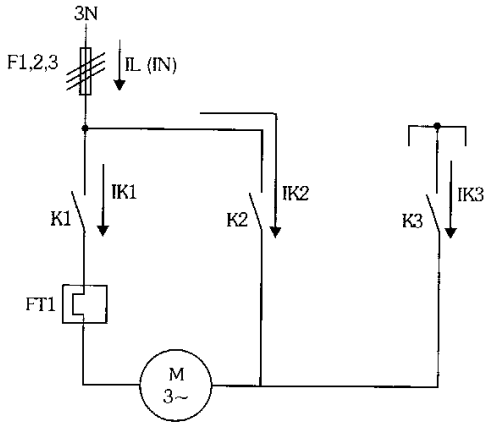


Figura 5.10 - Diagrama unifilar de força da chave estrela-triângulo.

Assim, consideramos IK1, IK2 e IK3 as correntes que circulam nos contatores K1, K2 e K3 respectivamente. Então, devemos analisar as correntes que circulam pelos contatores. Para tanto, consideramos a ligação do motor em triângulo para obtermos os respectivos valores de corrente. A figura 5.11 representa a ligação do motor em triângulo.

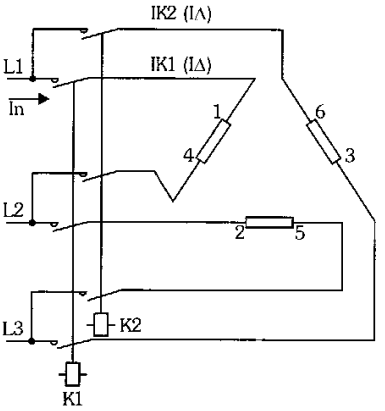


Figura 5.11 - Ligação do motor em triângulo.

Inicia-se a análise, considerando:

$$IL = In$$

A relação entre a corrente em Δ e a corrente de linha (alimentação) é dada por:

$$I_{\Delta} = IL/\sqrt{3}$$

Como a corrente de triângulo (I_{Δ}) é a mesma que circula nos contatores K1 e K2, tem-se:

$$I_{\Delta} = IK1 = IK2 = IL/\sqrt{3} = 0{,}58.\ In$$

E a sua impedância é dada por:

$$Z = \frac{U_n}{\frac{I_n}{\sqrt{3}}} = \frac{U_n x \sqrt{3}}{I_n}$$

Para calcularmos a corrente no contator K3(IK3), devemos considerar a ligação em estrela, pois ele somente entra em funcionamento na ligação estrela do motor. A figura 5.12 mostra um diagrama de força da ligação estrela com suas respectivas correntes.

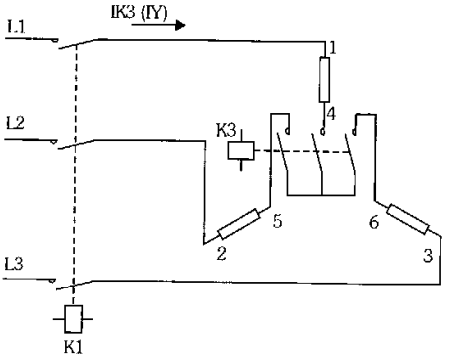


Figura 5.12 - Ligação do motor em estrela.

Desta forma, temos a corrente em estrela dada pela tensão dividida pela impedância:

$$I_Y = \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}{Z} = \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}{\frac{U_n x \sqrt{3}}{I_n}}$$

$$I_Y = In/\ 3 = 0{,}33\ In$$

Resultando em:

$$IK3 = 0{,}33 \times In$$

A corrente no relé de sobrecarga FT1 é a mesma do contator K1, pois o relé está ligado abaixo desse contator e a corrente que circula nele é a mesma do contator K1. Com isso, temos todas as correntes no circuito:

- IK1 = IK2 = 0,58 x In
- IK3 = 0,33 x In
- IFT = 0,58 x In

A corrente de partida tem uma redução de 33% em relação à partida direta, devido à ligação estrela-triângulo. Assim temos:

$$Ip = ((Ip/In) \times In) \times 0,33$$

5.2.2.2 - Exemplo de dimensionamento de uma chave estrela-triângulo

Dimensionar uma chave de partida estrela-triângulo para um motor de 100 cv, dois pólos, 380 V/660 V - 60 Hz, com comando em 220 V, Tp = 10 s.

Dados de placa do motor:

$$In(380\ V) = 134,44\ A;\ Ip/In = 8,2$$

Daí obtemos a corrente de partida:

$$Ip = Ip/In\ .\ In(380\ V) = 1102,49\ A$$

- **Número de contatos auxiliares**

Normalmente, em uma chave estrela-triângulo necessita-se, para o contator K1, de dois contatos NA e para os contatores K2 e K3, um contato NA e um NF.

- **Dimensionamento dos contatores K1 e K2**

$$Ie \geq 0,58 \times In \Rightarrow Ie \geq 78\ A$$

- **Dimensionamento do contator K3**

$$Ie \geq 0,33 \times In \Rightarrow Ie \geq 44,4\ A$$

- **Dimensionando o relé de sobrecorrente**

O relé de sobrecorrente que será utilizado deve ter uma faixa de ajuste em que esteja a corrente que passa pelo contator K1:

$$I(K1) = 0,58 \times In$$

$$Ie \geq 0,58 \times In \Rightarrow 78\ A$$

- **Dimensionamento dos fusíveis**

No momento da partida:

$$I = 0{,}33\ Ip$$

Assim:

$$I = 363{,}8\ A$$

Sendo o tempo de partida 10 s, temos o esboço da curva característica do fusível:

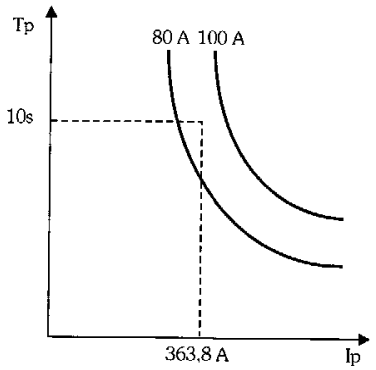


Figura 5.13 - Curva característica do fusível (esboço).

Para fazer o cálculo de corrente, devemos atender as três condições, como no cálculo para a partida direta. É preciso considerar a ligação do motor em estrela. Com isso teremos a seguinte corrente:

$$I = In \times 0{,}58$$

Então, é preciso verificar as condições necessárias:

- $If \geq 1{,}2\ In$
- $If \leq IfmáxK1$
- $If \leq IfmáxFT1$

5.2.3 - Vantagens da chave estrela-triângulo

- Baixo custo (em relação à chave compensadora);
- Pequeno espaço ocupado pelos componentes;
- Sem limite máximo de manobras.

5.2.4 - Desvantagens da chave estrela-triângulo

- Se o motor não atingir pelo menos 90% de sua rotação nominal, na comutação para a ligação triângulo o pico de corrente é quase o mesmo da partida direta.
- O motor deve ter pelo menos seis terminais acessíveis para ligações.
- O valor de tensão da rede deve coincidir com o valor de tensão da ligação triângulo do motor.

5.3 - Partida compensadora

Essa chave de partida alimenta as bobinas do motor com tensão reduzida na partida. A redução da tensão é feita por meio da ligação de um auto-transformador em série com as bobinas. Após realizada a partida, as bobinas do motor recebem tensão nominal. Na maior parte dos casos a chave de partida compensadora é composta dos seguintes equipamentos:

- Um autotransformador ligado em Y;
- Três contatores;
- Um relé de sobrecarga;
- Três fusíveis retardados;
- Relé de tempo.

***Observação**: Pode-se optar por colocar um disjuntor motor em vez de relés de sobrecarga e fusíveis retardados.*

5.3.1 - Autotransformador de partida

O autotransformador de partida possui um núcleo magnético plano, formado por três colunas de chapas de aço silício fechadas no topo. Três enrolamentos estão localizados nas colunas. Os terminais inferiores desses enrolamentos são conectados em Y, formando um centro que é suspenso. Ao longo do enrolamento do autotransformador, são feitos TAPS operacionais nas alturas das tensões de 50%, 65% e 80% da tensão aplicada na fase. São colocados sensores (sondas térmicas) que acompanham o crescimento da temperatura dos enrolamentos do autotransformador e impedem o acionamento se a sua temperatura ultrapassar determinado valor.

Desta forma, o conjugado motor da máquina acionada e a corrente que circula no enrolamento do motor ficam reduzidos por fatores correspondentes ao TAP escolhido para a operação.

A corrente, ao longo de todo o processo de partida do motor, fica reduzida em função da aplicação de uma tensão menor do que a nominal nos terminais do motor em processo de partida.

Como conseqüência direta desse fato, o conjugado também se reduz e a curva característica CONJUGADO versus ROTAÇÃO tem um valor inferior à curva característica de tensão plena. Esse novo posicionamento da curva característica depende do TAP escolhido no autotransformador.

Para motores que efetuam partida em vazio ou com carregamento muito pequeno, o TAP de 50% da tensão nominal de fase pode ser adequado. Para outras situações, o projetista deve escolher um TAP que resulte em tensão mais elevada na partida, corrente de partida maior e, conseqüentemente, conjugados maiores ao longo de todo o processo de partida, gerando mais capacidade acelerativa ao motor no processo de partida.

Essa partida é utilizada geralmente para motores acima de 15 cv. A partida é feita em três etapas:

1. Na primeira etapa, o autotransformador é ligado primeiramente em estrela e em seguida o motor é ligado à rede por intermédio de uma parte dos enrolamentos do autotransformador. A partida é feita com uma tensão reduzida em função da relação de transformação. O autotransformador possui derivações que possibilitam escolher a relação de transformação e a tensão reduzida mais apropriada.

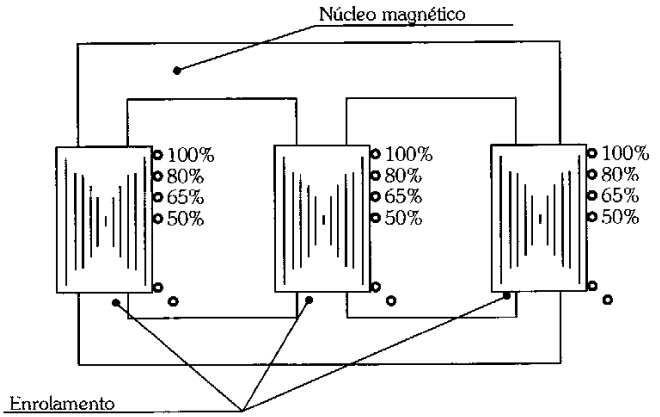


Figura 5.14 - Autotransformador trifásico com os seus TAPs.

2. Na segunda etapa, antes de passar à tensão plena, a ligação em estrela é aberta. Essa operação é realizada quando se atinge a velocidade de equilíbrio no final do primeiro período.

3. A ligação à plena tensão é feita após a segunda etapa, em que o autotransformador é desligado do circuito. A corrente e o conjugado de partida variam nas mesmas proporções o obtém-se a seguinte faixa de valores:

$$Ip = 1,7 \text{ a } 4 \text{ In}$$

Na figura 5.15 um gráfico ilustra o comportamento da corrente de partida da chave compensadora com relação à partida direta.

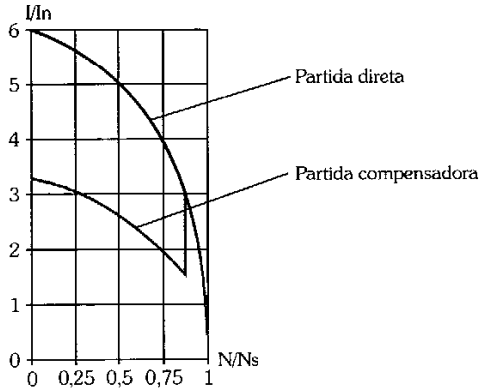


Figura 5.15 - Corrente de partida na chave compensadora.

Com relação ao conjugado teremos uma de partida de 50% a 85% do conjugado nominal, dependendo do TAP a ser utilizado, como é ilustrado na figura 5.16.

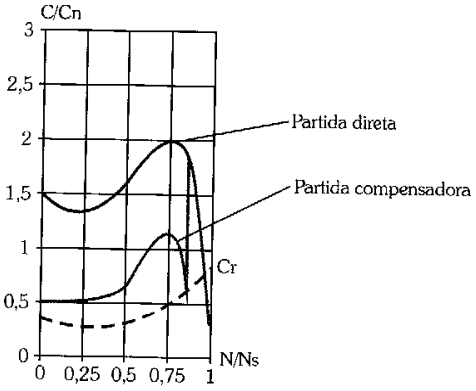


Figura 5.16 - Conjugado de partida na chave compensadora.

Assim, temos a redução das tensões aplicadas no motor de acordo com a derivação do transformador (TAP) no qual está ligado:

- **TAP 65%** reduz para 42% o valor de partida direta;
- **TAP 80%** reduz para 64% o valor de partida direta.

A chave de partida compensadora pode ser usada para partir motores sob carga, os quais podem ser de tensão única e possuírem apenas três cabos.

5.3.2 - Esquema de ligação da chave compensadora

A seguir, acompanhe os diagramas de comando e de força de uma chave de partida compensadora.

Pressionando o botão SH1, é acionado o contator K3, que fecha o lado secundário do autotransformador e através de seu contato 13-14 energiza a bobina do contator K2, conectando o autotransformador à rede. Este fica selado por seu contato 13-14, da mesma forma que o contator K3 fica selado pelo contato 13-14 do K2 e 13-14 do K3. Assim, o motor parte com tensão reduzida.

Pelo contato 43-44 do contator K2 é energizado o temporizador KT1. Após transcorrer o tempo programado em KT1, o contato 15-16 comuta e o

contator K3 é desenergizado, fechando seu contato 21-22 e através do contato 13-14 do K2 energiza a bobina do K1. Com a energização de K1 seu contato 21-22 abre, desenergizando K2 e o contator K1 se mantém acionado por seu contato 13-14. Com isso, o motor passa a receber a tensão nominal da rede. Ao ser pressionado o botão de impulso SH0, o circuito da bobina do contator K1 é desligado e desenergizado.

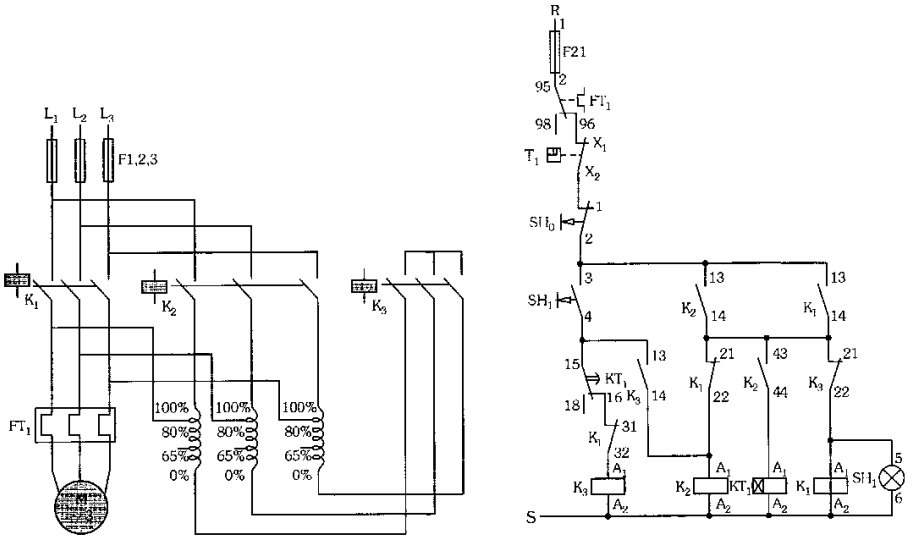


Figura 5.17 - Diagramas de comando e de força de uma chave compensadora.

5.3.3 - Equacionamento da chave de partida compensadora

5.3.3.1 - Conjugado de partida da chave compensadora

Como utilizamos um autotransformador para a partida do motor, devemos levar em conta as equações que relacionam as suas tensões e correntes.

$$V_{entrada}/N_{entrada} = (V_{saída}/N_{saída}) = a$$

$$I_{entrada} \times N_{entrada} = I_{saída} \times N_{saída}$$

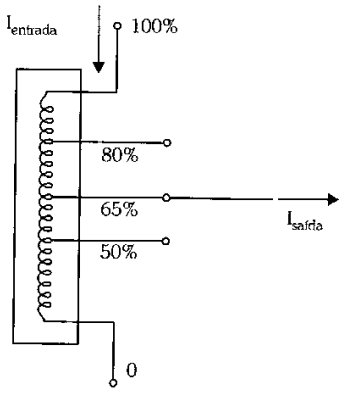


Figura 5.18 - Autotransformador e suas correntes.

Então, temos:

$$I_{entrada} = I_{saída} \times a$$

Sabemos que o torque é dado pela equação:

$$T = K. Vn^2$$

Sendo:

T: torque do motor

K: constante do motor

V: tensão do motor

Assim, temos um torque de partida nominal dado por:

$$T_{p(n)} = Kp_{(n)} \times Vn^2$$

Como: $V_{saída} / V_{entrada} = a$

O conjugado com a adição da chave compensadora será:

$$T_{p(c)} = Kp_{(c)} . V_{saída}^2$$

Assim:

$$T_{p(c)} = Kp_{(c)} . a^2 . V_{entrada}^2$$

Como a tensão de entrada do autotransformador é a própria tensão da fonte de alimentação, temos:

$$T_{p(c)} = Kp_{(c)} \cdot a^2 \cdot Vn^2$$

e

$$T_{p(c)} = a^2 (Kp_{(n)} \cdot Vn^2)$$

Associando com a equação do conjugado da partida normal, temos:

$$T_{p(c)} = a^2 T_{p(n)}$$

A equação mostra que o conjugado compensado é o produto do conjugado nominal (obtido com a aplicação da tensão nominal do motor) pela relação do número de espiras ao quadrado. Assim, se for aplicada uma relação de transformação de a = 0,5, o conjugado fica reduzido a 25% do conjugado nominal. A seguir, temos um quadro que mostra a relação entre os conjugados para os TAP's mais comumente encontrados no mercado:

TAP de transformação (a)	a^2	Percentual de conjugado nominal
0,5	0,25	25 %
0,65	0,4225	42,25%
0,8	0,64	64%

Tabela 5.1 - Conjugados de acordo com os TAPs de autotransformadores comerciais.

É fundamental conhecer o conjugado resistente imposto pela carga no processo de partida para escolher o TAP que será utilizado, pois como foi visto, a redução do conjugado de partida é muito grande e o motor pode não ter conjugado suficiente para vencer o conjugado resistente da carga e não partir.

5.3.4 - Determinação das correntes da chave compensadora

Para determinarmos as correntes nos circuitos da chave compensadora, primeiramente vamos considerar o diagrama unifilar do circuito de força da chave que está representado na figura 5.19.

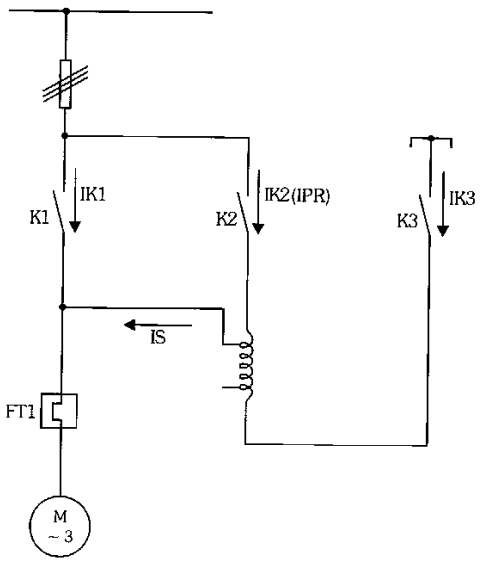


Figura 5.19 - Diagrama unifilar de força da chave compensadora.

No contator K1 temos a corrente nominal aplicada:

$$IK1 = In$$

Como a impedância do motor é constante, sendo aplicadas tensão e corrente nominal, temos:

$$Z = Un / In$$

Assim, quando aplicarmos tensão reduzida, teremos:

$$Z = (K \cdot Un) / IS$$

Como a impedância (Z) é constante:

$$(Un/In) = (K \cdot Un)/IS$$

Como a potência no primário do autotransformador é a mesma do secundário:

Assim, temos as seguintes equações no primário:

$$PS = US \cdot IS$$

$$UPR = UN$$

$$PPR = UPR \cdot IPR$$

As equações do secundário são as seguintes:

$$PS = US \cdot IS$$

$$US = K \cdot UN$$

$$IS = K \cdot In$$

Fazendo a igualdade das potências do primário e do secundário:

$$PS = PPR = UPR \cdot IPR$$

$$US \cdot IS = (K \cdot UN) \cdot (K \cdot In) = UN \cdot IK2$$

Daí, teremos: $IK2 = K^2 In$

Para determinar a corrente para o contator K3, temos:

$IS = IK2 + IK3$

$IK3 = IS - IPR$

$IPR = IK2 = K^2 . In$

E $IS = K . In$

$IK3 = K . In - K^2 . In$

Dando-nos o seguinte valor de corrente para o contator K3:

$$IK3 = In \cdot (K - K^2)$$

A corrente no relé de sobrecarga FT1 é a mesma do contator K1, pois o relé está ligado abaixo desse contator e a corrente que circula nele é a mesma do contator K1. Com isso, temos todas as correntes no circuito:

$IK1 = In$

$IK2 = K^2 . In$

$IK3 = (K-K^2) . In$

$FT1 = In$

A tabela seguinte mostra os valores das correntes nos contatores K2 e K3 para os seguintes TAPs dos autotransformadores:

TAPs do autotransformador (%Vn)	Fator de redução (K)	IK2	IK3
85	0,85	0,72 x In	0,13 x In
80	0,80	0,64 x In	0,16 x In
65	0,65	0,42 x In	0,23 x In
50	0,50	0,25 x In	0,25 x In

Tabela 5.2 - Contatores a partir da relação de TAPs dos autotransformadores.

A redução da corrente de partida é proporcional ao quadrado do fator de redução K. Assim, a equação a seguir dá a corrente de partida em função do fator de redução K:

$$Ip = (Ip/In \times In) . K^2$$

5.3.5 - Exemplo de dimensionamento de uma chave compensadora

Dimensionar uma chave de partida compensadora para um motor de 30 cv, oito pólos, 220 V/60 Hz, com comando em 220 V, TAP de 80%, Tp = 15 s.

Dados de placa dos motores:

In (220 V) = 77,1 A

Ip/In = 8

Ip = 617 A

- **Dimensionamento do contator K1**

O contator K1 deve ser dimensionado pela corrente que circula no motor. Assim, temos:

$Ie \geq In$

$Ie \geq 77,1\ A$

- **Dimensionamento do contator K2**

A corrente que circula em K2 depende do TAP em que ele está ligado, assim, a corrente em K2 é dada por:

$Ie \geq k^2 \times In$

$Ie \geq 49,3\ A$

- **Dimensionamento do contator K3**

$Ie \geq (k - k^2) \times In$

$Ie \geq 0,16 \times In$

- **Dimensionamento do relé de sobrecorrente**

O relé é escolhido pela corrente nominal do motor:

$Ie \geq In$

$Ie \geq 77,1\ A$

Assim, deve ser escolhido um relé que tenha a sua faixa de ajuste dentro da corrente encontrada.

- **Dimensionamento dos fusíveis**

A corrente de partida se reduz pelo fator k^2 e, como estamos considerando $k = 0,8$, temos $k^2 = 0,64$.

Assim: $Ip = k^2 \times Ip = 394,9\ A$

Considerando $Tp = 15\ s$

No esboço da curva característica do fusível, temos:

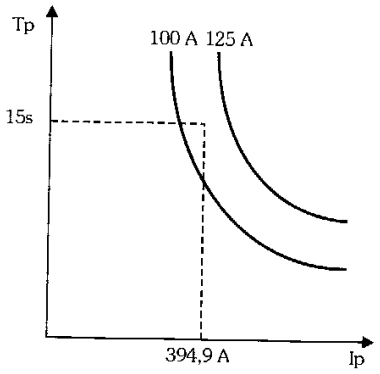


Figura 5.20 - Esboço da curva característica do fusível.

Assim, é escolhido **o fusível de 125 A**.

5.3.6 - Vantagens da chave de partida compensadora

- Na comutação do TAP de partida para a tensão da rede, o motor não é desligado e o segundo pico é bem reduzido.
- Para que o motor possa partir satisfatoriamente, é possível variar o TAP de 65%, 80% ou até 90% da tensão da rede.
- O valor da tensão da rede pode ser igual ao valor de tensão da ligação triângulo ou estrela do motor.
- O motor somente necessita de três bornes externos.

5.3.7 - Desvantagens da chave de partida compensadora

- Limitação de manobras;
- Custo mais elevado em função do autotransformador;
- Maior espaço ocupado no painel devido ao tamanho do auto-transformador.

Exercícios propostos

1. O que é chave de partida?
2. O que é chave de partida direta?
3. Enumere as vantagens e desvantagens de uma chave de partida direta.
4. Com o auxílio dos diagramas de comando e de força, explique o funcionamento da chave de partida direta.
5. Qual a função de uma chave de partida estrela-triângulo?
6. Enumere as vantagens e desvantagens da chave de partida estrela-triângulo.
7. Com o auxílio dos diagramas de comando e de força, explique o funcionamento da chave de partida estrela-triângulo.
8. Quando devemos usar a chave de partida compensadora?
9. Enumere as vantagens e desvantagens da chave de partida compensadora.
10. Com o auxílio dos diagramas de comando e de força, explique o funcionamento da chave de partida compensadora.

6

CHAVES DE PARTIDA ELETRÔNICAS

Com o advento da eletrônica de potência, torna-se cada vez mais economicamente viável e prático o uso de chaves eletrônicas de partida de motores. A seguir temos a descrição das chaves de partida eletrônicas mais utilizadas: *soft-starters* e inversores de freqüência.

6.1 - Soft-starters

As chaves de partida *soft-starters* são destinadas ao comando de motores de corrente contínua e corrente alternada, assegurando a aceleração e desaceleração progressivas e permitindo uma adaptação da velocidade às condições de operação. A figura 6.1 apresenta a *soft-starter* Altistart 48 da Schneider Electric.

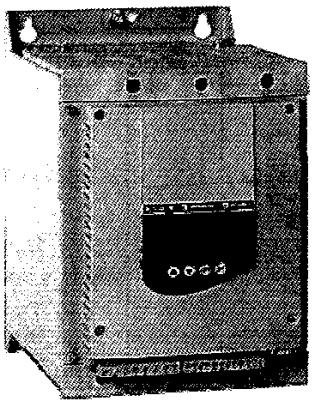


Figura 6.1 - Soft-starter Altistart 48 da Schneider Electric.

A alimentação do motor, quando é colocado em funcionamento, é feita por aumento progressivo da tensão, o que permite uma partida sem golpes e reduz o pico de corrente. Isso é obtido por intermédio de um conversor com tiristores em antiparalelo, montados de dois a dois em cada fase da rede.

A subida progressiva da tensão pode ser controlada pela rampa de aceleração ou dependente do valor da corrente de limitação, ou ligada a esses dois parâmetros. Assim, a *soft-starter* assegura:

- O controle das características de funcionamento, principalmente durante os períodos de partida e de parada;
- A proteção térmica do motor e do controlador;
- A proteção mecânica da máquina movimentada por supressão dos golpes e redução da corrente de partida.

6.1.1 - Princípio de funcionamento

O funcionamento das *soft-starters* está baseado na utilização de SCRs (tiristores), ou melhor, de uma ponte tiristorizada na configuração antiparalelo, que é comandada por uma placa eletrônica de controle, a fim de ajustar a tensão de saída, conforme programação feita pelo usuário, como na estrutura da figura 6.2.

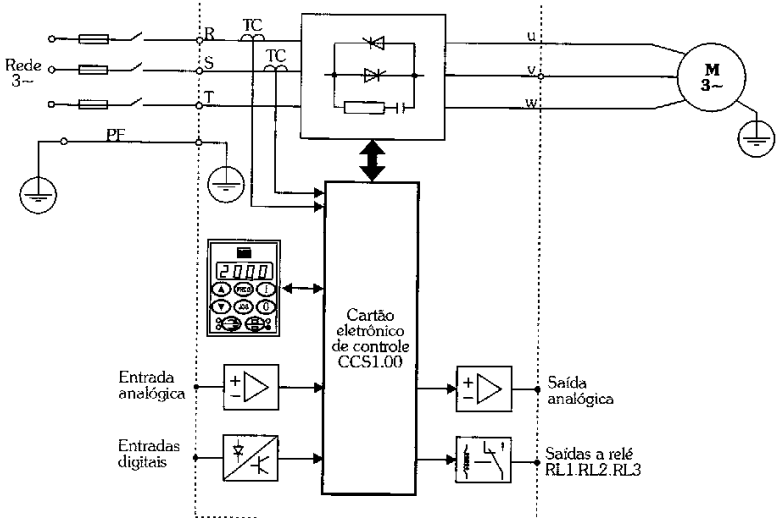


Figura 6.2 - Diagrama de blocos simplificados da soft-starter.

Como mostra o diagrama, a *soft-starter* controla a tensão da rede por meio do circuito de potência constituído de seis SCRs. Variando o seu ângulo de disparo, variamos o valor eficaz de tensão aplicada ao motor. Analisaremos em separado cada uma das partes da estrutura, dividindo-a em duas: circuito de potência e circuito de controle.

6.1.2 - Circuito de potência

Este é o circuito pelo qual circula a corrente que é fornecida para o motor. É constituído basicamente por SCRs e suas proteções e por TCs (transformadores de corrente).

- O circuito RC, representado no diagrama (*snubber*), tem como função proteger os tiristores contra variações da tensão aplicadas sobre eles (dv/dt).
- Os transformadores de corrente fazem a monitoração da corrente de saída, permitindo que o controle eletrônico efetue a proteção e manutenção do valor de corrente em níveis predefinidos (função limitação de corrente ativada).

6.1.3 - Circuito de controle

É o local onde ficam os circuitos responsáveis pelo comando, monitoração e proteção dos componentes do circuito de potência, bem como os circuitos utilizados para comando, sinalização e interface homem/máquina (IHM), que são configurados pelo usuário em função da aplicação.

Atualmente, a maioria das chaves *soft-starters* disponíveis no mercado é microprocessada, sendo totalmente digital.

6.2 - Principais funções da soft-starter

Além das características apontadas anteriormente, as chaves *soft-starter* também apresentam funções programáveis que permitem configurar o sistema de acionamento de acordo com as necessidades do usuário. O comando dos tiristores é feito por um microprocessador que fornece as seguintes funções:

- Controle das rampas de aceleração e desaceleração;
- Limitação de corrente ajustável;

- Conjugado na partida;
- Frenagem por injeção de corrente contínua;
- Proteção do acionamento por sobrecarga;
- Proteção do motor contra aquecimentos devido a sobrecargas ou a partidas demasiadamente freqüentes;
- Detecção de desequilíbrio ou falta de fases e de defeitos nos tiristores.

A seguir temos algumas das funções disponíveis nas *soft-starters*:

Rampa de tensão na aceleração: as chaves de partida estáticas podem ser ajustadas no módulo de tensão, de forma a se ter uma tensão inicial de partida adequada, responsável pelo torque inicial que aciona a carga. Ao fazer o ajuste da tensão de partida num valor Vp e um tempo de partida Tp, a tensão cresce do valor de Vp até atingir a tensão de linha do sistema, em um intervalo de tempo Tp, também parametrizável, como na figura 6.3.

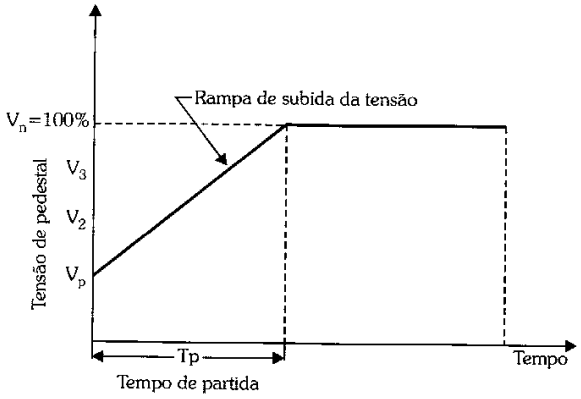


Figura 6.3 - Rampa de tensão na aceleração.

Com isso temos a seguinte forma de onda de tensão aplicada ao motor:

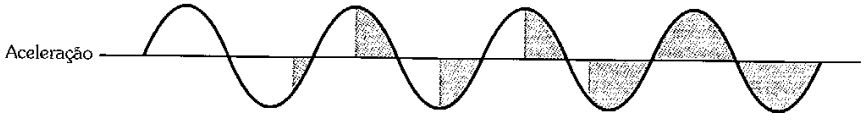


Figura 6.4 - Forma de onda de tensão aplicada ao motor na aceleração.

Como resultado, temos as seguintes curvas de corrente x velocidade angular e corrente x tempo, como indicam as figuras respectivamente:

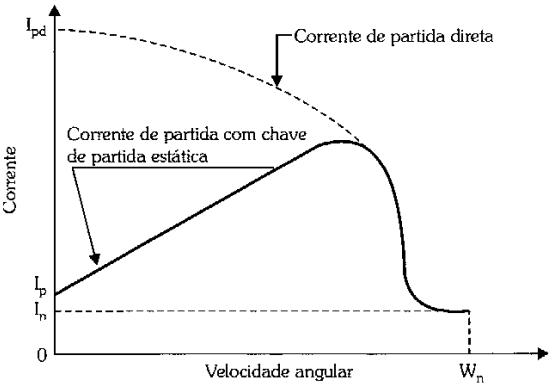


Figura 6.5 - Corrente x velocidade.

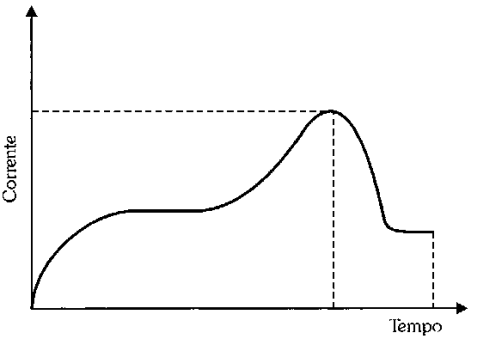


Figura 6.6 - Corrente x tempo.

Levando em conta que o conjugado do motor varia de maneira proporcional ao quadrado da tensão e que a corrente cresce linearmente, podemos controlar o conjugado de partida do motor, assim como a sua corrente de partida por meio do controle da tensão eficaz aplicada aos terminais do motor.

As chaves *soft-starters*, através do controle da variação do ângulo de disparo da ponte de tiristores, geram na saída uma tensão eficaz gradual e continuamente crescente até que seja atingida a tensão nominal da rede. Assim, durante um tempo Tp, o circuito de controle eleva a tensão nos terminais do motor, iniciando com o valor de partida da rampa que, em geral, pode ser ajustado de 15 % a 100% da tensão do sistema.

Quando ajustamos um valor de tempo de rampa e de tensão de partida (pedestal), não significa que o motor acelera de zero até sua rotação nominal no tempo definido no ajuste. Isso depende também das características dinâmicas do sistema motor/carga, como, por exemplo: sistema de acoplamento, momento de inércia da carga refletida ao eixo do motor etc. O valor de tensão e o tempo de rampa são valores ajustáveis dentro de uma faixa que pode variar conforme o fabricante.

Não existe regra que possa ser aplicada para definir o valor de tempo a ser ajustado e o melhor valor de tensão inicial para que o motor possa garantir a aceleração da carga. A melhor aproximação pode ser alcançada pelo tempo de aceleração do motor.

O valor da tensão de partida Vp deve ser ajustado de acordo com o tipo de carga que é acionado. A seguir, temos dois exemplos de aplicação da rampa de tensão na aceleração.

Bombas

Para esta aplicação, a tensão de partida não deve receber um ajuste elevado, a fim de evitar o fenômeno conhecido como golpe de aríete, que se traduz pela onda de pressão da coluna de líquido durante os processos de partida e parada. Por outro lado, a tensão não pode receber um ajuste muito baixo, sob pena de não se realizar o processo de partida. Durante a aceleração do motor, o conjugado do motor deve ser, no mínimo, superior a 15% do conjugado resistente do conjugado da bomba.

Ventiladores

Assim como as bombas, o valor de ajuste da tensão de partida Vp deve ser baixo o suficiente para permitir um torque motor adequado à carga. O ajuste do tempo de partida Tp não deve ser muito curto. Pode-se usar a limitação da corrente de partida para estender o tempo de partida Tp, enquanto a inércia do sistema é superada. O conjugado de partida do motor deve estar, no mínimo, 15% acima do conjugado do ventilador.

Rampa de tensão na desaceleração: existem duas possibilidades para que seja executada a parada do motor: por inércia, em que a *soft-starter* leva a tensão de saída instantaneamente a zero, assim o motor vai perdendo velocidade gradativamente de acordo com a energia cinética da carga.



Da mesma maneira que as *soft-starters* permitem o acionamento suave do motor, também podem executar uma parada suave. Na parada controlada, a *soft-starter* reduz gradualmente a tensão de saída até um valor mínimo em um tempo predefinido, como mostra a figura 6.7.

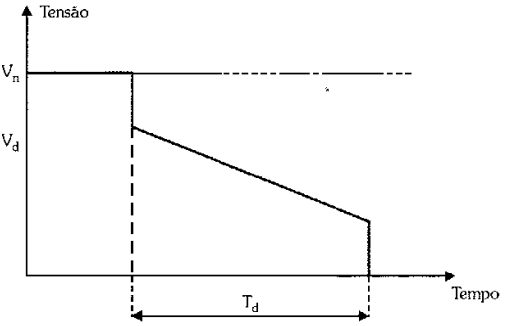


Figura 6.7 - Rampa de tensão de desaceleração.

Na rampa de desaceleração, o valor de tensão de Vd reduz o seu valor na forma de uma rampa decrescente até o valor de desligamento final, em que o motor pára de girar, retirando a tensão dos seus terminais. O tempo de desligamento Td pode ser ajustado de 1 a 20 segundos, dependendo do fabricante, e a tensão de desligamento Vd pode ser parametrizada em até 90% do valor de tensão.

Assim, temos a seguinte forma de onda de tensão aplicada ao motor:

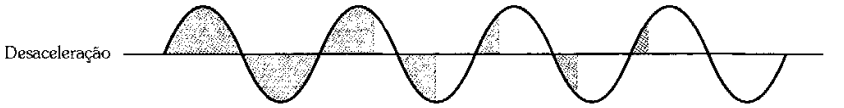


Figura 6.8 - Forma de onda de tensão aplicada ao motor na desaceleração.

Quando se reduz a tensão aplicada ao motor, ele perde conjugado e, por conseqüência, perde velocidade e a carga acionada também perde. Esse recurso é muito usual em aplicações que necessitam de uma parada suave do ponto de vista mecânico, como, por exemplo: bombas centrífugas, transportadores etc.

No caso das bombas centrífugas, é utilizado para reduzir o *golpe de aríete*, que pode provocar sérios danos a todo o sistema hidráulico, comprometendo a vida útil de componentes como válvulas e tubulações, além da própria bomba. Também pode ser utilizado em situações de um processo industrial, em que uma parada brusca pode provocar danos ao produto final, como esteiras transportadoras de garrafas de refrigerantes.

Pulso de tensão de partida (*kick start*): as chaves de partida estáticas (*soft-starters*) são providas de uma função chamada pulso de tensão de partida (*kick start*) com um valor ajustável. É aplicado em cargas de elevada inércia que, no momento da partida, exigem um esforço extra do acionamento em função do alto conjugado resistente.

O valor dessa tensão deve ser suficiente para se obter um conjugado motor que possa vencer o conjugado resistente da carga. Nesses casos, normalmente a *soft-starter* precisa aplicar no motor uma tensão maior que aquela ajustada na rampa de tensão de aceleração por meio da função *kick start*. Essa função faz com que seja aplicado ao motor um pulso de tensão com amplitude e duração programáveis para que o motor possa desenvolver um conjugado de partida suficiente para vencer o atrito e acelerar a carga.

Na prática, o pulso de tensão de partida deve ser ajustado entre 75% e 90% da tensão do sistema e o tempo do pulso de tensão de partida deve ser ajustado entre 100 e 300 milissegundos, dependendo do tipo de carga a ser acionado.

Deve-se usar essa função somente nos casos em que ela seja estritamente necessária, pois ao habilitar a função pulso de tensão de partida, a atuação da limitação de corrente de partida não ocorre. Assim, o sistema em que o motor está inserido pode sofrer elevadas quedas de tensão durante o tempo ajustado para o pulso de tensão. A seguir, temos um gráfico que representa a função de pulso de tensão de partida.

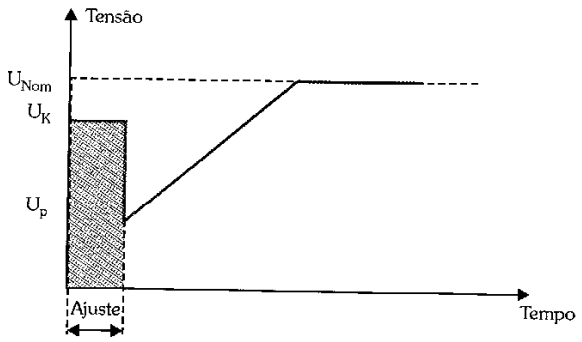


Figura 6.9 - Kick start.

Limitação de corrente: na maioria dos casos em que a carga apresenta uma inércia elevada, é utilizada essa função, que faz com que o sistema rede/*soft-starter* forneça ao motor somente a corrente necessária para que seja executada a aceleração da carga. Esse recurso garante um acionamento realmente suave. A limitação de corrente também é muito utilizada na partida de motores cuja carga apresenta um valor mais elevado de momento de inércia.

6.2.1 - Proteções

A utilização das *soft-starters* não fica restrita à partida de motores de indução, pois elas também podem garantir ao motor toda a proteção necessária. Assim, quando uma proteção atua, é emitida uma mensagem de erro correspondente para permitir ao usuário visualizar o ocorrido.

Sobrecorrente imediata na saída: ajusta o máximo valor de corrente que a *soft-starter* permite conduzir para o motor por período de tempo pré-ajustado, figura 6.10.

Subcorrente imediata: ajusta o mínimo valor de corrente que a *soft-starter* permite conduzir para o motor por período de tempo pré-ajustado. Essa função é utilizada para proteção de cargas que não possam operar em vazio, como, por exemplo: sistemas de bombeamento, figura 6.11.

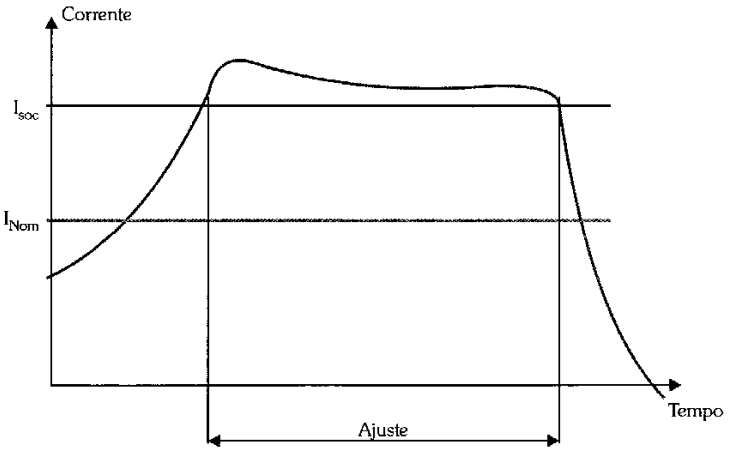


Figura 6.10 - Sobrecorrente imediata na saída.

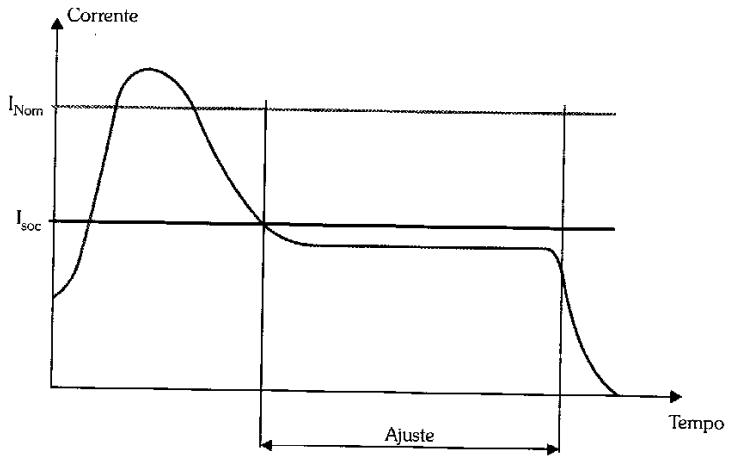


Figura 6.11 - Subcorrente imediata.

Outros parâmetros: além dos parâmetros já citados, a *soft-starter* possui diversas proteções, dependendo do fabricante do equipamento, como, por exemplo: sobretemperatura nos tiristores, seqüência de fase invertida, falta de fase na rede, falta de fase no motor.

Economia de energia elétrica: quando o motor opera em carga reduzida, conseqüentemente opera com baixo fator de potência. A chave de partida estática tem uma função que otimiza o ponto operacional do motor, minimizando as perdas de energia reativa, fornecendo apenas a energia ativa requerida pela carga, o que caracteriza um procedimento de economia de energia elétrica.

A função de economia de energia elétrica é aplicada com vantagens em situações em que o motor permanece funcionando a vazio por um longo período de tempo. Isso é feito mediante a redução da tensão fornecida nos terminais do motor durante o tempo em que o motor desenvolve a sua operação em carga reduzida ou a vazio. Reduzindo a tensão, reduz-se a corrente a vazio e, conseqüentemente, as perdas no ferro, que são proporcionais ao quadrado da tensão.

Conforme a aplicação, pode-se obter uma economia de energia entre 5% a 40% da potência nominal, considerando que o motor opere nas mesmas condições, porém, sob tensão nominal, para uma carga no eixo de apenas 10% da potência nominal. Essa função não oferece nenhuma vantagem quando aplicada em situações em que o motor opera em carga reduzida por curtos períodos de tempo.

Na prática, a função de otimização de energia só faz sentido ao ser ativada quando a carga for menor que 50% da carga nominal durante um período de operação superior a 50% do tempo de funcionamento do motor. Essa função pode ser aplicada para cargas como: motores de serraria, esmeril, esteiras transportadoras de aeroportos e cargas similares. Assim, temos a seguinte forma de onda de tensão aplicada ao motor:

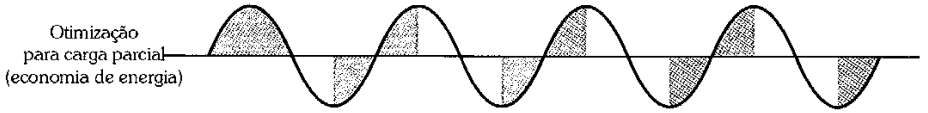


Figura 6.12 - Forma de onda de tensão para o modo economia de energia.

6.2.2 - Descrição dos parâmetros

Os parâmetros são agrupados de acordo com as suas características e particularidades, conforme apresentados em seguida:

Parâmetros de leitura: variáveis que podem ser visualizadas no *display*, mas não podem ser alteradas pelo usuário, como, por exemplo: tensão %, corrente %, potência ativa etc.

Parâmetros de regulação: são os valores ajustáveis a serem utilizados pelas funções da *soft-starter*, como, por exemplo: tensão inicial, tempo de rampa de aceleração, tempo de rampa de desaceleração etc.

Parâmetros de configuração: definem as características da *soft-starter*, as funções a serem executadas, bem como as entradas e saídas, como, por exemplo: parâmetros dos relés de saída e das entradas da *soft-starter*.

Parâmetros do motor: define as características nominais do motor, como, por exemplo: ajuste da corrente do motor, fator de serviço.

***Observação**: Existe um parâmetro na soft-starter que carrega as configurações originais de fábrica. Os parâmetros são escolhidos de modo a atender ao maior número de aplicações, reduzindo ao máximo a necessidade de reprogramação durante a colocação em funcionamento.*

6.2.3 - Formas de ligação

Existem várias formas de ligar a *soft-starter*, as quais estão elencadas a seguir:

Ligação direta: nesse tipo de ligação o motor é ligado diretamente à *soft-starter*. Dependendo da modelo da *soft-starter*, pode ser ligada diretamente, ou com o auxílio de contatores, fusíveis e relés de sobrecorrente, como indica a figura 6.13.

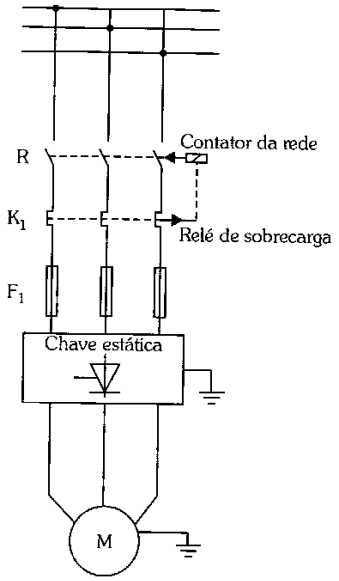


Figura 6.13 - Ligação direta da soft-starter.

Ligação com contator em paralelo (contator de *by pass*): essa ligação é feita para reduzir as perdas na *soft-starter* quando o motor está em regime normal de trabalho. Para tanto, é utilizado um contator em paralelo para quando o motor estiver em regime, conforme indica a figura 6.14.

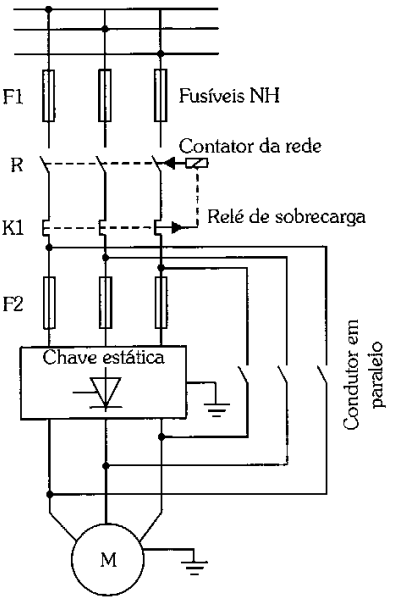


Figura 6.14 - Ligação com contator de by pass.

Ligação em partida seqüencial de diversos motores: podem ser ligados diversos motores com a mesma *soft-starter*, reduzindo o custo das partidas. Para tanto, é partido um motor, e após ser concluída a sua partida, esse motor é alimentado com a tensão da rede, e a *soft-starter* fica liberada para efetuar a partida de outro motor.

Para partida seqüencial recomenda-se o uso de motores de mesma potência e características de carga, assim pode ser utilizado o mesmo ajuste para ambos os motores. Se forem utilizados motores com potências e/ou cargas diferentes, devem ser ajustados os parâmetros de cada motor em separado, via entradas digitais ou via rede (*devicenet*, *profibus*, RS 232, entre outras). A figura 6.15 apresenta o esquema desse tipo de ligação.

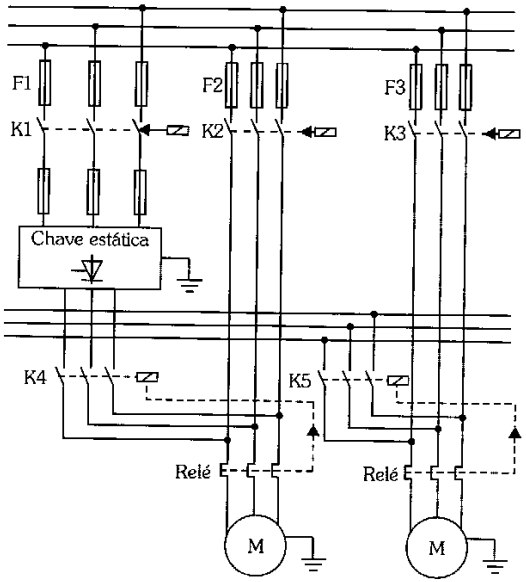


Figura 6.15 - Ligação seqüencial de motores com soft-starter.

Ligação simultânea de diversos motores: para efetuar essa ligação, a capacidade da *soft-starter* deve ser maior ou igual à soma das potências de todos os motores. A figura 6.16 mostra essa ligação.

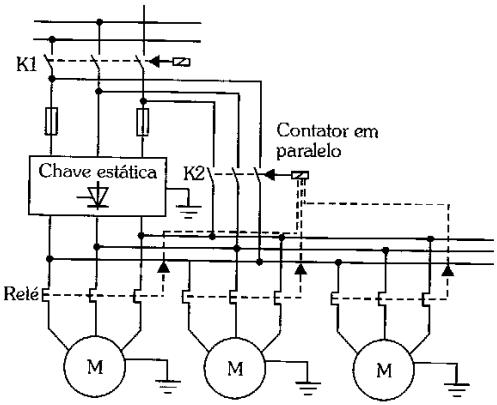


Figura 6.16 - Ligação simultânea de motores com soft-starter.

Diagramas de comando da *soft-starter*: a *soft-starter* possui um determinado número de entradas e saídas digitais e analógicas. As saídas podem

ser parametrizadas para comando: ligar e desligar *soft-starter*; sinalização: alarmes, sobrecorrente, falta de alimentação etc.; controle: indicação de final de rampa etc. As tensões de operação desses relés e saídas digitais podem ser de 110 Vac a 240 Vac a 24 Vdc, dependendo do fabricante.

A figura 6.17 exibe a *soft-starter* com a representação do seu circuito de comando.

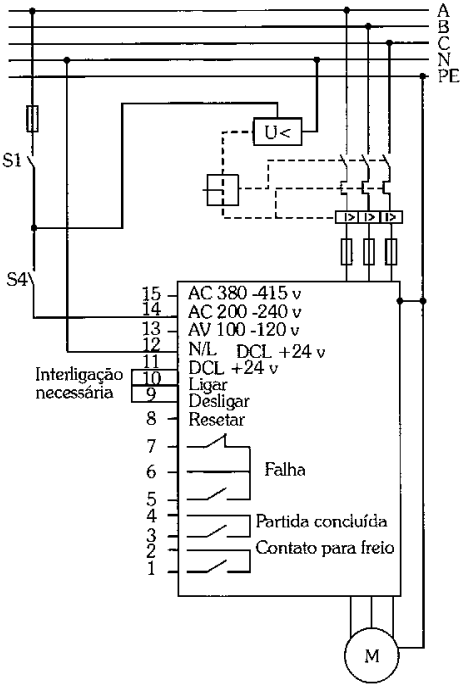


Figura 6.17 - Diagrama de comando de uma soft-starter.
(Fonte: Instalações Elétricas Industriais: João Mamede Filho)

6.3 - Inversor de freqüência

Há alguns anos, para se ter um controle preciso de velocidade eram utilizados motores de corrente contínua. Entretanto, isso acarretava diversos problemas como custo do motor e necessidade de retificação da tensão de fornecimento para alimentar o motor. Com o advento da eletrônica de potência aliada à necessidade de aumento de produção e diminuição de custos, dentro deste cenário surgiu a automação, ainda em fase inicial no Brasil.

Uma grande infinidade de equipamentos foi desenvolvida para as mais diversas variedades de aplicações e setores industriais. Um dos equipamentos mais utilizados nesses processos juntamente com o CLP é o inversor de freqüência, mostrado na figura 6.18. Um equipamento versátil e dinâmico que permitiu o uso de motores de indução para controle de velocidade em substituição aos motores de corrente contínua. Vamos então estudar o princípio básico do inversor de freqüência.

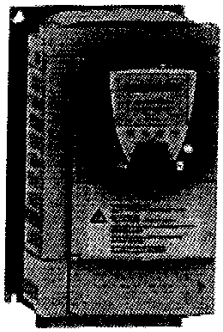


Figura 6.18 - Inversor de freqüência Altivar 71.
(Cortesia: Schneider Electric)

O método mais eficiente de controle de velocidade de motores de indução trifásicos, com menores perdas no dispositivo responsável pela variação da velocidade, consiste na variação da freqüência f_1 da fonte alimentadora através de conversores de freqüência, em que o motor pode ser controlado de modo a prover um ajuste contínuo de velocidade e conjugado com relação à carga mecânica.

Os motores de indução são equivalentes a um transformador em que o primário é o estator e o secundário é o rotor. Pelo equacionamento da máquina assíncrona, o conjugado desenvolvido pelo motor assíncrono é dado pela seguinte equação:

$$C = \varphi_m \cdot I_2$$

E a tensão aplicada na bobina de um estator é dada por:

$$E_1 = 4{,}44 \cdot F_1 \cdot N_1 \cdot \varphi_m$$

Sendo:

C: conjugado do motor (N.m)

Φ_m: fluxo de magnetização (Wb)

I_2: corrente no rotor (A)

E_1: tensão no estator (V)

F_1: freqüência da rede (Hz)

N1: número de espiras

O fluxo alternado Φ_1, resultante da tensão no estator U_1, induz no estator uma f.e.m. no rotor, a qual produz um fluxo Φ_2 proporcional à tensão U_2 e inversamente proporcional à freqüência. Portanto, temos:

$$\Phi_2 = U_2/f$$

Para possibilitar a operação do motor com torque constante para diferentes velocidades, deve-se fazer variar a tensão U_1 proporcionalmente com a variação da freqüência f_1, mantendo, desta forma, o fluxo constante.

6.3.1 - Princípios básicos

O avanço da eletrônica de potência permitiu o desenvolvimento de conversores de freqüência com dispositivos de estado sólido, inicialmente com tiristores e atualmente com transistores, mais especificamente o IGBT, transistor bipolar de porta isolada. Os cicloconversores antecederam, de certa forma, os atuais inversores. Eles eram utilizados para converter 60 Hz da rede em uma freqüência mais baixa, era uma conversão CA-CA. Já os inversores utilizam a conversão CA-CC e, por fim, em CA novamente.

Os inversores podem ser classificados pela sua topologia, que é dividida em três partes, sendo a primeira para o tipo de retificação de entrada, a segunda para o tipo de controle do circuito intermediário e a terceira para a saída.

Retificador: na rede de entrada, a freqüência é fixa em 60 Hz, sendo transformada pelo retificador em contínua (retificador de onda completa). O filtro transforma essa tensão em contínua com valor de aproximadamente:

$$Vcc = 1{,}41 \times Vrede$$

Controle de chaveamento: a figura 6.19 mostra um diagrama esquemático do circuito de um inversor de freqüência:

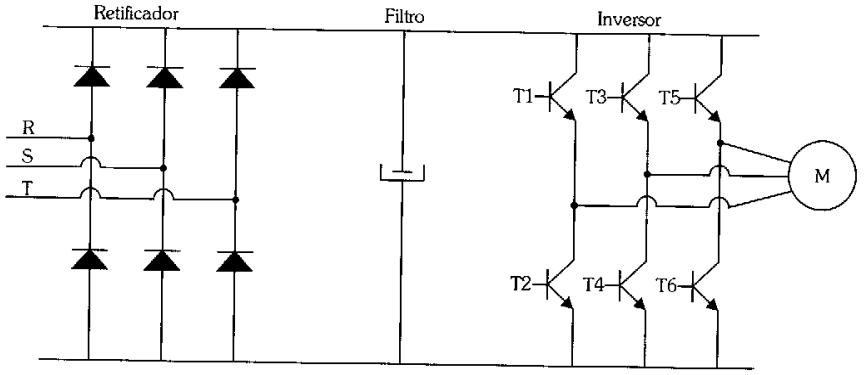


Figura 6.19 - Circuito de um conversor de freqüência.

A tensão contínua é conectada aos terminais de saída pelos tiristores T1 a T6, que funcionam no corte ou na saturação como uma chave estática.

O controle desses circuitos é feito pelo circuito de comando, de maneira a obter um sistema de tensão alternada em que as freqüências estão defasadas em 120°.

Devem ser escolhidas a tensão e a freqüência que permitem que a tensão U_2 seja proporcional à freqüência f para que o fluxo Φ_2 e o torque sejam constantes.

O circuito de comando dos transistores de potência é o elemento responsável pela geração dos pulsos de controle dos transistores de potência a partir do uso de microcontroladores digitais. Tal técnica tornou-se possível e extremamente confiável. Atuando sobre a taxa de variação do chaveamento das bases dos transistores, controla-se a freqüência do sinal trifásico gerado. Como o modulador recebe um sinal de corrente contínua ou é alimentado em corrente contínua, a freqüência e a tensão de saída do modulador para o motor independem da rede de alimentação do conversor, fato que permite que o conversor possa ultrapassar a freqüência nominal da rede.

A figura 6.20 mostra as tensões de saída em forma senoidal, para uma freqüência com período T. A tensão de saída varia de acordo com o método de modulação denominado PWM (*Pulse Width Modulation*) que fornece uma corrente senoidal ao motor para uma freqüência de modulação na faixa de 2 KHZ.

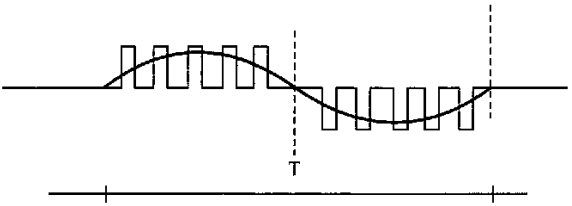


Figura 6.20 - Modulação PWM.

Independente da topologia utilizada, o princípio de funcionamento se baseia em uma tensão CC no circuito intermediário e devemos transformar em tensão CA para acionar o motor AC. Foi mostrado anteriormente um circuito em blocos de um inversor com a topologia PWM, que é a mais utilizada nos inversores de freqüência atuais. Como a tensão é fixa no diagrama, devemos, então, chavear os transistores de saída pela modulação de largura de pulso para obtermos uma forma de tensão CA sintetizada e de freqüência variável.

Com isso, estamos aptos a variar a velocidade do motor. A variabilidade da freqüência é muito grande, e pode ser de forma escalar ou vetorial. Como a escalar é mais comum, vamos comentá-la. A escalar, como o próprio nome sugere, é uma relação direta entre freqüência e tensão.

Observe no gráfico seguinte uma forma mais sucinta dessa descrição.

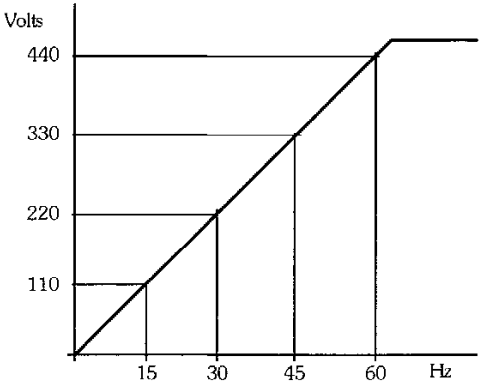


Figura 6.21 - Gráfico tensão x freqüência.

Gráfico escalar

Com a elevação da freqüência do sinal imposto à armadura do motor e manutenção do valor da tensão, a corrente de magnetização da máquina cai proporcionalmente e, com ela, o fluxo magnético estabelecido no entreferro. Conseqüentemente, caindo o fluxo magnético, cai o conjugado disponibilizado por ela. É a *operação com enfraquecimento de campo*. O conjugado eletromagnético da máquina enfraquece e, com isso, determinamos uma área acima da freqüência nominal que chamamos de região de enfraquecimento de campo, em que o fluxo começa a decrescer, portanto o torque começa a diminuir.

A curva conjugado x velocidade do motor acionado com conversor de freqüência pode ser colocada da seguinte maneira:

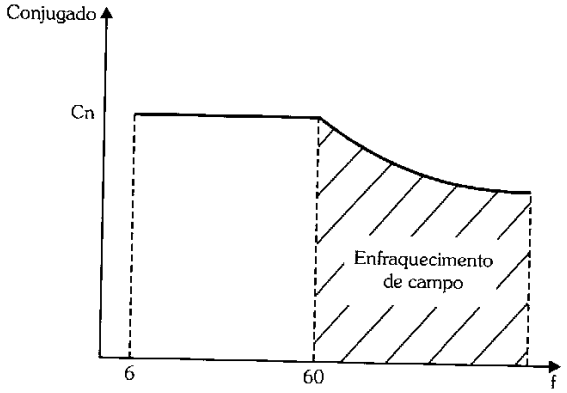


Figura 6.22 - Enfraquecimento do campo.

Podemos notar que o conjugado permanece constante até a freqüência nominal. Acima desse ponto o conjugado começa a decrescer.

É preciso tomar cuidado especial na aplicação de inversores para acionamento de motores em baixa rotação, pois os motores do tipo fechado com ventilação externa são autoventilados. Em baixas rotações, tipicamente abaixo de 50% da rotação nominal, o fluxo de ar pela carcaça é deficiente. A retirada de calor é prejudicada e a potência fornecida pelo motor deve ser reduzida para não ocorrer a queima dos materiais isolantes de seu enrolamento da armadura.

Os fabricantes propõem uma curva operacional como a mostrada a seguir, para evitar danos à máquina, em que um fator é aplicado ao conjugado nominal para determinar a sua capacidade de trabalho.

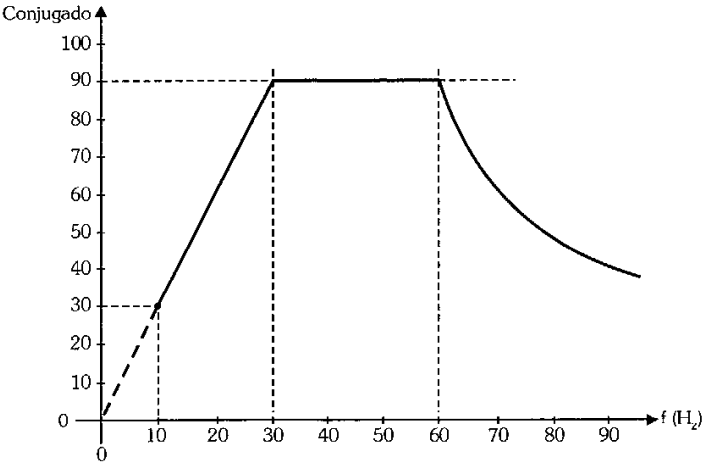


Figura 6.23 - Curva operacional para motor de indução.

Uma solução seria especificar o motor com um fator de serviço maior, ou então aumentar a classe de isolamento para que as bobinas resistam à maior temperatura, ou ainda especificar um motor com uma carcaça maior para que se tenha maior área para troca térmica.

Nos motores de indução trifásicos com ventilação independente, a troca independe da velocidade impressa pela alimentação do eixo. Assim, o conjugado solicitado a ela pode ser otimizado. Dentro de um intervalo que vai dos 10 Hz até a freqüência nominal, é possível ter um conjugado de 90% do conjugado nominal, conforme o gráfico seguinte:

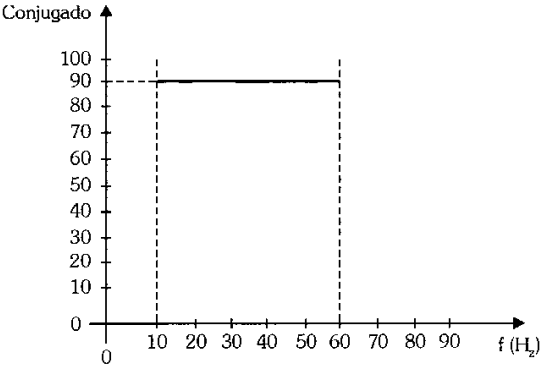


Figura 6.24 - Conjugado para máquinas com ventilação independente.

Os inversores devem garantir que a variação da tensão aplicada seja proporcional à freqüência, o que é feito pelo ajuste automático dos disparos dos transistores por sistemas microprocessados. Para motores de aplicação normal, não é necessário um ajuste muito preciso da velocidade ou do controle do conjugado. Para esses casos, é bastante razoável uma precisão de velocidade de 0,5% da rotação nominal, sem variação da carga e de 3 a 5% com variação de carga de até 100% do conjugado nominal. Usualmente, a faixa de variação da freqüência é pequena, algo entre 6 e 100 Hz.

6.4 - Classificação dos conversores de freqüência

A estrutura eletrônica de potência dos conversores que trabalham com modulação por largura de pulso é praticamente a mesma. O que os diferencia são as variações que ocorrem no seu circuito de comando. De acordo com as estruturas de comando, temos dois tipos de conversores distintos:

6.4.1 - Conversores com controle escalar

Esta família de conversores é composta de sistemas cuja exigência se restringe ao controle da velocidade do motor, sem controle do torque desenvolvido e sem conhecimento da dinâmica do processo sob controle. São sistemas que imprimem um certo erro de velocidade que, dada a aplicação, pode ser facilmente assimilado pelo sistema controlado. Os motores acionados por essa família de conversores têm ou devem atender a exigências normais e o controle é feito em malha aberta (sem realimentação), isto é, não existe, normalmente, um tacogerador instalado no eixo do motor para realimentar a estrutura controladora do conversor. A faixa de freqüências operadas, normalmente, vai dos 10 Hz aos 60 Hz.

6.4.2 - Conversores com controle vetorial

O avanço das técnicas de controle permitiu que as novas estruturas de comando geradas pudessem atender às sofisticadas solicitações do controle de velocidade com respostas rápidas e de alta precisão.

As máquinas de corrente contínua com sistemas de controle em malha fechada já atendiam a essas solicitações e, no acionamento em potência, tinham total domínio. Com o avanço teórico das técnicas vetoriais de controle, em que a avaliação das variáveis internas do motor, num processo dinâmico, é efetuada e passada ao sistema controlador, a regulação da máquina de indução trifásica tornou-se mais precisa e mais próxima do controle alcançado com a máquina de corrente contínua.

A corrente de armadura do motor, menos as perdas no ferro, pode ser analisada como formada por duas parcelas distintas: aquela que é responsável pela magnetização da máquina e, conseqüentemente, pelo fluxo magnético que atravessa o entreferro, e aquela outra parcela do ramo de força do circuito. Portanto, tendo conhecimento dessas grandezas, tem-se conhecimento dos fluxos de energia que a máquina necessita, por meio da análise da corrente da armadura. O sinal vindo do eixo do motor, coletado por um tacogerador de pulsos, fornece uma malha fechada de controle, o que possibilita:

- Alto desempenho dinâmico;
- Operação suave no intervalo de velocidades especificadas para o conversor;
- Pequenas oscilações no conjugado motor, quando ocorrem variações na carga;
- Grande precisão de velocidade.

6.4.3 - Blocos componentes do inversor de freqüência

A figura 6.25 descreve a representação em blocos dos componentes dos inversores de freqüência.

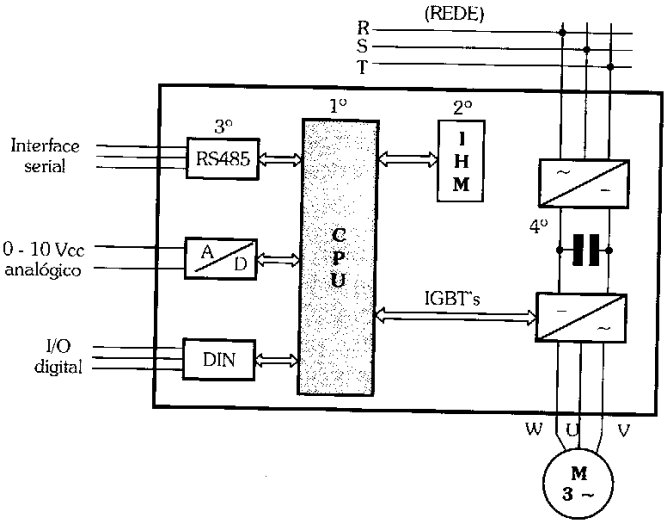


Figura 6.25 - Blocos componentes do inversor de freqüência.

1º Bloco - CPU

A CPU (Unidade Central de Processamento) de um inversor de freqüência pode ser formada por um microprocessador ou por um microcontrolador. Isso depende apenas do fabricante. De qualquer forma, é nesse bloco que todas as informações (parâmetros e dados do sistema) estão armazenadas, visto que também uma memória está integrada a esse conjunto. A CPU não apenas armazena os dados e parâmetros relativos ao equipamento, como também executa a função mais vital para o funcionamento do inversor: geração dos pulsos de disparo, por meio de uma lógica de controle coerente, para os IGBTs.

2º Bloco - IHM

O segundo bloco é a IHM (Interface Homem/Máquina). É através desse dispositivo que podemos visualizar o que está ocorrendo no inversor (*display*) e parametrizá-lo de acordo com a aplicação (teclas). Na figura 6.26, temos um detalhe da IHM de um inversor CFW 08 Plus.

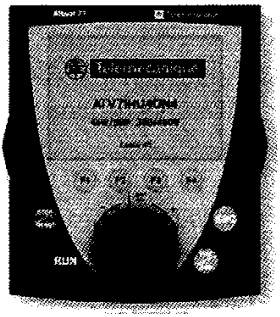


Figura 6.26 - IHM de um inversor Altivar 71.
(Cortesia: Schneider Electric)

Com esse IHM podemos visualizar diferentes grandezas do motor, como: tensão corrente, freqüência, status de alarme, entre outras funções. É também possível visualizar o sentido de giro, verificar o modo de operação (local ou remoto), ligar ou desligar o inversor, variar a velocidade, alterar parâmetros e outras funções.

3º Bloco - interfaces

A maioria dos inversores pode ser comandada por dois tipos de sinais: analógicos ou digitais. Normalmente, quando queremos controlar a velocidade de rotação de um motor AC no inversor, utilizamos uma tensão analógica de comando. Essa tensão se situa entre 0 a 10 Vcc. A velocidade de rotação (RPM) é proporcional ao seu valor, por exemplo:

$$1\ Vcc = 1000\ RPM,\ 2\ Vcc = 2000\ RPM$$

Para inverter o sentido de rotação, basta inverter a polaridade do sinal analógico (de 0 a 10 Vcc sentido horário e −10 a 0 Vcc sentido anti-horário). Este é o sistema mais utilizado em máquinas e ferramentas automáticas, sendo a tensão analógica de controle proveniente do controle numérico computadorizado (CNC).

Além da interface analógica, o inversor possui entradas digitais. Com um parâmetro de programação podemos selecionar a entrada válida (analógica ou digital).

4º Bloco - etapa de potência

A etapa de potência é constituída por um circuito retificador, que alimenta (através de um circuito intermediário denominado "barramento DC") o circuito de saída inversor (módulo IGBT).

O diagrama da figura 6.27 mostra a representação detalhada de um inversor de freqüência comercial WEG:

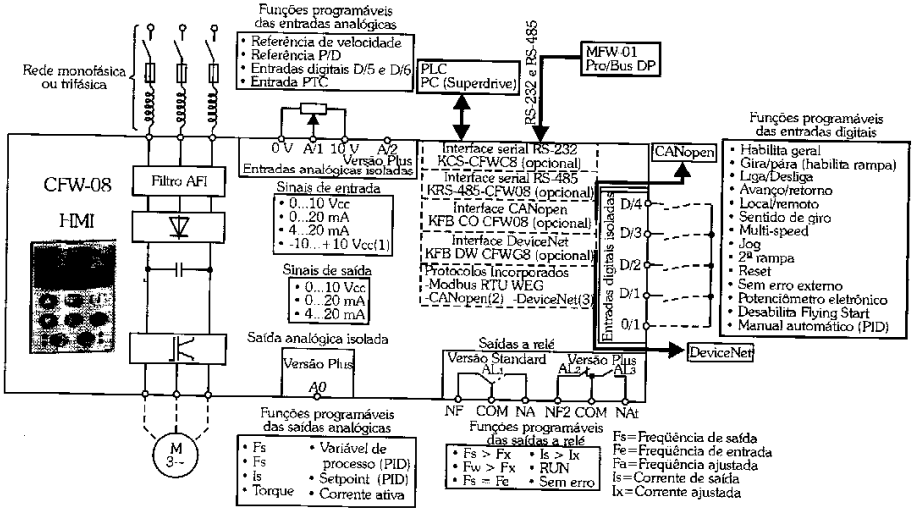


Figura 6.27 - Representação detalhada do inversor CFW 08.

6.4.4 - Dimensionamento do inversor

Para a escolha do inversor, devemos saber modelo, tipo e sua potência de acordo com a necessidade de utilização.

1º Potência do inversor

Para calcularmos a potência do inversor, temos que saber qual motor (e qual carga) ele acionará. Normalmente, a potência dos motores é dada em CV ou HP. Basta fazer a conversão em watts, por exemplo:

Rede elétrica = 380 Vca

Motor = 1HP

Aplicação = exaustor industrial

Cálculos: 1HP = 746 W

Como a rede elétrica é de 380 Vca e os inversores (normalmente) possuem fator de potência igual a 0,8 ($\cos\phi = 0{,}80$), temos:

CI = Corrente do inversor

$$CI = \frac{\text{Potência em Watts}}{\text{Tensão na rede x } \cos\phi}$$

$$CI = \frac{746\,\text{Watts}}{380 \times 0{,}8} = 2{,}45\,\text{A}$$

2º Tipos de inversor

A maioria dos inversores utilizados é do tipo escalar. Só utilizamos o tipo vetorial em duas ocasiões: extrema precisão de rotação, torque elevado para rotação baixa ou zero (guindastes, pontes rolantes, elevadores etc.).

3º Modelo e fabricante

Para escolher o modelo, basta consultarmos os catálogos dos fabricantes, ou procurar um que atenda às seguintes características mínimas, como no caso do exemplo citado.

Tensão de entrada = 380 Vca

Tensão de entrada = 380 Vca

Tipo = escalar

Os mais encontrados nas indústrias são: Siemens, WEG, YasKawa e GE (Fanuc).

6.4.5 - Sistemas de entrada e saída de dados

O sistema de entrada e saída de dados é composto por dispositivos responsáveis pela interligação do homem com a máquina. São dispositivos por onde o homem pode introduzir informações na máquina ou por onde a máquina pode enviar informações ao homem. Para os conversores de freqüência, podemos citar os seguintes dispositivos:

Interface homem/máquina (IHM): é um dispositivo de entrada/saída de dados, em que o operador pode entrar com os valores dos parâmetros de operação do conversor, como: ajuste de velocidade, tempo de aceleração/desaceleração etc. Também pode ter acesso aos dados de operação do conversor, como: velocidade do motor, corrente, indicação de erro etc.

Entradas e saídas analógicas: são os meios de controlar/monitorar o conversor através de sinais eletrônicos analógicos, isto é, sinais em tensão (0..10 Vcc) ou em corrente (0....20 mA, 4 ...20 mA) e que permitem basicamente fazer o controle de velocidade (entrada) e leituras de corrente ou velocidade (saída).

Entradas e saídas digitais: são os meios de controlar/monitorar o conversor através de sinais digitais discretos, como chaves liga/desliga. Esse tipo de controle permite basicamente ter acesso a funções simples, como seleção de sentido de rotação, bloqueio, seleção de velocidades etc.

Interface de comunicação serial: esse meio de comunicação permite que o conversor seja controlado/monitorado a distância por um computador central. Essa comunicação é executada por pares de fios, podendo ser conectados vários conversores a um computador central ou operado por CLP, por redes *field bus*, RS 232 ou RS 485, entre outras.

O conversor de freqüência permite o acionamento de motores de indução com freqüências entre 1 a 60 Hz com um torque constante, sem aquecimentos anormais nem vibrações fora de ordem. Também possui outras vantagens que estão enumeradas a seguir:

- Rendimento de 90% em toda a faixa de velocidade;
- Fator de potência de aproximadamente 96%;
- Acionamento de cargas de torque constante ou variável;
- Faixa de variação de velocidade, que pode chegar até 1:20;
- Partida e desligamento suave (rampa).

6.4.6 - Formas de variação de velocidade em um inversor de freqüência

A principal função de um conversor de freqüência é a variação de velocidade em um motor elétrico. Existem algumas formas de promover essa variação de velocidade. A seguir, enumeramos as principais maneiras de realizar essa variação de velocidade pelo inversor de freqüência:

1. Acionamento pela IHM

Uma das maneiras de realizar o controle de velocidade de um inversor de freqüência é o acionamento pelas teclas da IHM. Para tal, deve-se colocar o inversor em modo local, e pelo teclado, pode-se incrementar e decrementar a velocidade do motor localmente, bem como inverter o sentido de giro do motor.

2. Acionamento pelas entradas digitais

Em uma aplicação industrial, torna-se inviável o acionamento de um inversor localmente direto nas teclas de sua IHM. Assim, a grande maioria das aplicações com inversores de freqüência é realizada por meio de comandos remotos. Para isso, deve-se colocar o inversor em modo de acionamento remoto e, por meio de botões externos, acionar ou desativar o motor e ainda inverter o seu sentido de giro.

3. Acionamento pela função *multispeed*

O *multispeed* é utilizado quando se deseja até oito velocidades fixas pré-programadas. Permite o controle da velocidade de saída relacionando os valores definidos por parâmetros, conforme a combinação lógica das entradas digitais programadas para *multispeed*.

Para a ativação da função *multispeed*, primeiramente é preciso fazer com que a fonte de referência seja dada pela função *multispeed*, colocar o inversor em modo remoto e programar uma ou mais entradas digitais para *multispeed*, conforme a tabela 6.1.

	8 velocidades		
	4 velocidades		
		2 velocidades	
D12	**D13**	**D14**	**Referência de Freqüência**
Aberta	Aberta	Aberta	P124
Aberta	Aberta	0 V	P125
Aberta	0 V	Aberta	P126
Aberta	0 V	0 V	P127
0 V	Aberta	Aberta	P128
0 V	Aberta	0 V	P129
0 V	0 V	Aberta	P130
0 V	0 V	0 V	P131

Tabela 6.1 - Variação de velocidade de acordo com a função multispeed.

A função *multispeed* tem como vantagem a estabilidade das referências fixas pré-programadas e também garante a imunidade contra ruídos elétricos. A figura 6.28 exibe um gráfico aplicado ao inversor CFW 08 plus da WEG.

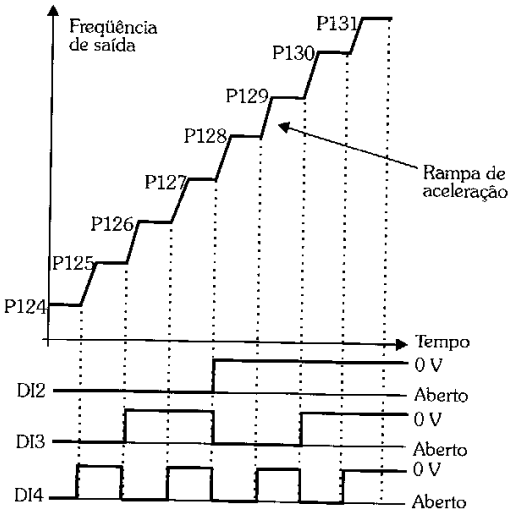


Figura 6.28 - Gráfico da variação da velocidade pelo comando multispeed.

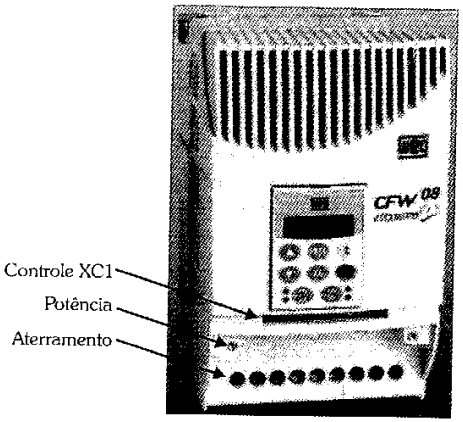
4. Acionamento pelas entradas analógicas

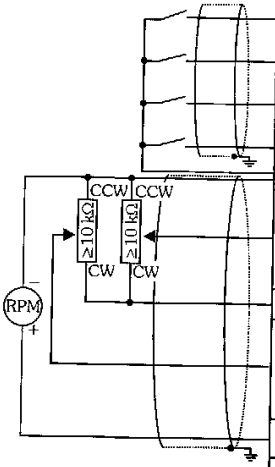
Em muitas aplicações industriais, deseja-se um controle da velocidade do motor desde 0% a 100%. Como vimos anteriormente, esse controle não é possível se utilizarmos entradas digitais. Para efetuarmos esse tipo de controle, pode-se trabalhar com as entradas analógicas do inversor por meio de sinais de tensão (0 a 10 Vcc) ou de sinais de corrente (4 a 20 mA). Esse acionamento pode ser realizado de duas maneiras:

- **Pelo potenciômetro**: o inversor de freqüência possui em seus bornes uma fonte de 10 Vcc, assim, pode-se conectar um potenciômetro na configuração de divisor de tensão para aplicar uma tensão variável de 0 a 10 Vcc.
- **Pela fonte de tensão ou corrente externas**: esse tipo de configuração é um dos mais utilizados quando se quer controlar a velocidade do inversor remotamente. O fornecimento de tensão ou corrente é feito por um controlador externo, como um controlador lógico programável (CLP) ou um controlador industrial.

6.4.7 - Conexões de entrada e saída do inversor de freqüência

As conexões de sinais (entradas e saídas analógicas) e controle (entradas digitais e saídas a relé) são feitas no conector do Cartão Eletrônico de Controle. A seguir veja os bornes de conexão para o circuito de potência e de aterramento. A figura exibe o diagrama de conexões de entradas para o inversor CFW 08 Plus 6.29.





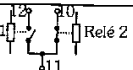
Conector XC1		Descrição Função padrão de fábrica	Especificações
1	DI1	Entrada digital 1 Sem função ou habilita geral	4 entradas digitais isoladas Nível alto mínimo: 10 Vcc Nível baixo mínimo: 3 Vcc Nível alto máximo: 30 Vcc Corrente de entrada: -11 mA @ 0 Vcc Corrente de entrada máxima: -20 mA
2	DI2	Entrada digital 2 Sentido de giro (remoto)	
3	DI3	Entrada digital 3 Reset	
4	DI4	Entrada digital 4 Sem função ou gira/pára	
5	GND	Referência 0 V	Não interligada com o PE
6	AI1	Entrada analógica 1 Referência de freqüência (remoto)	0 a 10 Vcc ou 0(4) a 20 mA. Impedância: 100 kΩ (entrada em tensão), 500 Ω (entrada em corrente). Resolução: 7 bits Tensão máxima de entrada: 30 Vcc.
7	+10 V	Referência para o potenciômetro	+10 Vcc ±5%, capacidade: 2 mA
8	AI2	Entrada analógica 2 Sem função	0 a 10 Vcc ou 0(4) a 20 mA. Impedância: 100 kΩ (entrada em tensão), 500 Ω (entrada em corrente). Resolução: 7 bits Tensão máxima de entrada: 30 Vcc.
9	AO	Saída analógica Freqüência de saída (Fs)	0 a 10 Vcc, RL ≥ 10 kΩ Resolução: 8 bits
10	AF	Contato NF do relé 2 Fs>Fx	 Capacidade dos contatos: 0,5 A / 250 Vac
11	Comum	Ponto comum dos relés	
12	NA	Contato NA do relé 1 Sem erro	

Figura 6.29 - Diagrama de conexões do inversor CFW 08 Plus.

6.4.8 - Transferência de configuração pela IHM

Em muitos modelos de inversor, é possível transferir o conteúdo dos parâmetros de um inversor para outro(s), possibilitando a configuração de inversores com maior agilidade. Essa função somente pode ser utilizada quando os inversores são do mesmo modelo (tensão e corrente) e têm versões de software compatíveis.

A figura 6.30 mostra a retirada e a conexão da IHM para a transferência da configuração.

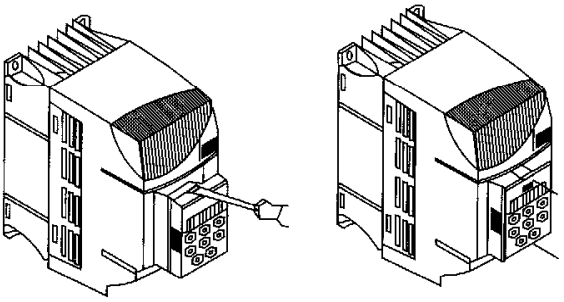


Figura 6.30 - Retirada e conexão da IHM do inversor.

6.4.9 - Aplicação dos inversores de freqüência em controle

A grande maioria dos inversores de freqüência dispõe da função regulador a PID que pode ser usada para fazer o controle de um processo em malha fechada. Essa função faz o papel de um regulador proporcional, integral e derivativo superposto ao controle normal de velocidade do inversor. A velocidade é variada de modo a manter a variável de processo (aquela que se deseja controlar, por exemplo: nível de água de um reservatório) no valor desejado, ajustado na referência (*setpoint*).

Um exemplo desse controle é um inversor acionando uma motobomba que faz circular um fluído numa dada tubulação. O próprio inversor pode fazer o controle da vazão nessa tubulação utilizando o regulador PID, sem necessidade de um controlador externo. Nesse caso, por exemplo, o *setpoint* (de vazão) pode ser dado por uma entrada analógica ou via *setpoint* digital e o sinal de realimentação da vazão chega à entrada analógica. Outros exemplos de aplicação: controle de nível, temperatura, dosagem, entre outros.

A figura 6.31 representa a aplicação de um inversor CFW08 Plus para controle PID.

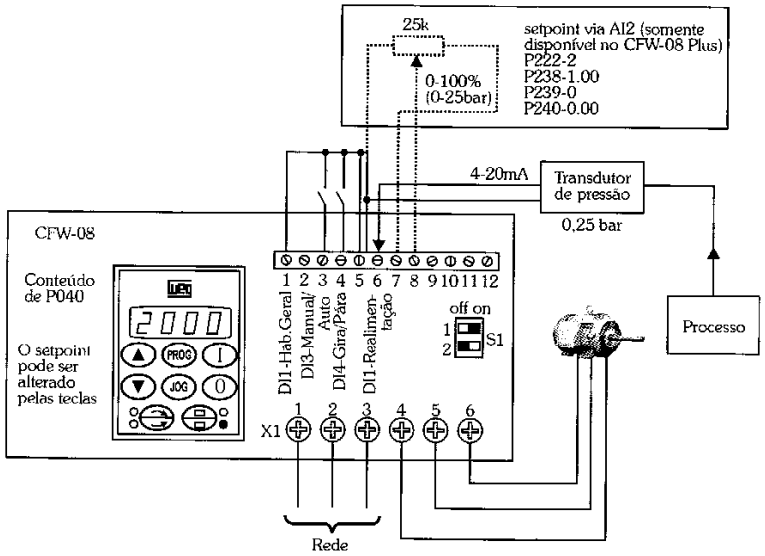


Figura 6.31 - Aplicação do controle PID em um inversor de freqüência.

6.4.10 - Considerações finais sobre os inversores de freqüência

Perda de potência: algumas restrições são feitas com relação à utilização dos conversores de freqüência. Uma delas é que o conversor não fornece uma forma de onda perfeitamente senoidal, o que traz perdas ao motor na faixa de 15%. No caso de implementação de inversores em motores já instalados, deve-se verificar se existe essa folga de potência e para motores novos deve-se levar em consideração esse acréscimo de potência.

Influência sobre os capacitores: os capacitores são afetados quando percorridos por correntes de alta freqüência. Deve-se ter atenção para evitar que o motor seja submetido a sobretensões devido a essa influência.

Sobretensões no isolamento: a comutação no conversor é realizada em alta freqüência, provocando elevados picos de tensão que afetam o isolamento das espiras entre fases e entre fase e terra. A taxa de crescimento da tensão em relação ao tempo (dv/dt) é muito elevada no processo de comutação,

e a isolação das espiras é afetada. Para minimizar esses efeitos, deve-se especificar o motor de uma classe de tensão de, no mínimo, 600 V com tensão suportável de pico de pelo menos 1000 V.

Limite de comprimento do circuito do motor: uma onda de tensão é injetada no terminal de fonte de circuito do motor, que tem uma determinada impedância característica, e atinge o terminal de carga em que estão ligadas as bobinas, cuja impedância característica é relativamente bem maior que a primeira, o que pode resultar no fenômeno de reflexão e refração da onda. Assim, o motor pode ser submetido à elevação de tensão nos seus bornes. A equação a seguir mostra o comprimento do cabo, em que podem surgir anomalias danosas à isolação do motor:

$$L_{cr} = (V_{po} \times T_{ct})/2$$

Sendo:

$\mathbf{V_{po}}$: velocidade de propagação da onda de tensão aproximadamente 150 m/μs

$\mathbf{T_{ct}}$: tempo de crescimento do pulso de tensão

A figura 6.32 mostra um gráfico do comprimento crítico do cabo em função do tempo de crescimento da tensão.

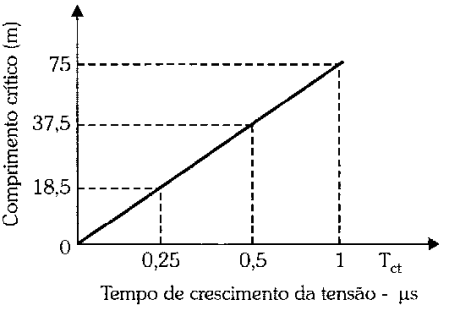


Figura 6.32 - Comprimento crítico do cabo.
(Fonte: Instalações Elétricas Industriais: João Mamede Filho)

Distorção harmônica: outro fator que deve ser considerado é a distorção harmônica, pois, como foi citado anteriormente, o conversor de freqüência fornece ao motor uma onda que não é perfeitamente senoidal, em função dos componentes harmônicos, tanto de tensão quanto de corrente, afetando, assim, as características dos motores de indução e seu rendimento.

Portanto, para manter a elevação de temperatura do motor dentro de sua classe de isolamento, é necessário reduzir o torque por meio de um fator apresentado na figura 6.33.

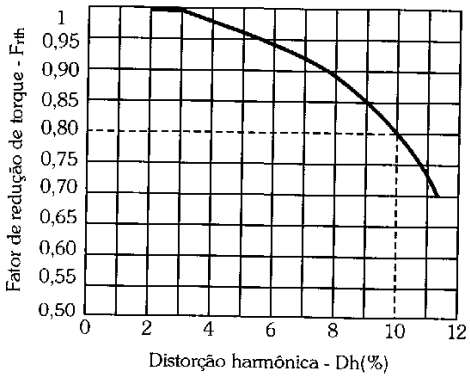


Figura 6.33 - Fator de redução de torque x distorção harmônica.
(Fonte: Instalações Elétricas Industriais: João Mamede Filho)

Para obter o rendimento de um motor de indução, acionado por um conversor de freqüência, deve-se utilizar a equação seguinte:

$$\eta_r = \frac{F_{rth}^2}{\frac{1}{\eta} + F_{rth}^2 - 1}$$

Sendo:

η_r: rendimento do motor trabalhando com o conversor de freqüência

η: rendimento do motor alimentado por uma onda senoidal

F_{rth}: fator de redução de torque por distorção harmônica

Exercícios propostos

1. Qual é a função de uma chave de partida *soft-starter*?
2. Quais as vantagens de empregar uma chave de partida *soft-starter*?
3. Qual o princípio de funcionamento de uma *soft-starter*?
4. Descreva as principais funções da *soft-starter*.
5. Quais são os tipos de parâmetros que podem ter uma *soft-starter*? Explique.
6. Quais são as formas de ligação de uma *soft-starter*?
7. Qual é a função de um inversor de freqüência?
8. Qual é o princípio de funcionamento de um inversor de freqüência?
9. Qual a faixa de freqüência recomendada para o uso do inversor de freqüência? Por quê?
10. O que é inversor de freqüência escalar?
11. Defina inversor de freqüência vetorial.
12. Quais são as interfaces de comunicação com o usuário existentes no inversor de freqüência?
13. Quais as vantagens de uma chave de partida que utiliza inversores de freqüência?

A

ESQUEMAS ELÉTRICOS

Esta seção apresenta uma série de esquemas de acionamentos elétricos para diversos empregos diferentes. Faz uma progressão de comandos mais simples até os mais complexos. Todos devem ser considerados **exemplos de ensino**. Não podem ser aplicados diretamente na prática por não conterem todas as funções necessárias de sinalização e segurança.

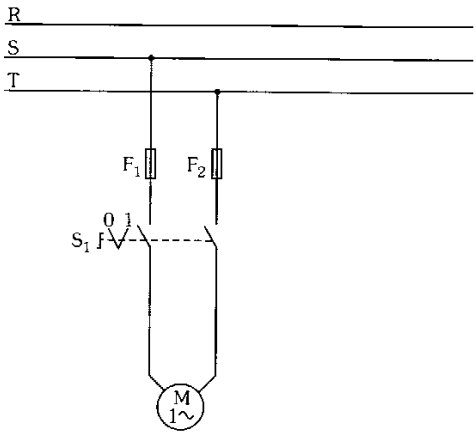


Figura A.1 - Partida de motor monofásico com chave mecânica.

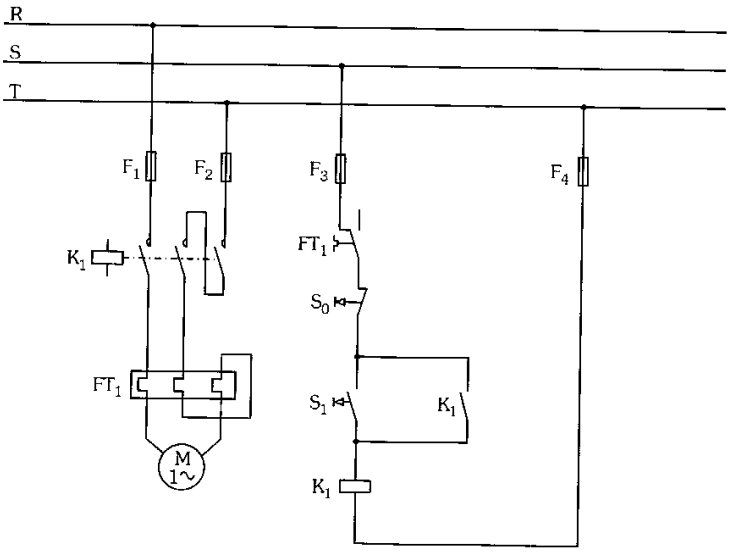


Figura A.2 - Partida de motor monofásico a contator.

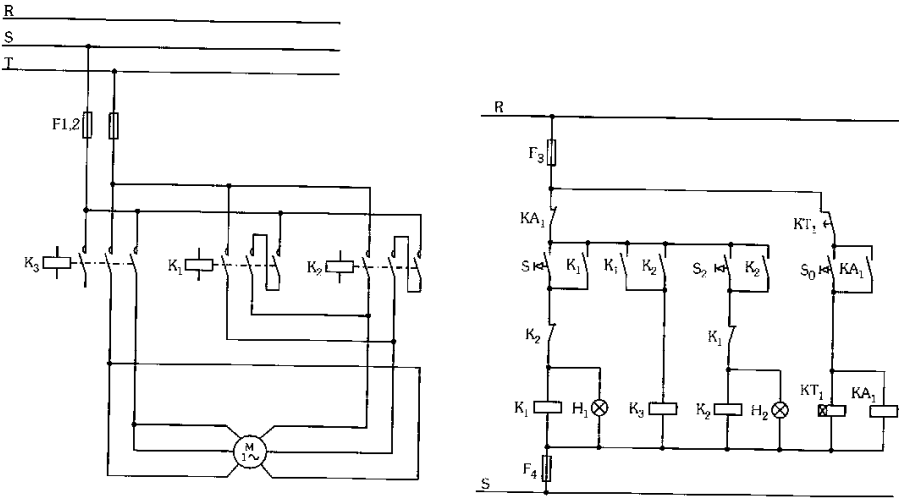


Figura A.3 - Reversão do motor monofásico.

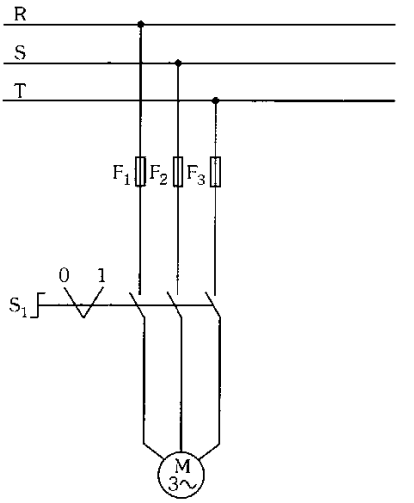


Figura A.4 - Partida de motor trifásico com chave mecânica.

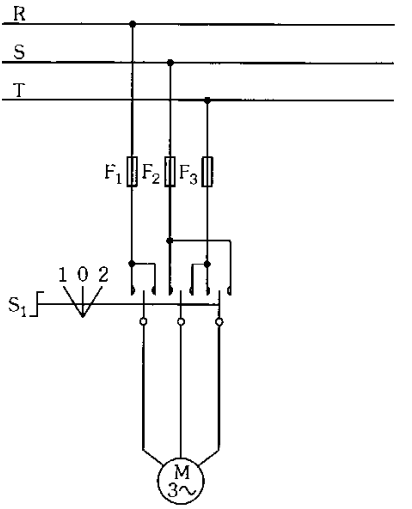


Figura A.5 - Partida reversora de motor trifásico com chave mecânica.

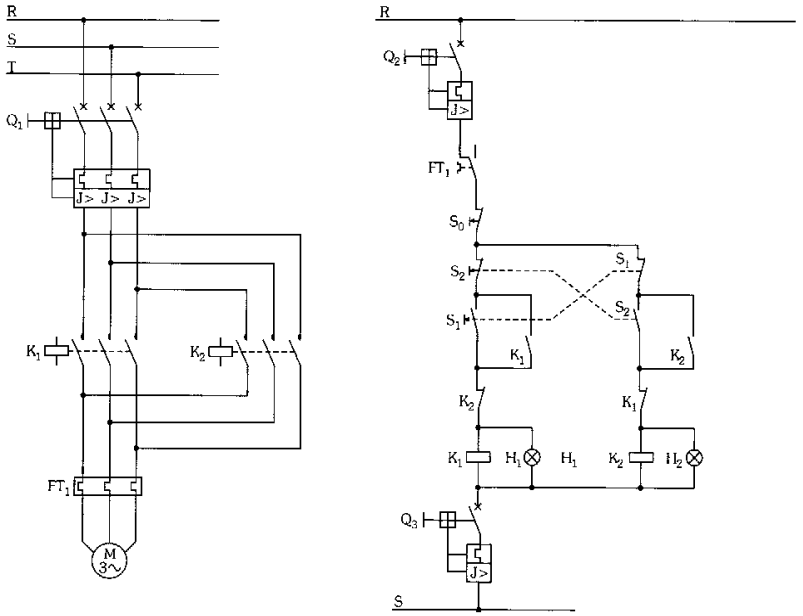


Figura A.6 - Partida reversora trifásica.

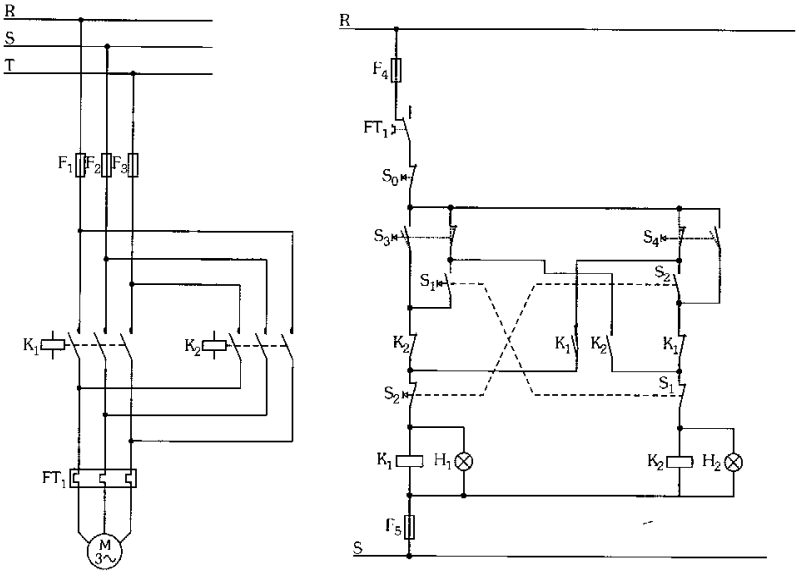


Figura A.7 - Partida reversora trifásica com fins de curso.

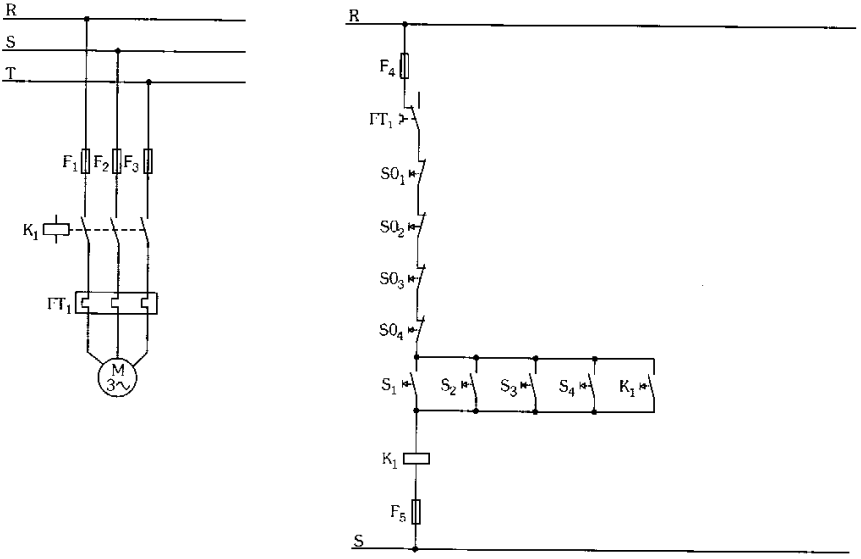


Figura A.8 - Motor acionado de vários pontos.

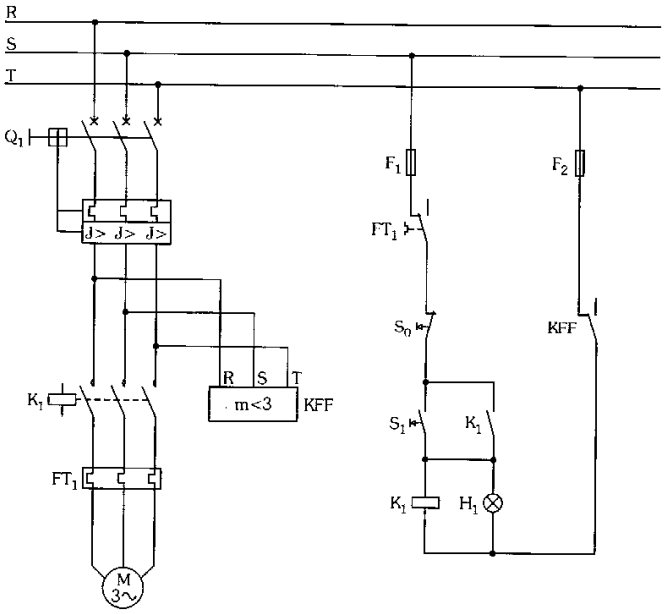


Figura A.9 - Proteção contra falta de fase.

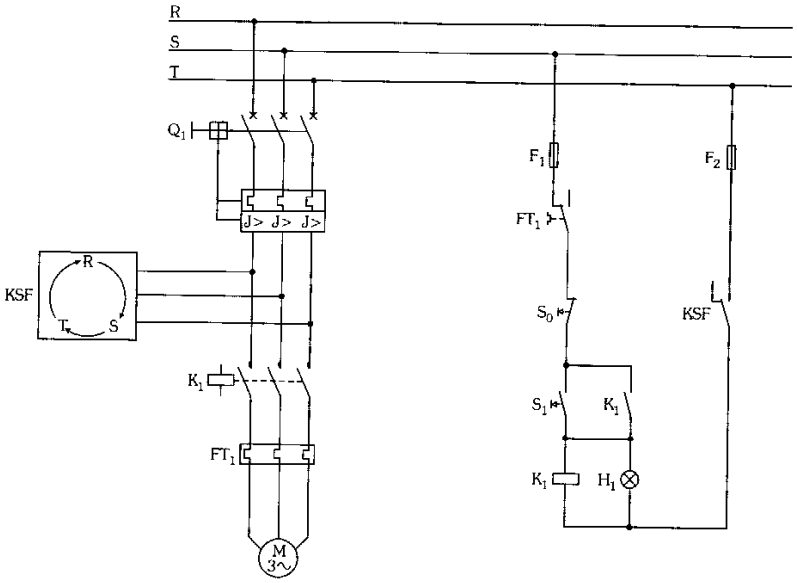


Figura A.10 - Proteção contra seqüência de fase invertida.

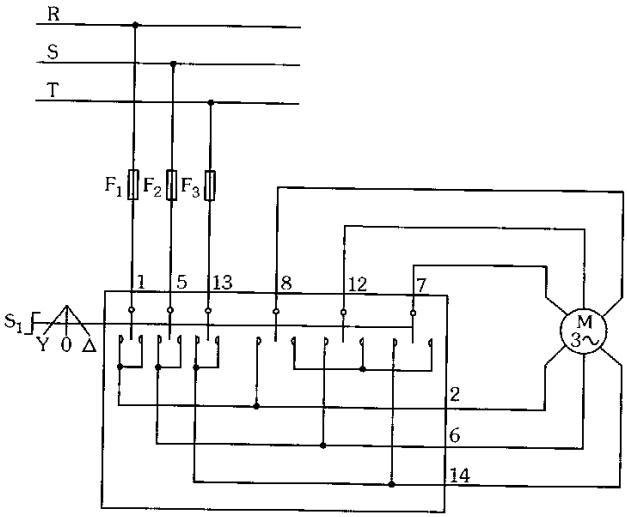


Figura A.11 - Partida estrela-triângulo com chave mecânica.

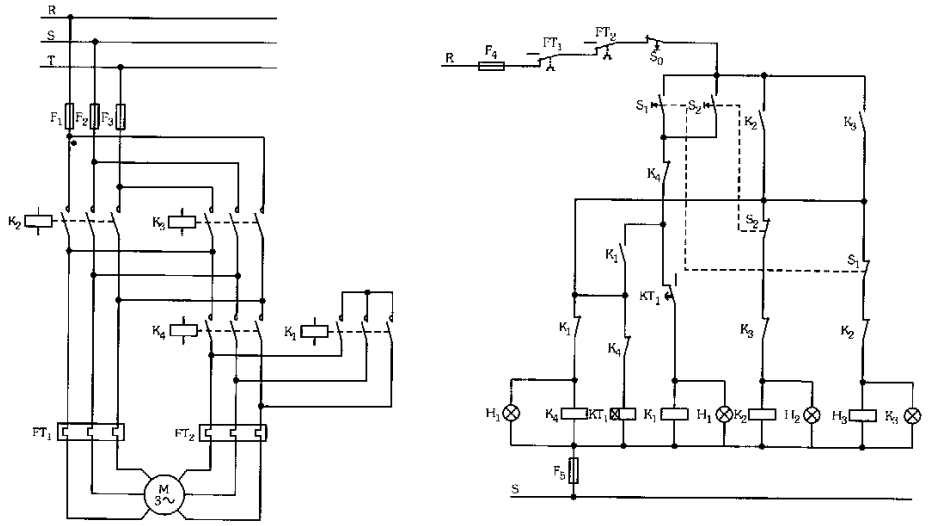


Figura A.12 - Partida estrela-triângulo com reversão.

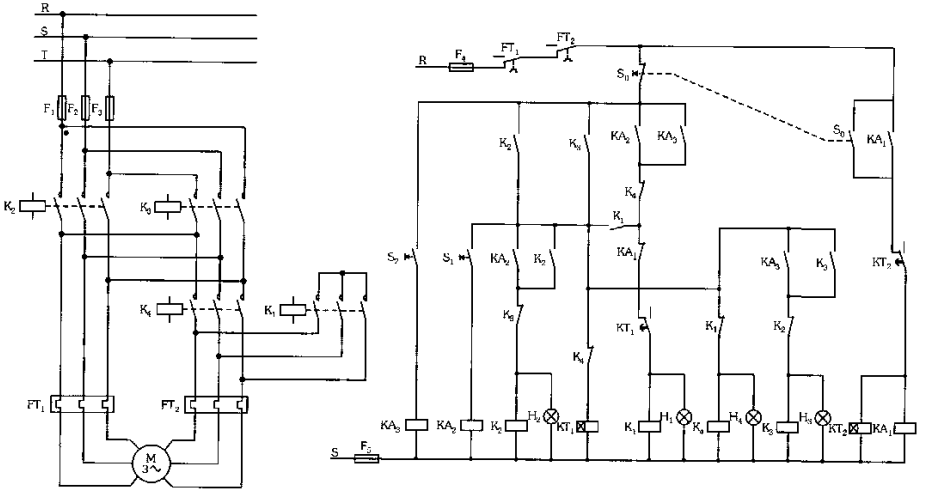


Figura A.13 - Partida estrela-triângulo com retardo para reversão.

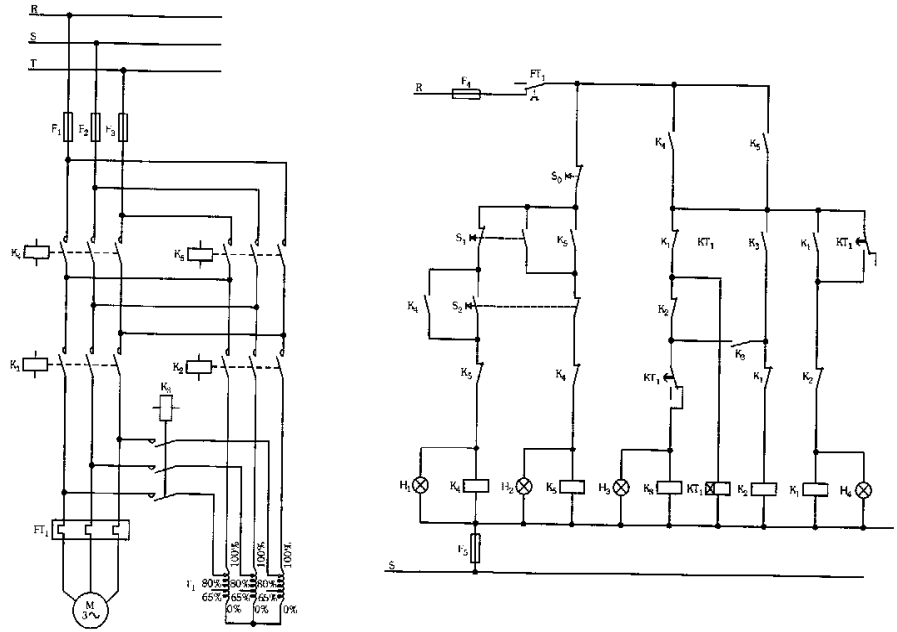


Figura A.14 - Partida compensadora com reversão.

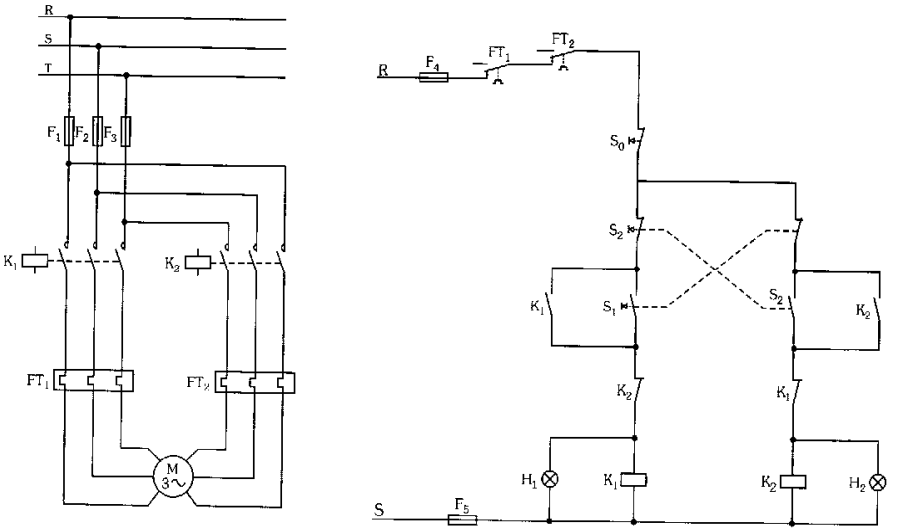


Figura A.15 - Motor com dois enrolamentos e duas velocidades.

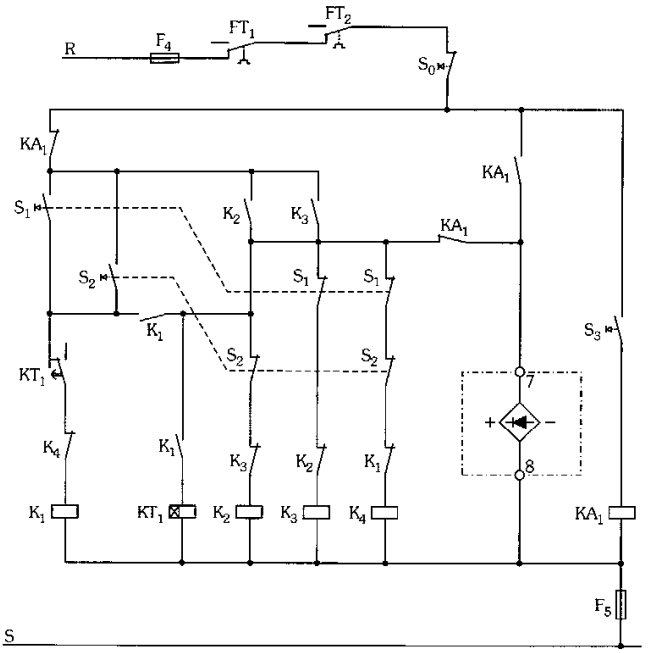


Figura A.16 - Partida estrela-triângulo com reversão para motofreio de proteção.

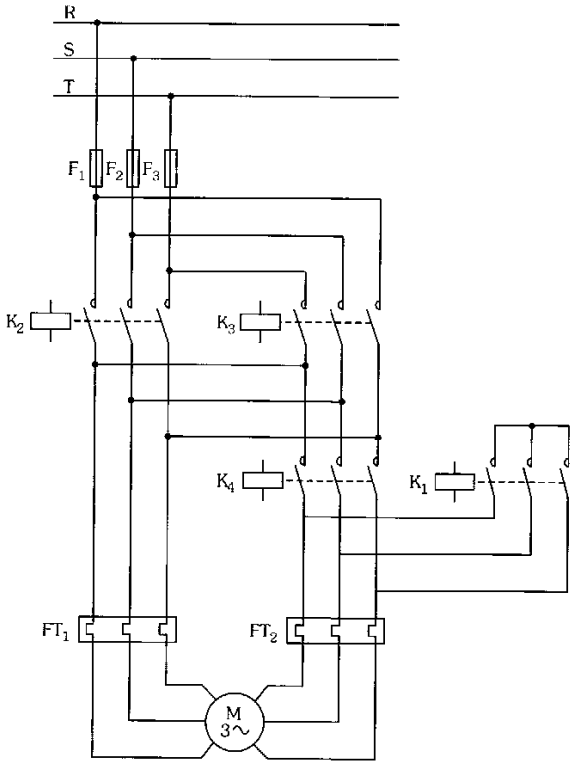


Figura A.17 - Partida estrela-triângulo com reversão para motofreio de proteção.

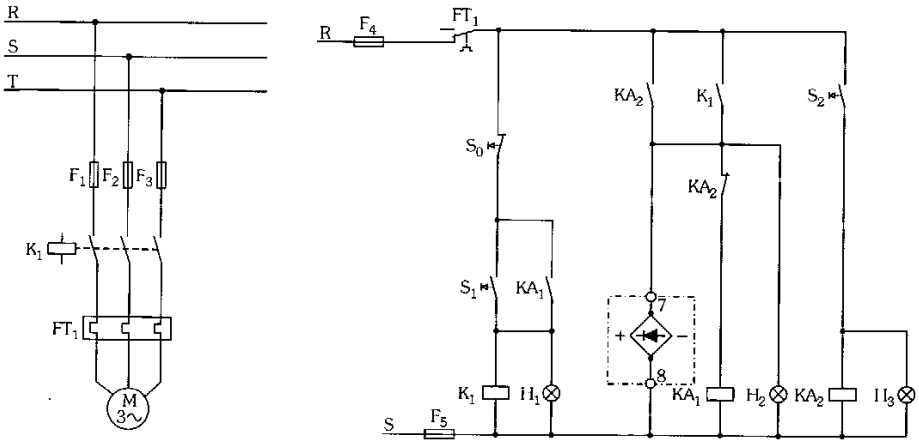


Figura A.18 - Chave de partida de motor com motofreio.

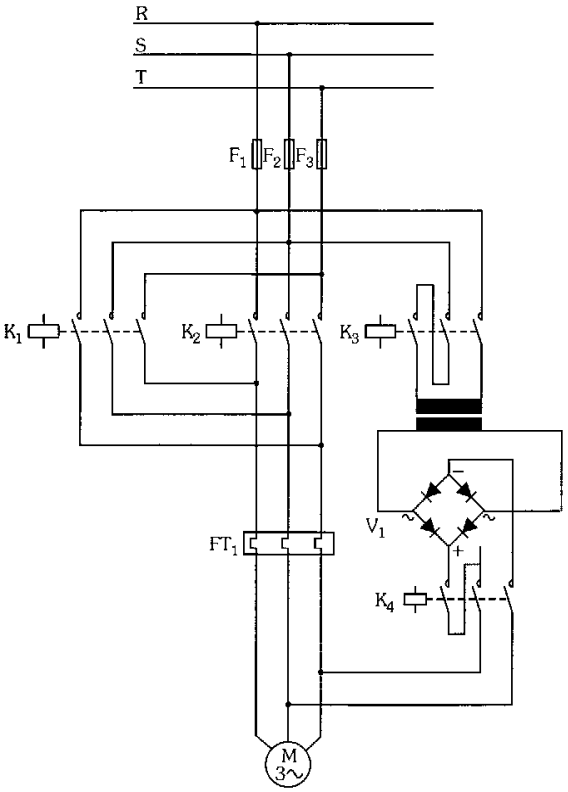


Figura A.19 - Motofreio reversível - força.

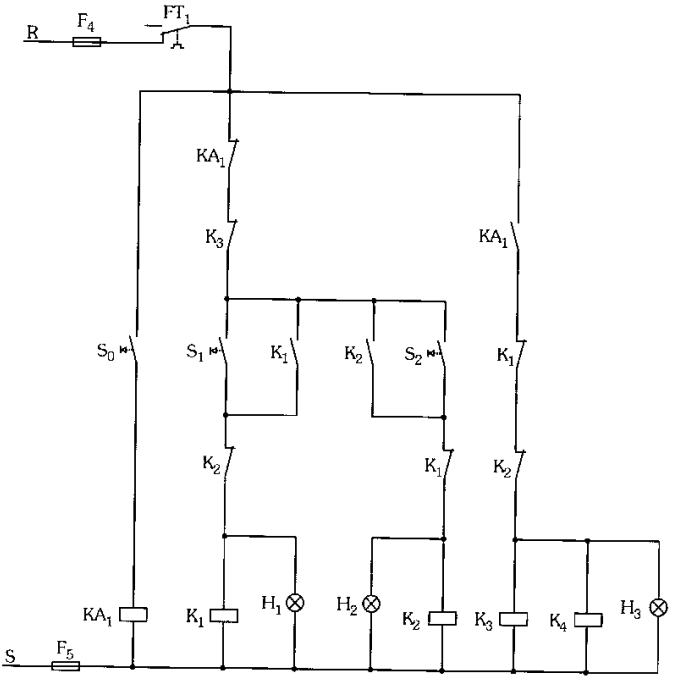


Figura A.20 - Motofreio reversível - comando.

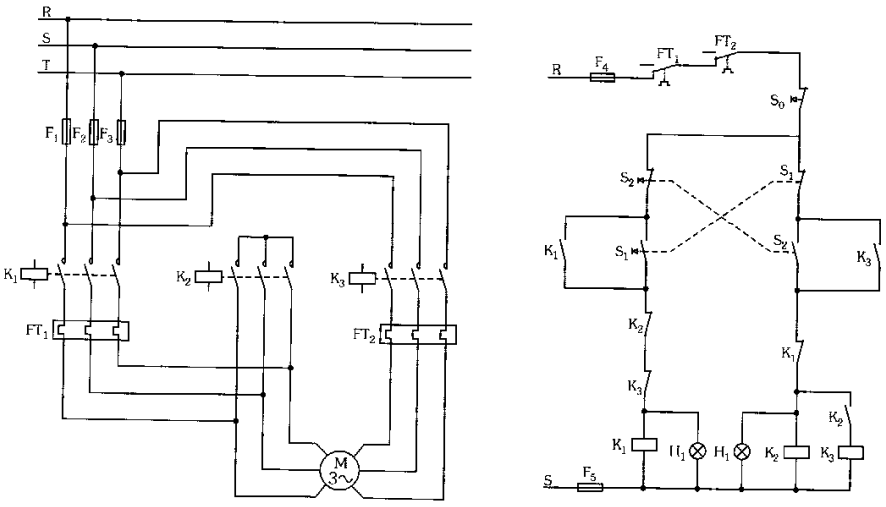


Figura A.21 - Partida em motor Dahlander.

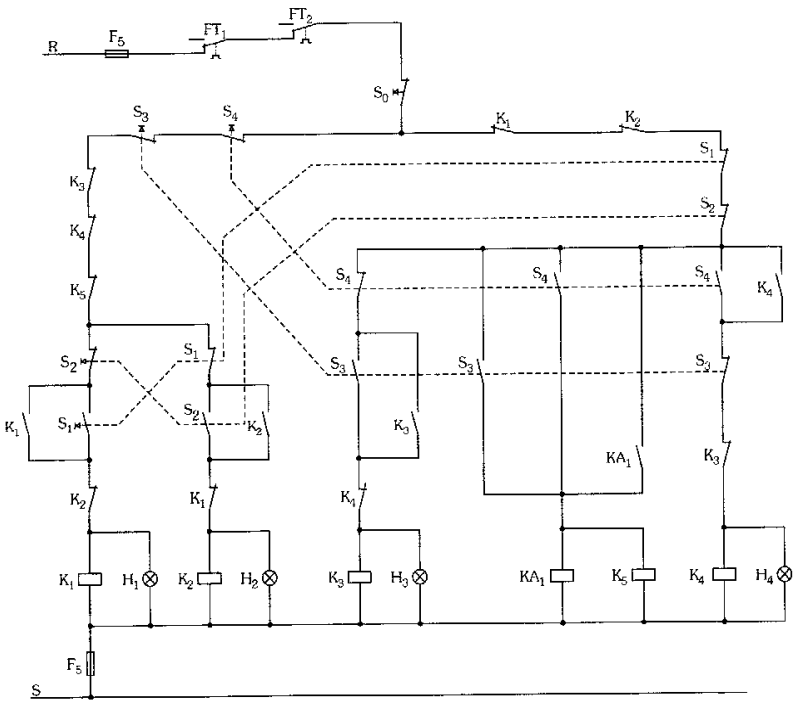


Figura A.22 - Diagrama de comando do motor Dahlander com reversão.

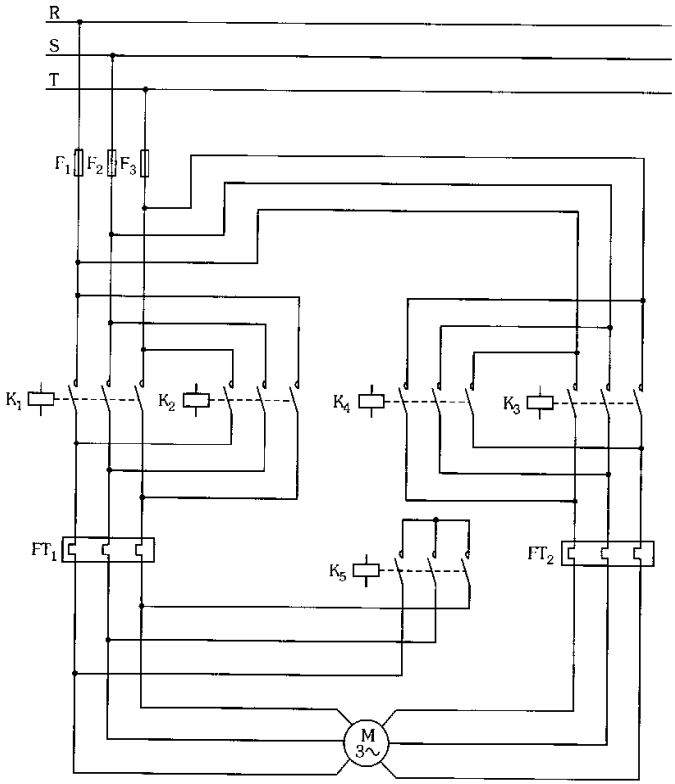


Figura A.23 - Motor Dahlander com reversão - circuito de força.

B

SIMBOLOGIA ELÉTRICA

A seguir, relacionam-se as normas nacionais e internacionais dos símbolos de maior uso, comparando a simbologia brasileira (ABNT) com a internacional (IEC), com a alemã (DIN) e com a norte-americana (ANSI), visando facilitar a modificação de diagramas esquemáticos, segundo as normas estrangeiras, para as normas brasileiras, e apresentar ao profissional a simbologia correta em uso no território nacional.

A simbologia tem por objetivo estabelecer símbolos gráficos que devem ser usados para, em desenhos técnicos ou diagramas de circuitos de comandos eletromecânicos, representar componentes e a relação entre eles. A simbologia aplica-se, generalizadamente, nos campos industrial, didático e outros em que fatos de natureza elétrica precisem ser esquematizados graficamente.

O significado e a simbologia estão de acordo com as abreviaturas das principais normas nacionais e internacionais adotadas na construção e instalação de componentes e órgãos dos sistemas elétricos.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Atua em todas as áreas técnicas do País. Os textos de normas são adotados pelos órgãos governamentais (federais, estaduais e municipais) e pelas empresas. Compõem-se de Normas (NB), Terminologia (TB), Simbologia (SB), Especificações (EB), Método de ensaio e Padronização (PB).

ANSI - American National Standards Institute

Instituto de Normas dos Estados Unidos, que publica recomendações e normas em praticamente todas as áreas técnicas. Na área dos dispositivos de comando de baixa tensão, tem adotado, freqüentemente, especificações da UL e da NEMA.

Sigla, significado e natureza

Em seguida há uma descrição dos principais institutos de normas internacionais:

CEE - International Comission on Rules of the Approval of Electrical Equipment

Especificações internacionais destinadas, sobretudo, ao material de instalação.

CEMA - Canadian Electrical Manufactures Association

Associação Canadense dos Fabricantes de Material Elétrico.

CSA - Canadian Standards Association

Entidade Canadense de Normas Técnicas que publica as normas e concede certificado de conformidade.

DEMKO - Danmarks Elektriske Materielkontrol

Autoridade Dinamarquesa de Controle dos Materiais Elétricos que publica normas e concede certificados de conformidade.

DIN - Deutsche Industrie Normen

Associação de Normas Industriais Alemãs. Suas publicações são devidamente coordenadas com as da VDE.

IEC - International Electrotechinical Comission

Essa comissão é formada por representantes de todos os países industrializados. Recomendações da IEC, publicadas por essa comissão, já são parcialmente adotadas e caminham para uma adoção na íntegra pelos diversos países ou, em outros casos, procede-se a uma aproximação ou adaptação das normas nacionais ao texto dessas normas internacionais.

JEC - Japanese Electrotechinical Committee

Comissão Japonesa de Eletrotécnica.

JEM - The Standards of Japan Electrical Manufactures Association

Normas da Associação de Fabricantes de Material Elétrico do Japão.

JIS - Japanese Industrial Standards

Associação de Normas Industriais Japonesas.

KEMA - Kenring van Elektrotechnische Materialen

Associação Holandesa de ensaio de Materiais Elétricos.

NEMA - National Electrical Manufactures Association

Associação Nacional dos Fabricantes de Material Elétrico (EUA).

OVE - Osterreichischer Verband fur Elektrotechnik

Associação Austríaca de Normas Técnicas, cujas determinações geralmente coincidem com as da IEC e VDE.

SEN - Svensk Standard

Associação Sueca de Normas Técnicas.

UL - Underwriters Laboratories Inc.

Entidade nacional de ensaio da área de proteção contra incêndio, nos Estados Unidos, que, entre outros, realiza os ensaios de equipamentos elétricos e publica as suas prescrições.

UTE - Union Tecnique de l'Electricité

Associação Francesa de Normas Técnicas.

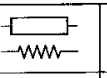
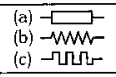
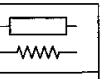
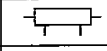
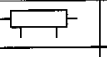
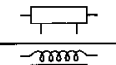
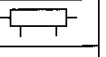
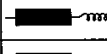
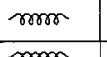
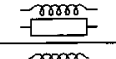
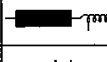
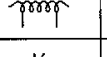
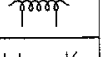
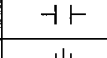
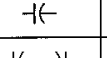
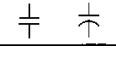
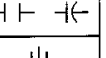
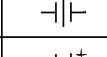
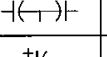
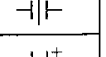
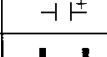
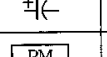
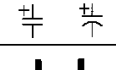
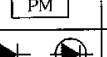
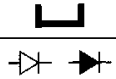
VDE - Verband Deutscher Elektrotechniker

Associação de Normas Técnicas Alemãs que publica normas e recomendações da área de eletricidade.

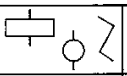
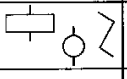
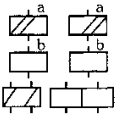
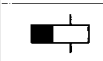
A seguir, temos os principais símbolos empregados por essas entidades.

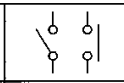
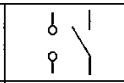
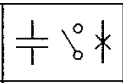
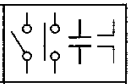
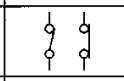
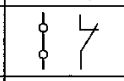
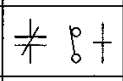
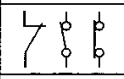
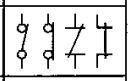
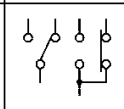
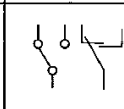
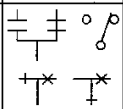
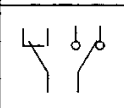
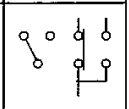
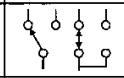
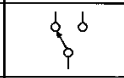
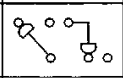
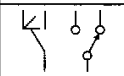
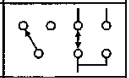
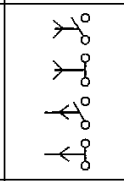
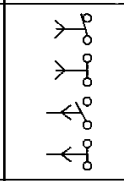
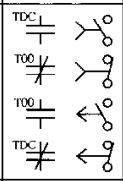
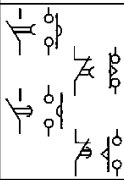
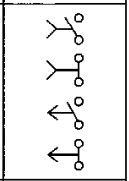
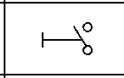
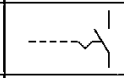
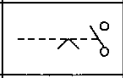
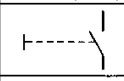
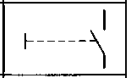
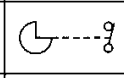
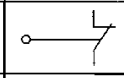
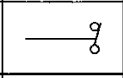
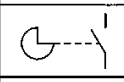
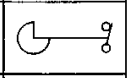
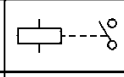
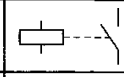
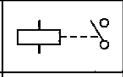
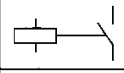
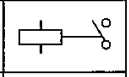
Significado	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
Grandezas elétricas-fundamentos					
Corrente contínua			DC		
Corrente alternada			AC		
Corrente contínua e alternada					
Exemplo de corrente alternada monofásica, 60 Hz	1-60 Hz	1-60 Hz	1 Phase 2 Wire-60 Hz	1-60 Hz	1-60 Hz
Exemplo de corrente alternada trifásica, 3 condutores, 60 Hz, tensão de 220 V	3-60 Hz 220	3-60 Hz 220	3Phase-3Wire 60Cycle-220 V	3-60 Hz-200 V (3N 3 W 220 V-60 Hz)	3-60 Hz-220 V
Exemplo de corrente alternada trifásica com neutro, 4 condutores, 60 Hz tensão de 380 V	3N-60 Hz 380 V	3N-60 Hz 380 V	3Phase-4Wire 60 Cycle-380 V	3M-60 Hz-380 V 3+M-50 Hz-380 V-30 4 W 380 V 60 Hz	3-60 Hz-380 V
Exemplo de corrente contínua, 2 condutores, tensão de 220 V	2 - 220 V	2 - 220 V	2WireDC, 220 V	2 - 220 V (2N.220 V)	2-220 V
Exemplo de corrente contínua, 2 condutores e neutro, tensão de 110 V	2N - 110 V	2N - 110 V	3WireDC, 110 V	2N - 110 V (3N.DC, 110 V)	2N - 110 V

Significado	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
Símbolos de uso geral					
Terra					
Massa					
Polaridade positiva					
Polaridade negativa					
Tensão perigosa				 (Obstáculo geral)	
Ligação delta ou triângulo					
Ligação Y ou estrela					
Ligação estrela com neutro acessível					
Ligação ziguezague					
Ligação em Y ou triângulo aberto					

Significado	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
Componentes de circuito					
Resistor					
Resistor com derivações					
Indutor, enrolamento, bobina					
Indutor com derivações					
Capacitor					
Capacitor com derivações					
Capacitor eletrolítico					
Ímã permanente					
Diodo semicondutor					
Diodo zener unidirecional e bidirecional					
Fotorresistor com variação independente da tensão					
Fotorresistor com variação dependente da tensão					
Fotoelemento					
Gerador hall					
Centelhador (de pontas)					
Pára-raios					
Acumulador, bateria, pilha					
Mufla terminal ou terminação					
Mufla de junção ou emenda reta					
Mufla ou emenda de derivação simples					
Mufla ou emenda de derivação dupla					
Par termoelétrico					

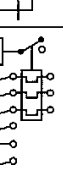
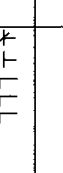
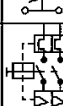
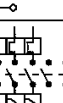
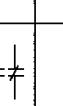
Significado	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
Dispositivos de sinalização óptica e acústica					
Buzina					
Campainha					
Sirene					
Cigarra					
Lâmpada de sinalização					
Indicador					
Instrumentos de medição					
Indicador, símbolo geral					
Amperímetro indicador					
Voltímetro indicador					
Voltímetro duplo ou diferencial indicador					
Wattímetro indicador					
Freqüencímetro indicador					
Indicador de fator de potência					
Registrador, símbolo geral					
Registrador de potência					
Integrador, símbolo geral					
Integrador de energia					

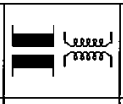
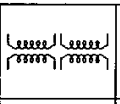
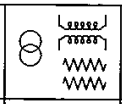
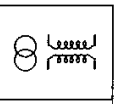
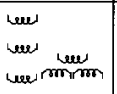
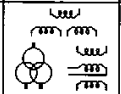
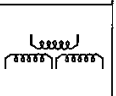
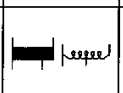
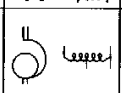
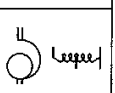
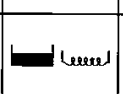
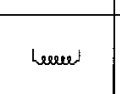
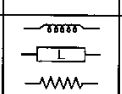
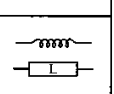
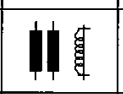
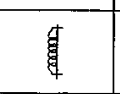
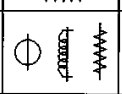
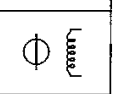
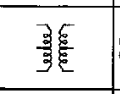
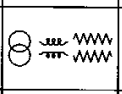
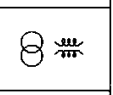
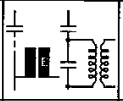
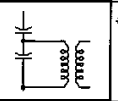
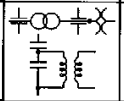
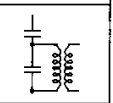
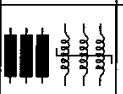
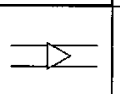
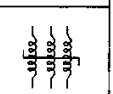
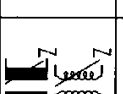
Significado	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
Bobinas de comando e relés					
Bobina eletromagnética, geral					
Bobina eletromagnética, de enrolamento único					
Bobina eletromagnética, de dois enrolamentos					
Relé de subtensão					
Relé com retardo para voltar ao repouso					
Relé com retardo prolongado para voltar ao repouso					
Relé com retardo para operar					
Relé com retardo para operar e para voltar ao repouso					
Relé polarizado					
Relé com remanência					
Relé com ressonância					
Relé térmico ou bimetálico					
Relé eletromagnético de sobrecarga					
Relé eletromagnético de curto-circuito					

Significado	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
Contatos e peças de contato com comandos diversos					
Fechador (normalmente aberto)					
Abridor (normalmente fechado)					
Comutador					
Comutador sem interrupção					
Temporizador: no fechamento na abertura na abertura no fechamento					
Fechador de comando manual					
Abridor com comando por excêntrico					
Fechador com comando por bobina					
Fechador com comando por mecanismo					
Abridor com comando por pressão					
Fechador com comando por temperatura					

Significado	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC

Dispositivos de comando e de proteção

Tomada e plugue					
Fusível					
Fusível com indicação do lado ligado à rede após a ruptura					
Secionador-fusível tripolar					
Lâmina ou barra de conexão, reversora					
Secionador tripolar					
Interruptor tripolar (sob carga)					
Disjuntor					
Secionador-disjuntor			 Chave de proteção		
Contatos com relé térmico, contatos auxiliares					
Disjuntor tripolar com relés eletromagnéticos com contatos auxiliares					

Significado	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IEC
			Transformadores		
Transformador com dois enrolamentos					
Transformador com três enrolamentos					
Autotransformador					
Bobina de reatância					
Transformador de corrente					
Transformador de potencial					
Transformador de corrente capacitivo					
Transdutor com três enrolamentos, um de serviço e dois de controle					
Transformador de dois enrolamentos com diversas derivações (TAPs) em um dos enrolamentos (com variação em escalões)					
Transformador de dois enrolamentos com variação contínua de tensão					

Nota 1:

A ABNT recomenda para transformadores de rede o uso do símbolo simplificado, formado por dois círculos que se cortam, especialmente na representação unifilar. Os traços inclinados que cortam a linha vertical indicam o número de fases.

Nota 2:

Simplificação análoga é normalizada para transformadores de corrente e de potencial.

Referências Bibliográficas

COTRIM, A. A. M. B. **Instalações Elétricas**. São Paulo: MacGraw-Hill, 2003.

CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 14. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

FILHO, G. F. **Motor de Indução**. São Paulo: Érica, 2000.

KOSOW, I. T. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 9. ed. Porto Alegre: Globo, 1993.

MAMEDE, J. F. **Instalações Elétricas Industriais**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

NETO, J. A. A. **Comandos Elétricos**. São Paulo: Eltec, 2002.

PFEIFFER, J. **Manual de Maquinas Elétricas**. São João de Meriti - RJ: Co-edição CADTS/SACTES, 1991.

_____. **Manual dos Comandos Elétricos**. São João de Meriti - RJ: Co-edição CADTS/SACTES, 1993.

ROLDAN, J. **Manual de Automação por Contatores**. Curitiba: Hemus, 2002.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Caderno Técnico: *Electric Motors***. Paris, 2004.

SIMONE, G. A. **Máquinas de Indução Trifásicas**. São Paulo: Érica, 2000.

SOUZA, G. T. **Máquinas e Comandos Elétricos**. Apostila: Curso técnico em Mecatrônica. Escola Técnica Estadual Pedro Ferreira Alves. Mogi-Mirim - SP, 2004.

WEG. **Catálogo de Motores Elétricos**. Jaraguá do Sul - SC, 2005.

WEG. **Comando e Proteção**. Apostila: Centro de treinamento de clientes. Jaraguá do Sul - SC, 2005.

Marcas Registradas

Altistart 48 e Altivar 71 são marcas registradas Schneider Electric.

SSW 04 e CFW 08 Plus são marcas registradas da WEG S.A.

Todos os demais nomes registrados, marcas registradas ou direitos de uso citados neste livro pertencem aos seus respectivos proprietários.

Índice Remissivo

A

Autotransformador de partida 168

B

Botoeiras 109

C

Capacitores
- banco de capacitores 95
- parâmetros 94
- ponto de localização 100

Características
- dos motores trifásicos 56
- nominais de motofreios trifásicos 51

Cargas
- capacitivas 139
- indutivas 137
- resistivas 138

Categoria D 61
- de conjugado 59
- H 61
- HY 61
- N 61
- NY 61

Chave
- com retenção 110
- de contatos múltiplos 111
- de impulso 109
- seletora 111

Chaves de partida 154
- compensadora 167
- direta 154
- estrela-triângulo 158

Classe de isolamento 62

Classificação dos dispositivos elétricos utilizados em baixa tensão 113

Conjugado
- acelerante 60
- do motor 60
- resistente 60

Constituição do motor de indução 22

Contato normalmente
- aberto 110
- fechado 110

Contator (de)
- blocos antiparasitas 144
- dimensionamento 142
- vida útil do contator 143

Contatores 134
- categorias de emprego dos contatores 136
- principais características 145
- principais defeitos 141

Correção do fator de potência
- vantagens 91

D

Desvantagens dos motores síncronos em relação aos motores de indução 41

Disjuntores motores 132
- características básicas 133

Dispositivos
- de comando e proteção 112
- elétricos 109

E

Escorregamento 59
Enrolamentos em
estrela 77
triângulo 79

F

Fator de potência 90
causas 91
compensação 97
dos motores 105
medição 100
métodos para melhoramento 92
Fator de serviço 68
Formas construtivas dos motores 73
Fusíveis 115
aspectos construtivos 117
características 119
dimensionamento 123
NH 121
D, partes constituintes 120
NH, 122
D 120
ultra-rápidos 125

G

Grau de proteção de motores 71

I

Identificação das bobinas de um motor de indução trifásico 81
Interruptores fim de curso 111
Inversor de freqüência 195
aplicação em controle 213
blocos componentes 203
classificação 202
controle escalar 202
controle vetorial 202
conexões de entrada e saída 211
considerações finais 214
dimensionamento 206
formas de variação 209
princípios básicos 197
sistemas de entrada de dados 208
transferência de configuração 213

L

Ligação para frenagem
lenta 49
média 50
rápida 51
Ligação dos rolamentos em
estrela 75
triângulo 78

M

Motor aberto 65
Motor com
dois capacitores 34
dois enrolamentos separados 21
rotor bobinado 46
rotor gaiola de esquilo 45
Motor Dahlander 21
Motor de capacitor
partida 31
permanente 33
Motor de
fase dividida 30
pólos sombreados 28
rotor bobinado 46

Motor monofásico com
dois terminais 26
quatro terminais 26
seis terminais 27
Motor
para três e quatro velocidades 22
síncrono para correção 40
totalmente fechado 66
trifásico com freio 48
universal 35
Motores
à prova de explosão 73
AC 18
DC 18
de alto rendimento 52
de indução 18
de indução monofásicos 24
síncronos 38

N

Número de rotações 69

P

Partida compensadora
desvantagens 178
equacionamento 171
esquema de ligação 170
exemplo de dimensionamento 176
vantagens 178
Partida direta,
esquema de ligação 156
exemplo de dimensionamento 157
Partida estrela série paralelo 80
Partida estrela-triângulo
desvantagens 167
equacionamento 161
esquema de ligação 160
exemplo de dimensionamento 165
vantagens 167
Partida
série paralelo 79
triângulo série paralelo 80
Perdas
elétricas 74
magnéticas 74
mecânicas 74
no motor 74
parasitas 75
Potência
aparente 86
ativa 85
de motores trifásicos 106
do transformador 104
reativa 86
Princípio de funcionamento de um motor trifásico 53

R

Regime de serviço 67
Relé de sobrecorrente
dimensionamento 131
representação 131
Relés auxiliares de 145, 148
falta de fase 149
mínima tensão 150
proteção PTC 147
tempo com retardo 145
tempo estrela-triângulo 146
temporizador pneumático 146
Relés de
seqüência de fase 147
sobrecarga 126

Rendimento 56
do motor em função da potência no seu eixo 58
de sua potência nominal 57
Rotação nominal 67

S

Seleção de um motor 19
Sentido de rotação de motores trifásicos 70
Soft-starter 181
descrição dos parâmetros 191
formas de ligação 192
principais funções 183
princípio de funcionamento 182
proteções 189

T

Tabela de características elétricas de motores trifásicos 83
Tempo com rotor bloqueado 62
Tensão nominal múltipla 69
Tipos de motores elétricos 19
Triângulo das potências 88

V

Vantagens
da ligação estrela 77
dos motores síncronos 42
Velocidade síncrona 38
Ventilação 65