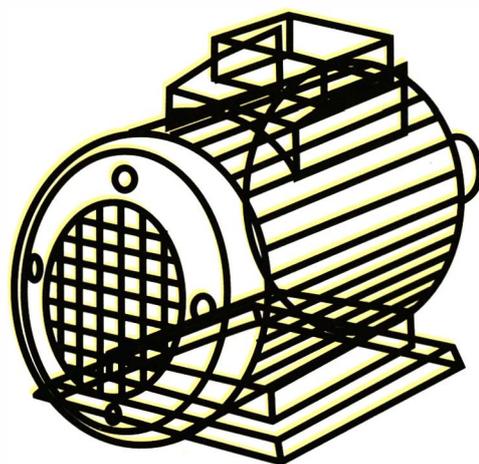


MOTORES DE INDUÇÃO

Manutenção e Instalação

PIRELLI
FIOS E CABOS ELÉTRICOS

EQUACIONAL
MOTORES E GERADORES



**A PIRELLI É LÍDER
ABSOLUTA EM
FIOS ESMALTADOS
E MAGNETOS.**

PIRELLI

FIOS E CABOS ELÉTRICOS.

Apresentação

É muito difícil encontrar um profissional da área elétrica que não tenha tido a necessidade de algum conhecimento sobre motor de indução, o mais comum e mais usado dentre todos os motores elétricos, seja em aplicações industriais ou domésticas, seja em sistemas trifásicos ou monofásicos.

O Jornal da Eletricidade, da Pirelli Cabos, reconhecendo esta carência, vem divulgando há algum tempo uma série de artigos denominada Curso de Motores de Indução, especialmente redigida pelo engenheiro Aureo Gilberto Falcone, professor titular da Escola Politécnica da USP e diretor geral da Equacional Elétrica e Mecânica, também conhecido autor de livros e outras publicações na área de engenharia de máquinas elétricas.

O interesse despertado pelos leitores, somado à necessidade de publicações dirigidas diretamente ao treinamento profissional básico, motivaram a produção deste livro. Ele contém os mesmos temas dos artigos do jornal, agora ampliados e com um novo tratamento dado pelo autor, sem perder, contudo, as características necessárias à sua adequação a um público amplo, composto de instaladores, compradores e vendedores de material elétrico, engenheiros, técnicos e eletricitistas em geral.

Dispostos em 15 capítulos, os temas estão em uma sequência natural de interesse de quem trabalha nas áreas de manutenção e instalação. Os aspectos éticos na execução de serviços, bem como as questões de Garantia de Qualidade, são oportunamente abordados em vários capítulos.

A Pirelli Cabos tem concretizado, ao longo dos anos, vários projetos de parceria que, como este, têm por objetivo contribuir para o aprimoramento dos profissionais da área elétrica.

A Equacional, por outro lado, tem uma tradição de dedicação ao ensino técnico, mantendo desde a sua fundação um setor de desenvolvimento de equipamentos para treinamento em escolas e indústrias, além de sua linha normal de atendimento em serviços e fabricação de motores e geradores.

Esperamos que esta publicação seja útil e cumpra as finalidades para as quais foi preparada.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Falcone, Aureo Gilberto,
Motores de Indução: Manutenção e
Instalação /
Aureo Gilberto Falcone. -- São Paulo :
LVBA Comunicação, 1995.

Patrocinadores: Pirelli Fios e Cabos e
Equacional.

1. Motores Elétricos de indução I. Título

95-0527

CDD-621.460288

Índices para catálogo sistemático:

1. Motores de Indução: Motores elétricos:
Instalação: Tecnologia 621.460288
2. Motores de Indução: Motores elétricos:
Manutenção: Tecnologia 621.460288

Índice

Capítulo I - <i>Cuidados iniciais - requisitos ambientais - rejuvenescimento periódico</i>	6
Capítulo II - <i>Sistemas de partida e proteção</i>	12
Capítulo III - <i>Dimensionamento da fiação de alimentação de motores</i>	16
Capítulo IV - <i>Potência, conjugado (torque) e escorregamento</i>	18
Capítulo V - <i>Perdas, rendimento e fator de potência</i>	20
Capítulo VI - <i>Introdução ao enrolamento de motores trifásicos</i>	22
Capítulo VII - <i>Enrolamentos com mais de dois pólos e estrela/triângulo</i>	24
Capítulo VIII - <i>Isolação de motores e sua classificação térmica</i>	26
Capítulo IX - <i>Fios e cabos para enrolamentos de motores</i>	29
Capítulo X - <i>Conservação de energia, essencial em motores elétricos</i>	30
Capítulo XI - <i>Acoplamento motor-carga</i>	31
Capítulo XII - <i>Normalização de dimensões - aspectos construtivos mecânico e magnético</i>	33
Capítulo XIII - <i>Motores trifásicos de rotor bobinado e motores monofásicos</i>	37
Capítulo XIV - <i>Modificação de tensão - cálculo do fluxo magnético</i>	39
Capítulo XV - <i>Modificação de velocidade - funcionamento em frequência variável</i>	42

Cuidados iniciais - requisitos ambientais - rejuvenescimento periódico

I. Introdução

O objetivo desta publicação é tratar apenas dos motores assíncronos de indução, particularmente os de pequeno e médio portes, que são os mais encontrados. Eles podem ser monofásicos ou polifásicos, de rotor bobinado ou rotor em gaiola, de aplicações domésticas ou industriais.

A quantidade de motores de indução é tão grande em relação aos de corrente contínua, aos síncronos e aos especiais que, provavelmente, eles atinjam 90% ou mais dos motores instalados na indústria. Isso se deve ao fato de eles serem de construção mais simples, robustos e seguros, e menos suscetíveis às agressões do meio ambiente, principalmente os de rotor em gaiola. Mas nem por isso deixam de necessitar de certos cuidados:

a) por **cuidados iniciais** entende-se um conjunto de verificações para concluir se o motor está adequado e apto a ser instalado e executar os serviços a que se destina;

b) por **requisitos ambientais** entende-se as verificações do local onde o motor será instalado quanto à temperatura, pressão e agressividade química e mecânica do meio ambiente, visando tanto a proteção do equipamento quanto a segurança, do ponto de vista elétrico e mecânico das pessoas que trabalham com ele. É preciso verificar também o inverso, ou seja, o quanto o motor

agride o ambiente com emissão de gases, vapores, ruídos e vibrações. Neste ponto, os motores elétricos são os mais favoráveis e, dentre eles, destacam-se os motores de indução, que, quando bem projetados e construídos, apresentam baixíssimo nível de vibração e tolerável nível de ruído para a maioria das aplicações;

c) por **rejuvenescimento** entende-se uma série de operações a que deve ser submetido o motor, para que tenha sua durabilidade estatisticamente prolongada, ou seja, para que a probabilidade de vida útil seja aumentada. Estes itens lembram um pouco o que se costuma fazer com o atleta que é candidato a uma competição ou campeonato. O item "a" seria o exame médico inicial, o "check-up" a que é submetido antes da convocação, para verificar suas possibilidades.

O item "b" corresponderia ao exame técnico das condições das pistas, dos campos e do rigor e exigências da competição. E o item "c" pode lembrar as concentrações ou internações periódicas, de um ou alguns dias, em uma clínica especializada para tratamento, relaxamento e retomada da plena forma física e mental.

Acreditamos que estes três itens, se bem conduzidos, podem garantir o sucesso, não só do motor mas também de quem cuida dele.

II. Cuidados Iniciais

Depois de executada a instala-

ção elétrica, cablagem, chaves, fusíveis, contadores e outros (veja capítulos II e III), o próximo cuidado é examinar detalhadamente o estado do motor, verificando os dados de placa (tais como potência, tensões, frequência, grau de proteção e outros itens), para concluir se ele é, ou está, realmente adequado.

Desta forma, podemos distinguir três casos:

- motores novos armazenados por pouco tempo (um a três meses);
- motores novos armazenados por longo tempo (meses ou anos), em locais não adequados;
- motores já usados e armazenados.

No **primeiro caso**, se o motor é reconhecidamente de boa qualidade, com certificado de ensaio de fábrica e garantia, não são necessários maiores cuidados e pode-se dar a primeira partida apenas com pequenas verificações. Porém, é sempre recomendável controlar com um voltímetro as tensões que chegam aos terminais, e com um amperímetro as correntes, para assegurar que estejam equilibradas e nos valores corretos (é mais prático utilizar um amperímetro tipo alicate).

No **segundo caso**, ou seja, nos motores armazenados por um longo período, é bom verificar se o equipamento gira livremente quando acionado com as mãos. Os rolamentos não devem ter "pontos de resistência" ao movimento, tais como "degraus", ruí-

Tabela 1

Tensão nominal do motor	até 220V	440V	2300V	4400V	6600V
Resistência de isolamento em $M\Omega$ (a 40°C)	1,0	1,25	2,5	4,5	7,0

dos ou outras anomalias que, com cuidado e um pouco de prática, podem ser percebidas pelo tato e pela audição.

É aconselhável também tirar as tampinhas dos rolamentos (veja cap. XII) para verificar seu estado quanto à oxidação (ferrugem) e entrada de umidade. Se o rolamento não for do tipo selado (lubrificação permanente), veja se a graxa não está ressecada. Se for preciso, tire com os dedos a graxa velha e coloque uma nova na qualidade e quantidade recomendadas segundo o tipo de rolamento.

Se o motor for equipado com bicos de engraxadeira e válvula de graxa (dispositivo que expulsa a graxa velha), faça as mesmas operações anteriores e, em seguida, acione o motor e aplique uma engraxadeira, introduzindo o lubrificante até que o excesso saia pelo escape (veja cap. XII).

Depois, verifique a continuidade dos enrolamentos com lâmpada-teste ou ohmímetro. A medida da resistência de isolamento é feita com um megôhmetro (conhecido nas oficinas pela marca Megger). Aplica-se o instrumento entre os terminais do motor e a massa (carcaça), e entre fases, no caso de motores trifásicos que tenham seis terminais (veja cap. VII). Os valores mínimos aceitáveis, para motores novos, são recomendados pela norma NBR 5383, da ABNT (veja cap. VIII).

Na Tabela 1 constam valores que o Departamento de Serviços da Equacional recomenda como mínimo aceitável para motores usados. Ela serve apenas como um guia aproximado para os casos mais comuns de manutenção

de campo. Esses valores não são, portanto, normalizados.

Se os valores obtidos forem menores que estes, o motor deve ser submetido à secagem em estufa ventilada, a uma temperatura de cerca de 120°C, durante 5 a 10 horas, dependendo do tamanho do equipamento. Depois de frio, deve-se medir novamente a resistência de isolamento. Se a recuperação dos valores obtidos não for, no mínimo, algumas vezes maior do que os da tabela, é indício de isolamento envelhecida ou quimicamente atacada. O motor deve ser submetido a uma investigação mais especializada.

No **terceiro caso**, ou seja, para motores já usados e armazenados, os cuidados devem ser um pouco maiores. É preciso submetê-los antes ao rejuvenescimento, um processo a ser visto mais adiante.

Porém, tanto para motores novos como para usados, o instalador nunca deve esquecer de alguns pontos antes de instalá-lo na sua base:

a) Durante o transporte do motor, qualquer desatenção pode danificá-lo seriamente. Os que pesam acima de 30 quilos, por exemplo, não devem ser suspensos pelo eixo (os rolamentos nem sempre suportam o peso da carcaça). Por isso, os motores maiores têm sempre olhais na carcaça, onde devem ser aplicados os ganchos ou os cabos de suspensão das talhas e das pontes rolantes.

Evite impactos ou choques. Eles produzem marcas nas pistas dos rolamentos, inutilizando-os. Os mesmos cuidados devem ser to-

mados com relação aos isolantes dos enrolamentos, que também são sensíveis a choques;

b) Não ponha em funcionamento um motor blindado com ventilador externo sem cobertura, chamada nas oficinas de “chapéu”. Ela é essencial do ponto de vista térmico e de segurança do trabalho, pois dirige o ar de resfriamento sobre as aletas do motor e proporciona proteção contra toques de pessoas, objetos e ferramentas. Verifique também se as aletas estão limpas, para não dificultar a saída do calor gerado internamente no motor;

c) Nos motores abertos, as cabeças de bobinas e as passagens de ar também devem estar limpas. Se preciso, desmonte o motor, limpe as cabeças e desobstrua as passagens;

d) Se o motor for de rotor bobinado, verifique o estado das escovas, dos porta-escovas e dos anéis (veja cap. XIII).

Finalizando, em qualquer dos três casos verifique o borne de aterramento que pode estar dentro da caixa de ligações ou fora dela. Não instale motores sem fio terra, pois ele representa segurança para o operador e para a instalação.

III. Requisitos do local (ambiente)

Quanto à proteção em relação ao ambiente, os motores elétricos são divididos em três categorias principais:

a) **Motores abertos com ventilação interna (IP-11 até IP-23)**: o ar do ambiente entra em contato com as partes ativas (bo-

binas e núcleo magnético). Eles têm janelas de entrada e saída de ar, protegidas com telas para evitar toques de pessoas, entrada de ferramentas e corpos estranhos (veja Tabela 2). Não são indicados para ambientes agressivos, muito úmidos, ou com grande concentração de pó;

b) **Motores blindados com**

ou sem ventilação externa (IP-44 até IP-66): tem grau de proteção muito maior. São mais caros e mais volumosos, sendo subdivididos em vários graus de proteção e normalizados pela ABNT (NBR 6146). Atualmente, esses são os mais comuns dentre os motores fabricados em série;

c) **Motores à prova de explo-**

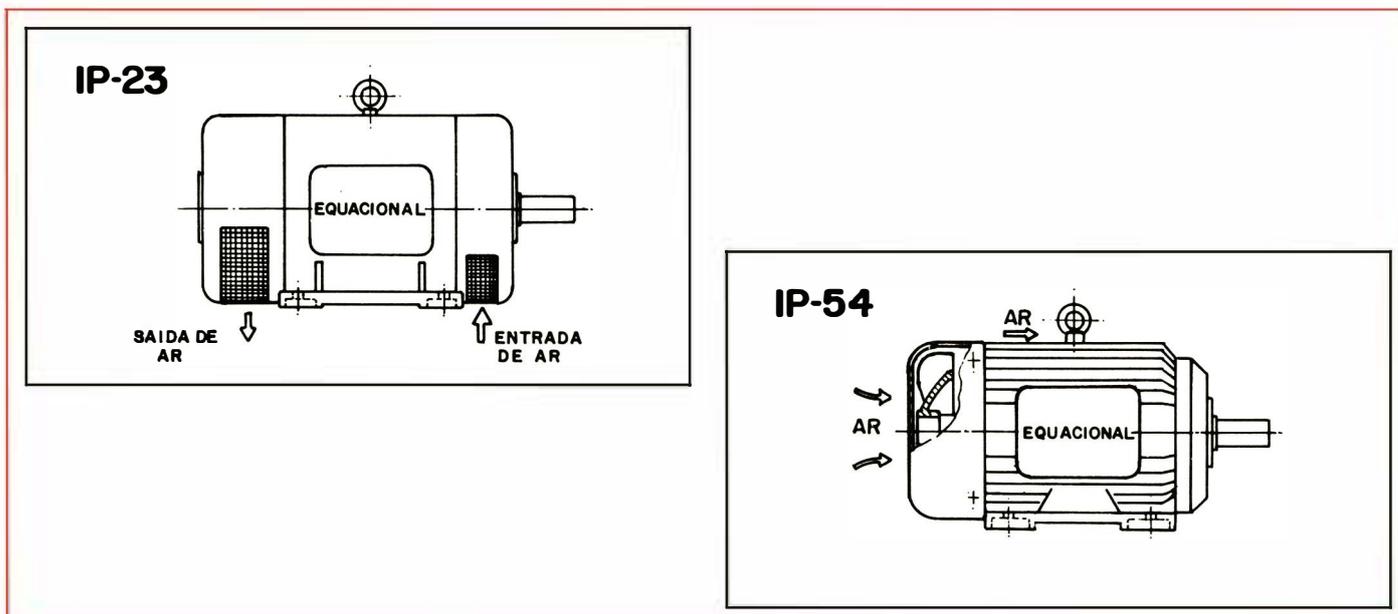
são (IP-Ex): Em certos ambientes, como refinarias, destilarias, postos de gasolina e minas de carvão, existem vapores, gases e até pós inflamáveis. Estas substâncias podem penetrar no motor por pequenas frestas ou folgas, como a que existe entre tampinha e eixo (veja cap. XII), e provocar uma explosão interna,

Tabela 2

Resumo simplificado dos tipos mais comuns de graus de proteção de motores, pela ABNT (norma NBR 6146). A ABNT normaliza também os métodos de resfriamento (com ventilação, sem ventilação, com trocador de calor etc.):

Graudeproteção	Forma construtiva	Proteção nas aberturas e nas janelas do motor, contra toques e objetos	Proteção contra entrada de pó	Proteção contra entrada de água
IP-23	Aberto, com ventilador interno ou com moto-ventilador independente	Fechado com tela ou grade com malha de no máximo 12 mm	Não há	Apenas contra gotejamento e aspersão até 60° da vertical
IP-44	Blindado (Fechado)	Não há aberturas, porém admite-se frestas (folgas) até 1,0 mm	Não há	Água em qualquer direção (com entrada mínima que não afete o funcionamento)
IP-54	Blindado (Fechado)	Não há aberturas, somente folga na passagem do eixo	Sim (permite-se entrada em quantidade mínima que não afete o funcionamento)	Como o anterior
IP-55	Blindado (Fechado) com selos e retentores	Não há aberturas. Caixas de ligações com vedações	Como o anterior	Água em forma de jato

Esta tabela não inclui proteções especiais contra intempéries, uso naval, ambientes inflamáveis (prova de explosão) e outros.



devido a possíveis centelhamentos de origem mecânica ou elétrica dentro do equipamento.

A estrutura do motor deve resistir, sem se danificar, a essa pressão dinâmica provocada pela explosão interna e, mais importante ainda, não pode deixar escapar chama pelas folgas existentes para não incendiar o ambiente. Por isso, este tipo de motor tem o mesmo aspecto dos motores blindados, porém é muito mais robusto e apresenta longos labirintos entre tampinhas e eixo, com a finalidade de resfriar e apagar a chama, evitando sua propagação para o ambiente.

Os motores à prova de explosão também são classificados em vários graus de segurança, conforme o tipo de ambiente (hidrogênio, acetileno, vapor de gasolina, álcool, pó de carvão etc.), e sua normalização encontra-se também na ABNT e em outras normas, como IEC e NEC.

IV. Rejuvenescimento

“Rejuvenescimento de motores” é força de expressão. Talvez fosse o caso de usar revigoração, porém rejuvenescimento já é nome consagrado. As operações deste tipo não implicam tornar o motor jovem. Nada impede que um equipamento que tenha passado por essas operações venha a romper sua isolação (queimar) no dia seguinte. Até com um motor novo isso pode acontecer. Na técnica, nada é certeza, tudo é probabilidade.

O rejuvenescimento apenas garante um aumento de probabilidade de sobrevida útil do motor. Apenas para esclarecimento, vamos supor alguns valores. Digamos que um motor novo, cor-

retamente dimensionado, instalado e utilizado, tem probabilidade igual a 99,8% (998 por mil) de não apresentar defeitos durante o período de garantia (normalmente um ano).

Digamos também que um motor com muitos anos de uso con-

anual ou de alguns anos, ou ainda pode-se aproveitar a ocorrência de algum defeito ou acidentalidade (como submersão, proximidade de fogo etc.), para proceder o rejuvenescimento.

Nos motores de pequeno porte (até 20 ou 30 CV) do tipo blindado,

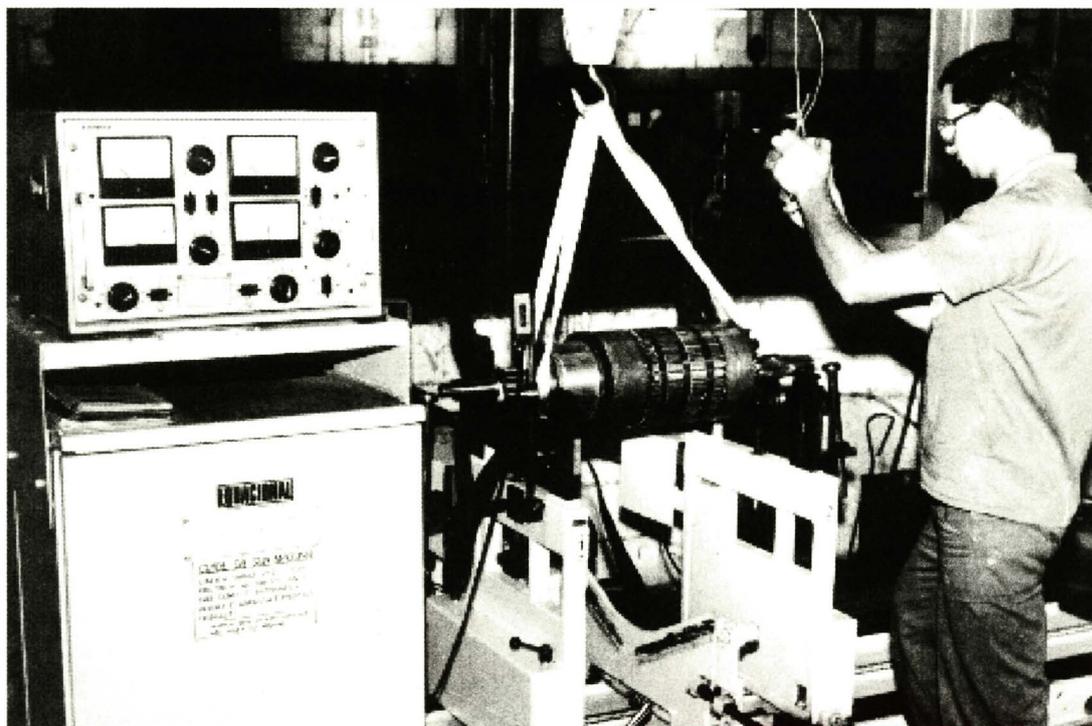


Foto 1: máquina de balanceamento dinâmico

tínuo e pesado tem 40% de probabilidade de resistir por mais um ano. Esse mesmo motor, após corretas operações de rejuvenescimento, poderá ter essa probabilidade aumentada para 70%. E isso é vantajoso, principalmente quando se trata de equipamentos de médio e grande portes e de alta tensão, pois representam grande quantidade de dinheiro em jogo, tanto pelo valor do motor, quanto pela interrupção do que ele produz.

A periodicidade de rejuvenescimento depende da severidade do trabalho e do grau de agressividade mecânica e química do ambiente. Locais com alto teor de pó, gases agressivos e sujeitos a choques podem requerer rejuvenescimento com periodicidade semestral ou menor, principalmente quando se trata de motores abertos. Nos ambientes mais limpos e onde exista uma manutenção preventiva eficaz, a periodicidade pode ser

de baixo custo, normalmente não são feitas operações completas de rejuvenescimento, desde que exista manutenção preventiva.

Enfim, a periodicidade e a necessidade de rejuvenescimento são de decisão do proprietário dos motores, baseado na sua experiência, no conhecimento de seu ambiente, nos seus modos de operação, nas estatísticas de ocorrência de defeitos e nas gestões econômico-financeiras da empresa, envolvendo custo inicial do motor, cessação de produção por defeitos, relação custo/benefício de investimento em unidades de reserva e outros.

Os procedimentos para rejuvenescimento variam de acordo com as oficinas de reparo e exigências

do proprietário do motor. Às vezes se observam rejuvenescimentos que não passam de maquiagem, como as que fazem os noivos para a cerimônia de casamento. Agradam à vista, mas não passam de um pequeno conjunto de operações superficiais e inócuas, que, a curto prazo, podem frustrar os objetivos técnicos e financeiros do proprietário do motor.

Um rejuvenescimento, se eficaz, é uma operação economicamente vantajosa (difícilmente ultrapassa 20% do custo do motor e traz benefícios muito maiores que isso). Porém, se inadequada, pode ser perniciosa, acabando por abreviar a vida do motor ao invés de prolongá-la, além de acarretar sérios prejuízos.

Espera-se dos técnicos que operam em manutenção, quer sejam eles autônomos ou funcionários de pequenas ou grandes empresas, que tenham sempre presente três pontos-chaves para o sucesso:

- procurar instruir-se, aprender e se aperfeiçoar continuamente;
- honestidade técnica, acima de tudo, para com seu cliente;
- encarar como clientes não somente os externos que compram serviços de sua empresa, mas também os internos de qualquer departamento, que devem ser tratados com a mesma atenção, prontidão e cortesia.

Dentro desses princípios, só sobram duas opções ao técnico que administra rejuvenescimento de motores: ou ele está equipado e preparado para proceder esta operação, ou a confia a uma empresa de reconhecida confiabilidade. Não há meio termo. O rejuvenescimento de motores tem que ser encarado como uma operação de engenharia e, portanto, deve ser acompanhado por técnico especializado e experimentado.

Em uma época em que já está se praticando no Brasil os conceitos de Qualidade Total, que implicam em qualidade física do

produto e satisfação do cliente, tudo o que foi dito acima levamos, há algum tempo, juntamente com o Departamento de Serviços da Equacional, a fazer uma proposta clara e transparente de uma série de operações que caracterizem um rejuvenescimento eficaz. Resumidamente, segue abaixo um extrato dessa relação com os respectivos comentários e procedimentos:

a) Como primeira hipótese, admite-se que o motor não tenha defeito já constatado e que se destine apenas a rejuvenescimento (se ele estiver avariado ou for portador de alguma anomalia de origem, o tratamento será outro);

b) Exame geral do motor e conhecimento do seu histórico (tipo e tempo de serviço, regime de trabalho, ambiente, tipo de acoplamento e outros dados).

Comentário: Esses elementos são necessários ao técnico que administrará as operações, pois eles influenciam nas diretrizes e procedimentos a serem adotados no rejuvenescimento;

c) Desmontagem geral e exame mecânico com medições da ponta de eixo, dos rebaixos de tampas, colos e assentos de mancais, folgas de tampinhas, tolerâncias, estado dos rolamentos etc. Comparar com as exigências originais do motor.

Comentário: Se não for possível obter junto ao fabricante do motor as informações originais, o técnico ou o engenheiro encarregado deve procurar concluir esses valores, calculando-os segundo os preceitos e normas existentes, baseados em projetos semelhantes e na sua experiência.

Procedimento: Se for necessário, devem ser feitos embuchamentos, metalizações (ou preenchimento com solda onde for permitido) e posterior usinagem dessas partes;

d) Exame do estado do isolante das bobinas, quanto à contaminação, tipo de sujeira, grau de envelhecimento, presença de fissuras, pequenas trincas, descascamento, documentação

fotográfica do enrolamento e medição da resistência de isolamento.

Procedimento: Limpeza geral da carcaça, mecânica e química (se necessário), com solventes adequados ao tipo de sujeira, lavagem com água pura em jato de baixa pressão (evite jatos fortes e de vapor, em enrolamentos muito envelhecidos, pois essas ações contribuirão para incrustar, ainda mais, pequenas partículas no isolante). Secagem em estufa ventilada. Nova medição de resistência de isolamento e, em motores de maior responsabilidade, aconselha-se uma medida de índice de polarização do dielétrico.

Se não houver retomada da resistência de isolamento, então estamos diante de um caso como o exposto na seção II. Se houver retomada, então, depois de seco, os enrolamentos devem ser tratados com banho de verniz isolante, compatível com a classe de isolamento original do motor (veja cap. VIII) e polimerizados em estufa.

Finalmente, aplicar uma demão de verniz de proteção, alquídico ou epóxico, se possível do tipo incolor, para que as partes fiquem visíveis. Esses vernizes com pigmentos vermelhos ou pretos podem ser interpretados com um artifício utilizado para esconder “serviço malfeito”.

Comentários: Se as isolações forem consideradas extremamente envelhecidas e fissuradas, não se deve aplicar esses procedimentos, pois o rejuvenescimento seria contra-indicado. O motor precisa ser reenrolado (rebobinado). Deve-se tomar cuidado com produtos químicos, tais como solventes e desengraxantes (só use se você estiver seguro, experimentado e bem recomendado a respeito deles, pois podem ser prejudiciais à isolação do motor).

Não se recomenda impregnar motor já usado em autoclave a vácuo-pressão, pois, além da pressão acabar introduzindo im-

purezas para dentro de possíveis frestas do isolante, pode-se contaminar o verniz, com prejuízo do próximo motor que aí for colocado;

e) Exame dos cabos de conexão entre bobinas e caixa de ligações, do enfaixamento, da ancoragem das cabeças, dos bornes e terminais. Quase sempre se conclui que a troca de cabos é necessária (veja cap. IX). Se o motor for de rotor bobinado (veja cap. XIII), os porta-escovas e as escovas devem ser cuidadosamente examinados.

Em caso de substituição destes componentes, é necessária a consulta ao fabricante, pois é difícil, ou quase impossível para quem não é especialista, reconhecer o tipo de material correto para uma escova;

f) Limpeza química e mecânica, jateamento de partículas sólidas, centragem de carcaça, tampas e tampinhas (usinagem, se necessário) e pintura final de acordo com os padrões originais ou específicos para instalação em locais como petroquímicas, siderúrgicas, bordo de navios etc.

Comentários: A limpeza correta e o jateamento auxiliam na detecção de defeitos, como falhas e trincas e na aderência da pintura. Apesar de muito comuns nas oficinas, não utilize o jato de areia aberto, pois, além de poluidor, pode causar silicose no operador a ele exposto;

g) Exame do eixo e ventilador. Em caso de suspeita de fissura, deve-se fazer um teste de “líquido penetrante” ou ultra-som. Centragem (usinagem, se necessário);

h) Exame do rotor. No caso de rotor bobinado, o enrolamento rotórico exige o mesmo tratamento do estatórico. No caso de rotor

em gaiola, se houver suspeita de barras interrompidas, pode-se fazer um ensaio de corrente induzida;

i) Exame dos mancais. No caso de mancais de escorregamento (de bucha), medir e examinar a superfície. Se necessário, deve-se usiná-lo e ajustá-lo (rasquetamento). Troca de óleo, conforme original. No caso de mancais de rolamento, a troca é sempre recomendável. Porém, nos motores de grande porte, o preço desses componentes, quan-

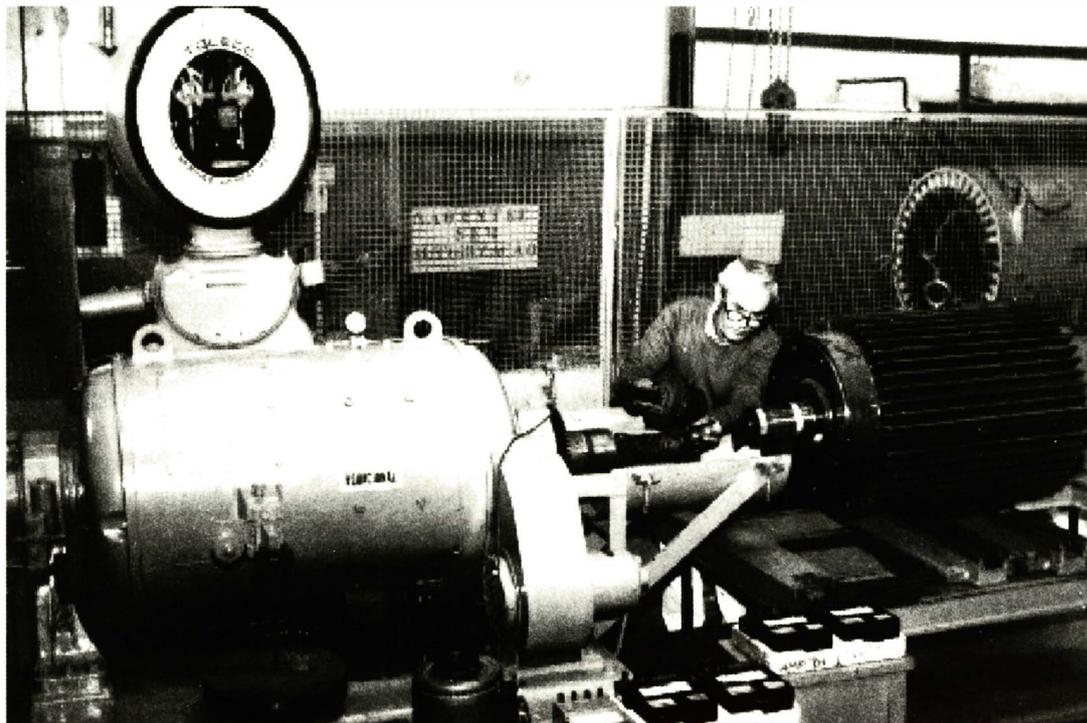


Foto 2: freio eletrodinamométrico

do de tipos especiais, pode ser tão elevado que mereça um exame minucioso para estudo de possível reaproveitamento;

j) Balanceamento. É operação importante, que deve ser obrigatoriamente do tipo dinâmica, executada em balanceadora com dois planos de simetria (foto 1). Balanceamentos estáticos, manuais e por tentativa deixam resíduos de contra-pesos que produzem vibrações e são extremamente prejudiciais à vida dos mancais e da isolação;

l) Montagem final e ensaios. Nova medida de resistência de isolação e funcionamento em vazio. Estes ensaios devem ser obrigatórios e constituem-se no mínimo necessário. Porém, não

se deve limitar a isso nos motores de maior porte e de maior importância, os quais devem ser submetidos a ensaio de vazio e de rotor bloqueado (NBR 5383), e a um mínimo de uma hora em funcionamento a plena tensão.

Nos casos específicos, conforme exigência do proprietário do motor, pode ser feito ensaio em carga em freio eletrodinamométrico (foto 2), com medidas das características e de elevação de temperatura. Nunca se deve executar ensaio de tensão suportável

(veja cap. VIII), como o que se recomenda para motores novos, pois o isolante teria grande probabilidade de não suportá-lo.

Finalmente, os técnicos ou os engenheiros que administram o rejuvenescimento (e sejam credenciados para tal) devem emitir relatório discriminando os serviços executados e os resultados atingidos, para conhecimento e arquivo dos proprietários dos motores.

Sistemas de partida e proteção

I. Introdução

Os motores de indução de gaiola, de baixa tensão (até 440 V), podem partir de três modos:

a) Diretamente, para pequenos motores (recomenda-se não ultrapassar 5 CV);

b) Em sistemas estrela-triângulo, para potências médias;

c) Com chave compensadora, para motores de potências médias e grandes.

Além desses, existem outros sistemas de partida, tais como série/paralelo e por meio de sistemas eletrônicos (soft-starters). Estes não serão vistos neste capítulo.

De maneira geral, o método direto só deve ser utilizado quando a corrente de partida do motor não introduzir queda de tensão apreciável na rede, que convém não ser maior que 10% da tensão nominal, sob risco de comprometer outros equipamentos ligados na mesma instalação. Os limites de potência do item "a" podem ser obtidos nas normas e recomendações das concessionárias de energia elétrica.

Nos motores maiores é necessário utilizar os métodos "b" e "c", que reduzem a tensão de alimentação durante o tempo de arranque, restabelecendo no final da partida a tensão nominal nos terminais do motor. Porém, essa redução de tensão diminui fortemente o torque de partida (veja cap. VII).

A norma brasileira que rege as

ligações de motores é a NBR 5410, que deve ser consultada por quem pretende se dedicar a esse tipo de instalações em baixa tensão.

II. Partida Direta

Neste método (circuito da fig. 1), o motor é conectado diretamente à rede, através de um contator eletromagnético, sendo que, no circuito, sempre se recomenda a utilização de fusíveis e relé térmico como dispositivos de proteção.

Acompanhando a fig. 1, nota-se que, quando se pressiona o botão "LIGA", energiza-se a bobina do contator C1, que, por sua

vez, fecha-se e energiza o motor. Ao mesmo tempo, fica selado pelo contato "NA" de C1 e o mantém fechado.

O contato "NF" do relé térmico fica em série com a bobina do contator, desenergizando-a e interrompendo o circuito (abrindo C1), se ocorrer sobrecarga. É fácil notar que, ao se pressionar o botão "DESLIGA", tudo volta à situação inicial, com o motor desenergizado.

III. Contatores, relés de proteção e fusíveis

A função do relé térmico (RT na fig. 1) é proteger o motor contra sobrecargas prolongadas.

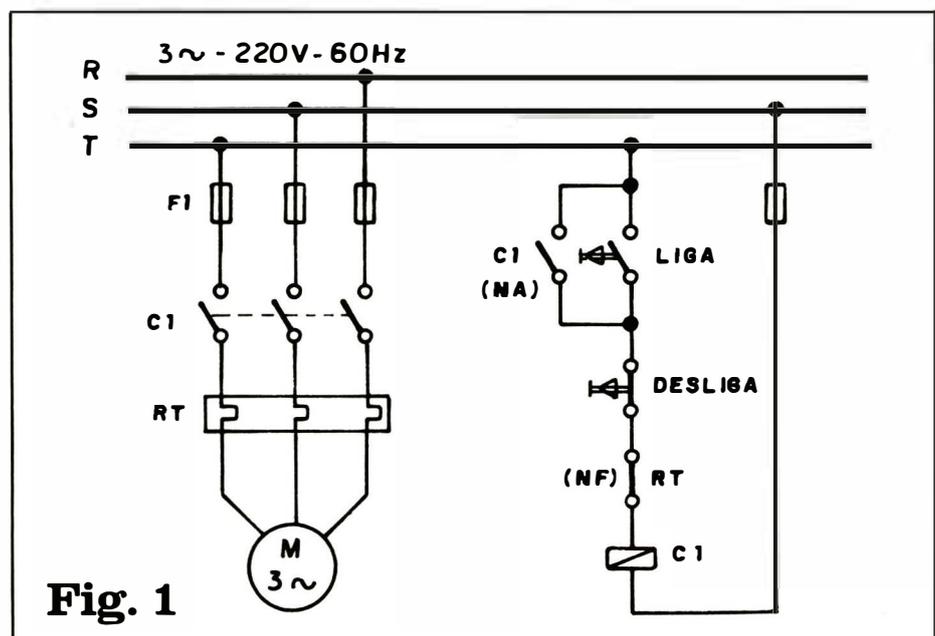


Fig. 1

Sua atuação se dá pela passagem da corrente por hastes bimetálicas, que ao se aquecerem, abrem um contato após um determinado tempo. A característica da “corrente x tempo de atuação” do relé térmico é chamada “Característica de Tempo Inverso”, e é dada por um gráfico como o mostrado na fig. 2, que nos fornece o tempo de abertura do relé, em função de múltiplos da corrente I_R ($0,8 I_R / 1 I_R / 1,5 I_R / 2 I_R$ e assim por diante).

Vejam os exemplos: acompanhe no gráfico da fig. 2, o caso de um relé térmico ajustado para 40 A ($1 I_R = 40 A$). Quando a corrente do motor é menor ou igual a esse valor, o relé fica indefinidamente fechado, ou seja, o tempo de abertura é infinito. Se o motor ficar levemente sobrecarregado e sua corrente aumentar, por exemplo, para 60 A ($1,5 I_R$), nota-se pelo gráfico que o relé térmico vai abrir depois de um intervalo de tempo de aproximadamente um minuto, desligando o motor. Se a sobrecarga for maior e a corrente subir para 80 A ($2 I_R$), o relé desliga em 20 segundos, e assim por diante.

Quanto ao contator, seu dimensionamento depende da corrente de partida do motor, da frequência de ligações, da possibilidade de reversões por contracorrente, além de outros fatores.

A escolha do relé e do seu ajuste depende do tipo de carga, da sua inércia e do ciclo de trabalho (carga intermitente). Nos motores de médio e grande portes, a

escolha correta dos contadores e relés de proteção deve ser encarada com os devidos cuidados, e a consulta aos fabricantes desses componentes torna-se obrigatória.

De maneira geral e simplificada, para cargas constantes, a regulagem do relé é feita por uma

corrente da ordem de $1,1 I_R$.

Vejam os exemplos: acompanhe no gráfico da fig. 2, o caso de um motor cuja corrente nominal seja 40 A. O contator encontrado no mercado é um modelo de 40 A (veja Tabela 1) e o relé indicado deve ser um modelo de faixa de regulagem de 38 a 50 A, que também se encontra na mesma

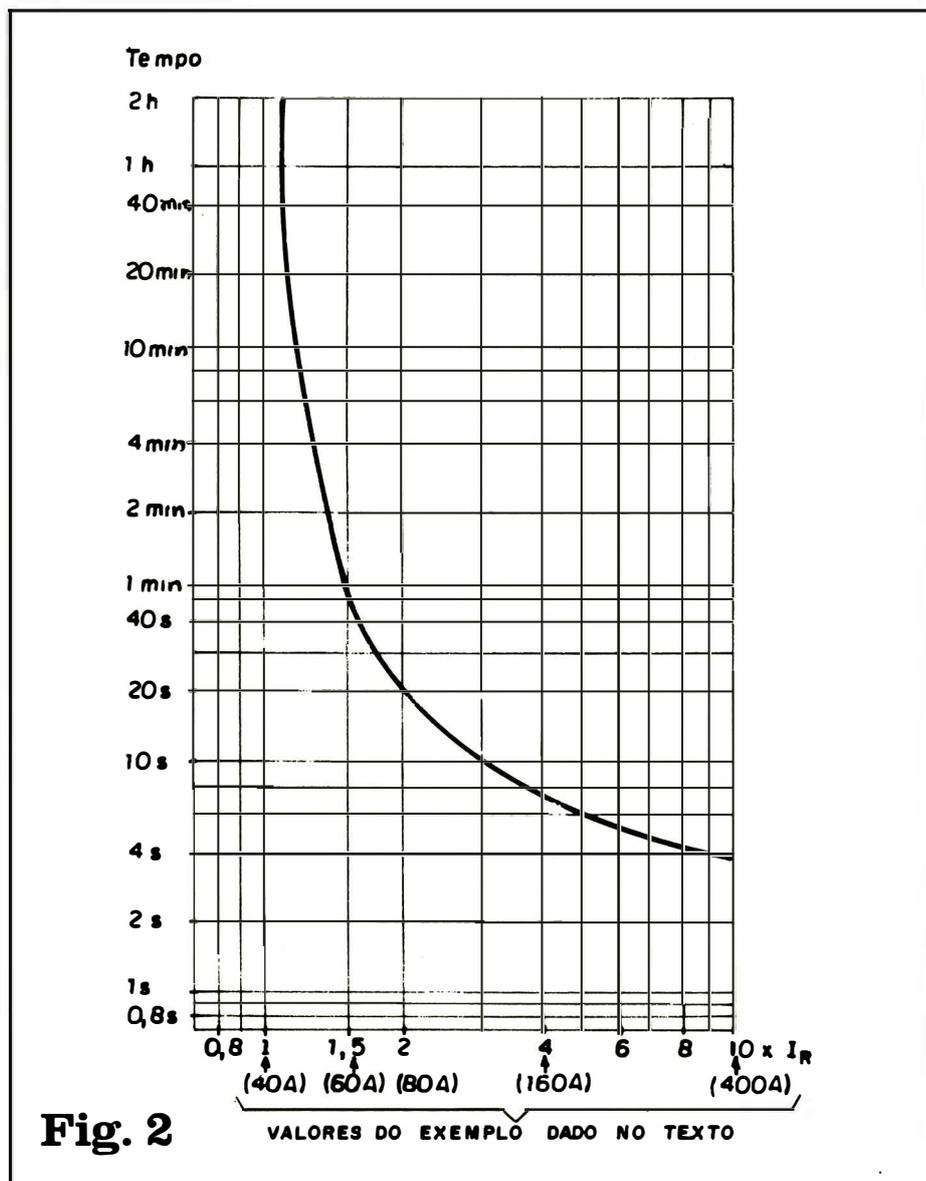


Fig. 2

Tabela 1

Contadores e relés térmicos para motores elétricos
(Os valores padronizados podem variar com o fabricante)

CORRENTE NOMINAL E FAIXA DE REGULAGEM EM AMPERES(A)

CONTATOR	9	16	25	40	80	145	265	500
RELÉ TÉRMICO	7-10	13-18	23-32	38-50	75-105	125-200	250-400	400-630

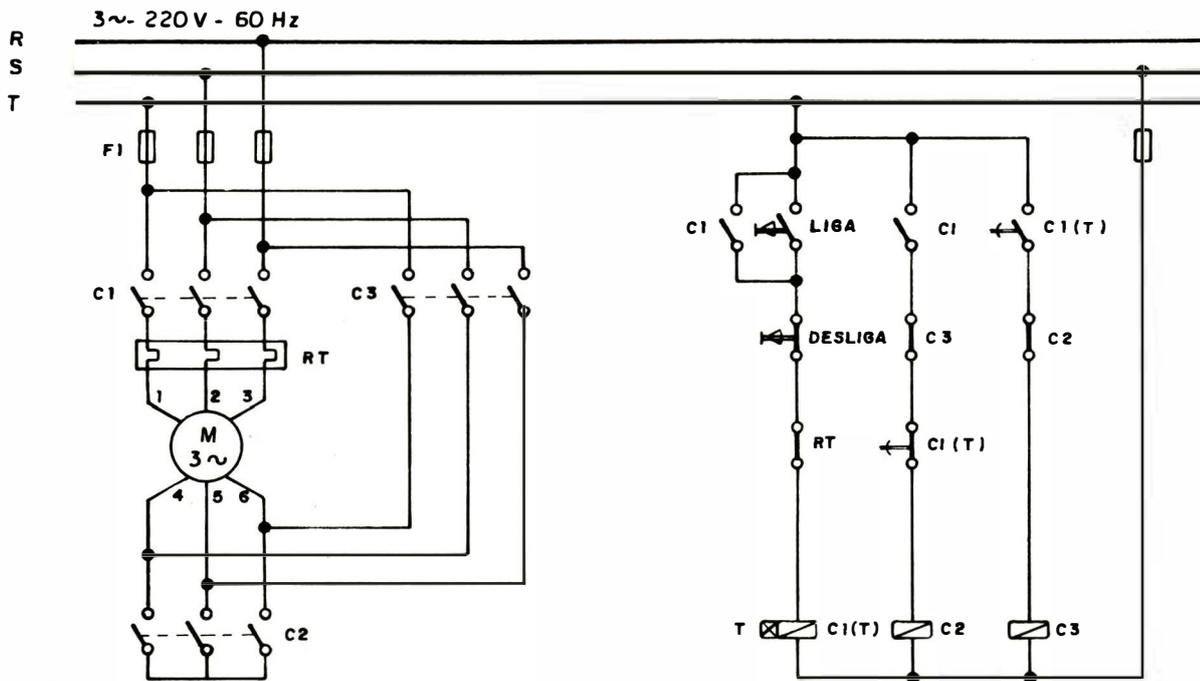


Fig. 3

tabela. Seu ajuste deve ser feito para que sua atuação se dê em aproximadamente 44 A (1,1 x 40).

Deve-se lembrar que, embora o contator e o relé sejam de corrente nominal de 40 A, eles têm capacidade para suportar a corrente de partida dos motores de indução, que é da ordem de seis a oito vezes a corrente nominal, visto que ela perdura por apenas alguns segundos.

A função dos fusíveis na alimentação do motor é a de prote-

rior ao valor obtido multiplicando-se a corrente de partida pelo fator indicado na Tabela 2.

O caso em questão é de um motor normalizado, com uma corrente de partida típica da ordem de 6 vezes a nominal, resultando 240 A. Portanto, o fusível escolhido de acordo com a Tabela 2 deverá ser $0,4 \times 240 = 96$ A. Escolha um fusível com corrente nominal, no entorno de 96 A (no caso, 100 A).

Os fusíveis industriais também são componentes que apresentam grande variação de tipos e aplicações e, mais uma vez, é aconselhável a consulta aos catálogos dos fabricantes.

IV. Partida Estrela/Triângulo

Nesta configuração, o motor precisa ter obrigatoriamente seis terminais e ligação triângulo para a tensão nominal da rede. Assim, para linhas de 220 V, o motor deve possuir enrolamento para tensões 220/380 V;

para linhas de 380 V, o motor deve ser 380/660 V e, para linhas de 440 V, deve ser 440/760 V (veja cap. VII). O circuito é mostrado na fig. 3 e pode ser acompanhado da seguinte maneira:

Ao pressionar o botão "LIGA", o contator C1 entra e aciona o contator C2, que fecha o centro da estrela.

Suponhamos que o motor seja de 220/380 V. Nesta situação, ele começa com conexão estrela, cuja tensão nominal seria de 380 V. Porém, como a rede é 220 V, o motor parte com tensão reduzida de 1,73. Para a linha, isso resulta em uma corrente de partida de 1/3 da corrente que apresentaria, se fosse ligado diretamente em triângulo na linha de 220 V (veja cap. VII).

O contator C1 tem agregado um bloco de contatos temporizados C1 (T) que, após alguns segundos (o suficiente para o equipamento atingir rotação próxima à sua nominal), desliga o contator C2 e liga o C3, reconectando os terminais do motor em triângulo e, portanto, aplicando tensão nominal, agora com menor sobrecorrente.

Tabela 2

CORRENTE DE PARTIDA	FATOR
<i>até 40 A, inclusive</i>	0,5
<i>maior que 40 A até 500 A, inclusive</i>	0,4
<i>acima de 500 A</i>	0,3

ger a instalação contra curto-circuitos na fiação de acesso ou no próprio equipamento, em caso de algum defeito. Segundo a NBR 5410, a corrente nominal do fusível escolhido não deve ser supe-

O critério de dimensionamento dos relés térmicos e contadores já foi descrito anteriormente. Porém, aqui deve ser notado que, nos contadores C1 e C3, a corrente é 1,73 vezes menor que a nominal do motor, e para o contador C2 a corrente é dividida por 3. Por exemplo, se a corrente nominal do motor é 40 A, deve-se usar para os contadores C1 e C3 uma corrente de $40/1,73 = 23$ A. Ou seja, deve-se escolher o contador padronizado mais próximo desse valor, que é o de 25 A (veja a Tabela 1).

Escolhe-se um relé térmico padronizado, com faixa de regulação entre 23 e 32 A, ajustando-o para corrente $1,1 \times 23 = 25,5$ A. Para o contador C1, usa-se uma corrente de $40/3 = 13,3$ A, optando-se, então, pelo contador padronizado mais próximo (16 A).

Quanto aos fusíveis, a seleção é feita da mesma forma que a realizada para ligação direta.

V. Partida com chave compensadora (compensador de partida)

Neste método, é utilizado um autotransformador entre a rede e o motor durante a partida. No

secundário deste, existem “taps” que apresentam tensão de saída, normalmente com 50%, 65% e 80% da tensão de entrada. A escolha do “tap” é definida pela corrente de partida máxima que a rede suporta. O circuito está mostrado na fig. 4.

Ao se pressionar o botão “LIGA”, entram os contadores C1 e C2, alimentando o motor com tensão reduzida, de acordo com o “tap” de autotransformador escolhido (A.T.).

A corrente de partida no motor é então limitada na proporção da redução da tensão provocada pelo autotransformador. Porém, é necessário lembrar que, graças ao efeito transformador, a corrente primária é diminuída na mesma relação. Logo, a corrente na linha fica reduzida com o quadrado dessa relação (veja exemplo mais adiante).

Ao final de um determinado tempo, os contadores temporizados C1 (T) abrem o contador C2 e fecham C3, aplicando tensão nominal aos terminais do motor. A entrada do C3 também provoca a abertura do C1, desligando o autotransformador e concluindo o processo de partida.

O critério de dimensionamento

do contador C3, do relé térmico e dos fusíveis é o mesmo da partida direta: é feito pela corrente nominal do motor. Porém, o contador C2 é escolhido para esta corrente reduzida pelo fator de redução da tensão do autotransformador e o contador C1, para a corrente nominal reduzida pelo quadrado do fator de redução da tensão.

Vejam um exemplo de motor de 440 V, cuja corrente nominal é 500 A, utilizando o “tap” do autotransformador, que reduz a tensão para 50% da tensão da rede. Para o contador C2, a corrente será multiplicada pelo fator de redução do autotransformador, ou seja, $0,5 \times 500 \text{ A} = 250 \text{ A}$. O contador padrão será um de 265 A. Para o contador C1, a corrente de dimensionamento será, pelo exposto acima, $0,5 \times 0,5 \times 500 \text{ A} = 125 \text{ A}$. A escolha recairá sobre um contador padronizado de 145 A (Tabela 1).

Quanto ao autotransformador, sua especificação é feita pela potência do motor, tensão nominal da rede e número máximo de partidas por hora. Mais uma vez, sugere-se consultar os catálogos técnicos sobre compensadores de partida.

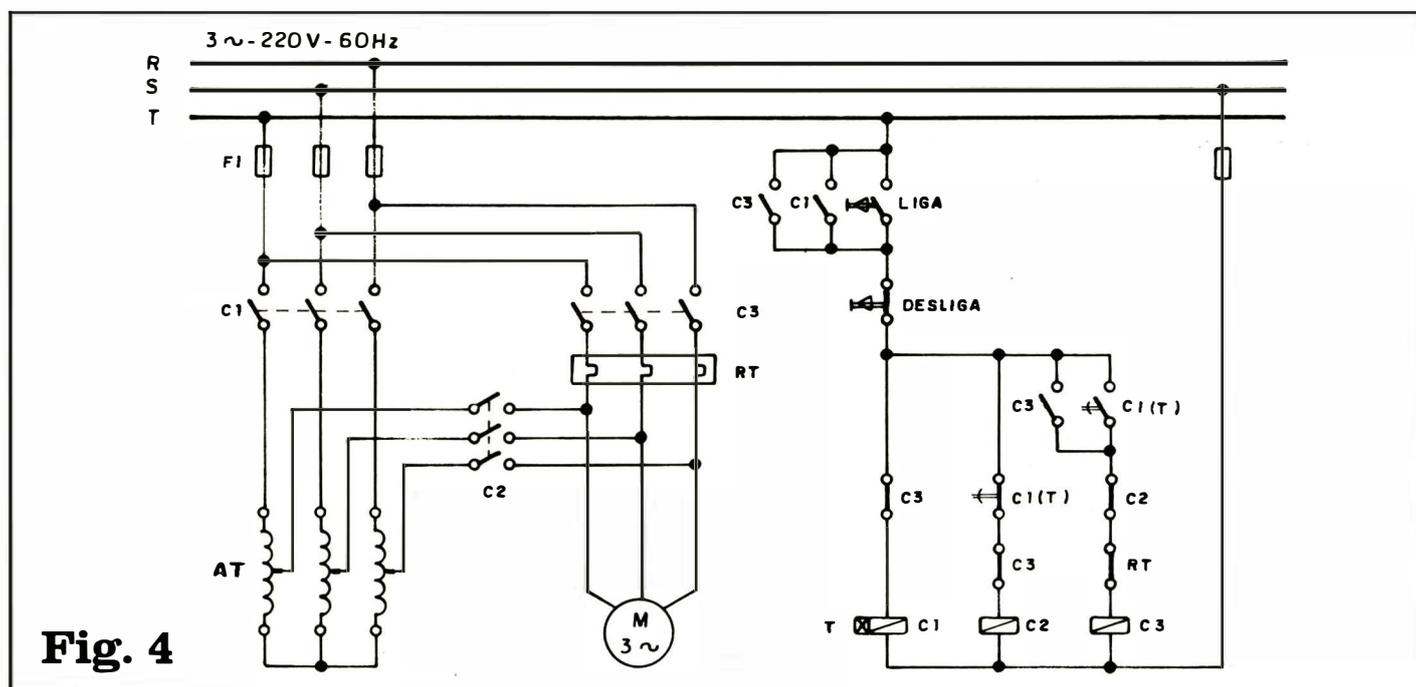


Fig. 4

Dimensionamento da fiação de alimentação de motores

I. INTRODUÇÃO

O bom desempenho de um motor está relacionado com o correto dimensionamento da fiação (cablagem) e escolha dos tipos de condutores a serem utilizados.

A escolha entre fios sólidos e cabos flexíveis e o tipo da isolação são assuntos por demais extensos. Existe uma grande variedade de materiais isolantes (PVC, EPR e outros) para atender às diversas condições de trabalho, temperatura, meio ambiente e maneiras de instalar (aérea, em eletroduto e outras). Não se deve utilizar cabos sem a recomendação segura de um fornecedor de alta confiabilidade, que ofereça literatura técnica contendo todos os elementos necessários para sua escolha.

Um mau dimensionamento e um serviço executado sem qualidade implicam não somente elevadas quedas de tensão, prejudicando o funcionamento do motor, mas também perdas de energia, aumentando inutilmente o consumo e aquecendo os cabos, danificando sua isolação. A segurança da instalação e das pessoas depende muito da fiação elétrica, que, muitas vezes, tem sido responsável por graves acidentes, como incêndios e paradas de produção.

II. DIMENSIONAMENTO

O que vamos apresentar a seguir serve como guia preliminar para os casos mais simples de motores de baixa tensão (até 440 V). Para o dimensionamento de sistemas mais amplos e complexos, é essencial o apoio das normas técnicas, em particular a NBR 5410 da ABNT, e um bom catálogo técnico, como, por exemplo, o “Fios e Cabos para Instalação da Baixa Tensão” da Pirelli Cabos, que trata do assunto com pormenores e orienta o instalador.

Conhecendo-se a resistência ôhmica e a reatância por metro de cabo, a corrente conduzida e a distância entre o ponto da tomada de energia e o motor, você pode calcular a queda de tensão e as perdas. Porém, esse trabalho é longo e pode ser evitado, utilizando-se ábacos e tabelas que são elaborados por fabricantes de motores, de tal modo que fornecem diretamente a secção em mm² a ser usada, em função da tensão da rede, da distância e da corrente, já levando em conta a capacidade de condução do cabo e uma queda de tensão menor que 3% da tensão nominal, valor aceitável para a corrente nominal (não para a de partida de motores de gaiola).

Para utilização das Tabelas 1 e

2 que estamos apresentando, basta fazer um cálculo prévio de relação voltagem/distância, e encontraremos um resultado em volt por metro (V/m), que permite o acesso às mesmas. Quanto à corrente, a NBR 5410 recomenda multiplicar a corrente nominal do motor pelo seu fator de serviço. Quando este for desconhecido, adote o valor orientativo de 1,1. Se a fiação é destinada à alimentação de dois ou mais motores, aplique o fator de serviço em cada um e some os resultados.

Vejam dois exemplos:

1) Instalação de um motor monofásico de 3 kW (4 CV), 220 V, corrente nominal 21 A, fator de serviço igual a 1,0, distância da fonte igual a 50 m, condutores em eletroduto. É um caso para a Tabela 1.

Cálculo de V/m:

$$\frac{220}{50} = 4,4 \text{ V/m}$$

Entrando na coluna de 4,4 V/m e na linha de 20 A (que é o valor mais próximo da corrente I=21A na Tabela 1), localizamos, no encontro da coluna com a linha, o valor 6, que é a secção em mm² do cabo ou fio a ser usado.

2) Fiação para alimentação de

três motores trifásicos de 440 V, sendo um de 20 CV (26 A), um de 10 CV (14 A) e outro de 7,5 CV (11 A), distantes 120 m da fonte, com cabos instalados ao ar. É o caso da Tabela 2.

Cálculo de V/m:

$$\frac{V}{m} = \frac{440}{120} = 3,67 \text{ V/m}$$

Como não foi indicado, adotaremos fator de serviço 1,1.

Cálculo de I:

$$I = 1,1 (26 + 14 + 11) = 56,1 \text{ A}$$

Na Tabela 2, os valores mais próximos de V/m e de I são: 3,7 e 55.

Obtemos, assim, cabo de

secção igual a 25 mm².

Recalcule o exemplo 2 modificando os motores para 220 V. As correntes serão o dobro, ou seja, 52 A, 28 A e 22 A e chegamos à conclusão econômica que há grande vantagem em se utilizar tensões maiores, principalmente quando as distâncias são grandes.

Tabela 1 - Motores monofásicos e trifásicos - cabos em PVC - 1 circuito em eletroduto

V/m \ I(A)	11	7,33	5,50	4,40	3,70	2,93	2,20	1,76	1,47	1,10	0,88	0,73
10	2,5	2,5	2,5	4	4	6	6	10	10	16	16	25
15	2,5	2,5	4	4	6	6	10	16	16	25	25	25
20	2,5	4	6	6	10	10	16	16	25	25	35	35
30	4	6	10	10	10	16	25	25	35	35	50	70
40	6	10	10	16	16	25	25	35	35	50	70	95
55	10	10	16	16	25	25	35	50	70	95	120	150
70	16	16	16	25	25	35	50	70	70	120	150	185
95	16	25	25	35	35	50	70	95	120	185	240	-x-
125	16	25	35	50	50	70	95	120	185	-x-	-x-	-x-
145	16	25	35	50	70	95	120	150	240	-x-	-x-	-x-
165	25	35	50	70	70	95	150	185	-x-	-x-	-x-	-x-
200	25	50	70	70	95	120	185	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-
240	35	50	70	95	120	150	240	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-
280	35	70	95	120	150	240	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-
320	50	70	95	120	185	240	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-

Tabela 2 - Motores trifásicos - cabos em PVC - linha aérea com espaçamento 20 cm

V/m \ I(A)	11	7,33	5,50	4,40	3,70	2,93	2,20	1,76	1,47	1,10	0,88	0,73
10	2,5	2,5	2,5	2,5	4	4	6	10	10	16	16	25
15	2,5	2,5	4	4	6	6	10	10	16	25	25	35
20	2,5	4	4	6	6	10	16	16	25	25	35	50
30	4	6	6	10	10	16	25	35	35	50	70	95
40	4	6	10	10	16	16	25	35	50	70	95	120
55	6	10	16	16	25	25	50	70	70	120	185	240
70	10	16	16	25	25	35	70	70	95	185	-x-	-x-
95	10	16	25	35	50	70	95	120	185	-x-	-x-	-x-
125	16	25	35	50	70	95	150	240	-x-	-x-	-x-	-x-
145	16	35	50	70	70	120	185	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-
165	25	35	50	70	95	150	240	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-
200	25	50	70	95	120	240	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-
240	35	70	95	150	185	-x-						
280	50	70	120	185	240	-x-						
320	50	95	150	240	-x-							

Nas tabelas foram evitados os valores de secção acima de 240 mm². O motivo é que, à medida que se aumenta a secção, o cabo vai se tornando menos cômodo para ser manuseado (aumento do peso por metro e menor flexibilidade). Isso também o torna mais difícil de ser encontrado no mercado e exige eletroduto de grande dimensão. Sempre que possível, a solução nesses casos é subdividir a corrente em mais de um cabo por fase (cabos em paralelo).

Potência, conjugado (torque) e escorregamento

I. Rotação Síncrona

Os enrolamentos de estator podem ser executados de forma a produzir dois, quatro, seis ou mais pólos (veja cap. VII), de um campo rotativo, cuja velocidade, denominada rotação síncrona (n_s) é relacionada com a frequência (f) da rede e com o número de pólos (p) do enrolamento pela seguinte fórmula:

$$n_s = 120 \frac{f}{p} \quad (1)$$

Assim sendo, um motor de dois pólos, 60 Hz, terá:

$$n_s = 120 \frac{60}{2} = 3600 \text{ rpm}$$

Para quatro pólos, é fácil verificar que teremos 1.800 rpm. Para seis pólos, 1.200 rpm, e assim por diante. O campo rotativo induz tensões e, conseqüentemente, correntes no rotor e, pela interação entre campo e corrente, aparecem forças que resultam em conjugado (também denominado torque), o que faz o rotor girar.

II. Escorregamento

O rotor de um motor de indução, em carga, jamais gira

com a rotação síncrona, pois se isto acontecesse a velocidade do rotor seria igual à do campo indutor. Sem o movimento relativo entre os dois, não haveria corrente induzida no rotor e, conseqüentemente, não haveria torque.

Portanto, o rotor acelera até próximo da velocidade síncrona e, em carga nominal, ele apresenta uma velocidade ligeiramente inferior a n_s . Essa diferença, em valor percentual, é chamada escorregamento. Assim, em um motor de quatro pólos, 60 Hz, que gira em carga a 1.730 rpm, o escorregamento (s) será:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100 = \frac{1800 - 1730}{1800} \cdot 100 = 3,9\%$$

Para um motor de seis pólos, 60 Hz, que, em carga nominal, gira a 1.185 rpm é fácil calcular que (s) será igual a 1,25%. Como regra geral, os escorregamentos em motores normais diminuem com a potência, variando de 3% a 5% em pequenos motores e chegando a 1,0% ou até menos que 0,5% em motores de médio e grande portes.

III. Potência Elétrica e Potência Mecânica

Em corrente alternada monofásica, a potência elétrica é dada por:

onde U e I são tensão e corrente

$$P = U I (FP) \quad (2)$$

e FP é o chamado “fator de potência” (veja cap. V).

Se for trifásica, deve-se acrescentar o fator $\sqrt{3} = 1,732$:

$$P = 1,732 U I (FP) \quad (3)$$

Essa potência P é denominada, na Eletrotécnica, “potência ativa” de entrada no motor, porque só ela pode se transformar em trabalho (energia mecânica) e calor (energia térmica) dentro do equi-

pamento, coisa que não ocorre com a potência reativa, a ser vista no capítulo V.

No Sistema Internacional de Unidade (SI), adotado no Brasil por força de lei, a unidade de potência ativa, seja ela elétrica ou mecânica, é o Watt (W) ou seus múltiplos kW e MW. A potência que consta na placa dos motores é sempre a potência ativa mecânica na saída do eixo. Aceita-se, em caráter excepcional, o CV que equivale a 0,746 kW (ou 1 kW = 1,34 CV). A unidade HP, do antigo sistema inglês, ainda encontrada em alguns motores, não deve ser usada (1 kW = 1,36 HP).

V. Torque

Sendo uma torção, o torque é expresso na unidade Newton x metro (N x m do sistema SI). Porém, a unidade quilograma-força x metro (kgf x m) é mais intuitiva e, por isso, muito utilizada pelos usuários de motores.

Sendo a potência mecânica um produto do torque pela velocidade, a fórmula (4) fornece o torque C, em kgf x m, em função da potência mecânica em kW e da rotação em rpm.

$$C = 974,4 \frac{P_m}{n} \quad (4)$$

Por exemplo, um motor de 100 CV (75 kW) de quatro pólos, 60 Hz, 1.780 rpm, terá o torque nominal igual a :

$$C_{\text{nom}} = 974,4 \frac{75}{1780} = 41 \text{ kgf x m}$$

V. Curvas de Torque x Rotação

São normalmente dadas em

valores percentuais do torque nominal e mostram com clareza o valor do torque de partida (Cp) e do torque máximo (Cmax).

Os valores de Cp, de Cmax e também das correntes de partida dos motores de gaiola normalizados são estipulados pelas normas ABNT (NBR 7094). Uma curva típica de um motor de gaiola de quatro pólos, normalizado na categoria N da NBR 7094, com potência na faixa dos 20 CV, está apresentada na fig. 1.

Essa categoria se caracteriza pelo torque de partida relativamente baixo e pequenos escorregamentos. A fig. 2 apresenta um caso típico de motor de categoria H, para equipamentos de alto torque de partida (Cp > 275%) e altos escorregamentos (s > 5%). Quanto maiores Cp e Cmax, menor o tempo de partida e maior o poder de sobrecarga instantânea do motor. Na curva da fig. 1, por exemplo, o motor pode suportar um sobretorque de até 200% do valor nominal.

VI. Aplicações mais comuns

a) Bombas centrífugas, ventiladores, tornos comuns: Não

têm grande exigência quanto ao torque de partida, sendo suficientes os motores de categoria N. Uma curva típica do torque de bomba centrífuga está na fig. 1, mostrando o ponto de funcionamento (cruzamento da curva do motor com a da carga).

Deve-se tomar cuidado com os serviços intermitentes e os casos de partidas frequentes e consecutivas com grande inércia externa, que certamente exigirão motores especiais. Neste particular, convém consultar a NBR 7094;

b) Talhas, guinchos e pequenas pontes rolantes: Ao contrário das bombas, as talhas apresentam torque quase constante durante toda a aceleração da carga. Por isso, é preferível utilizar um motor da categoria D (fig. 2). Quando houver sobretorque na carga (não raro em guinchos), o motor de categoria D aumenta o escorregamento (diminui a velocidade) e limita a potência, que é o produto de Torque x Velocidade. Nas pontes rolantes de maior capacidade são usados os motores de indução de rotor bobinado que serão vistos no capítulo XIII.

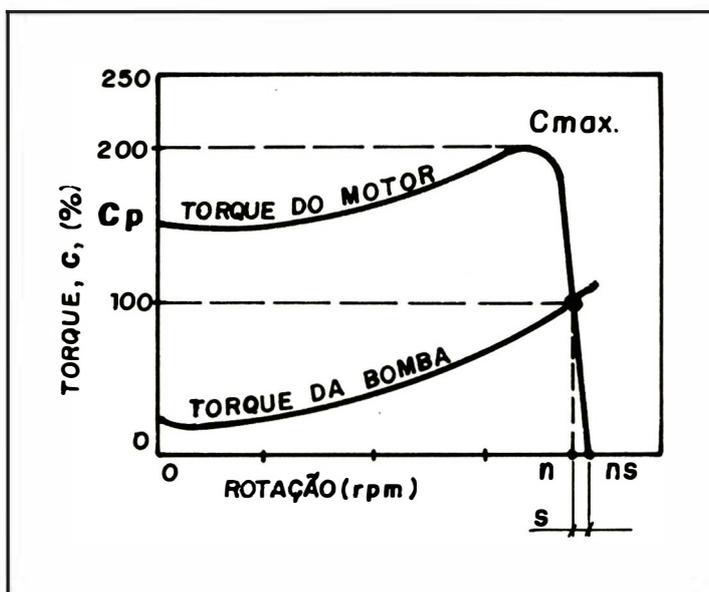


Fig. 1

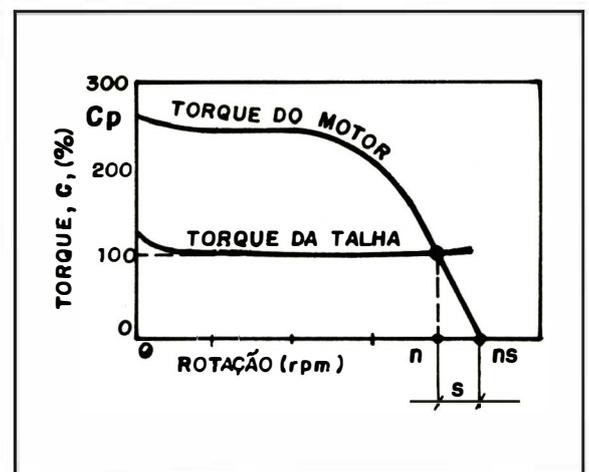


Fig. 2

Perdas, rendimento e fator de potência

I. Perdas

As perdas, além de representarem um consumo inútil de energia, aquecem o motor, diminuindo a vida da isolação (veja cap. VIII). As perdas de potência são de três naturezas:

a) perdas magnéticas, também denominadas perdas no ferro, comentadas no cap. XII;

b) perdas Joule, também denominadas perdas no cobre. São proporcionadas pelo efeito Joule (RI^2) sobre as resistências ôhmicas próprias dos enrolamentos do estator e do rotor;

c) perdas mecânicas, devidas ao ventilador e atritos nos mancais e no ar.

Há ainda as perdas suplementares, que são acréscimos às perdas no ferro e no cobre, devidas principalmente à pulsação de fluxo nas superfícies dos dentes e distribuição irregular da corrente de carga nos condutores. As perdas mecânicas e no ferro manifestam-se mesmo com o motor em vazio, porém, as perdas Joule e suplementares são dependentes da carga.

II. Rendimento (η)

Quanto maiores as perdas, menor o rendimento. Este é calculado pela relação entre a

potência mecânica de saída no eixo (P_m) e a potência elétrica ativa de entrada (P_e), sendo P_e igual a P_m mais as perdas.

$$\eta = \frac{P_m}{P_e}, \text{ ou, } \eta = \frac{P_m}{P_e} \cdot 100\% \quad (1)$$

Se tomarmos a expressão (3) do capítulo IV, concluímos que:

$$P_m = P_e \eta = 1,732 UI (\text{FP}) \eta \quad (2)$$

Como exemplo, vamos calcular a potência ativa de entrada e a corrente absorvida por um motor trifásico de 56 kW (75 CV), 380 V, que apresenta rendimento 0,91 (91%) e fator de potência 0,89. Pelas fórmulas (1) e (2), temos:

$$P_e = \frac{P_m}{\eta} = \frac{56000}{0,91} = 61540 \text{ W} = 61,54 \text{ kW}$$

$$I = \frac{P_m}{1,732 U \eta (\text{FP})} = \frac{56000}{1,732 \times 380 \times 0,91 \times 0,89} = 105 \text{ A}$$

Também como exemplo, vamos calcular o rendimento de um motor de 5 CV (3,73 kW), dois pólos, 220 V, 13,7 A, cujas perdas somam 490 W.

$$P_e = P_m + \text{perdas} = 3730 + 490 = 4220 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{3730}{4220} = 0,88 \text{ (88\%)}$$

Na fig. 1, temos uma curva da variação do rendimento, em função da percentagem de carga no eixo do motor, para um caso típico de equipamento da ordem de 75 kW, quatro pólos, 60 Hz.

Note como o valor de η cai rapidamente para cargas abaixo de 50%. Portanto, além de procurar utilizar motores de boa procedência e com rendimento comprovado, você deve procurar evitar o uso de motores superdimensionados ou que fiquem longos períodos em vazio (carga nula), para evitar consumo inútil de energia (veja cap. X).

III. Fator de potência

O fator de potência é também chamado cosse de fi ($\cos \phi$) por ser igual ao cosseno do ângulo ϕ entre a tensão e a corrente. Na técnica de corrente alternada, define-se três potências que possibilitam a definição energética do fator de potência:

- “potência ativa”, já vista no capítulo IV,

$$P = 1,732 UI (FP) \quad (3)$$

- “potência reativa” (que pode ser indutiva ou capacitiva),

$$Q = 1,732 UI \sqrt{1 - (FP)^2} \quad (4)$$

- “potência aparente”, ou resultante das duas anteriores,

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 1,732 UI \quad (5)$$

Pelas fórmulas 3 e 5 nota-se que o fator de potência, FP, é a relação P/S.

Os motores de indução absorvem da linha uma potência aparente S, que apresenta uma parcela de potência ativa P e outra de reativa indutiva Q. A unidade de S é o volt-ampere (VA) e a de Q é o volt-ampere reativo (VAR), ou seus múltiplos kVA e kVAR. A potência reativa não produz trabalho e só circula inutilmente pela linha, sobrecarregando os condutores.

Vejamos como o fator, denominado “fator de potência”, dá uma idéia da quantidade de potência reativa absorvida por um equipamento. Por exemplo, um motor de 220 V, que absorve 50 A, com fator de potência 0,83, está recebendo uma potência aparente

Tabela 1

CV	CARCAÇA	η	FP
0,5	71	0,65	0,71
1,0	80	0,70	0,72
3,0	90 L	0,76	0,80
5,0	100 L	0,83	0,84
10	132 S	0,88	0,86
25	160 L	0,89	0,87
30	180 M	0,91	0,87
50	200 L	0,92	0,88
75	225 M	0,92	0,88
100	250 M	0,93	0,89
150	280 M	0,93	0,90
200	315 M	0,94	0,90

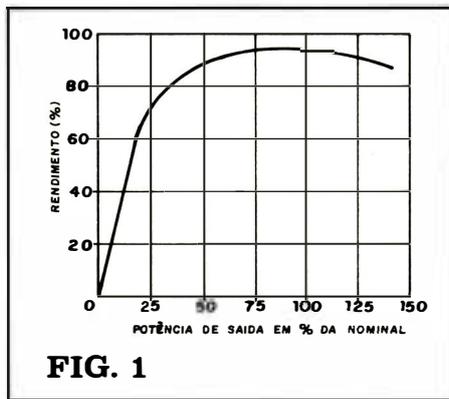


FIG. 1

igual a $1,732 \times 220 \times 50 = 19052$ VA e uma potência ativa de apenas:

$$P = S (FP) = 19,052 \times 0,83 = 15\ 813\ W$$

Se o fator de potência fosse 0,93, bastaria uma corrente de

$$50 \times \frac{0,83}{0,93} = 44,62\ A$$

para dar o mesmo valor de potência ativa, ou seja, quanto maior o (FP), menor será a corrente necessária, pois menor será a parcela de potência reativa. É por esse motivo que as concessionárias de energia elétrica aplicam penalidade (multa) aos consumidores industriais que apresentam baixo fator de potência ou, em outras palavras, que absorvem muita potência reativa.

Até pouco tempo atrás, o mínimo

permitido era 0,85. Recentemente, após regulamentação do DNAEE, esse valor passou para 0,92. Portanto, se o usuário não tomar cuidado, irá pagar uma conta que pode chegar até o dobro do consumo registrado. Nas instalações onde há muitos motores de indução, é conveniente fazer a correção do fator de potência com capacitores, pois estes absorvem potência reativa capacitiva, que neutraliza a indutiva.

Na fig. 2, você pode notar um andamento típico do (FP) com a carga. É uma curva parecida com a do rendimento. Portanto, valem as mesmas recomendações. Na Tabela 1, fornecida pelo fabricante Equacional, constam rendimento e fator de potência de motores de gaiola normais, blindados, de quatro pólos, 60 Hz, onde se nota que η e (FP) crescem de acordo com o tamanho da máquina. Portanto, deve-se tomar ainda mais cuidado quando existem muitos motores pequenos, ao invés de poucos de maior porte, em uma instalação.

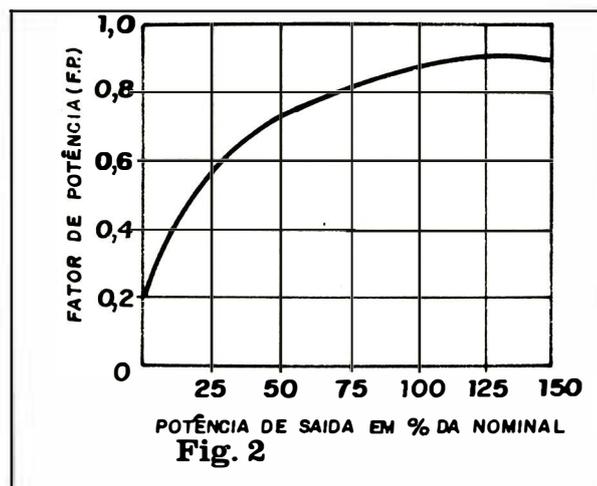


Fig. 2

NOTA: Energia é dada pelo produto Potência x Tempo. Por exemplo, uma potência ativa de 100 kW, fluindo por uma linha durante 40 horas, corresponde a uma energia ativa de 4000 kWh. Uma potência reativa de 75 kVAR no mesmo número de horas, na mesma linha, corresponde a uma energia reativa de 3000 kVARh. A potência aparente seria $\sqrt{(75)^2 + (100)^2} = 125$ kVA, com uma correspondente energia aparente de $\sqrt{(4000)^2 + (3000)^2} = 5000$ kVA h. Observe que o $f.p. = 100\ kW / 125\ kVA = 0,8$ pode ser também calculado pela relação de energias: $4000/5000 = 0,8$. É isso que fazem as concessionárias para calcular o fator de potência médio mensal do consumidor, visto que elas medem o consumo mensal de energia ativa e reativa na entrada das indústrias.

Introdução ao enrolamento de motores trifásicos

I. Preliminares

No capítulo IV foi enunciado o princípio de funcionamento dos motores de indução e apresentados o campo rotativo, a rotação síncrona, o escorregamento e a necessidade de um enrolamento (bobinado) para consegui-los.

Existem muitas maneiras de se executar enrolamentos específicos para baixa ou alta tensão, com bobinas pré-moldadas ou não, com fio retangular ou redondo, simples camada ou dupla camada etc. Vamos nos deter aos casos mais simples de estatores de motores de indução trifásicos, de pequeno e médio portes (até 200 ou 300 CV) de baixa tensão (220 V, 380 V ou 440 V) em fio redondo, com bobinas não pré-moldadas.

eles, existem três tensões alternadas de igual valor, mas defasadas, no tempo, de 120 graus uma da outra. É como se fossem três fontes de tensões monofásicas (a, b e c) interligadas, que provocam no motor três correntes (a, b e c - fig. 1), também defasadas entre si em 120 graus, essenciais ao funcionamento dos motores trifásicos.

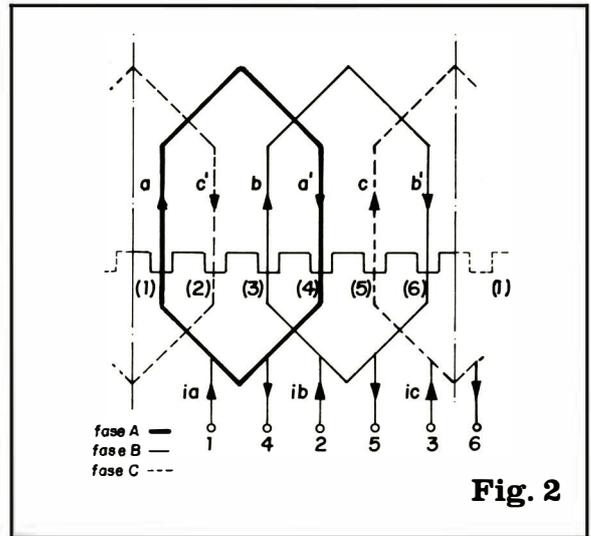


Fig. 2

II. Enrolamento elementar de dois pólos

Este enrolamento produz dois pólos magnéticos, N e S, que giram em relação ao estator. Tudo se passa como se esse enrolamento trifásico fosse a composição de três enrolamentos monofásicos, cada um ocupando um terço de circunferência do estator. Ele apresenta somente seis ranhuras, e está desenhado em corte na fig.1, em esquema planificado na fig. 2 e em esquema circular na fig. 3. Sua

Este tipo de enrolamento é chamado de “simplex camada” ou de “canal cheio”, resultando em um número de bobinas igual à metade do número de ranhuras (no caso, seis ranhuras e três bobinas). Note nas figuras 1 e 2 que o passo da bobina vai da ranhura 1 até a 4, ou seja, é de

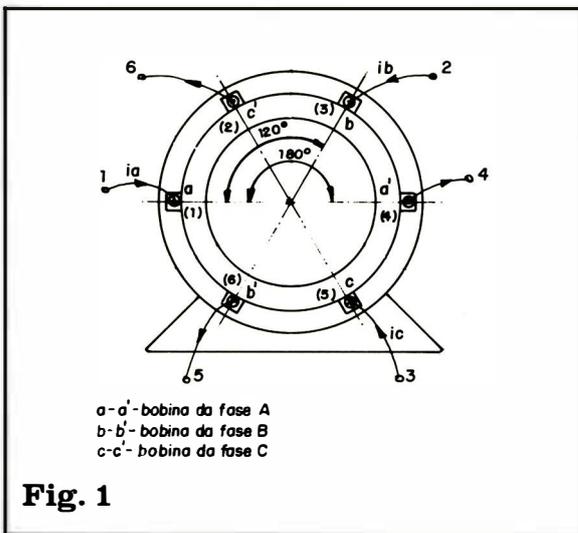


Fig. 1

Os sistemas trifásicos oferecidos pelas concessionárias são constituídos de três fios. Entre

interligação entre fases (Δ e λ) está representada na fig. 4.

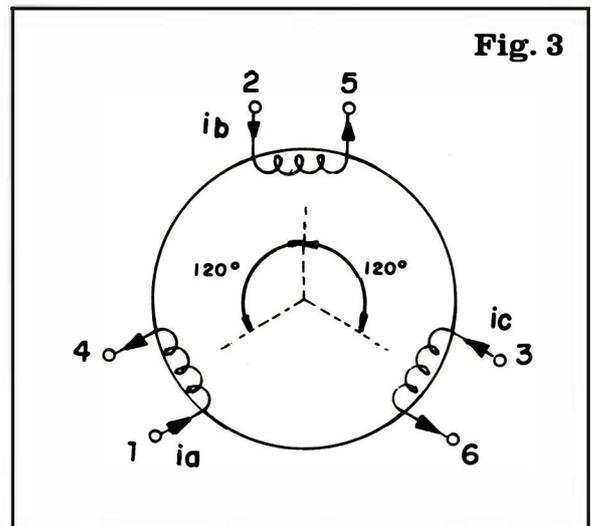


Fig. 3

meia circunferência (180 graus), chamado passo inteiro. Atente também para os três enrolamentos parciais como se fossem três monofásicos, um com a corrente i_a da fase a, outro com a corrente i_b da fase b e mais outro com i_c da fase c (fig. 3).

Este enrolamento contém três grupos de bobinas, com uma bobina para cada grupo e, portanto, uma bobina por fase. Supondo que cada bobina tenha 150 espiras, o número de espiras por fase será também igual a 150.

Dividindo o número de ranhuras pelo número de pólos e de fases, encontramos o índice "q", muito importante nos enrolamentos trifásicos:

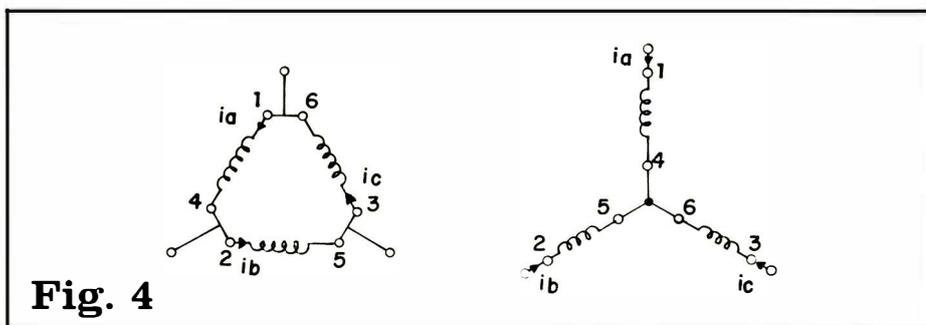


Fig. 4

$$q = \frac{6}{2 \times 3} = \text{uma ranhura por pólo e por fase.}$$

Infelizmente, um enrolamento tão simples tem muitos inconvenientes. Ele produz um campo rotativo deformado com alto teor de componentes harmônicos, além de dar características de fator de potência, rendimento e curva de torque de baixa qualidade (veja cap. V).

III. Enrolamento real de dois pólos

As características dos motores são muito melhoradas quando se subdivide cada bobina de cada fase em várias bobinas parciais (q maior que 1, chamado enrolamento distribuído) e também quando se faz o passo menor que 180 graus (chamado enrolamento de passo encurtado).

Nas figuras 5 e 6, apresentamos um enrolamento de dois pólos, trifásico, agora com 12

ranhuras e com passo encurtado. O passo inteiro seria da ranhura 1 até a 7, porém ele está feito com 1 até 6. Neste caso, o índice q resulta em:

$$q = 12 / 2 \times 3 = \text{duas ranhuras por pólo e por fase.}$$

Outra novidade neste enrolamento é que ele não é mais de simples camada, porém de "dupla camada". Isso faz com que o número de bobinas seja igual ao de ranhuras.

Ele tem, portanto, 12 bobinas, ou seja, quatro bobinas por fase. Se cada bobina tiver, por

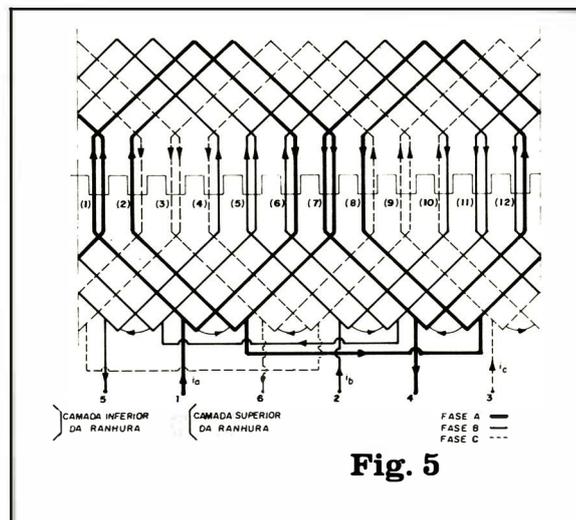


Fig. 5

inteiro, quantas bobinas teria, quantas bobinas por fase, quantos grupos teria e de quantas bobinas cada um?

Se cada bobina fosse feita com 20 espiras, quantas espiras por fase teríamos?

Calcule a rotação síncrona produzida pelo enrolamento quando ligado a um sistema trifásico de frequência 60 Hz.

Calcule a rotação em carga, sabendo-se que o escorregamento a plena carga é 3,5% (veja cap. IV). Procure desenhar este enrolamento no tipo esquema planificado, numerando as ranhuras e terminais.

2. Como se pode inverter o sentido de rotação do campo girante e, conseqüentemente, do eixo do motor? Basta inverter a seqüência de fases *a*, *b* e *c* nos terminais 1, 2 e 3 (figura 4), comprove isso em um motor trifásico, ligando o cabo da fase *a* no 2 e o da fase *b* no 1, ou trocando *b* com *c*, ou *a* com *c*.

exemplo, 45 espiras, teremos $4 \times 45 = 180$ espiras por fase. Esse enrolamento é composto de seis grupos de bobinas, com duas em cada grupo.

A corrente de cada fase percorre agora quatro bobinas em série. As interligações entre as fases podem ser as mesmas do caso anterior (Δ e λ). A partir daí, é possível deduzir enrolamentos de dois pólos com $q = 3$, $q = 4$ e assim por diante, usando o mesmo raciocínio. Este tipo de enrolamento é também denominado imbricado.

IV. Questões

1. Para um enrolamento de dois pólos, trifásico, com 24 ranhuras e passo de bobina de 1 até 11, qual seria o índice "q", qual seria o passo

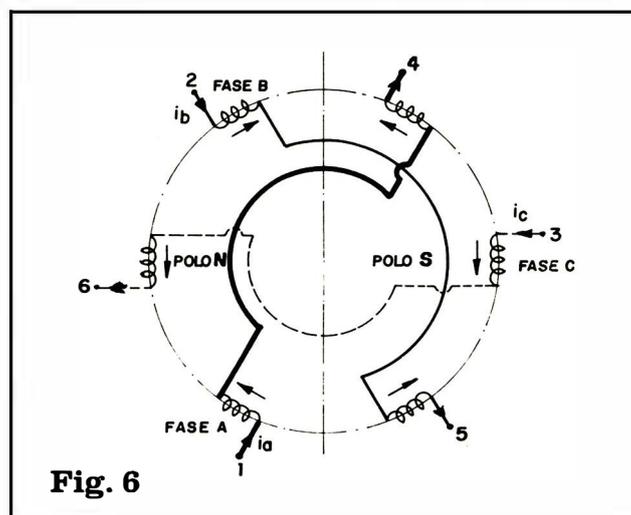


Fig. 6

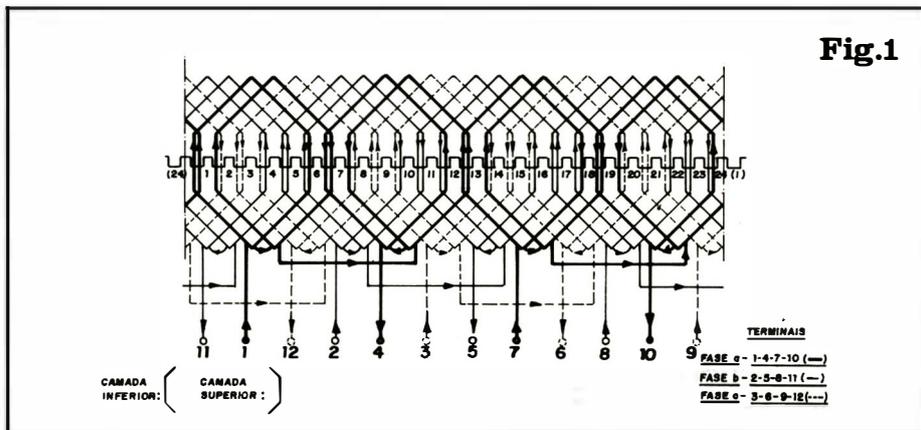
Enrolamentos com mais de dois pólos e estrela/triângulo

I. Introdução

Nos enrolamentos do capítulo 6, o bobinado dos dois pólos ocupava toda a circunferência do estator e cada pólo magnético correspondia a 180 graus (veja fig. 6 do cap. anterior). O passo "inteiro" das bobinas era meia circunferência e os grupos de

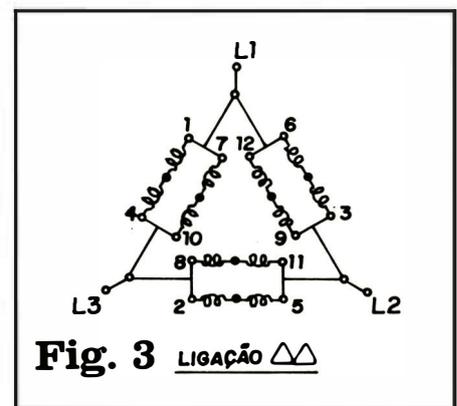
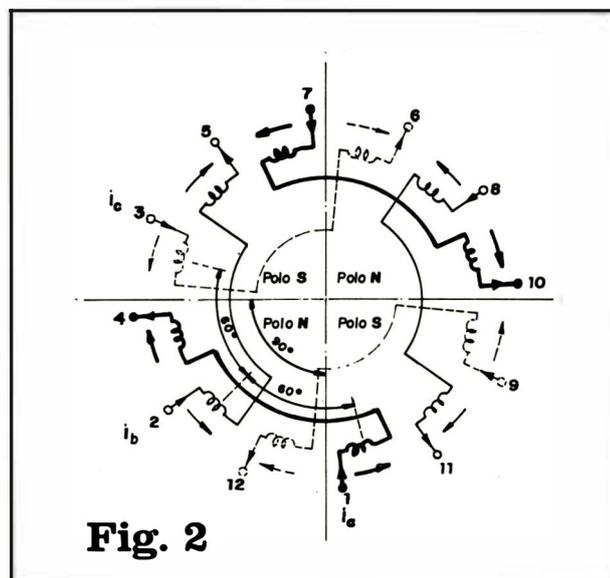
les executado em meia circunferência, produzem uma sequência de pólos magnéticos N, S, N, S (ver fig. 2).

Se o enrolamento de quatro pólos não passa da repetição de um enrolamento trifásico de dois pólos a cada 180 graus, o de seis pólos será a repetição (três vezes) de um de dois pólos a cada



bobinas de cada fase ficavam distantes (defasados) de um terço da circunferência (120 graus).

Para colocar quatro pólos na circunferência do estator é necessário que cada pólo ocupe somente um quarto do espaço (90 graus), portanto, um par de pólos ocupará 180 graus. Deste modo, o passo inteiro da bobina será 90 graus, e não 180, e os grupos de cada fase ficarão distantes de 60 graus, e não 120. Isso equivale a uma situação em que dois enrolamentos trifásicos, cada um com dois pólos, um em seguida do outro, e cada um de-



terça parte da circunferência, e, assim por diante, para oito, 10 e 12 pólos.

II. Enrolamento de 4 pólos

Dado um exemplo real, de quatro pólos, usado em pequenos motores, com 24 ranhuras, dupla camada e passo encurtado (veja esquema planificado na fig. 1), é

fácil notar que o passo inteiro seria de $24/4 = 6$ (1 até 7), porém, está executado com passo de 1 até 6. O número "q" será: $24/(4 \times 3) = 2$ ranhuras por pólo e por fase.

III. Ligação série/paralelo

Este enrolamento é como se fosse constituído de dois enrolamentos de dois pólos, portanto, podemos fazer uma inter-

ligação entre fases, triângulo ou estrela, em cada enrolamento parcial de dois pólos e, depois, ligá-los em paralelo ou em série.

Considere-se a hipótese de que o fabricante tenha projetado o motor para que a parte do enrolamento entre os terminais 1-4 da fase "a" (figs. 1 e 2) seja adequada para 220 V. O mesmo acontece com a parte entre os terminais 7-10, também da fase "a". Elas podem, portanto, ser postas em paralelo. Fazendo o mesmo com os terminais 2-5 e 8-11 (na fase "b") e 3-6 e 9-12 (na fase "c") e ligando-se em triângulo paralelo, resulta no esquema apresentado na fig. 3, quando o motor pode ser ligado em linha trifásica de 220 V. Se, porém, for realizada uma ligação série (nas fases "a", "b" e "c"), o resultado

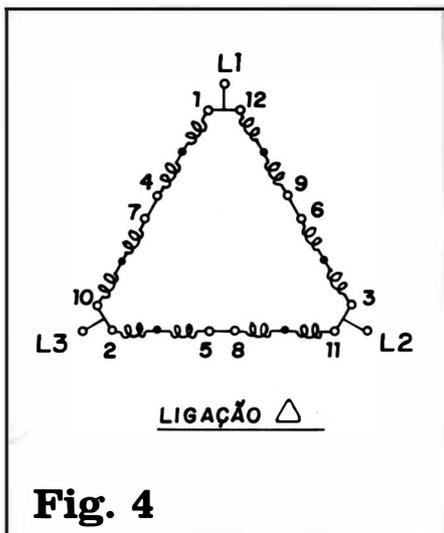
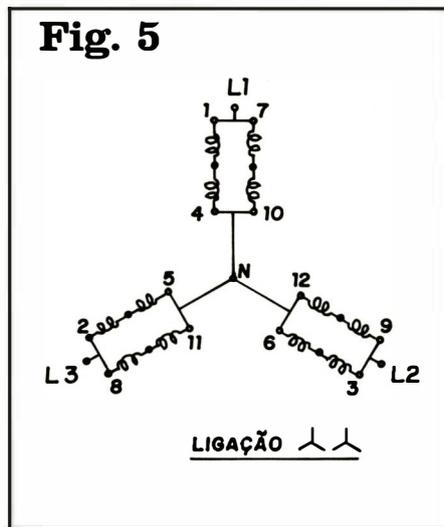


Fig. 4

será o triângulo série, bom para linha de 440 V (conforme indicada na fig. 4).

IV. Ligação estrela/triângulo

Nas ligações em Δ , a tensão de fase é igual a de linha e a corrente de fase é $\sqrt{3} = 1,732$ vezes menor que a de linha. Na ligação λ , a corrente de linha é igual a de fase, e a tensão de fase é 1,732 vezes menor que a de linha. Portanto, ao se passar uma ligação triângulo paralelo para estrela paralela, o enrolamento se torna adequado para $1,732 \times 220 = 380$ V (fig. 5). Em



estrela série, o enrolamento torna-se bom para $1,732 \times 440 = 760$ V (fig. 6). Assim sendo, esse motor está apto para funcionar em quatro tensões. Estes motores possuem 12 terminais na caixa de ligação e são chamados motores com 12 pontas acessíveis.

O mais interessante destas possibilidades de interligação das fases em Δ/λ é poder partir o motor no processo estrela/triângulo (veja cap. II). Em motores de gaiola, a corrente de partida é elevada (de 5 a 8 vezes a nominal). Imagine um motor de 220 V em ligação triângulo. Se o ligarmos inicialmente em estrela como se fosse de 380 V, mas aplicarmos apenas 220 V, a corrente de partida será $\sqrt{3} \times \sqrt{3} = 3$ vezes menor, porém, o torque de partida fica muito prejudicado (1/3 do normal).

Durante a aceleração, a corrente vai diminuindo e é possível mudar a ligação de estrela para triângulo e ele funcionará, em regime, em 220 V. É válido ressaltar que em pequenos motores (até 5 ou 6 kW), este excesso de corrente na partida não é tão grave para a rede e a partida estrela/triângulo fica mais restrita a motores maiores.

Note que nos motores feitos para partida λ/Δ não são necessárias as 12 pontas acessíveis, mas apenas seis, visto que os paralelos de cada fase já são feitos internamente.

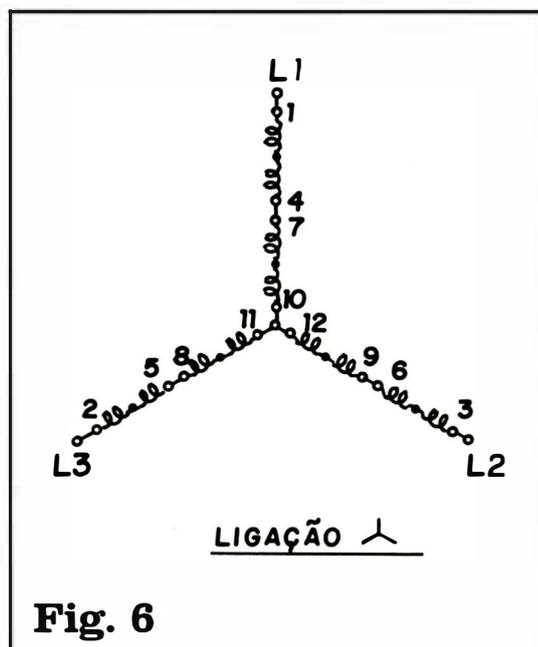


Fig. 6

V. Questões sobre enrolamento

Para finalizar, lembramos que é comum ouvirmos que só se começa a entender melhor os enrolamentos, fazendo, desenhando ou então seguindo com um lápis, atentamente, bobina por bobina, terminal por terminal. Portanto, procure resolver as seguintes questões:

1. Siga o enrolamento da fig. 1 e conclua qual seria a diferença caso ele ainda apresentasse quatro pólos, mas com 36 ranhuras e com passo de bobina 1 a 9.

2. Procure desenhar um enrolamento trifásico de seis pólos, com 36 ranhuras e passo 1 a 6. Compare seu desenho com o da fig. 1 e analise as principais diferenças.

3. Para esse enrolamento de seis pólos, suponha que o número de espiras por bobina seja 18, calcule o índice "q", o número de bobinas, o número de bobinas por fase, o número de bobinas por grupo e o número de espiras por fase.

NOTA: Essas noções sobre enrolamentos valem também para estatores e rotores dos motores de anéis (veja cap. XIII) de pequeno e médio portes, que são normalmente executados em fios redondos.

Isolação de motores e sua classificação térmica

1. Introdução

Só abordaremos aqui os motores de baixa tensão, até 600 V, de um ponto de vista que atende às necessidades dos interessados em serviços de reenrolamento, e não em fabricação.

As partes estruturais de um motor, como carcaça, núcleos magnéticos (pacote), tampas, caixas de ligação, eixo e barramento de gaiola, desde que bem cuidadas e adequadamente usadas, têm vida muito longa. Costuma-se dizer que, se não houvesse acidentes, elas seriam praticamente eternas, coisa que não ocorre com escovas e mancais (sejam de rolamento ou de escorregamento), que são denominados componentes de desgaste e, portanto, renováveis periodicamente.

Assim, o grande limitador de vida do motor elétrico é o enrolamento, ou melhor, a isolação do enrolamento, tanto dos condutores (fios) entre si, como daqueles para a massa. Os fatores limitativos da vida do isolante são de natureza química, mecânica, elétrica e térmica.

- **Os agentes químicos:** podem ser de natureza gasosa, líquida ou sólida. Atacam o material isolante, destruindo-o em pouco tempo ou diminuindo lentamente suas características (seu poder dielétrico). O isolante acaba sendo perfurado, devido ao po-

tencial elétrico a ele aplicado. A água é um agente pernicioso, não por si só, mas porque dissolve sais e outras substâncias que vão agir de maneira maléfica sobre o isolante.

- **Os agentes mecânicos:** dentre os que afetam a isolação, destacam-se os choques e as vibrações provocadas pelo próprio motor (desbalanceamento) ou transmitidas ao mesmo pelas estruturas externas. Outro agente mecânico é a erosão causada por pós abrasivos lançados pelo ventilador.

As ações química e térmica sobre os isolantes são temas excessivamente longos e complexos para serem tratados nesta publicação. Portanto, o que estamos apresentando é apenas um resumo do que interessa, de um ponto de vista prático, ao técnico de manutenção.

- **Agente térmico:** pode-se construir um motor quase perfeito no que diz respeito à proteção contra pó, água e agentes mecânicos e químicos, e utilizá-lo sem sobrecargas em um local extremamente limpo. Porém, é impossível protegê-lo contra o agente térmico (temperatura de funcionamento). Contra este mal não há remédio: nenhuma isolação é eterna.

Todo motor apresenta perdas de potência (Watts) internamente (veja cap. V). Essas perdas se

transformam em calor que aquece o enrolamento, produzindo uma elevação de temperatura em relação ao ambiente, pois sem isso, o calor não se escoaria para fora do motor.

A elevação de temperatura possui efeito pernicioso sobre os isolantes: é o fenômeno denominado **envelhecimento térmico do dielétrico**, onde o material de isolação perde lentamente seu poder dielétrico. O isolante acaba sendo rompido (perfurado), deixando passar corrente em algum ponto (curto-circuito entre condutores ou para a massa), de tal modo que, se não houver uma proteção de ação rápida, as consequências podem ser desastrosas, com estouros, fusão de condutores e até fusão parcial do pacote de chapas magnéticas.

É claro que, se a temperatura de funcionamento for muito elevada, em função de grandes sobrecargas ou devido ao projeto ou construção inadequados, o enrolamento pode se queimar rapidamente, muito antes do que ocorreria pelo fenômeno de envelhecimento térmico, que é, por natureza, um fenômeno lento. Estes casos são denominados queima acelerada e não envelhecimento térmico.

Enfim, pelo fato de a temperatura ser um fator limitador inexorável, os motores (tanto os abertos como os blindados) são projetados com sistema de dissipação (ventilação), adequado

para que a elevação de temperatura esteja de acordo com o isolante utilizado.

Para se ter uma idéia da grande importância da temperatura na vida de um enrolamento, é bom lembrar que apenas 10°C a mais de temperatura de funcionamento podem reduzi-la à metade. Por exemplo: se o isolante utilizado é bom para suportar uma temperatura contínua de 120°C, durante uma vida prevista de quatro anos, não se deve esperar mais que dois anos de funcionamento se ele for submetido a 130°C.

● **Agentes elétricos:** são as sobretensões (tensões muito acima da nominal), que podem ocorrer tanto de forma contínua (mais raro) como em forma de pulsos provocados por oscilações na linha ou até por origem de descargas atmosféricas (raios). O potencial elétrico aplicado ao isolante poderá ser de tal valor que ultrapasse o limite do poder dielétrico do material, perfurando-o e provocando o curto-circuito.

II. Classes de isolamento

Como a suscetibilidade diante da temperatura (estabilidade térmica) varia de acordo com a natureza do isolante, as normas dividem as isolações em classes, de acordo com a temperatura máxima atingida pelo motor.

Normalmente, as medidas nos laboratórios de máquinas elétricas e a indicação dos fabricantes nas placas de identificação referem-se à **elevação de temperatura** do enrolamento (ΔT) em relação ao ambiente, e não à temperatura absoluta. Por esse motivo, as normas apresentam classificações de elevação de temperatura em relação a um ambiente que deve ser no máximo de 40°C, com motor instalado em uma altitude máxima de 1.000 metros (Tabela 1).

A NBR 7094 classifica os limites de elevação de temperatura em classes principais, designadas por

meio de letras A, E, B, F e H, fornecendo os valores de elevação de temperatura e os materiais recomendáveis.

Os valores de ΔT dependem do tamanho do motor, do método de medição dessa temperatura e da parte em que a temperatura está sendo medida. Portanto, o que está apresentado na Tabela 1 é um resumo, com valores folgados (seguros), que atende à maioria dos casos práticos. É válido apenas para enrolamentos de motores de indução de pequeno e médio portes sob tensão e frequências nominais, em regime contínuo e com medição da elevação de temperatura pelo método da variação da resistência ôhmica do enrolamento.

Se a medição for realizada por termômetro aplicado ao enrolamento, os valores devem ser 10°C menores na classe B e entre 15 e 20°C nas classes F e H. Modernamente, já se usa a classe C, baseada em resinas sintéticas, com limites de temperatura maiores que a classe H, porém, ela ainda não é encontrada em motores de inclusão normais e não será aqui comentada.

A classe A está em desuso, mas ainda é encontrada em motores antigos. A classe E é praticamente inexistente em motores e não apresenta interesse. Apesar da classe B ainda ser muito usada,

materiais recomendáveis para atender às necessidades imediatas:

Para classe A: Tanto para isolamento dos condutores (fios) como contra massa (nas ranhuras), utilizam-se materiais de origem natural, orgânica, como fibras de algodão, seda, celulose e seus tecidos, papel, madeira tratada, películas de acetato de celulose e outros. Os vernizes de impregnação, tanto os de secagem ao ar como os de secagem em estufa de baixa temperatura (80 a 100°C), podem ser à base de resinas naturais como goma-laca, ou sintéticas, geralmente à base de resinas fenólicas e asfálticas. Normalmente não se usa impregnação à vácuo-pressão em autoclave.

Para classe B: Utilizam-se sempre materiais sintéticos, como fibras de vidro e seus tecidos, fitas e folhas laminadas de resinas sintéticas como poliéster (por exemplo, o Mylar), mica aglomerada com resinas sintéticas à base de poliéster, fenólicas ou epóxi. Os materiais de classe A podem ser usados apenas com finalidade estrutural. Os fios são isolados com fibra de vidro, ou esmaltados com as resinas já citadas. A impregnação é à base de vernizes fenólicos, poliéster e epóxi e a polimerização (cura) em estufa.

Para classe F: Podem ser utili-

Tabela 1

Classe Térmica:	A	E	B	F	H
Limites ΔT (° C):	60	75	80	100	125

os motores modernos devem estar normalmente na classe F.

III. Materiais Utilizados

Existe uma grande variedade de materiais que atendem às classes de isolamento. Para aqueles que se interessam pelo assunto, recomenda-se a literatura técnica a respeito e a consulta aos fabricantes desses materiais.

A seguir damos um resumo dos

zados quase todos os materiais da classe B, tanto para os fios como contra massa. Porém, as resinas, esmaltes e vernizes de classe F mais utilizados são os de poliésteres modificados e imídicos. A impregnação deve ser obrigatoriamente em autoclave a vácuo-pressão e a polimerização em estufa de alta temperatura (de 130 a 140°C).

Para classe H: Utilizam-se materiais inorgânicos ou sintéti-

cos, tais como fibra de vidro, mica, fitas ou folhas (por exemplo, os papéis de fibras poliamídicas ou Nomex), obrigatoriamente à base de resinas classe H.

nosso alcance e geram a satisfação dos clientes externo e interno (veja no cap. I). Produzir sem qualidade é próprio daqueles que gostam de “dar um jeito” ou ra-

Após executado, o enrolamento deve ser submetido a uma medição da resistência de isolamento entre fases e para a massa (veja no cap. I). É bom lembrar que, após um reenrolamento (rebobinagem), o enrolamento é considerado novo e, conseqüentemente, as exigências em Megaohm são as mesmas de um motor novo, mais severas do que as dos casos descritos no capítulo I. Como a resistência da isolamento depende da temperatura, sua medida deve ser acompanhada da medida da temperatura do enrolamento e os valores em $M\Omega$ devem ser, no mínimo, os apresentados na Tabela 3.

O ensaio de tensão aplicada, denominado tensão suportável, deve ser, em nossa opinião, obrigatório em rebobinamentos. Não é seguro receber de um fornecedor um reenrolamento (que é um novo enrolamento) sem esse ensaio.

Ele consta na aplicação de uma tensão alternada de 60 Hz, com valor $2U + 1000$, durante um minuto entre fases e contra a massa. Por exemplo, em um enrolamento de $U = 380$ V, a tensão aplicada deve ser de 1760 V. Mais uma vez, é bom lembrar que ensaios sobre a isolamento dos enrolamentos tem um valor estatístico (com base em probabilidades), portanto, pode-se fazer a seguinte pergunta: É preferível receber um rebobinamento, que pode até apresentar defeito no período de garantia, mas com grande probabilidade de não apresentá-lo, ou receber um motor que também pode apre-

Tabela 2

MATERIAL	Rigidez Dielétrica (kV/mm)
Filme de mica composto com Mylar	35
Mica aglomerada com resina epóxi	15
Fita de vidro impregnada com epóxi	30
Fita de vidro impregnada com poliéster	10
Nomex puro (papel Nomex)	35
Nomex composto com filme de Mylar	55
Papel isolante (celulose)	8

A esmaltação dos fios e os vernizes de impregnação são à base de silicone e, mais moderadamente, à base de poliésteres imídicos. A impregnação deve ser a vácuo-pressão, e a polimerização em estufa (150°C), ou conforme recomendação do fabricante.

É permitido compor uma isolamento com materiais de diversas classes. Prevalecerá, porém, a classe do material mais baixo. É importante também que os isolantes apresentem boas propriedades mecânicas, como resistência à tração, à compressão e ao corte.

IV. Ensaios de isolamento

Se a isolamento é o principal limitador da vida do motor, é nela que devemos concentrar maior atenção: máxima limpeza no ambiente do enrolamento (sujeira e umidade são altamente nocivas ao poder dielétrico), ordem, registros escritos, esquemas e, sobretudo, ensaios.

Como os ensaios ou testes de isolamento são também assuntos muito extensos e bem explorados nas normas ABNT, vamos fazer apenas alguns comentários, úteis e suficientes para resolver os problemas do dia-a-dia e oferecer segurança ao serviço.

É bom lembrar sempre que a qualidade e segurança não são coisas distantes e nem custam caro. Ao contrário, elas resultam em redução de custo, estão ao

ciocinam na base do “vai assim, quem sabe passa” (mais cedo ou mais tarde, acaba não passando).

Deixe isso para aqueles que gostam de viver perigosamente. Não se pode admitir execução de serviços sem qualidade às portas do ano 2000, com tanta tecnologia à nossa disposição.

Isolação é coisa muito séria e sua qualidade começa na recepção do almoxarifado. Não transija e nem contemporize com o fornecimento de materiais isolantes. Adquira-os, juntamente com os vernizes e fios esmaltados, de quem possa oferecer certificado de origem (garantia de qualidade). Um isolante com falhas, um fio mal isolado ou em desacordo com a classe térmica, pode significar a perda de todo o seu trabalho e reputação.

Se houver alguma dúvida sobre o material, exija (ou faça você mesmo) ensaios de rigidez

dielétrica (kV/mm), e compare com os números reconhecidos para o material em questão. Os valores de kV/mm variam muito com a origem e o fabricante do isolante. A Tabela 2 dá uma idéia aproximada dos valores mínimos exigidos.

Tabela 3

Faixa de Temp.:	10 - 20°	30 - 40°	50 - 60°	70 - 80°C
Valor em $M\Omega$:	40	10	4	1

sentar defeito no período de garantia mas que, além disso, não se pode contar com o fator probabilidade? A boa técnica recomenda a opção pela primeira hipótese. Portanto, é bom fazer ou exigir que sejam feitos esses ensaios.

Fios e cabos para enrolamentos de motores

Os fios para enrolamentos são condutores sólidos de alta condutibilidade (cobre eletrolítico e mais raramente alumínio), para redução das perdas Joule (veja cap. V). Os condutores de secção retangular são utilizados em motores especiais, em máquinas de grande porte e em alta tensão. Os de secção circular, denominados fios redondos, são utilizados na maioria dos motores de indução e, por este motivo, somente eles serão aqui comentados, de um ponto de vista dirigido a quem faz manutenção, e não a profissionais que trabalham com projeto.

Podem apresentar revestimento isolante de fibras ou fitas sintéticas, sendo que as fibras naturais, como algodão e seda, são encontradas somente em motores muito antigos (isolantes de classe A). Normalmente, usam-se fios esmaltados, isolados com resinas, tais como polímeros termofixos à base de poliuretano, poliéster imídico, poliéster modificado, poliéster imídico com cobertura de poliamida-imida, polivinilformal e outros.

Os fios esmaltados estão sujeitos às mesmas restrições térmicas, mecânicas e químicas dos isolantes vistos no capítulo VIII. Os esmaltados com poliamida aromática, por exemplo, apresentam excelente resistência à água e são usados em moto-bombas submersas. Dentre os esmaltados com resinas poliuretanas, os mais usados são os de classe térmica 130 e 155°C e, quando recobertos

com poliamida (nylon), apresentam maior resistência à abrasão. Os poliéster-imídicos são da classe 180°C e, quando recobertos com poliamida-imida, podem ultrapassar os 200°C, além de apresentarem excelente resistência aos gases refrigerantes.

Na tabela apresentada, constam apenas as bitolas mais utilizadas, na escala AWG. Os valores de diâmetro isolado (D isol) são para fios com isolação grau 2, como por exemplo os tipos Termodur (à base de resina poliéster modificado) e Pireterm (à base de poliéster-imida), que são marcas comerciais da Pirelli Cabos e que podem atender, respectivamente, às classes F e H de isolação de motores (veja cap. VIII).

Quanto aos cabos de ligação para enrolamentos, devem apre-

sentar boa flexibilidade. Dentre os isolados com PVC, recomenda-se o de classe 105°C, que pode ser usado em motores de serviço leve, em meios não agressivos. Os isolados à base de EPR e XLPE são, respectivamente, para trabalho até 130°C e 155°C e apresentam boa resistência mecânica e química (solvente e óleos). Os isolados com silicone são para 155°C e, quando revestidos com fibra de vidro, podem chegar a 200°C com excelente comportamento térmico e químico.

A isolação é o ponto crítico do motor elétrico, portanto, cuidado com os isolantes: eles podem comprometer seu trabalho. Ensaios de qualidade na recepção de cabos e fios esmaltados são mais complexos do que os que citamos para os isolantes do capítulo VIII, consequentemente, é difícil exercer controle. É necessário, portanto, apoiar-se na confiabilidade do fabricante.

NOTA: A escala AWG é utilizada pela maioria dos enroladores de motores. Porém, se você necessitar substituir um fio da escala milimétrica, não é difícil encontrar a equivalência com um fio AWG (ou uma associação deles), utilizando-se a mesma tabela apresentada.

AWG Nº	D nu (mm)	D isol (mm)	Secção (mm ²)	kg/km (c/isol)	Ω/km (a 20°C)
26	0,404	0,462	0,13	1,19	133,9
25	0,455	0,516	0,16	1,50	106,2
24	0,511	0,577	0,20	1,90	84,21
23	0,574	0,643	0,25	2,39	66,79
22	0,643	0,714	0,32	3,00	52,96
21	0,724	0,798	0,40	3,79	42,00
20	0,813	0,892	0,51	4,77	33,31
19	0,912	0,993	0,65	6,00	26,42
18	1,024	1,110	0,82	7,55	20,95
17	1,151	1,240	1,04	9,52	16,61
16	1,290	1,384	1,30	12,0	13,17
15	1,450	1,547	1,65	15,1	10,45
14	1,628	1,732	2,08	19,0	8,28
13	1,829	1,923	2,63	23,9	6,57
12	2,052	2,151	3,30	30,1	5,21

Conservação de energia, essencial em motores elétricos

Existem hoje no Brasil alguns programas de conservação de energia dirigidos especificamente ao setor elétrico (por exemplo: o Procel, da Eletrobrás, e o Maxi watt, da Cesp). O consumo industrial de energia elétrica é da ordem de 55% do total. Segundo a Cesp, no Estado de São Paulo, 70% do consumo industrial é proporcionado pelos motores elétricos.

Como a imensa maioria dos motores elétricos é constituída de motores de indução, conclui-se que, apesar de eles serem os grandes trabalhadores da indústria, são também os grandes consumidores. Portanto, merecem toda nossa atenção nesse particular.

As recomendações para economia de energia em motores são quase evidentes. Porém, como o óbvio tem a propriedade de ser negligenciado, é interessante revê-las nos capítulos III e V, que tratam do funcionamento muito fora do ponto nominal, funcionamento em vazio e dimensionamento correto da cablagem de alimentação.

Fala-se muito em motores de alto rendimento. Como reconhecê-los? À primeira vista, não há outra maneira senão pelos dados de placa. A comprovação só é possível submetendo-os a ensaios no campo de provas. Porém, como isso nem sempre é acessível ao comprador, ele terá que depositar sua confiança no fabricante.

Os valores de rendimento da tabela abaixo são para motores comuns, de quatro pólos, 60 Hz, e servem apenas para dar uma idéia comparativa:

Potência nominal (CV)	5	10	20	50	100	200
Rendimento usual (%)	82	86	88	90	92	93
Rendimento aumentado (%)	86	89	91	93	94	95

Do ponto de vista da coletividade, é claro que deve haver um engajamento geral no sentido de minimizar desperdícios e economizar energia. Não é difícil demonstrar que, se todos economizarem, de imediato, 5% de energia (quantidade bem viável), isso equivaleria a uma usina do porte de Ilha Solteira (3.200.000 kW).

Porém, do ponto de vista econômico-financeiro do usuário, haveria compensação em se empregar motores de rendimento aumentado? Depende de vários fatores. Vamos tomar, por exemplo, o motor de 50 CV (37 kW), da tabela, em uma aplicação de serviço contínuo de 30 dias por mês e 24 horas por dia. A provável diferença de preços entre os dois, no mercado atual, deve ser da ordem de US\$ 350,00.

É fácil calcular as potências absorvidas (veja cap. V):

$$\frac{37}{0,9} = 41,1 \text{ kW}$$

$$\frac{37}{0,93} = 39,8 \text{ kW}$$

A diferença de consumo é, portanto, 1,3 kW, que resulta, em um mês, em $30 \times 24 \times 1,3 = 936$ kWh. As tarifas (preço do kWh) variam com o tipo de consumidor,

mas vamos admitir um custo médio de 0,055 US\$/kWh. Resultará então em: $936 \times 0,055 = 51,48$ US\$/mês.

Facilmente se conclui que a compensação se daria em menos de sete meses, visto que:

$$\frac{\text{US\$ } 350,00}{\text{US\$ } 51,48} = 6,8 \text{ meses}$$

Se o funcionamento fosse de 12 horas por dia, a compensação seria concretizada em 13,6 meses (pouco mais de um ano).

Se a vida prevista desse motor for, por exemplo de quatro anos, o resultado se apresenta muito vantajoso. Porém, o cálculo acima é simplista, não levando em conta os custos do acréscimo do investimento (juros do capital) e os custos de manutenção e depreciação. Serve, porém, para alertar que esse estudo é importante na compra de um equipamento.

Acoplamento motor-carga

I. Introdução

A conexão mecânica entre motor e carga (acoplamento) pode ser feita direta ou indiretamente.

Um acoplamento mecânico direto é aquele que não apresenta nenhum elemento entre o motor e a máquina acionada. Por exemplo, um ventilador diretamente montado sobre a ponta do eixo do motor ou um rotor de bomba centrífuga montado sobre a ponta do eixo.

Os acoplamentos indiretos são mais freqüentes. Os elementos de acoplamento podem ser rígidos (mais raros) ou flexíveis, sendo que estes últimos podem ser divididos, de uma maneira bem simplificada, em dois tipos: de luvas elásticas ou de polias/correias.

II. Polias/correias

É um acoplamento de baixo custo e fácil instalação, e tem a vantagem em relação às luvas de poder reduzir ou multiplicar a velocidade. Como desvantagem, porém, podemos citar a menor durabilidade e o esforço radial. Elas geram um esforço perpendicular ao eixo (força F na fig. 1), principalmente quando são usadas

correias planas, visto que elas exigem grande aperto para transmitir o torque do motor. Essa força perpendicular, além de prejudicar os rolamentos, provoca uma flexão na ponta do eixo, podendo até rompê-lo, se o esforço superar sua resistência mecânica (ver cap. XII).

Normalmente, as correias mais usadas são trapezoidais (correias V), que, além de provocar menor deslizamento, exigem menor força de aperto e são encontradas facilmente no mercado. Atualmente, é possível usar também correias V dentadas, que evitam deslizamentos.

Aspectos importantes: 1) o aperto das correias exige muito cuidado, não podendo ser excessivo. O valor exato e os procedimentos para isso dependem do tipo e do número de correias utilizadas. Portanto, é importante consultar os catálogos técnicos onde constam as recomendações dos fabricantes quanto a cálculos específicos de número de correias,

força de aperto, conceito de diâmetro primitivo da polia etc; 2) Procure evitar relações maiores que 1:3 entre os diâmetros das polias, para que o ângulo de abraçamento não fique muito pequeno na polia menor, o que pode provocar deslizamento e redução da vida das correias; 3) faça o acoplamento de modo que, em funcionamento, a parte de baixo da correia seja tracionada e a superior afrouxada, pois o contrário também provoca diminuição do ângulo de abraçamento (fig. 1).

III. Luvas elásticas ou flexíveis

São formadas por duas flanges de aço chavetadas, uma ao eixo do motor e outra ao eixo da carga (fig. 2) com um elemento intermediário que pode ser de borracha, couro ou plástico (resinas especiais). Algumas luvas apresentam molas de aço flexível interligando as flanges.

Devido à grande variedade de

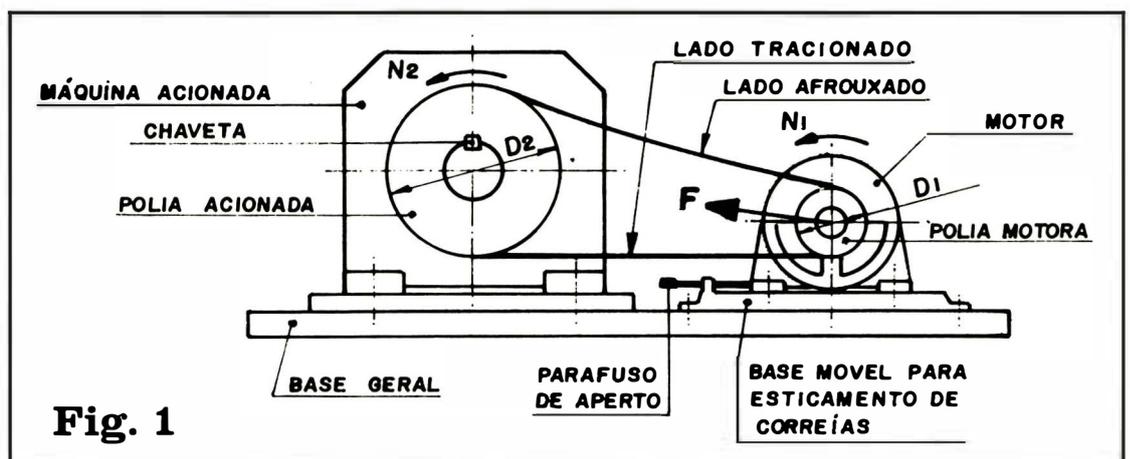
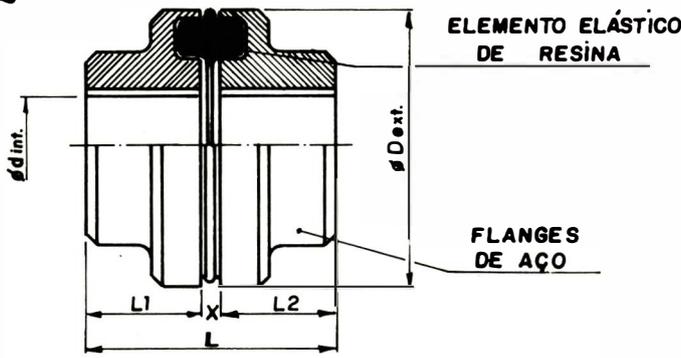


Fig. 1

Fig. 2



luvas existentes, é aconselhável consultar os catálogos técnicos dos fabricantes, onde constam velocidades recomendáveis, desalinhamentos, torque e potência transmitidos. Na fig. 4, damos uma idéia dos desalinhamentos

típica, como a da fig. 2.

Do nivelamento e do alinhamento depende a vida do rolamento do motor e da carga, e do próprio acoplamento. Com uma régua metálica e um esquadro, você pode nivelar e alinhar, de

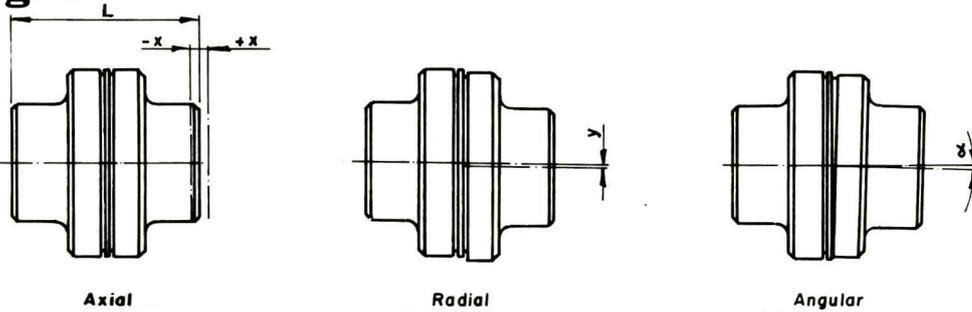
Se for preciso, coloque pequenos calços (lâminas) sob os pés de apoio do motor e da carga para corrigir desalinhamentos radiais e angulares. Se o motor vibrar depois do acoplamento, pode ser um sinal de desalinhamento na luva. Se isso ocorrer, afrouxe ligeiramente os parafusos da base do motor, faça-o funcionar e tente acertá-lo com ligeiros deslocamentos, por meio de pequenas batidas. Este é um procedimento empírico, adotado no local da instalação, em pequenos motores.

IV. Bases

Nos pequenos motores, as mais comuns são placas de aço (às vezes, chapa estampada) onde se fixam os parafusos dos pés do motor e da carga.

Quando o acoplamento é do tipo polia/correia, a base geral deve permitir um deslocamento do motor para possibilitar o esticamento das correias (fig. 1). Nos motores médios e grandes, as bases são estruturas de aço perfilado, tipo U ou I, presas por parafusos chumbadores a um bloco de concreto (para absorver e não transmitir vibrações) com volume e dimensões apropriados ao tipo e peso do equipamento.

Fig. 4



Desalinhamento	Tamanho (mm)														
	50	67	82	97	112	128	148	168	194	214	240	265	295	330	370
Axial, $\pm x$ (mm)	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	2,5
Radial, y (mm)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
Angular, α (°)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0

máximos permitidos, para se ter um bom desempenho e uma boa durabilidade de uma luva elástica

modo aproximado, as duas pontas de eixo ou as superfícies das flanges do acoplamento (fig. 3).

e não transmitir vibrações) com volume e dimensões apropriados ao tipo e peso do equipamento.

Suponhamos um caso em que se deseja acoplar por correias um motor de rotação $N_1 = 1760$ rpm a um torno mecânico cuja entrada da caixa de engrenagens exige 700 rpm.

O diâmetro da polia acionada é de $D_2 = 410$ mm. Qual o diâmetro da polia a ser usada no motor? (veja fig. 1)

A relação entre D_2 e D_1 deve ser:

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1760}{700} = 2,5143$$

Daí resulta:

$$D_1 = \frac{D_2}{2,5143} = \frac{410}{2,5143} = 163 \text{ mm}$$

LUVA ELÁSTICA

Verificação de Alinhamento

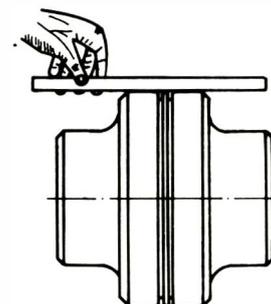


Fig. 3

Normalização de dimensões - aspectos construtivos mecânico e magnético

I. Normalização das Dimensões

Os tamanhos dos motores de indução normais ou de aplicações gerais abrangem a faixa que vai normalmente do 56 até o 315, da sequência de carcaças normalizadas da ABNT e IEC.

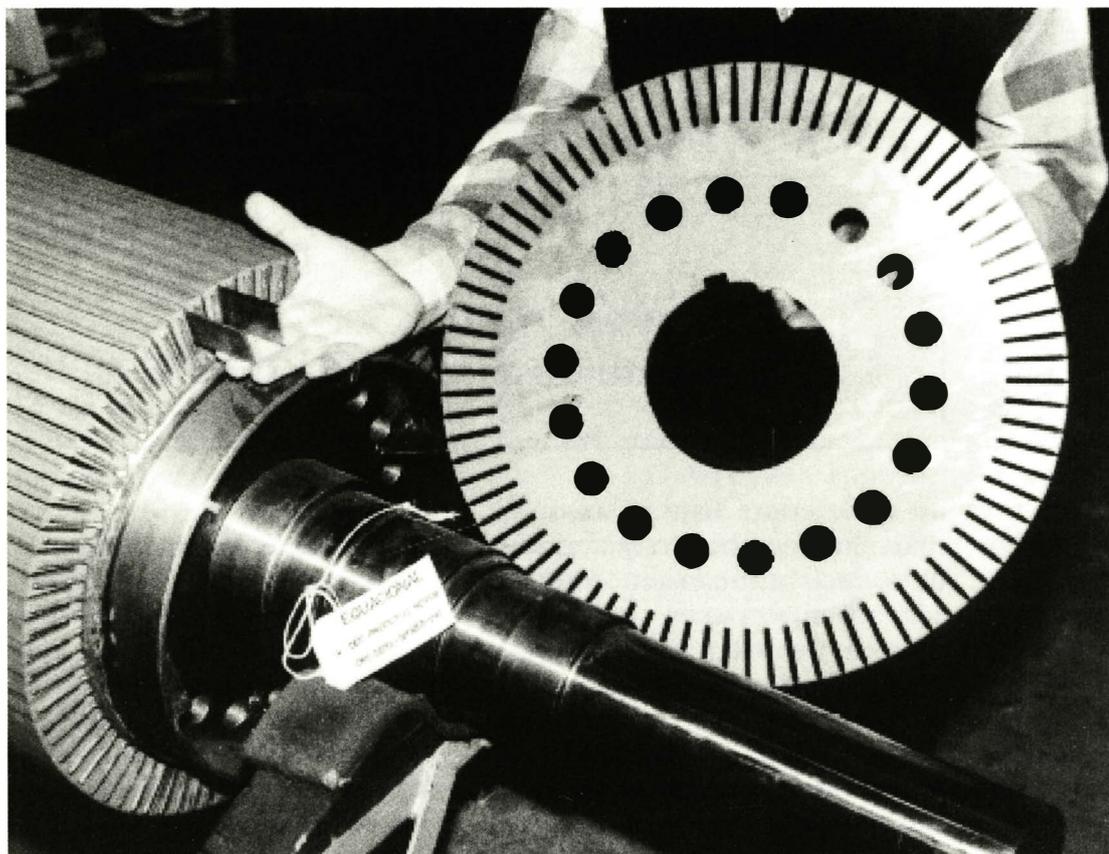
Os motores normais são reconhecidos pela altura da base até o centro da ponta de eixo em mm, o que se costuma chamar na

prática de “tamanho de carcaça”. Por exemplo, uma carcaça tamanho 225 tem essa altura igual a 225 mm, uma carcaça 450 tem essa altura igual a 450 mm, e assim por diante. A norma NBR 5432 padroniza essas alturas e, para cada uma delas, fixa (“amarra”) outras medidas. A Tabela 1 é um resumo das medidas mais importantes dos motores blindados com ventilação externa, até o tamanho 315,

e que satisfazem as necessidades do dia-a-dia de quem utiliza esses motores. Essas medidas são a furação da base do motor e a distância dos furos até a extremidade do eixo, entre outras. Quanto ao diâmetro da ponta de eixo, pode haver alguma variação de um fabricante para outro dentro do mesmo tamanho de carcaça. Os valores de diâmetros apresentados na Tabela 1 valem para os motores de indução de gaiola, série ou tipo A2, fabricados pela Equacional. As normas estipulam três comprimentos de carcaça: S, M, L (curta, média e longa). Com a intenção de não sobrecarregar a tabela, com exceção dos tipos 90 e 100, todos os outros modelos são de comprimento M (veja no cap. V uma tabela de correspondência entre carcaças e potências, para 4 pólos).

II. Núcleo Magnético

Os núcleos do estator e do rotor são formados de discos de chapa lamina-



Pacote de rotor em fase de montagem

da (com espessura normal de 0,5 mm) isolados e fortemente prensados formando um “pacote” cilíndrico (foto). As ranhuras são estampadas nos discos antes da prensagem. No estator elas têm a forma de pêra com um rasgo na extremidade, por onde são introduzidos os fios.

Por que o pacote é laminado? E por que deve ser de aço silício especial? A intenção é diminuir o aquecimento do motor e melhorar o rendimento (veja cap. V).

As chamadas perdas magnéticas se subdividem em duas: perda Foucault ou de correntes parasitas e perda histerética. As variações do fluxo com a mesma frequência da rede induzem correntes na massa do núcleo. Se ele fosse maciço ou feito com material de baixa resistividade elétrica, as correntes parasitas seriam muito grandes, produzindo elevadas perdas Joule (RI^2) nessa massa. Como essas perdas são proporcionais ao quadrado da espessura das chapas utilizadas, elas serão fortemente reduzidas se usarmos chapas de pequenas espessuras (0,5 mm ou menos).

O aço silício possui resistividade muito maior que o aço carbono, o que reduz as correntes parasitas. Além disso, ele apresenta, em relação ao aço carbono, comuns, menores perdas histeréticas, que são as perdas relacionadas com o ciclo de histerese devido à magnetização cíclica provocada por excitação em corrente alternada. Um núcleo construído em aço silício custa mais caro do que o construído em aço carbono comum, porém, a vantagem do aumento do rendimento (conservação de energia) acaba por reduzir o custo de operação e compensar o investimento. Os motores de alto rendimento (cap. X) devem, portanto, possuir núcleo de lâminas de aço silício.

III. Barramento da gaiola

Nos motores normais, as barras

e os anéis de curto-circuito devem ser de material de baixa resistividade, normalmente alumínio fundido ($\phi = 0,0269 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$) ou cobre ($\phi = 0,0172 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$), não somente para reduzir as perdas Joule (RI^2) mas também para reduzir o escorregamento, já que este depende da resistência ôhmica rotórica.

O alumínio é injetado em estado fundido nas ranhuras do pacote do rotor, formando, de uma só vez, as barras da gaiola e os

alumínio fundido) e na solda barra/anel de curto nas gaiolas de cobre, pois esses pontos são prováveis fontes de defeitos dos motores, principalmente aqueles submetidos às sobrecargas e vibrações.

IV. Carcaças

Tanto a carcaça, como tampas e tampinhas (fig. 1) dos motores construídos em grandes séries

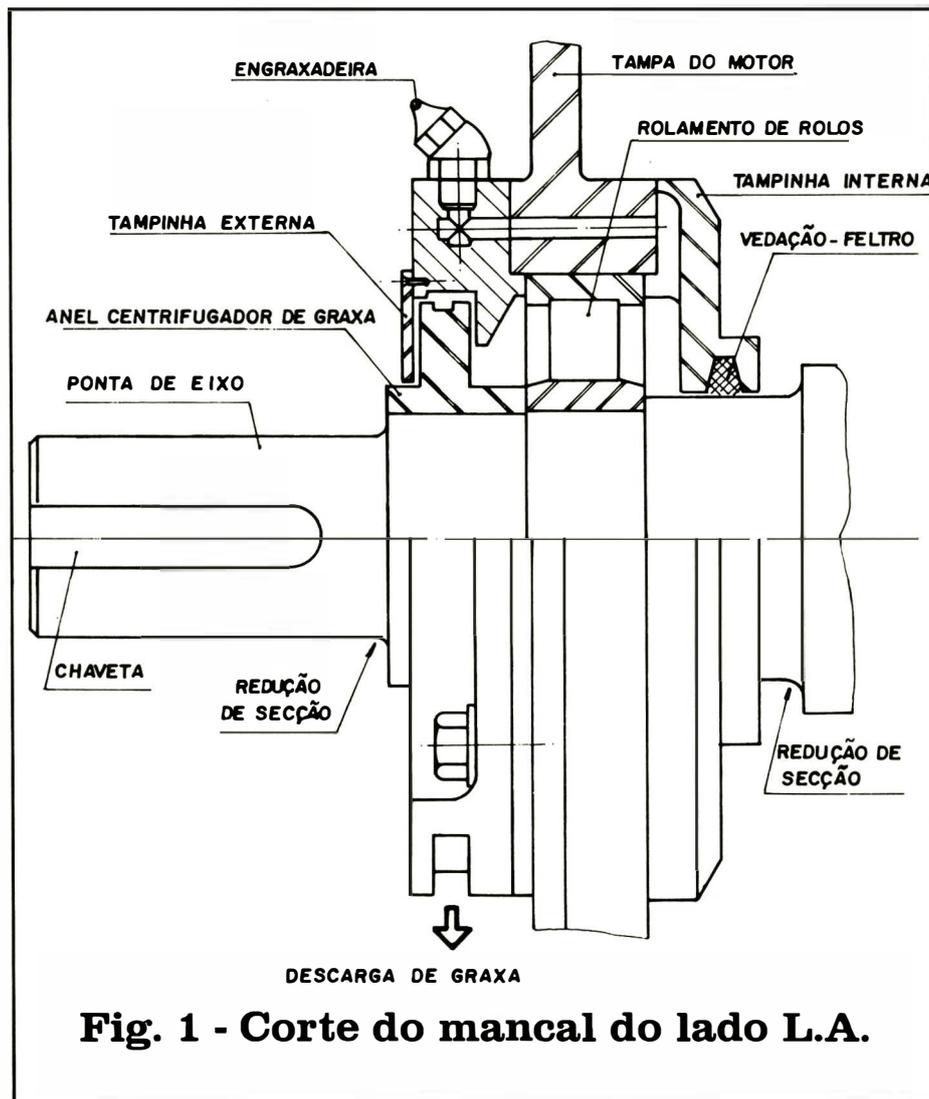


Fig. 1 - Corte do mancal do lado L.A.

anéis de curto. Este processo é mais simples e barato quando se trata de fabricação em grandes séries. As pequenas séries e os motores de maior porte são executados em cobre, soldando-se as barras e os anéis de curto com soldas especiais (veja foto). O técnico de manutenção deve estar sempre atento ao problema de continuidade das barras (principalmente no caso da gaiola de

são em ferro fundido. As pequenas séries e principalmente as construções sob encomenda não compensam o custo dos modelos de fundição e são construídas em chapas de aço de baixo carbono e soldadas. Esse tipo de execução tem maior custo, mas possui a vantagem de, além da carcaça ser mais leve e mais resistente a choques, ter melhor usabilidade.

V. Eixos

Nos motores normais, os eixos são comumente executados em aço carbono. Não é recomendável fabricar um eixo com aço inferior ao 1045 (0,45% de carbono) laminado a quente, pois sua resistência mecânica é bem superior aos de mais baixo carbono. Ele apresenta tensão de ruptura à tração da ordem de $6,37 \times 10^8$ N/mm² (65 kgf/mm²) contra 53 kgf/mm² do aço 1030 e 43 kgf/mm² do 1020. Nos motores especiais isso é insuficiente, sendo utilizados aços-liga laminados ou forjados. Não é raro acontecer rompimento de eixo; as partes mais sujeitas a defeitos são as pontas, principalmente onde a secção se reduz (fig. 1). Essas partes devem sempre ser cuidadosamente examinadas durante a manutenção, para detectar possíveis inícios de fissuras.

Além do problema de redução de secção, é nesse ponto que é aplicado todo o momento fletor resultante da força radial, originada pelo acoplamento, composto com o momento de torção (veja cap. IV), resultante do torque que o motor aplica à carga. É aconselhável evitar cantos vivos nessa redução de secção e, em caso de reusinagem, procurar consultar os manuais de mecânica para os raios de curvatura recomendáveis em cada caso.

VI. Mancais

Nestes tipos de motores não se usam mancais de escorregamento, mas somente de rolamento. Os motores menores apresentam rolamento de esferas, tanto do lado da ponta de eixo (denominado L.A.) como do lado oposto (denominado L.O.A.), uma vez que esses rolamentos são suficientes para suportar os esforços radiais e axiais desses motores.

Os motores maiores, usualmente acima do tamanho 250, apresentam um rolamento de rolos cilíndricos do lado L.A., pois estes têm a capacidade de carga

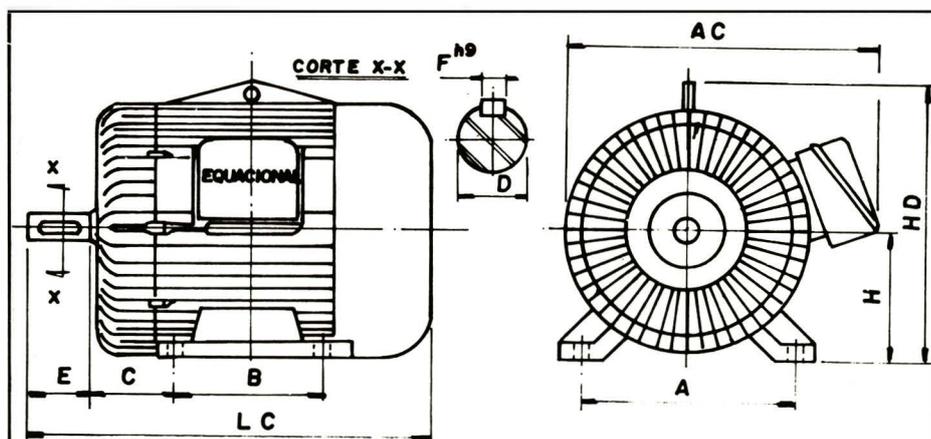


Tabela 1

TIPO	DIMENSÕES DE MONTAGEM				MEDIDAS MÁXIMAS			PONTA DE EIXO			ROLAMENTOS	
	H	A	B	C	LC	AC	HD	E	F	D	LA	LOA
A2	63	100	80	40	208	145	160	23	4	11	6202	6202
63	71	112	90	45	241	160	177	30	5	14	6203	6202
71	80	125	100	50	269	182	206	40	6	19	6204	6204
80	90 L	140	125	56	320	204	226	50	8	24	6205	6205
90 L	100	160	140	63	350	226	254	50	8	24	6205	6205
100 L	112	190	140	70	378	252	285	60	8	28	6206	6205
112 M	132	216	178	89	483	300	322	80	10	32	6207	6206
132 M	160	254	210	108	593	430	345	110	12	42	6209	6208
160 M	180	279	241	121	650	490	385	110	14	48	6210	6208
180 M	200	318	267	133	705	505	435	110	16	55	6312	6310
200 M	225	356	311	149	783	600	480	110	16	55	NU312	6310
225 M	250	406	349	168	894	650	532	140	18	65	NU314	6312
250 M	280	457	419	190	1010	755	612	140	20	75	NU316	6313
280 M	315	508	457	216	1105	820	675	140	20	75	NU316	6313

NOTA: Os rolamentos citados são os mais usados nos motores normais

radial maior que os de esfera, para suportar os esforços dos acoplamentos, principalmente se forem do tipo de polias e correias. O outro rolamento é de esferas (lado L.O.A.) e pode suportar pequenas cargas axiais, além de posicionar o eixo.

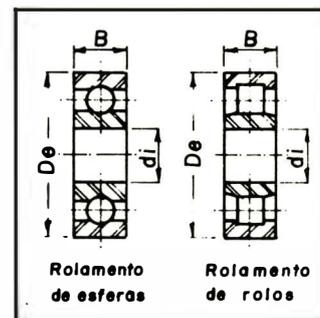
Os períodos de lubrificação dos rolamentos dependem do seu tipo, do seu tamanho e da velocidade de trabalho. Os rolamentos menores são normalmente de lubrificação permanente, ou seja, uma vez colocada a graxa, ela só será renovada na próxima manutenção (veja cap. I). Os rolamentos maiores, que têm

período de lubrificação menor, devem ser providos, nos motores bem construídos, de um sistema que expulse a graxa velha enquanto se injeta a nova, com o motor girando. Esse processo é denominado **sistema válvula de graxa** (fig. 1). Para o conhecimento desses pormenores é necessária a consulta aos manuais e catálogos dos fabricantes de rolamentos.

Porém, para atender às necessidades mais imediatas do usuário, reproduzimos na Tabela 2 alguns dados mais importantes de alguns rolamentos dos tipos mais utilizados nos motores normais.

Tabela 2

TIPO	De (mm)	Di (mm)	B (mm)	rpm máxima	TIPO	De (mm)	Di (mm)	B (mm)	rpm máxima
6305	62	25	17	11000	6202	35	15	11	20000
6306	72	30	19	9500	6203	40	17	12	18000
6307	80	35	21	8500	6204	47	20	14	15000
6308	90	40	23	7500	6205	52	25	15	14000
6309	100	45	25	6700	6206	62	30	16	11000
6310	110	50	27	6000	6207	72	35	17	9500
6311	120	55	29	5300	6208	80	40	18	8500
6312	130	60	31	5000	6209	85	45	19	8000
6313	140	65	33	4500	6210	90	50	20	7500
6314	150	70	35	4300	NU312	130	60	31	4300
6315	160	75	37	4000	NU313	140	65	33	4000
6316	170	80	39	3800	NU314	150	70	35	3800
6317	180	85	41	3400	NU315	160	75	37	3400
6318	190	90	43	3400	NU316	170	80	39	3200



Notas:

- 1) 62 - de esferas, leves.
63 - de esferas, meio pesados. NU3 - de rolos, meio pesados
- 2) RPM máxima para lubrificação à graxa.
De = ϕ externo, Di = ϕ interno, B = largura

CURIOSIDADES...

O povo denominou de “curiosas” as senhoras providas de sentimento de solidariedade, que executavam os serviços de parteiras leigas. Ainda hoje, nas zonas rurais distantes, elas dão sua inestimável contribuição no exercício dessas funções. Mas, ultimamente, “curioso” está significando também o tipo que quebra-galho em matéria de serviços técnicos. Existem curiosos mecânicos, curiosos em construção civil, e até curiosos genéricos, que fazem de tudo um pouco. Alguns são amadores; acodem gratuitamente amigos e vizinhos. Outros já se consideram profissionais e atendem com hora marcada, em geral nos fins de semana.

O caseiro do sítio vizinho era um curioso mecânico. Hoje, graças a alguns recentes sucessos em conserto de bomba d’água, soldas de calhas e algumas trocas de fusíveis, já está se considerando um curioso elétrico, com grandes chances de, dentro em breve, tornar-se um curioso genérico. Bom sujeito, ainda jovem, prestativo e jeitoso, mas, como

ninguém é perfeito, ele também tem seu defeito. Um deles é o de ser “sabido”. Mais por inocência do que por presunção, não passa pela sua cabeça que alguém da redondeza possa saber mais que ele. Por pensar assim, já acabou enfrentando algumas situações difíceis...

Há algum tempo foi encarregado, pelo proprietário do sítio em que trabalha, de trocar o motor de uma velha serra de madeira, do tipo que tem uma mesa com fenda central, por onde aparece parte do disco de serra e o motor é montado por baixo.

Satisfeito pela confiança, no primeiro sábado livre foi até a vila e comprou um motor trifásico de 5 CV e, para não ter dúvidas, pediu que deixassem a ligação dos terminais prontinha para 220 V.

Arrumou um ajudante, fez a furação da mesa de acordo com a base do novo motor, acertou o acoplamento ao eixo da serra, conectou os cabos, acionou a chave e, por azar, o motor girou ao contrário do exigido pela serra. E agora? Alguma notícia na placa do

motor? Nada! Uma daquelas plaquinhas com uma seta indicando sentido de rotação? Não! Fiação, contatos, fusíveis? Tudo aparentemente em ordem.

A situação ficou difícil. Indignado, ele culpou o fabricante, e chegou a pensar que sentido de rotação é algo que precisa ser previamente testado. O jeito foi refazer o serviço. Desacoplou, fez nova furação e montou o motor do outro lado da mesa para que não houvesse possibilidade de erro. Acoplou, conectou, acionou a chave e novamente a serra girou ao contrário.

O que fazer? O que ele acabou fazendo não sabemos, mas depois de tanto apanhar deve ter aprendido a inverter a rotação de um motor. Uma coisa é certa: o rapaz, além de não ter nenhuma familiaridade com motor elétrico é do tipo que gosta de aprender errando ao invés de procurar estudar ou consultar quem conhece do assunto. Caso ele tivesse lido as últimas linhas do capítulo VI, não teria passado tanto vexame...

Motores trifásicos de rotor bobinado e motores monofásicos

Como já mencionamos, esta publicação destina-se principalmente ao motor trifásico de gaiola normalizado, porém, é frequente o técnico de manutenção deparar-se com motores trifásicos de rotor bobinado e com motores monofásicos. Neste capítulo, vamos fazer alguns comentários de caráter genérico sobre esses motores e os que desejarem mais pormenores podem procurar pelo autor, na Equacional, empresa fabricante de motores de rotor bobinado.

1. Motor de rotor bobinado

É também denominado motor de anéis. O princípio de funcionamento e o enrolamento do estator (primário) são semelhantes aos dos motores de gaiola (veja caps. VI e VII). A diferença está no enrolamento do rotor (secundário) que é também um bobinado normalmente ligado em Δ , no lugar da gaiola, e com isso pode-se ter acesso ao circuito rotórico por meio de três anéis e escovas (ver fig.1).

A resistência do enrolamento rotórico influi muito na curva do conjugado (fig. 2). O motor de anéis permite alterar esta resistência, externamente, por meio de um reostato ajustável, R_a , como mostra a fig. 1.

Se R_a for nulo, ou seja, com os contatos C_0 fechados, o motor de anéis comporta-se como o de gaiola normal, que tem baixo escorregamento, alta corrente de

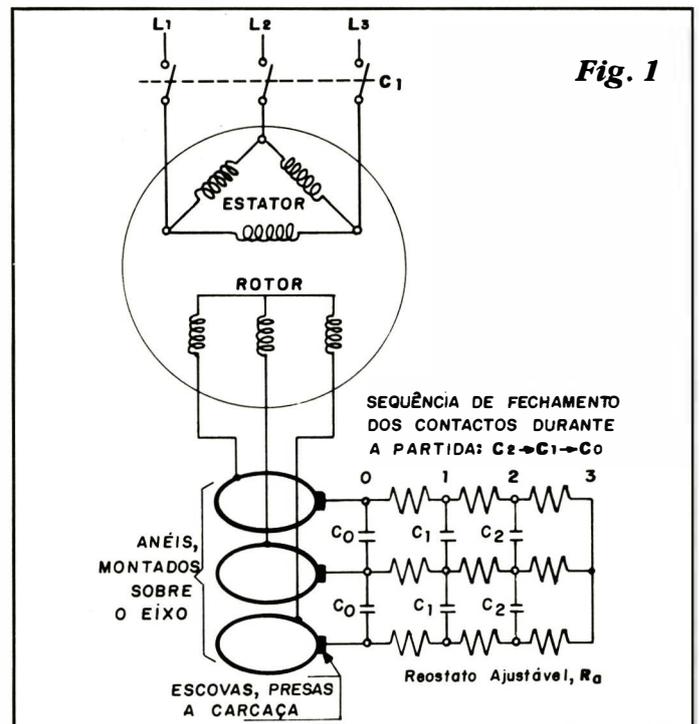
partida e torque de partida relativamente baixo. Porém, se aumentarmos o valor de R_a , a curva de torque vai mudando: a) o motor passa a apresentar maior escorregamento, b) maior torque de partida, c) não altera o torque máximo (fig. 2) e, o que é muito importante e vantajoso, diminui a corrente de partida a ponto de dispensar chaves compensadoras, chaves estrela-triângulo ou qualquer outro método eletrônico mais moderno para atenuar a corrente.

Na fig. 2 estão desenhadas várias curvas de torque x rotação. A curva 0 é para rotor curto-circuitado ($R_a = 0$). As curvas 1, 2 e 3 são para R_a crescentes, correspondentes às resistências externas nos pontos 1, 2 e 3 do reostato.

Isso sugere iniciar a partida do motor com toda resistência R_a (com todos os contatos C_2 , C_1 e C_0 abertos) e, à medida em que o motor vai acelerando, vamos curto-circuitando as seções de resistência até chegar ao valor zero com os contatos C_0 fechados. Quando o objetivo é regular a velocidade do mo-

tor de anéis, deixa-se parte de R_a inserida, o que faz o motor aumentar o escorregamento e diminuir a velocidade (fig. 2), porém, isso produz perda Joule e prejudica o rendimento do motor. Este recurso é utilizado, às vezes, para regulação por curtos períodos, como em alguns guinchos e pontes rolantes. Os motores de anéis, além de talhas pesadas, guinchos e pontes rolantes, são utilizados também em britadores, compressores, bombas, moinhos, ventiladores e cargas mecânicas de grande inércia.

As placas de identificação dos motores de anéis indicam sempre a tensão que é induzida no rotor (V_2), que aparece nos anéis com o secundário aberto e rotor



parado, e a corrente rotórica (I_2), que aparece nos anéis com o motor em carga.

Quanto à manutenção, os motores de anéis exigem mais que o motor de gaiola, já que os anéis e as escovas, que são componentes de desgaste, merecem cuidados especiais.

O enrolamento do rotor, nos motores até 300 CV, é normalmente de fio redondo, como o estator. Nos motores de médio e grande portes, os enrolamentos são usualmente do tipo barramento ondulado, com barras de cobre isoladas.

II. Motores monofásicos

São normalmente utilizados em locais onde não se dispõe de redes trifásicas, como residências, escritórios, instalações rurais de pequeno porte, pequenas fábricas e oficinas. Existe uma grande variedade deles: motores universais (monofásicos de comutador), motores monofásicos de repulsão, monofásicos de campo distorcido ("shaded-pole"), monofásicos de rotor em gaiola com capacitor permanente e o de partida por capacitor, que é seguramente o mais usado na faixa de 1/8 até 6 CV, e largamente utilizado em refrigeradores, máquinas de lavar, moinhos e bombas domésticas e agrícolas. É neste que vamos nos deter um pouco mais.

Nos capítulos IV, VI e VII, vimos que é necessário um enrolamento trifásico alimentado por correntes trifásicas para produzir campo rotativo necessário ao funcionamento, porém, na verdade qualquer enrolamento polifásico (com duas, três ou seis fases), produz campo girante. O enrolamento puramente monofásico não apresenta campo rotativo e, portanto, o motor assim construído não teria torque de partida. Contudo, a partir de um impulso inicial no seu eixo, esse movimento faz aparecer correntes induzidas na gaiola, que, pela interação com o campo magné-

tico, resultam em um torque no mesmo sentido do impulso dado. Isto faz com que o motor complete a aceleração e entre em funcionamento.

Porém, como esse método não é recomendado, nasceu a idéia de se construir motores monofásicos cujo enrolamento estático é composto de dois enrolamentos parciais: um denominado principal ou "fase principal", que funciona permanentemente, e outro denominado auxiliar ou "fase auxiliar", que só funciona durante a partida. O "principal" é ligado diretamente à linha, absorvendo a corrente I_p (fig. 3) e o "auxiliar" é ligado através de um capacitor tipo eletrolítico C_p , com a função de defasar (adiantar) a corrente I_a por ele absorvida. Isso forma um enrolamento de duas fases (difásico), que produz campo girante e inicia o processo de partida do motor como se fosse um trifásico.

Durante a aceleração, interrompe-se o circuito da fase auxiliar por meio de um contato centrífugo ou platinado, C_o , que é montado sobre o eixo e regulado para abrir em aproximadamente 50% a 70% da velocidade síncrona.

Esse sistema de partida torna o motor monofásico mais suscetível a defeitos, principalmente quando funciona em meios agressivos sujeitos a pó, graxa e corrosão. Em muitos casos, o centrífugo é substituído por botoeira manual ou então por um relé temporizado como nos refrigeradores, por exemplo. Para se poder utilizar o motor monofásico em duas tensões, as bobinas da fase

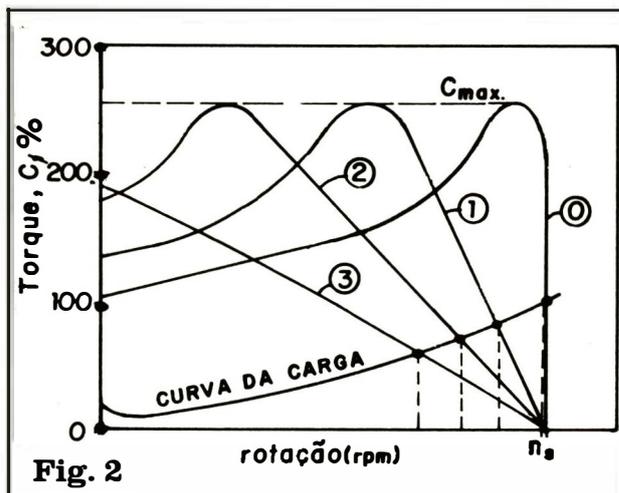


Fig. 2

principal são normalmente subdivididas em duas partes, de modo que, em paralelo (terminais 1 com 3 e 2 com 4), resultam em 110 V, e em série (terminal 2 com 3) dá 220 V. A fase auxiliar mais capacitor é normalmente de 110 V, mesmo nos motores de 220 V e portanto vai ligada entre os terminais 3 e 4 da fig. 3.

A identificação mais usual dos terminais é demonstrada na fig. 3. Da mesma maneira que nos motores trifásicos, a inversão de rotação é feita pela inversão de fases. Nos motores monofásicos, em geral, isso é feito invertendo-se os terminais 5 e 6 da fase auxiliar.

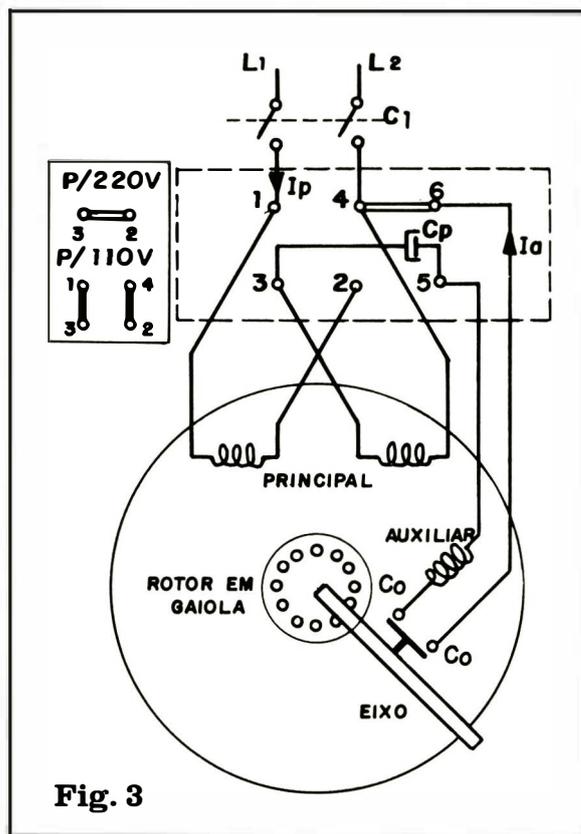


Fig. 3

Modificação de tensão - cálculo do fluxo magnético

I. Introdução

Vamos limitar esta apresentação a motores de baixa tensão (até 500 V) de pequeno e médio portes, com enrolamentos de dupla camada, executados com fio redondo, cuja potência, torque e rotação sejam conservados após a modificação. Nos casos mais complexos ou de difícil reconhecimento é interessante consultar o fabricante. Se isso não for possível, é conveniente confiar os cálculos de modificação a uma empresa que execute este tipo de serviço com reconhecida capacidade técnica.

No capítulo VII, vimos que existem motores de gaiola que podem ser usados até em quatro tensões: 220/380/440/760 V, possuindo 12 terminais acessíveis. Imagine, porém, um motor com apenas 3 terminais, cuja placa indica 220 V e precisa ser utilizado em 440 V. Desmontando-se o motor é possível verificar as interligações entre fases, junto às cabeças de bobinas. Neste caso, nota-se que o motor está, na maioria das vezes, interligado em dois triângulos em paralelo. Esta situação permite tentar desamar- rar, **com muito cuidado**, as interligações e refazê-las para um triângulo série. Também é possível isolar novamente as cabeças, de modo que o motor servirá para 440 V. Porém, se ele já estiver em um triângulo série em 220 V, a religação em paralelo resultará

em 110 V. Para ligá-lo em 440 V, a única alternativa é modificar o enrolamento.

Para isso, procure obter cuidadosamente e, sem possibilidade de erros, no ato de desmanchar o enrolamento original, todos os valores, tais como número de ranhuras, bobinas, espiras por bobina, interligação entre fases (estrela ou triângulo), série ou paralelo, bitola e número de fios em paralelo para formar um condutor. Um bom enrolador mantém sempre um registro desses dados em arquivo, para, em caso de dúvidas futuras, poder consultar os valores originais. Às vezes, ocorre que o enrolamento está completamente danificado, a tal ponto de não se poder conseguir esses elementos e o problema se tornar um pouco mais complicado do que o exemplo que vamos examinar, exigindo cálculo quase completo do motor, principalmente no núcleo magnético (pacote de chapas). Nestes casos, mais uma vez sugerimos confiar o trabalho a uma empresa que domine a engenharia especializada em máquinas elétricas.

II. Fluxo e força eletromotriz

O princípio básico da modificação é o seguinte: se o motor, após modificado, apresentar a mesma potência e a mesma rotação, o torque deverá ser o mesmo (veja cap. IV). Como o torque é

diretamente relacionado ao fluxo magnético do motor, este deverá também ser mantido.

Demonstra-se na Teoria das Máquinas Elétricas que a tensão induzida, denominada **força eletromotriz**, por fase de um enrolamento, é dada pela fórmula 1, que aparece no Quadro A. Ler o Quadro A antes de prosseguir.

III. Exemplo de cálculo

Motor trifásico original: 25 CV, 60 Hz, 6 pólos, 208 V, 73 A, interligação entre fases estrela série (Δ), 54 ranhuras, enrolamento de dupla camada (portanto, 54 bobinas), 18 bobinas por fase, três espiras por bobina (portanto, $18 \times 3 = 54$ espiras por fase), passo de bobina = 7 (1 a 8), sendo cada condutor formado de oito fios nº 17 AWG esmaltados (veja cap. IX).

Vamos modificar o motor para uma tensão especial de 480 V.

Para calcular o Φ pela fórmula (2), necessitamos:

$$N = 54 \text{ espiras por fase}$$
$$q = \frac{54}{6 \times 3} = 3 \text{ ranh/pólo/fase}$$

Como a ligação é Δ , de acordo com o Quadro A, podemos calcular a tensão induzida por fase:

$$\frac{208}{1,732} = 120,1 \text{ V}$$
$$E = 0,96 \times 120,1 = 115,3 \text{ V}$$

QUADRO A

$$E = 4,44 f N \phi K_c K_d \quad (1)$$

e daí se tira com facilidade o fluxo magnético:

$$\phi = \frac{E}{4,44 f N K_c K_d} \quad (2)$$

onde:

E = tensão induzida por fase, em Volt

f = frequência da rede, em Hz

N = número de espiras por fase

ϕ = Fluxo por pólo do motor (unidade Weber=Wb)

K_d = fator de distribuição. É um fator que leva em conta o fato dos enrolamentos serem distribuídos em "q" ranhuras/pólo/fase (veja caps. VI e VII). Se o enrolamento for concentrado ($q = 1$), o fator K_d será igual a 1.

K_c = fator de encurtamento ou de corda. Ele leva em conta o fato da maioria dos enrolamentos ter bobinas encurtadas, ou seja, com passo menor que o passo inteiro ou pleno. Se as bobinas tiverem passo inteiro, K_c será igual a 1.

Notas: 1) A tensão induzida é sempre um pouco menor que a voltagem da linha aplicada ao motor, por causa das quedas na resistência ôhmica e na reatância do enrolamento, sendo que nos motores pequenos a queda é maior que nos médios e grandes. Considerando-se que a reatância e resistências do enrolamento são parâmetros de cálculo difícil e que interessam mais a projetistas que usuários, vamos adotar como média, que a tensão

induzida, E, seja aproximadamente 0,96 da tensão nominal do motor.

Por exemplo, se a tensão é 440 V, E será $0,96 \times 440 = 422$ V.

Deve-se também estar atento à interligação entre fases: para interligação triângulo, a tensão de fase é igual a de linha e a corrente de fase equivale à da linha dividida por 1,732. Para ligação estrela, a corrente da fase é igual à de linha e a tensão de fase é a de linha dividida por 1,732.

2) Para o cálculo de K_d e K_c são necessárias duas fórmulas, onde entram grandezas trigonométricas (seno e coseno), necessitando de tabelas ou calculadoras um pouco mais sofisticadas. Para evitar esse contratempo, estamos apresentando abaixo duas tabelas, uma com os valores de K_d já calculados para os casos mais encontrados na prática, ou seja, com "q" igual a 1; 2; 3; 4; 5 e 6 e outra com os valores já calculados do K_c para passos de bobina fracionários e iguais a 1; 0,889; 0,867; 0,833; 0,800; 0,778; 0,750; 0,733; 0,722 e 0,667. O cálculo de "q", para entrar na tabela, já foi apresentado nos capítulos VI e VII. O cálculo do passo fracionário (p.f.) é simples, bastando para isso, dividir o passo original das bobinas pelo valor do passo pleno ou inteiro. Por exemplo: se uma bobina tem passo igual a 10 ranhuras (1 a 11) e o passo inteiro é 12 ranhuras (1 a 13), o passo fracionário é $10/12 = 0,833$ do passo inteiro.

Se preferir, pode dizer que o p.f. é equivalente a 83,3% do passo inteiro.

Tabela 1 - K_d em função de q

q	1	2	3	4	5	6
K_d	1,000	0,966	0,960	0,958	0,957	0,956

Tabela 2 - K_c em função de p.f.

pf	1,000	0,8889	0,867	0,833	0,800	0,778	0,750	0,733	0,722	0,667
	100%	88,9%	86,7%	83,3%	80%	77,8%	75%	73,3%	72,2%	66,7%
K_c	1,000	0,985	0,978	0,966	0,951	0,940	0,924	0,913	0,906	0,866

Entrando com $q = 3$ na tabela 1, obtemos $K_d = 0,960$

O passo original é 7 ranhuras:

O passo inteiro neste caso seria:

$$\frac{54 \text{ ranhuras}}{6 \text{ pólos}} = 9 \text{ ranhuras}$$

O passo fracionário = p.f. será $7/9 = 0,778$ ou $77,8\%$

Entrando com p.f. = $0,778$ na Tabela 2, obtemos $K_c = 0,940$

Utilizando esses valores na fórmula (2), obtemos o fluxo:

$$\Phi = \frac{115,3}{4,44 \times 60 \times 54}$$

$$\cdot \frac{1}{0,94 \times 0,96} = 0,00888 \text{ Wb}$$

Se continuarmos com a ligação estrela série, a voltagem por fase será:

$$\frac{480}{1,732} = 277,1 \text{ V}$$

e a tensão induzida será:

$$E = 0,96 \times 277,1 = 266 \text{ V}$$

Se o novo enrolamento tiver o mesmo "q" e o mesmo passo de bobina, teremos os mesmos K_d e K_c . Como se deve conservar o

fluxo, facilmente se obtém o novo número de espiras por fase, bastando aplicar novamente a fórmula (1), agora com o objetivo de se resolver o número de espiras N , resultando na fórmula 3:

$$N = \frac{E}{4,44 f \Phi K_c K_d} \quad (3)$$

$$N = \frac{266}{4,44 \times 60 \times 0,00888} \cdot \frac{1}{0,94 \times 0,96} = 124,6 \text{ espiras/fase}$$

O número de espiras por bobina será:

$$124,6/18 = 6,92 \text{ espiras/bob.}$$

Pode-se aproximar (arredondar) este valor para 7, sendo que o número de espiras por fase será de $18 \times 7 = 126$.

E o novo condutor de cobre, como fica? Como a potência será conservada, na nova tensão de 480 V a corrente diminuirá na proporção de 208 V para 480 V (veja cap. IV).

$$I = 73 \times 208/480 = 31,6 \text{ A}$$

O condutor será menor, na proporção de 31,6 A para 73 A. Os oito fios nº 17 AWG (veja tabela no cap. IX), que formam um condutor, equivalem a $8,32 \text{ mm}^2$ de secção de cobre. No novo

enrolamento, teremos:

$$31,6/73 \times 8,32 = 3,60 \text{ mm}^2$$

Voltando à tabela de fios de cobre encontraremos, com facilidade, que dois nºs 16 mais um nº 17 satisfazem essa área de secção. Teremos, então, aproximadamente os mesmos Amperes/ mm^2 do motor original (mesma densidade de corrente).

Finalmente deixamos para você as seguintes questões:

1) Se o enrolamento é de dupla camada, quantos condutores e quantos fios ficarão agora em cada ranhura? Os novos fios cabem na mesma? Compare os totais de área de secção transversal do enrolamento original e do modificado, usando a tabela de fios. Este cálculo costuma ser denominado "verificação do enchimento da ranhura". Se for possível, na prática, é conveniente experimentar os fios na ranhura antes de fazer as bobinas, para não ter surpresas desagradáveis ao enrolar o motor.

2) Outra opção é modificar a interligação Δ para Δ , na nova tensão de 480 V, porém, é necessário ficar atento aos valores da tensão induzida por fase (E) e à corrente de fase, pois estas ficarão diferentes e resultarão em um número de espiras também diferente.

Curiosidades

- O transformador, precursor do motor de indução, teve sua invenção patenteada pelo engenheiro russo Yablochkov em 1876.
- O princípio do motor de indução foi descoberto e estudado pelo físico italiano Ferraris em 1885. Ele apresentou um modelo elementar na Exposição de Frankfurt, famosa mundialmente até hoje.
- O primeiro motor de gaiola de esquilo, na sua forma parecida com a de hoje, foi construído pelo engenheiro russo Dolivo-Dobrovolsky, em 1889, ano da proclamação da República no Brasil.

Modificação de velocidade - funcionamento em frequência variável

I. Introdução

No capítulo IV foram apresentados os conceitos de escorregamento e rotação síncrona dos motores de indução. A rotação síncrona pode ser calculada pela fórmula abaixo:

$$n_s = 120 \frac{f}{p} \quad (1)$$

Nota-se facilmente que para modificar a rotação temos que alterar o número de pólos ou a frequência.

II. Alteração do número de pólos

Tomemos como exemplo um motor de 8 pólos, 60 Hz, cuja rotação síncrona é de 900 rpm e a rotação nominal de aproximadamente 880 rpm. Se ele for rebobinado para 6 pólos, ficará com 1200 rpm (aprox. 1170 rpm em carga).

Embora isso seja possível, não abordaremos esse tema nesta publicação, visto ser assunto complexo que implica em recálculo de toda a estrutura magnética do motor com alteração do fluxo por pólo, o que, sem os devidos cuidados, pode resultar em saturação de algumas partes magnéticas, como os dentes e a coroa, impossibilitando o uso do mesmo. Na maioria dos casos, principalmente quando a diferença de polos é muito grande (por exemplo, de 6

para 10, de 2 para 8, e outros) não compensa economicamente, resultando em um motor de características inferiores.

III. Alteração da frequência

Ao contrário da alteração do número de pólos, a alteração de frequência é quase sempre compensadora e mais simples de ser executada. Imaginemos um motor de 4 pólos, 60 Hz, cuja rotação síncrona é de 1800 rpm. Se ele for ligado a uma fonte de 50 Hz, ela se alterará para:

$$n = 120 \frac{50}{4} = 1500 \text{ rpm}$$

Por meio de um inversor pode-se fazer a velocidade do motor variar em uma ampla faixa. Os inversores são equipamentos que, ligados à linha de 60 Hz, podem fornecer na sua saída frequência ajustável no valor desejado. Podem ser rotativos (grupos motor-generadores) ou estáticos (eletrônicos). Embora hoje em dia os inversores estáticos ainda sejam relativamente caros para motores de maior potência, eles tendem a baratear à medida que avança a tecnologia eletrônica.

Assim, um motor de 4 pólos poderá variar a rotação síncrona de 600 até 2700 rpm se alimentado através de um inversor de frequência ajustável de 20 a 90 Hz (confira estes números apli-

cando a fórmula 1). Isso é útil em muitos processos industriais onde é necessário variar a velocidade, tais como bombas e ventiladores de vazão ajustável e máquinas operatrizes especiais, entre outros.

Porém, o motor não aceita variação pura e simples da frequência. Veja a fórmula (2) do capítulo XIV, e note que ao se alterar a frequência, o fluxo também se altera, podendo provocar problemas.

No capítulo anterior, aquele motor de 208 V, 60 Hz, que tinha 54 espiras por fase, apresentava um fluxo calculado de 0,00888 Wb. É fácil ver que ao se aplicar os mesmos 208 V com frequência mais baixa e igual a 50 Hz, o fluxo fica maior na relação:

$$\frac{60}{50} = 1,2 \text{ (20\% maior)}$$

Isso traz os inconvenientes já citados de saturação magnética.

Portanto é preciso alterar o número de espiras ou a voltagem para compensar a mudança de frequência. Como fazê-lo? Vamos distinguir dois casos:

Caso A: Alteração da frequência sem modificar o enrolamento

Para manter o fluxo é necessário, na fórmula 2 do capítulo XIV, que a voltagem varie na proporção direta da variação da fre-

quência. Basta você tomar o exemplo anterior e aplicar na fórmula (2) a frequência 50 Hz e uma tensão mais baixa na proporção de 1,2: **208/1,2 = 173,3 V**. O fluxo continuará com o mesmo valor de 0,00888 Wb.

Por este motivo, os inversores de frequência, tanto os rotativos como os estáticos, para alimentação de motor de indução, fornecem automaticamente a tensão de acordo com a frequência. Por exemplo, para o motor acima, se usado com um inversor de frequência com faixa 50:120 Hz (1:2,4), a tensão de saída deverá variar também na relação 1:2,4 ou seja, 173,3 : 416 V.

Porém, é sempre bom lembrar que não é qualquer motor que pode ser submetido a uma frequência variável dentro de faixas amplas como 1:3 ou mais, principalmente quando se usam alguns tipos de conversores estáticos que apresentam elevado teor de harmônicos na tensão de saída. Isso faz aumentar o nível de ruído e as perdas no ferro e, conseqüentemente, a temperatura de funcionamento do motor.

Além disso, como o aumento de frequência resulta em aumento de rotação, surgem limitações mecânicas. Os motores de gaiola normais nem sempre suportam grandes aumentos de velocidade. As forças centrífugas que se manifestam nas barras da gaiola e no ventilador aumentam com o quadrado da velocidade. Por exemplo, com 120 Hz a velocidade será o dobro e a força centrífuga será **2 x 2 = 4 vezes maior**. Isso pode provocar ruptura desses componentes, danificando seriamente o motor, caso ele não tenha sido projetado e construído para essa condição. Os rolamentos também podem ser um fator de limitação. Quanto maior for o diâmetro do rolamento (motores maiores), menor é o limite de

velocidade em que ele pode ser usado (veja Tabela 2 no cap. XII).

Caso B: Alteração da frequência modificando o enrolamento

Se o problema não é variar a velocidade dentro de uma certa faixa, mas apenas fazer o motor funcionar na mesma tensão, e em outra frequência, para a qual ele não foi projetado, a melhor e mais barata solução é modificar o enrolamento.

Voltando ao exemplo do capítulo XIV, o motor de 6 pólos que alteramos para 480 V (266 V por fase) agora terá mantida a tensão e modificada a frequência de 60 para 50 Hz. Ele passará, então, a ter rotação síncrona igual a 1000 rpm (em carga, aproximadamente 980 rpm). Para conservar o fluxo (que era de 0,00888 Wb), será preciso alterar o número de espiras por fase.

Usando novamente a fórmula (2) do capítulo XIV teremos:

$$N = \frac{266}{4,44 \times 50 \times 0,00888} \cdot \frac{1}{0,94 \times 0,96} = 149,5 \approx 150$$

É fácil notar que diminuindo a frequência na relação **60/50 = 1,2**, o número de espiras aumenta 1,2 vezes (de 124,6 para 149,5). O número de espiras deve, portanto, ser alterado na proporção inversa da variação da frequência.

É claro que se aumentando o número de espiras por fase aumenta-se o número de espiras por bobina, o número de condutores e o número de fios por ranhura. Portanto, deve-se diminuir a bitola dos fios na relação 1,2 (20% menor). Como exercício, complete o cálculo verificando o novo número de fios na ranhura e as novas secções dos fios (bitolas de fios magnéticos no cap. IX).

Com a diminuição da secção dos fios na relação 1,2, a capacidade de

conduzir corrente deve cair na relação 1,2 e o motor deverá funcionar com menor corrente. Como a tensão é a mesma e a corrente deve diminuir, a potência também diminuirá na mesma relação. Como exercício, calcule a nova potência desse motor em 50 Hz.

Não devemos nos esquecer que a ventilação do motor também diminuirá com a diminuição da rotação, porém, quase sempre isso não acarreta maiores problemas nos motores de pequeno e médio portes, pois as perdas no ferro do motor também diminuirão com a redução da frequência.

Deixamos para você calcular uma modificação ao contrário dessa, ou seja, de 50 Hz para 60 Hz. O que acontecerá com a rotação? E com o número de espiras e a bitola dos condutores? Com a corrente? Com a potência? O exercício será mais completo a partir de um caso real de motor de 50 Hz, do qual se tenha os dados do enrolamento. Modifique-o para 60 Hz conservando a voltagem. Porém, aqui o cuidado com a rotação deve ser maior, principalmente se o motor for de 2 pólos, visto que em 50 Hz já apresenta rotação alta (3000 rpm). Se você tiver dúvidas quanto aos efeitos da nova velocidade, é melhor não se arriscar e confiar o estudo dessa possibilidade a uma empresa que possua engenharia especializada nesses serviços.

Para encerrar esta parte, vamos analisar um caso interessante: o padrão de frequência no Brasil e nos EUA é de 60 Hz, ao passo que na Europa e em vários países latino-americanos é de 50 Hz. Muitos motores importados da Europa apresentam em sua placa: Voltagem = 380 V, frequência = 50 Hz. Se você pretende utilizá-lo em 440V, 60Hz, desde que ele suporte mecanicamente um aumento de rotação de 20%, normalmente não é necessária nenhuma modificação no enrolamento. Basta notar que a relação **440/380 = 1,16** é próxima da relação entre as frequências: **60/50 = 1,2**.

INDICAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Existe um grande número de livros e revistas que tratam da teoria, funcionamento, manutenção e pesquisa em máquinas elétricas de corrente contínua e alternada. Todos eles são úteis, porém, os mencionados a seguir são os mais indicados aos propósitos desta publicação.

I. Livros de apoio, de caráter básico:

- 1) Fitzgerald, A.E.; Kingsley Jr., C. e Kusko, A.; “Máquinas Elétricas”, Editora Mc GrawHill do Brasil, São Paulo, 1975, (tradução do original norte-americano).
- 2) Falcone, A. G.; “Eletromecânica” (vol. 1 - Eletromecânica Básica, vol. 2 - Máquinas Elétricas Rotativas), Editora Edgard Blucher Ltda. - 2ª edição, São Paulo, 1992.
- 3) Martignoni, Alfonso; “Eletrotécnica”, Editora Globo, 7ª edição, Rio de Janeiro, 1987.

II. Livros para consultas de caráter prático (enrolamentos, instalações elétricas e construção de máquinas elétricas)

- 1) Martignoni, Alfonso; “Máquinas de Corrente Alternada”, Editora Globo, 5ª edição, Rio de Janeiro, 1987.
- 2) Cotrim, Ademaro; “Instalações Elétricas”, Editora Makron, 3ª edição, São Paulo, 1993.
- 3) Kostenko, M. e Piotrovski, L.; “Máquinas Elétricas”, vol. 2, Editora Lopes da Silva, Porto, Portugal, 1979, (tradução do original russo).

III. Normas Técnicas

Todas as normas técnicas utilizadas nesta publicação são da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Contudo, cada país possui suas normas técnicas no setor da eletrotécnica. Por exemplo, VDE (Alemanha); NEMA, AISE, IEEE (USA); BS (Inglaterra); JIS (Japão). Muitas vezes, nos trabalhos de manutenção, o técnico é obrigado a trabalhar com equipamentos de várias procedências, construídos de acordo com as normas dos países de origem. Existe também uma normalização elétrica internacional da IEC (International Electrotechnical Commission), na qual participa a ABNT.

As normas técnicas brasileiras relacionadas com a matéria desta publicação foram citadas no texto de cada capítulo, à medida que foram sendo necessárias. Tanto estas, como as normas estrangeiras, podem ser encontradas para consultas nas bibliotecas técnicas das empresas ou nos escritórios da ABNT - Rua Marquês de Itu, 88 - São Paulo/SP, CEP: 01223-900, telefone (011) 222-0966.

**MOTORES DE INDUÇÃO -
MANUTENÇÃO E INSTALAÇÃO**

Autor: Aureo Gilberto Falcone

Publicação editada pela LVBA Comunicação Ltda.

R. Alvarenga, 806 - São Paulo (SP)

CEP: 05509-001 tel.: (011) 815-2055

Patrocínio: Pirelli Cabos S/A

Coordenação: Flavio Valsani - CONRERP 592

Fotos: Antônio Frazão

Revisão Técnica: Hilton Moreno

Fotolito e Impressão: Margraf

Tiragem da primeira edição: 5.000 exemplares

Lançamento: 1995

É proibida a reprodução total ou parcial desta publicação, por quaisquer meios, sem prévia autorização da Pirelli Cabos S/A e da Equacional Elétrica e Mecânica Ltda.

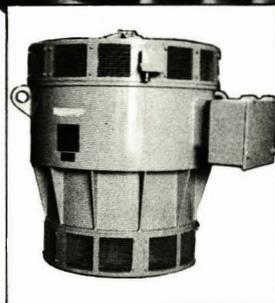
EQUACIONAL

Fabricação - Projetos - Serviços

- Motores de indução de gaiola e de rotor bobinado
- Motores de corrente contínua
- Variadores de tensão



- Freios de sapata
- Conversores de frequência
- Freios eletrodinamométricos
- Equipamentos de ensino técnico



de 2 W a 4.000 kW

EQUACIONAL
MOTORES E GERADORES

EQUACIONAL ELÉTRICA E MECÂNICA LTDA.
Rua Secundino Domingues, 787 Jd. Independência CEP 03223-110 São Paulo S.P.
Fone.: (011) 918-0777 Fax: (011) 271-1562 Telex: 11 63169

PIRELLI
FIOS E CABOS ELÉTRICOS

EQUACIONAL
MOTORES E GERADORES