
3 MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

3.1 FONTES DE ALIMENTAÇÃO

Uma longa vida útil de um motor de indução trifásico depende fundamentalmente das boas condições da fonte de alimentação, ou seja, da qualidade da energia fornecida, aí incluído o sistema de proteção.

A tensão e frequência nos terminais do motor devem ser muito próximas à nominal. O fluxo magnético do entreferro é dado por:

$$\Phi = \frac{KE}{f}$$

Onde:

Φ = fluxo de magnetização (Wb)

E= tensão no terminal do motor (V)

f= frequência da tensão estatórica (Hz)

K= constante, função da geometria do pacote magnético e da construção do enrolamento.

Os efeitos das variações da tensão e frequência serão mais danosos ao motor, quanto mais próximo estiver operando da potência nominal.



Fig 1 Centro de controle de motores (CCM)

A NBR 7094 estabelece as variações permissíveis de tensão e frequência em relação ao nominal, conforme figura 2.

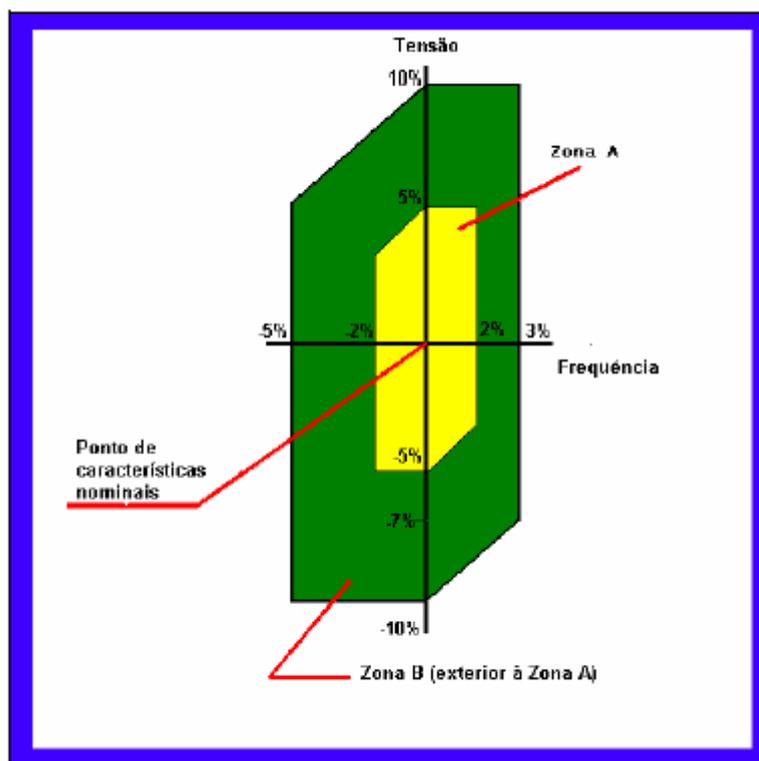


Fig 2 Gráfico de variação de tensão e frequência conforme norma NBR 7094

Geralmente a frequência é firme, muito próxima de 60Hz, ocorrendo variação na tensão da concessionária e quedas de tensões nos elementos internos da indústria, transformadores e cabos, principalmente.

As oscilações da tensão da concessionária podem ser minimizadas através de transformadores equipados com comutador de tapes sob carga (Load Tape Changer).

O transformador alimentador do Centro de Controle de Motores deve ser especificado com tensão secundária 5% (cinco por cento) acima da tensão nominal dos motores, por exemplo 460V para motores de 440V e 480V para motores de 460V.

Os condutores de alimentação dos motores são calculados para que a tensão no terminal dos motores, nas condições de partida e de regime, mantenha-se próximo da nominal (lembre-se que os conjugados de partida e nominal são proporcionais ao quadrado da tensão).

A zona A da figura 2 estipula as variações de tensão e frequência permitidas, dentro das quais o motor deve ser capaz de desempenhar sua função principal continuamente,

podendo não atender completamente suas características de desempenho em condições nominais, apresentando alguns desvios.

Nesta zona a tensão pode variar em mais ou menos 5% e a frequência em mais ou menos 2%.

Na zona B o motor ainda deve ser capaz de desempenhar sua função principal, apresentando desvios superiores àquelas da zona A.

Os valores máximos de desvio da tensão e frequência são de 50%.

Os efeitos das variações da tensão e frequência se anulam quando tem o mesmo sentido. Por exemplo, um motor com tensão e frequência nominal de 440V e 60Hz opera muito bem em um sistema com tensão de 380V (-14%) e frequência de 50Hz (-17%).

Quando as variações são de sinal contrário, os efeitos sobre as características do motor são cumulativos, reduzindo seu desempenho.

Tensões e correntes desequilibradas provocam aquecimento no interior do motor que podem levar à degradação térmica e a conseqüente falha do material isolante.

Correntes harmônicas aumentam as perdas do motor, elevando a temperatura média nos enrolamentos, reduzindo a vida útil do material isolante por degradação térmica.

3.2 PROTEÇÃO DE MOTORES DE CORRENTE ALTERNADA.

3.2.1 Proteção Contra Surto de Tensão

O nível de isolamento de máquinas rotativas é muito menor do que de outros tipos de equipamentos elétricos, como por exemplo, os transformadores, sendo portanto mais suscetíveis a danos por surtos de tensão.

As fontes comuns de surtos de tensão em motores são as operações de manobras e as descargas atmosféricas. O chaveamento de pequenas cargas indutivas e bancos de capacitores através de disjuntores a vácuo, são fontes de surtos.

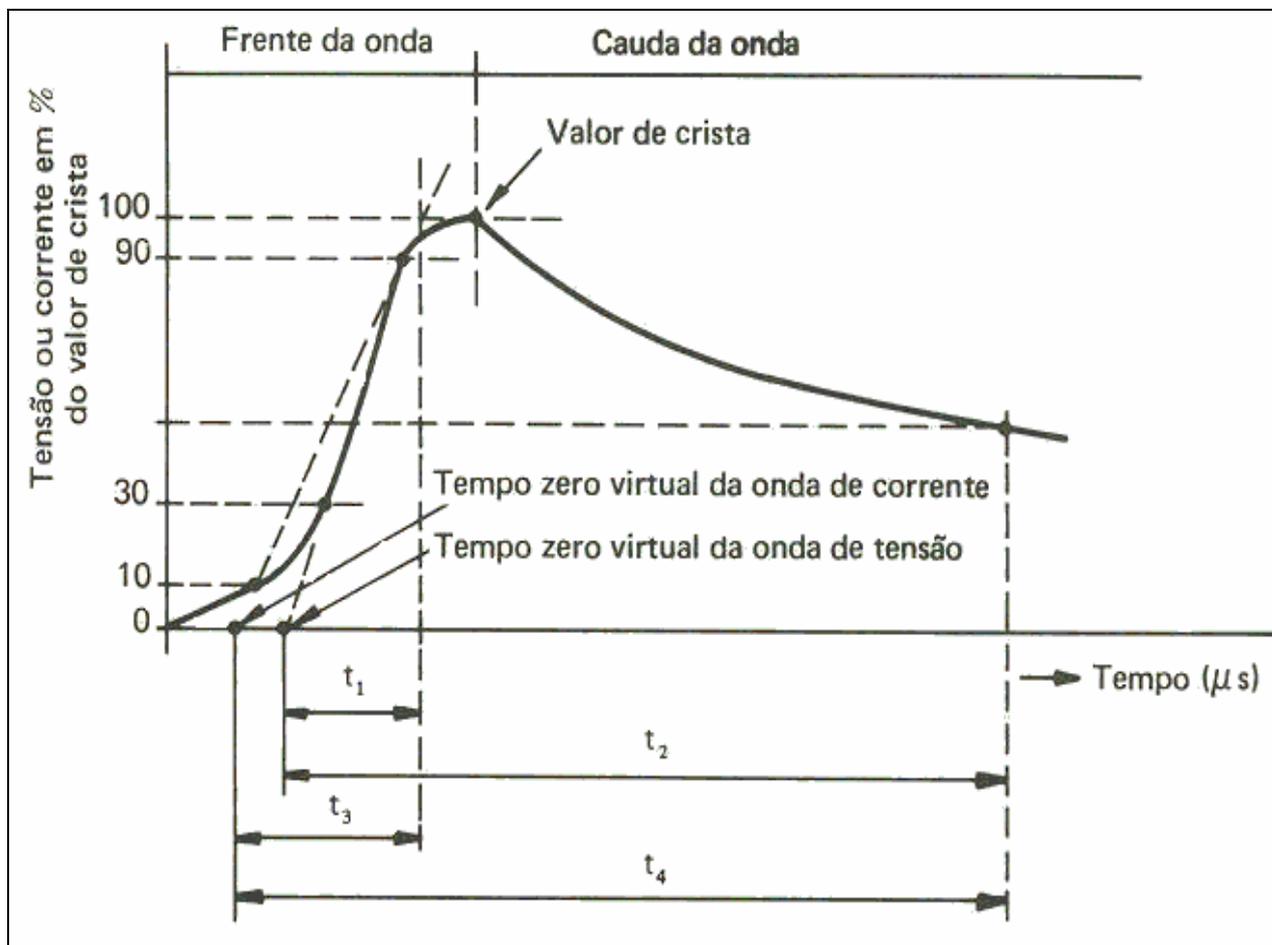


Fig 3 Caracterização da onda de um surto de tensão

A forma de onda tem uma frente escarpada e uma cauda longa, conforme 0.

A proteção do isolamento de máquinas rotativas compreende a limitação da tensão de impulso e a redução da inclinação da frente de onda da tensão, denominado “achatamento de onda”. O circuito de proteção compreende a instalação de pára-raios e capacitores adequadamente calculados, instalados entre os terminais da máquina e a malha de aterramento, conforme Fig 4.

Surtos de tensão podem levar o isolamento ao stress, ocasionando a falha do isolamento nas primeiras espiras do enrolamento.

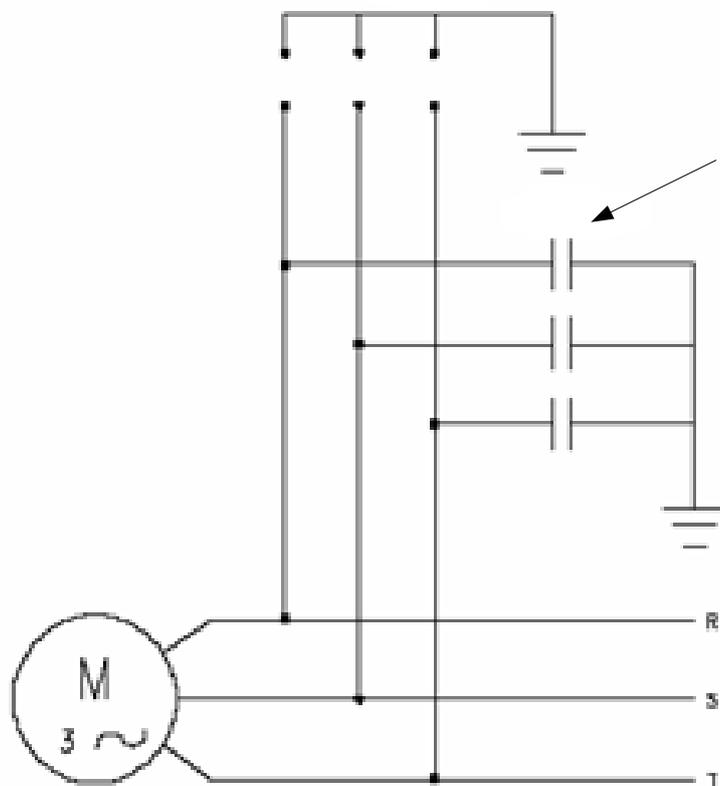


Fig 4 Esquemas de ligação de motores de indução para proteção contra surtos utilizando capacitores e para-raios..

3.2.2 Proteção Contra Sobrecargas.

O funcionamento do motor acima de sua potência nominal acarreta uma corrente acima da nominal circulando nos enrolamentos e um aumento na temperatura da máquina, podendo superar a temperatura máxima admitida pelo material isolante. A operação nesta condição levará a degradação térmica do material isolante e queima da máquina.

Os motores de baixa tensão são normalmente protegidos por um relé térmico, percorrido pelas correntes das três fases, provocando o aquecimento de lâminas bimetálicas, que em condições de sobrecarga, desligará o contator, desenergizando o motor.

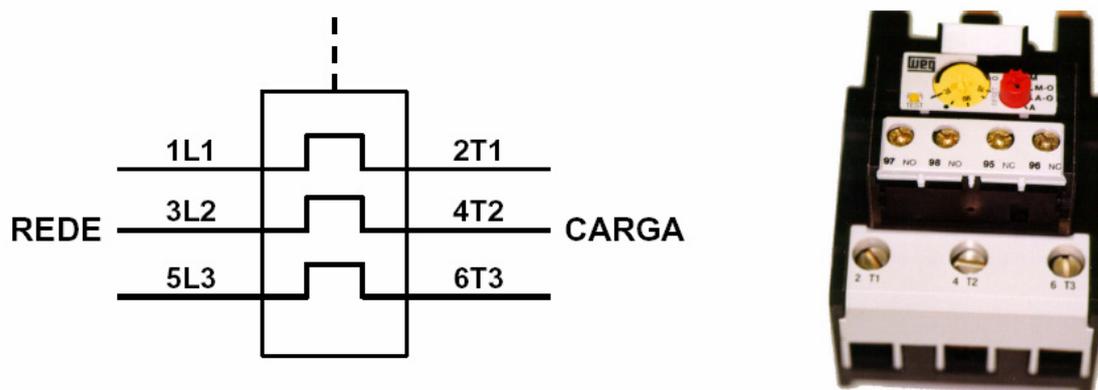


Fig 5 Relé de sobrecarga

A curva de operação do relé térmico deverá ser compatível com a curva térmica da máquina protegida, conforme mostrado na Fig 6.

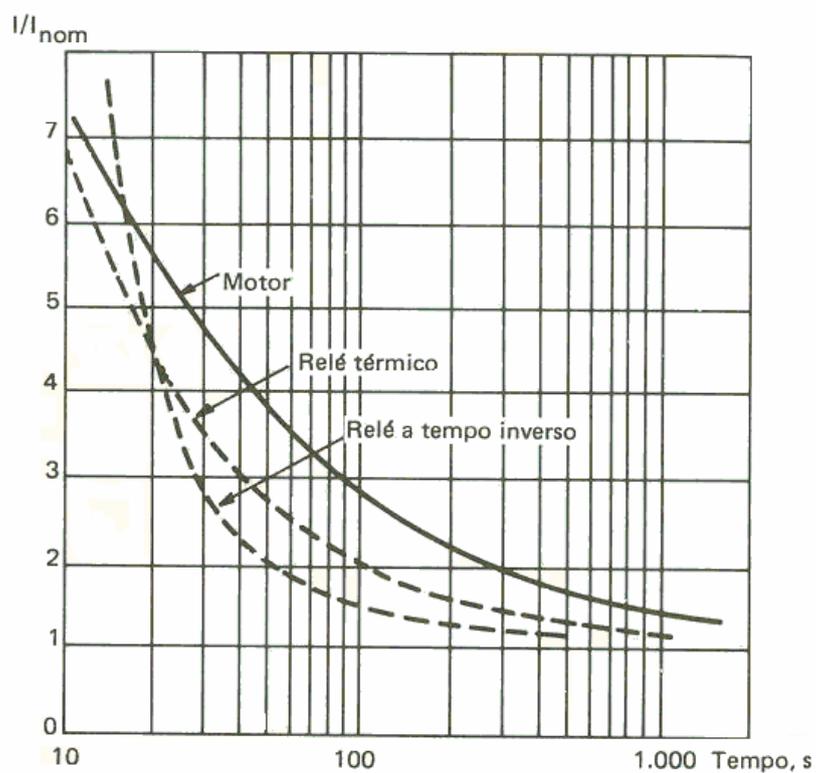


Fig 6 Curvas de um relé térmico de sobrecarga, um relé de sobrecorrente a tempo inverso e de integridade térmica de um motor

O relé térmico deve ser regulado para o valor da corrente nominal do motor protegido, mesmo em máquinas com fator de serviço.

Nos casos em que o motor tem sobra térmica (Fator de Serviço – FS>1) e está acontecendo a operação do relé térmico, é possível regular o térmico para um valor até $I_N \times FS$. Neste caso recomenda-se verificar a temperatura no interior do enrolamento após a nova regulação do relé térmico.

Procedimento para verificação da temperatura do enrolamento.

1. Regule o relé térmico para até $I_N \times FS$ (corrente nominal vezes o fator de serviço do motor)
2. Com o motor à temperatura ambiente, meça a resistência ôhmica dos enrolamentos R_1 . Meça a temperatura ambiente t_1 .
3. Opere o motor com a carga na condição que estava provocando a operação do relé térmico por um tempo suficiente para que seja alcançado o equilíbrio térmico.
4. Desligue o motor e meça rapidamente a resistência ôhmica dos enrolamentos R_2 , e a temperatura do ar de refrigeração t_a ,
5. Calcule a elevação de temperatura do enrolamento através da formula abaixo:

$$t_2 - t_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + t_1) + t_1 - t_a$$

6. Calcule a temperatura do ponto mais quente considerando a temperatura ambiente de 40°C.

$$T = (t_2 - t_a) + 40^\circ\text{C} + K$$

onde:

K=5°C para máquinas com ΔT de 60°C e 75°C

K=10°C para máquinas com ΔT de 80°C

K=15°C para máquinas com ΔT de 100°C e 125°C

ΔT =elevação de temperatura de projeto da máquina

A temperatura do ponto mais quente não deve ser superior a:

100°C- para máquinas com materiais de classe térmica “A”

120°C- para máquinas com matérias de classe térmica “E”

130°C- para máquinas com matérias de classe térmica “B”

155°C- para máquinas com matérias de classe térmica “F”

180°C- para máquinas com matérias de classe térmica “H”

Nos motores de maior porte, de média tensão, a proteção contra sobrecargas é confiada a relés de sobrecorrente associados a detectores de temperatura instalados no interior do enrolamento do motor. A curva de proteção do relé deve ser compatível com a curva térmica do motor de forma que o relé opere antes que o material isolante seja comprometido.

Os detectores de temperatura mais utilizados em motores de grande porte são os “RTD” - Resistance Temperature Dependent ou “resistência calibrada”, tendo como característica uma relação linear com a temperatura, propiciando uma indicação da temperatura no interior dos enrolamentos.

Os *RTDs* mais comuns são os de platina e cobre que têm, respectivamente, suas resistências a 0°C de 100Ω e 10Ω.

Tabela 1 Conversão de resistência x temperatura para RTD PT-

100

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.95	106.24	106.63	107.02	107.40
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.28
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	113.99	114.38	114.77	115.15
40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.85	118.24	118.62	119.01
50	119.40	119.78	120.16	120.55	120.93	121.32	121.70	122.09	122.47	122.86
60	123.24	123.62	124.01	124.39	124.77	125.16	125.54	125.92	126.31	126.69
70	127.07	127.45	127.84	128.22	128.60	128.98	129.37	129.75	130.13	130.51
80	130.89	131.27	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.56	133.94	134.32
90	134.70	135.08	135.46	135.84	136.22	136.60	136.98	137.36	137.74	138.12
100	138.50	138.88	139.26	139.64	140.02	140.39	140.77	141.15	141.53	141.91
110	142.29	142.66	143.04	143.42	143.80	144.17	144.55	144.93	145.31	145.68
120	146.06	146.44	146.81	147.19	147.57	147.94	148.32	148.70	149.07	149.45
130	149.82	150.20	150.57	150.95	151.33	151.70	152.08	152.45	152.83	153.20
140	153.58	153.95	154.32	154.70	155.07	155.45	155.82	156.19	156.57	156.94
150	157.31	157.69	158.06	158.43	158.81	159.18	159.55	159.93	160.30	160.67

Os *RTDs* são instalados nas ranhuras dos motores, em contato com as bobinas, dispostos nas três fases, propiciando alarme e desligamento.

Devido à inércia térmica, os detectores de temperatura não podem, na grande maioria das situações, atuar de forma suficientemente rápida para defeitos que ocasionam elevações abruptas de corrente.

São muito eficazes para motores sujeitos a regime intermitentes ou contínuos com carga intermitente e em casos em que ocorrem sobretensões sem a correspondente sobrecorrente, como na obstrução no sistema de refrigeração ou perda de ventilação.

Os resistores são normalmente fornecidos com três terminais, permitindo, quando ligados em ponte, eliminar o efeito da resistência dos condutores entre o resistor e o relé supervisor.

Outros dispositivos podem operar como detectores de temperatura, tais como os bimetálicos e os termistores.

Os termostatos são dispositivos bimetálicos que comutam um contato quando a temperatura se aproxima de um valor estabelecido (fixo). Instalados nas cabeças de bobinas do lado oposto ao ventilador (individual, ou por fase), são ligados em série com a bobina do contator, desligando o circuito quando da abertura do contato.

Os termistores (Fig 7b) são dispositivos semicondutores instalados dentro das cabeças das bobinas, do lado oposto à ventilação, podendo ser instalados em uma única fase, mas preferencialmente nas três. O termistor exige um relé que irá sentir a variação abrupta do valor da resistência, próxima à temperatura de operação, comutando um contato que irá provocar o desligamento do motor.

O termistor mais comumente usado na proteção de motores é o PTC que tem um coeficiente de temperatura positivo (resistência aumenta com o aumento da temperatura).

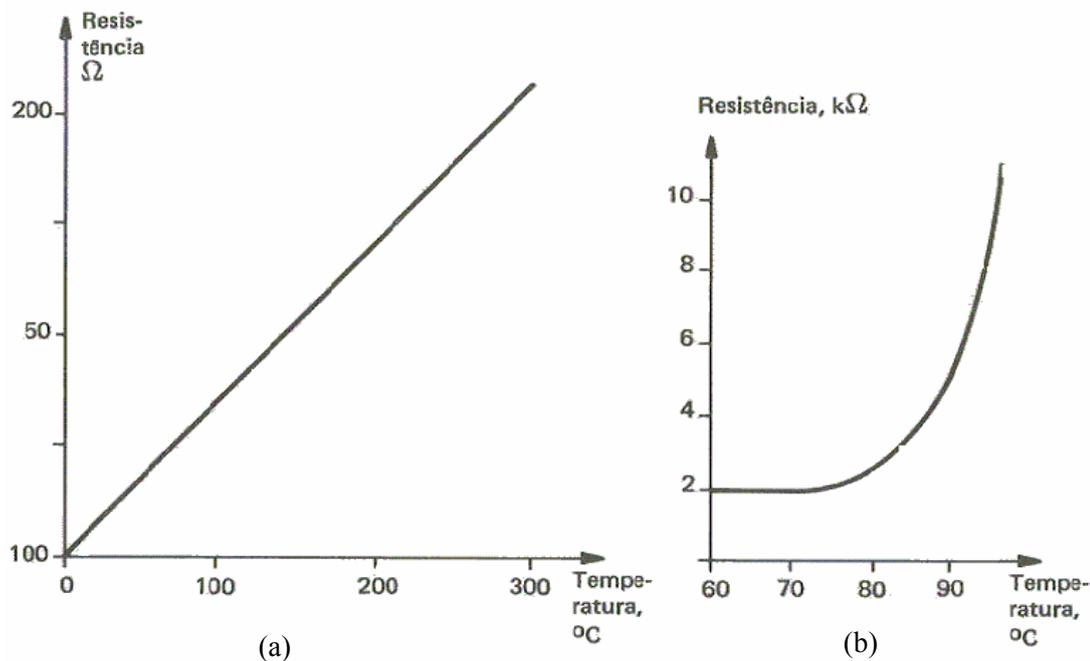


Fig 7 Características típicas de um RTD de platina (a) e de um termistor tipo PTC (b)

O desligamento da proteção por detectores de temperatura deve ser ajustada para o limite da classe de isolamento

Tabela 2 Limites de temperatura para cada classe de isolamento

<i>Classe de Isolação</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
<i>Desligamento</i>	105°C	120°C	130°C	155°C	180°C

O alarme deve ser ajustado para o valor da temperatura média do enrolamento em condições nominais ($\Delta T + 40^\circ\text{C}$).

3.2.3 Proteção Contra Curtos-Circuitos

As correntes elevadas de curto-circuito podem ocasionar danos permanentes ao motor (fusão de cobre e colocação das lâminas do pacote magnético em curto-circuito e até a fusão das lâminas de aço) e aos outros elementos do circuito tais como cabos, dispositivos de comando, CCM, etc, devendo ser interrompidas muito rapidamente.

Os motores de baixa tensão são protegidos através de disjuntores com unidades magnéticas ajustáveis ou fusíveis do tipo Diazed e NH. Nos motores de média tensão a proteção contra curtos-circuitos é confiada a um relé com atuação instantânea ajustados para um valor acima da corrente de rotor bloqueado, conjugado com uma função temporizada.

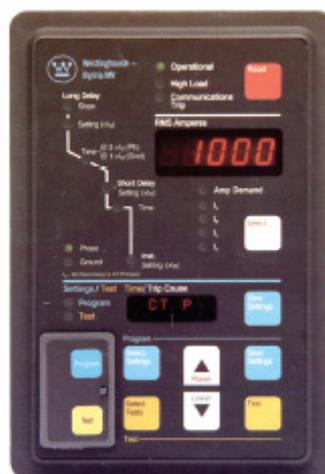


Fig 8 Relé tipo MV Microprocessado - Westinghouse

A proteção contra falta para terra (corrente de seqüência zero) é normalmente ligada a um TC toroidal que abraça as três fases, conforme Fig 9

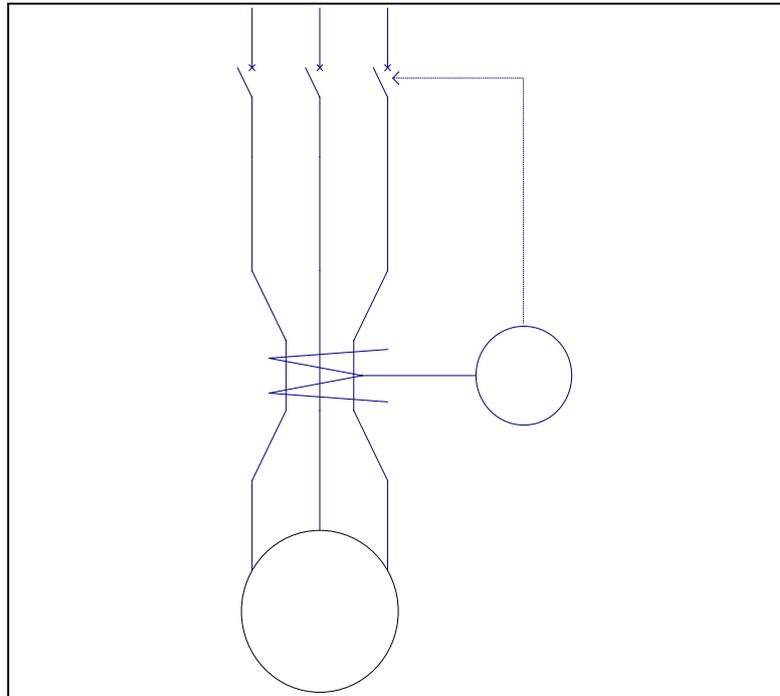


Fig 9 Esquema de proteção de falta fase terra

Em máquinas de grande porte é comum a utilização de proteção diferencial dos enrolamentos. Um esquema de ligação possível é mostrado na Fig 10. As vantagens desta proteção são a alta confiabilidade, alta velocidade e pelo fato de operar somente para faltas internas ao motor.

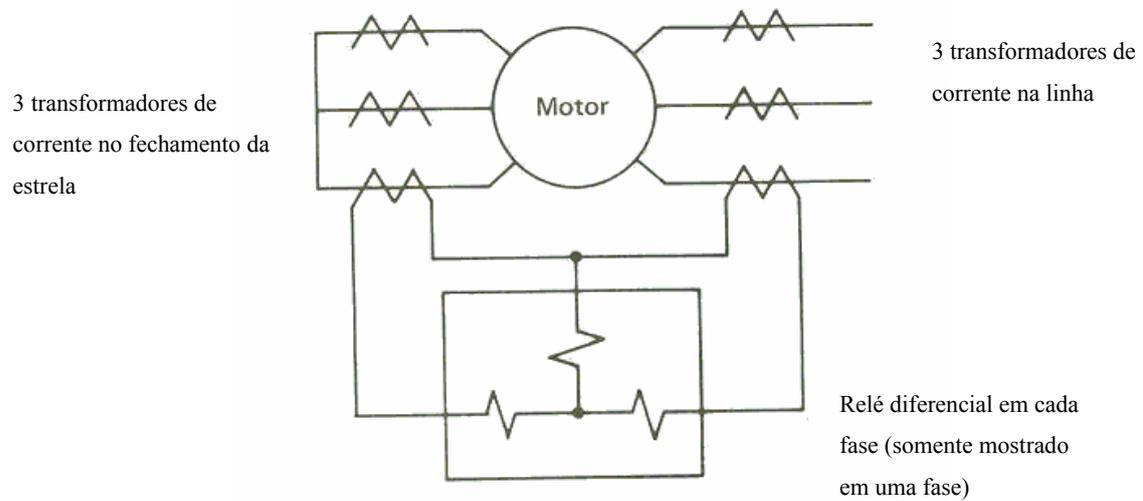


Fig 10 Circuito típico de um sistema de proteção diferencial



Fig 11 Proteção diferencial de motor de média tensão

3.3 PROTEÇÃO CONTRA FALTA E DESEQUILÍBRIO DE FASES

Correntes desequilibradas provocam aquecimentos nos enrolamentos, capazes de levar o sistema isolante à falha por degradação térmica. Para a proteção de motores de média tensão são utilizadas unidades que filtram as correntes de seqüência negativa, desligando o motor.

3.4 INTERAÇÃO MOTOR E MÁQUINA ACIONADA

A transmissão consiste no conjunto responsável pela transferência da potência mecânica à carga acionada. Quando vista pelo motor, a transmissão é uma fonte de esforços externos, devendo-se garantir a compatibilidade entre o motor e a transmissão.

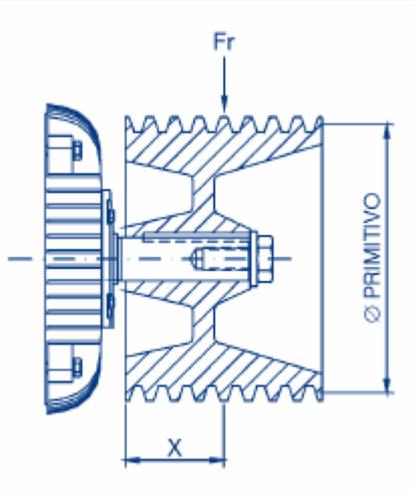
As transmissões diretas devem ser preferidas pelo fato de exercerem menores esforços sobre a ponta do eixo do motor.

Os motores padronizados pelos fabricantes nem sempre são adequados às aplicações com transmissões não-diretas, aí incluídas polias e correias, rodas dentadas, engrenagens, etc, isso quando montadas diretamente sobre o eixo do motor.

A força transferida ao eixo será tanto maior quanto menor for a polia motora montado no eixo do motor. As tabelas a seguir indicam o diâmetro primitivo mínimo de polias motoras em correspondência à carcaça e a metade do comprimento da polia (fonte WEG).

Tabela 3 Diâmetro primitivo mínimo de polias

ROLAMENTO DE ESFERAS							
Carcaça	Rolamentos	MEDIDA X (mm)					
		20	40	60	80	100	120
63	6201-ZZ	40	—	—	—	—	—
71	6203-ZZ	40	40	—	—	—	—
80	6204-ZZ	40	40	—	—	—	—
90	6205-ZZ	63	71	80	—	—	—
100	6206-ZZ	71	80	90	—	—	—
112	6307-ZZ	71	80	90	—	—	—
132	6308-ZZ	—	100	112	125	—	—
160	6309	—	140	160	180	200	—
180	6311	—	—	160	180	200	224
200	6312	—	—	200	224	250	280



Carcaça	Pólos	ROLAMENTO DE ESFERAS				
		Rolamentos	MEDIDA (mm)			
			50	80	110	140
225	II	6314	190	200	212	224
	IV-VI-VIII	6314	250	265	280	300
250	II	6314	224	233	250	265
	IV-VI-VIII	6314	375	400	425	450
280	II	6314	300	315	335	355
	IV-VI-VIII	6316	500	530	560	600
315	II	6314	—	—	—	—
	IV-VI-VIII	6319	—	—	—	—
355	II	6314	310	300	290	285
	IV-VI-VIII	6322	—	—	—	—

Carcaça	Pólos	ROLAMENTO DE ROLOS						
		Rolamentos	MEDIDA (mm)					
			50	80	110	140	170	210
225	II	NU 314	50	50	65	80	—	—
	IV-VI-VIII	NU 314	77	80	110	136	—	—
250	II	NU 314	63	66	69	84	—	—
	IV-VI-VIII	NU 314	105	115	145	175	—	—
280	II	NU 314	95	100	105	110	—	—
	IV-VI-VIII	NU 316	135	140	170	210	—	—
315	II	NU 314	170	175	180	185	—	—
	IV-VI-VIII	NU 319	—	170	185	225	285	—
355	II	NU 314	—	—	225	295	340	390
	IV-VI-VIII	NU 322	—	—	345	410	455	565

A polia deve ser montada o mais próximo possível do mancal do motor conforme Fig 12.

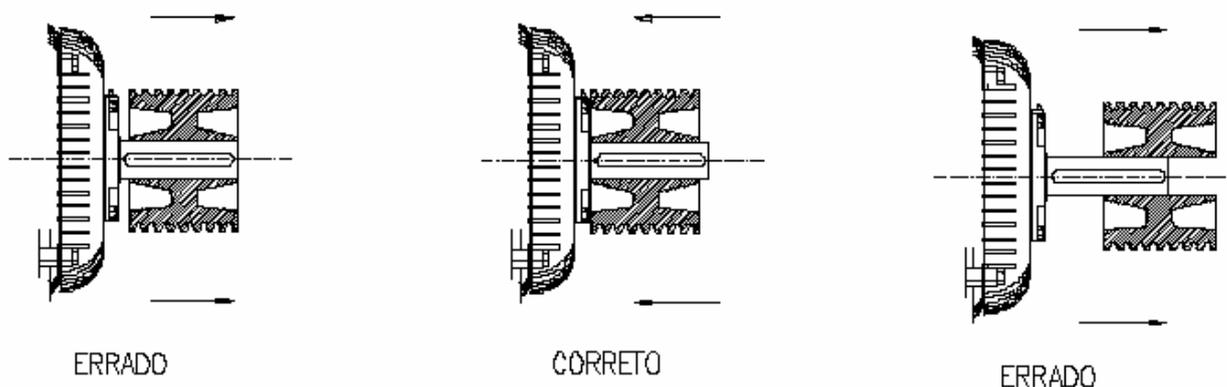


Fig 12 Exemplo de instalação de polias

As polias motoras e movidas devem estar perfeitamente alinhadas, reduzindo os esforços radiais desnecessários nos mancais.

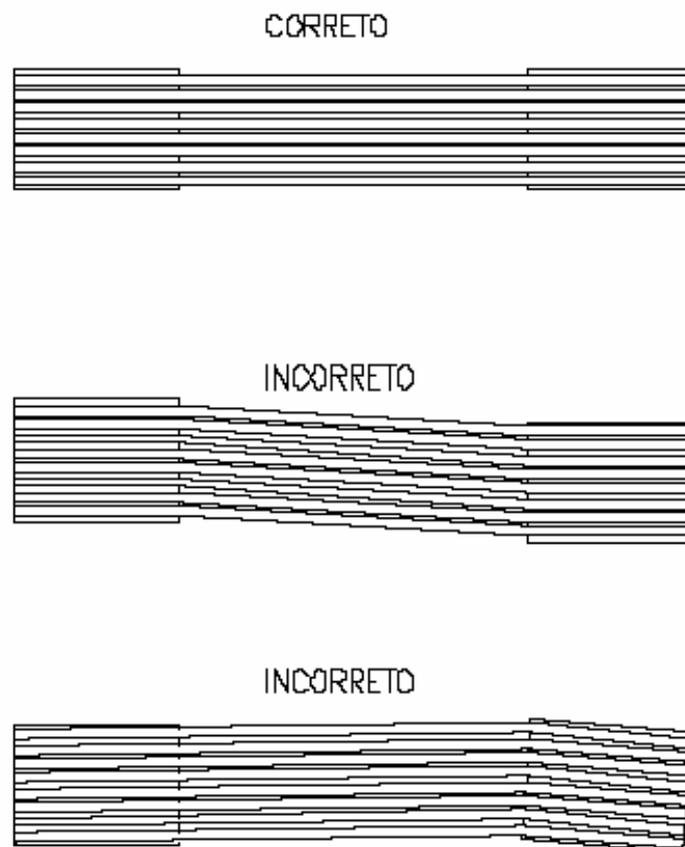


Fig 13 Alinhamento de polias

A tensão na correia deverá ser suficiente para evitar o escorregamento durante o funcionamento. Tensões excessivas aumentam o esforço na ponta do eixo e mancal, causando fadiga, com reflexo na redução da vida útil do rolamento e eventual cisalhamento do eixo.

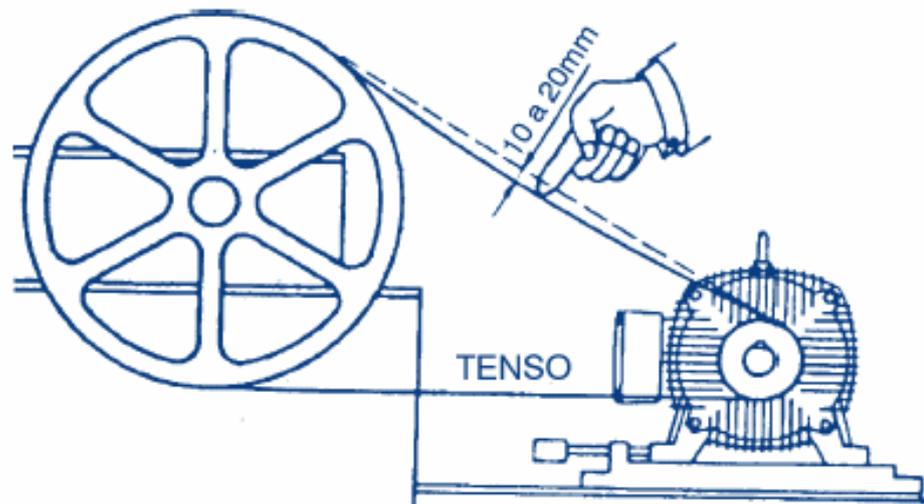


Fig 14 Instalação de correias

Mesmo quando todos os requisitos citados estão atendidos, pode acontecer falha prematura de rolamentos. Neste caso o fabricante deve ser consultado com respeito à compatibilidade do motor para acionamento por correia.

3.5 INSPEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

3.5.1 Instalação do Motor Elétrico.

Na atividade de instalação de um motor, o inspetor deve verificar os seguintes pontos:

3.5.1.1 Aterramento

A carcaça do motor deve estar firmemente conectada ao potencial de terra através do quarto condutor ou diretamente à malha de terra, conforme Fig 15.

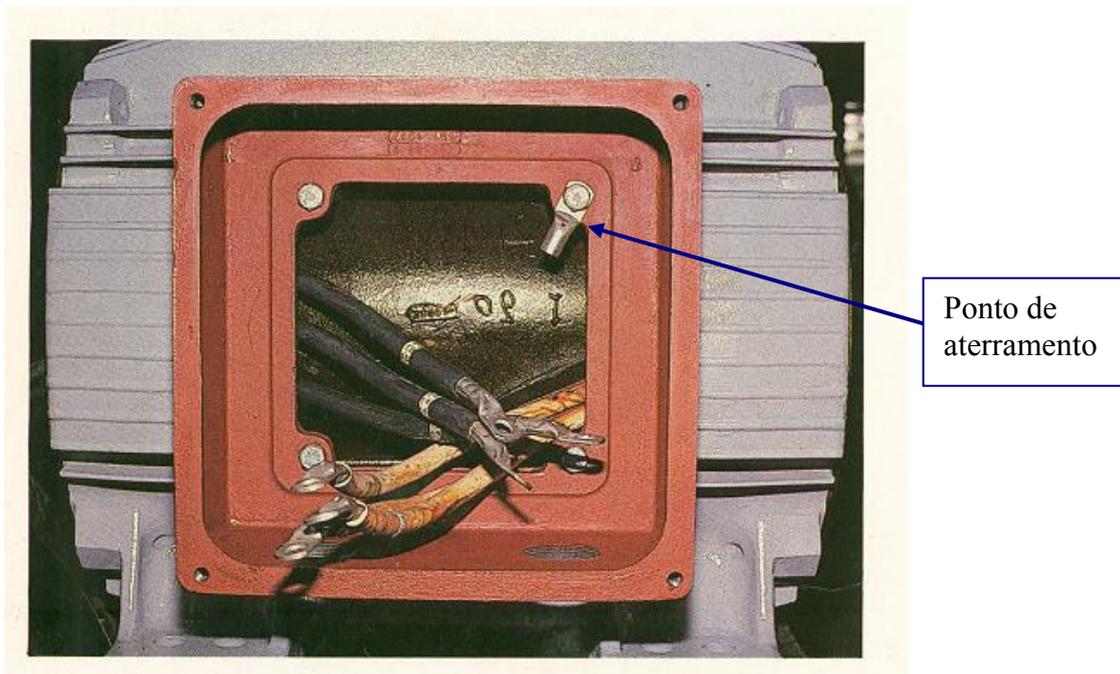


Fig 15 Aterramento da carcaça

3.5.1.2 Dispositivos de Bloqueio e Calços

Os dispositivos de bloqueio e calços instalados para transporte, devem ser removidos permitindo a livre movimentação do rotor.

3.5.1.3 Medição da Resistência de Isolamento

Para que um motor seja energizado é necessário que a resistência do isolamento para a massa e entre fases tenha um valor mínimo que permita sua energização.

O valor mínimo é definido pela equação:

$$R_m = KV + 1$$

Onde,

R_m = resistência 1 minuto a 40°C em megohms, na posição RST x massa

KV = classe de tensão do motor em kV

Para maiores informações consulte o capítulo 24 – “Avaliação de Isolamento Elétrico Utilizando Tensões de Corrente Contínua”.

3.5.1.4 Conexão de Força do Motor

O inspetor deverá verificar se a conexão do motor foi realizada de acordo com a tensão da rede. Deverá ser verificado se a isolamento dos cabos de conexão do motor está feita com um volume de fita isolante capaz de garantir tanto a resistência elétrica quanto a mecânica exigida pelos esforços contra paredes da caixa de ligações.

3.5.1.5 Conexões dos Condutores dos Circuitos de Proteção e Controle

Certificar-se da correta ligação dos resistores de aquecimento, dispositivos indicadores e de proteção (termostatos, termistores, termo-resistências, sensores de vibração, etc) e controle (solenóides, etc).

3.5.1.6 Fixação do Motor à Base

O motor deverá estar firmemente fixado à base, com todos os parafusos torquoados.

3.5.1.7 Proteções do Motor

Certificar se os dispositivos de proteção (relés térmicos, fusíveis, disjuntores, relés de sobrecorrente, diferencial e outros) estão ajustados corretamente para efetiva proteção do motor.

3.5.2 Operação com o Motor Desacoplado

Na operação com o motor desacoplado são verificados o sentido de giro do motor e ruídos que possam caracterizar algum problema de mancal e a correta operação do resistor de aquecimento (space heater).

A medição de vibração com o motor desacoplado tem como objetivo detectar principalmente desbalanceamento, danos em rolamentos, desalinhamento entre furos das tampas, empeno de eixo e problemas magnéticos.

A medição normalmente é realizada com um medidor de velocidade de vibração em seis pontos da carcaça, posições axial, vertical e horizontal, mancal lado acoplado (LA) e oposto ao lado acoplado (LOA), conforme Fig 16.

O maior valor medido deve ser comparado com a Tabela 4, obtida com base na Norma ISO 10816 – 1, editada em 1995

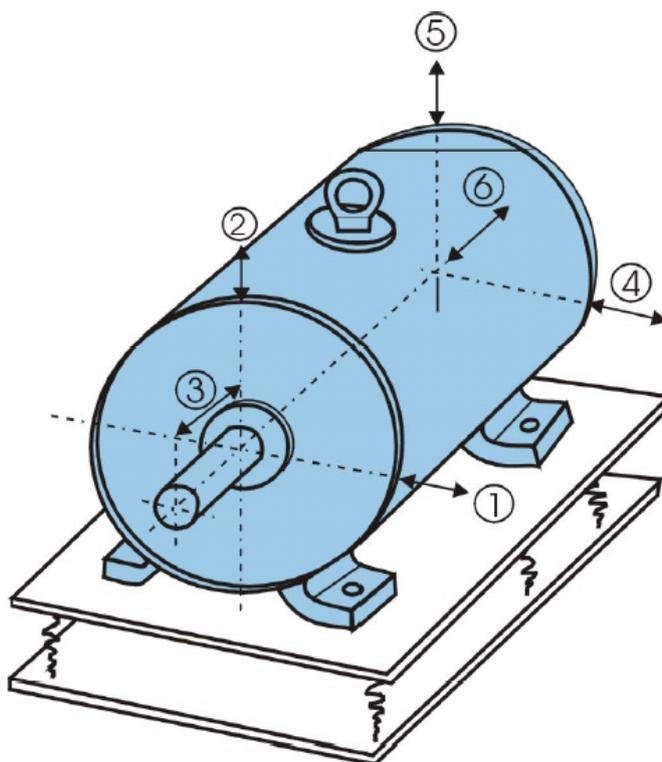


Fig 16 Pontos de medição de vibração

Tabela 4 Limites de vibração de acordo com a faixa de potência do motor

POTÊNCIA DO MOTOR	LIMITE DE VIBRAÇÃO (mm/s) VALOR RMS
Menor que 20 cv	1,8 mm/s
20 cv até 100 cv	2,8 mm/ s
100 cv até 500 cv	4,5 mm/s

Caso algum valor medido supere o valor de tabela, recomenda-se uma análise de vibração para definição da causa do problema.

Durante a operação com o motor desacoplado é importante fazer a medição da corrente nas três fases.

Caso as correntes estejam desequilibradas, calcular o desequilíbrio:

$$DI = \frac{DMD}{MTF} \times 100\%$$

onde:

DI = Desequilíbrio de corrente em percentagem.

DMD = Maior desvio de corrente de fase em relação à média das três fases.

MTF = Média das três fases.

O limite do desequilíbrio de corrente recomendado pela WEG é:

10 % - para motores de 4, 6 e 8 pólos.

20 % - para motores de 2 pólos.

O desequilíbrio pode ter como causa o próprio desequilíbrio da tensão de alimentação ou da impedância dos enrolamentos do motor.

Desequilíbrio de corrente ocasiona um sobreaquecimento nos enrolamentos e redução da vida útil do isolamento por degradação térmica.

3.5.3 Acoplamento Motor – Máquina Acionada

O processo de acoplamento exige um criterioso procedimento de alinhamento executado com relógio comparador ou equipamento a laser. O motor deve estar firmemente fixado à base.

O acoplamento deve ser flexível o bastante para compensar o desalinhamento residual.

As partes do acoplamento devem ser montadas de tal forma que deixe uma folga mínima de 3 mm e que permita o deslocamento (passeio) magnético do eixo, permitindo que o motor trabalhe no centro magnético.

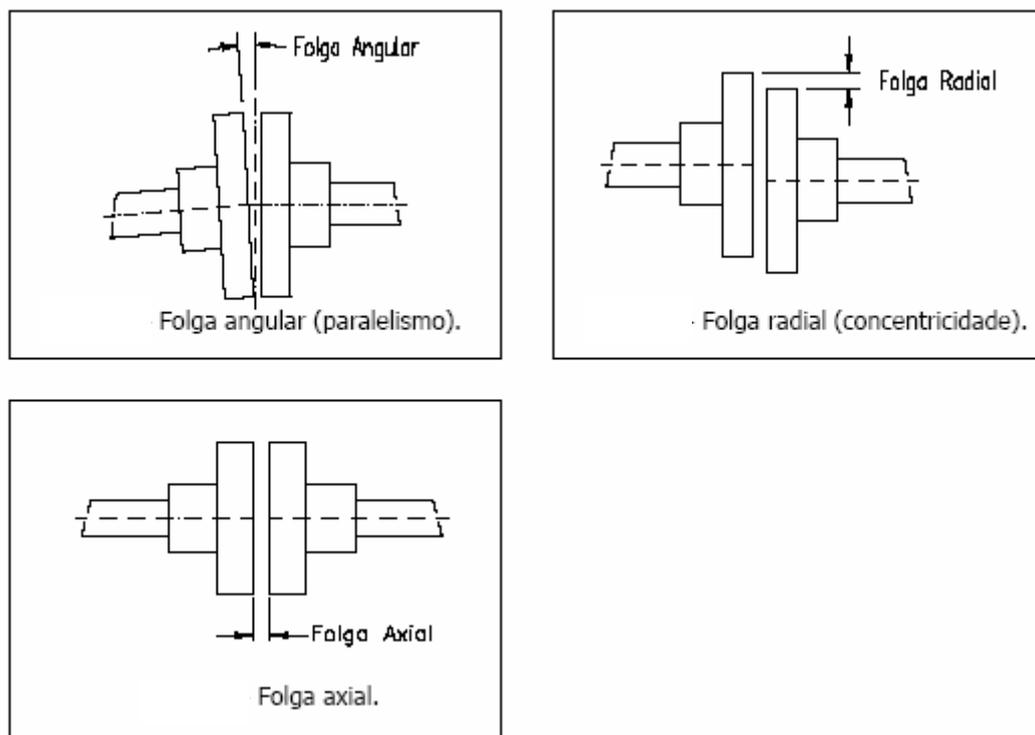


Fig 17 Alinhamento motor - máquina acionada

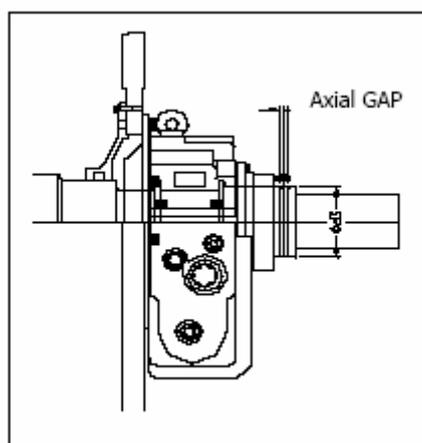


Fig 18 Carcaça do mancal e folga axial

3.5.4 Operação com o Motor Acoplado

O motor acoplado deve ser girado preferencialmente com carga máxima, quando serão novamente verificados os níveis de vibração, as correntes nas três fases e a existência de

rúidos anormais. Em máquinas de grande porte, pode ser importante uma análise das vibrações no espectro de frequência.

Para máquinas acopladas valem os seguintes limites de vibração global (V_{eff} em mm/s).

Tabela 5 Valores de vibração para motores com carga

GRUPO DE MÁQUINAS	BOM	ACEITÁVEL	AINDA ACEITÁVEL	NÃO ACEITÁVEL
GRUPO K Máquinas pequenas. Motores até 15 kW fixadas rigidamente com a fundação.	0 a 0,7 mm/s	0,7 a 1,8 mm/s	1,8 a 4,5 mm/s	> 4,5 mm/s
GRUPO M Máquinas médias. Motores com potência entre 15 e 75 kW fixadas rigidamente com a fundação.	0 a 1,1 mm/s	1,1 a 2,8 mm/s	2,8 a 7,1 mm/s	> 7,1 mm/s
GRUPO G Máquinas maiores. Motores com potência acima de 75 kW sobre fundações rígidas.	0 a 1,8 mm/s	1,8 a 4,5 mm/s	4,5 a 11,0 mm/s	> 11,0 mm/s
GRUPO T Máquinas montadas sobre fundações de frequência manual baixa (apoiadas elasticamente).	0 a 2,8 mm/s	2,8 a 7,0 mm/s	7,0 a 18,0 mm/s	> 18,0 mm/s

Nas máquinas de grande porte devem ser verificadas todas as proteções, instrumentos indicadores e dispositivos de controle.

3.5.4.1 Indicadores e Proteção de Vibração

Observar se os valores de vibração com carga estão dentro dos limites de controle, e se estão compatíveis com os níveis operacionais normais da máquina.

3.5.4.2 Indicadores e Proteção Térmica dos Mancais

A temperatura dos mancais, com o motor operando com carga e após atingir o equilíbrio térmico não deve ser superior a 80 °C. Temperatura superior deve ser investigada.



Fig 19 Sensores de vibração e temperatura de mancal de motor de média tensão



Fig 20 Indicador de temperatura do mancal de motor de média tensão

3.5.4.3 Indicadores e Proteção Térmica dos Enrolamentos

Após o motor atingir o equilíbrio térmico, operando com carga, a temperatura dos enrolamentos não deve ser superior à temperatura de alarme, igual a $\Delta T + 40^{\circ}\text{C}$. Indicação de temperatura superior deve ser investigada.

3.5.4.4 Dispositivos Auxiliares

Observar a correta operação dos dispositivos de lubrificação forçada dos mancais, refrigeração à água do motor e outro circuitos periféricos.



Fig 21 Indicador e pressostatos do sistema de lubrificação dos mancais de motor de média tensão

3.5.5 Inspeção Sistemática

3.5.5.1 Sistema de Alimentação

- Verificar se o valor da tensão está compatível com a nominal ($\pm 10\%$).
- Verificar se as tensões estão equilibradas nas três fases.
- As correntes nas três fases estão equilibradas e são inferiores à corrente nominal?
- O painel de alimentação e componentes (inclusive proteção) estão plenamente operativos?
- A linha elétrica e cabo de alimentação estão em perfeitas condições?

3.5.5.2 Motor

- O motor está rigidamente fixado à base?
- O aterramento da carcaça está efetivo? Os cabos no interior da caixa de ligações estão bem isolados, sem sinais de aquecimento e com o isolamento preservado?
- O interior da caixa de ligações está isento de contaminantes ?
- A carcaça está limpa, sem acúmulo de materiais que comprometam a troca de calor?
- O sistema de ventilação (ventilador, dutos, etc) está funcionando adequadamente?
- Os sensores e indicadores de vibração e temperatura estão instalados corretamente, limpos e os condutores e prensa cabos em boas condições?
- A vibração total do motor está dentro dos valores aceitáveis por normas e os valores estão de acordo com as medições anteriores?
- Os valores das medições de isolamento estão de acordo com as medições anteriores? Os valores garantem uma operação segura?
- Os valores das medições de resistência ôhmica indicam enrolamentos equilibrados?

3.6 INSPEÇÃO EM MÁQUINAS COM ESCOVAS DE CARVÃO

Motores de CA de rotor bobinado, motores de corrente contínua e geradores elétricos utilizam escovas de carvão para transferir energia entre partes móveis e fixas.

As máquinas que utilizam escovas exigem da manutenção um cuidado especial por dois motivos básicos:

-
- Máquinas com escovas exigem da manutenção um esforço muito grande para manter a comutação em boas condições e o motor com uma grande confiabilidade.
 - O pó de escova é um contaminante que, associado com a umidade e óleo, principalmente, reduz muito significativamente a resistência de isolamento dos enrolamentos.

Para que haja uma boa comutação, ou seja, para que o trabalho das escovas sobre o comutador ou anel coletor seja perfeito, é necessário que haja um depósito de grafite sobre sua superfície, denominado filme ou patina.

A formação de um bom filme exige que a escova seja adequada às características operacionais da máquina. Além disto são necessárias condições específicas de umidade, temperatura e rugosidade do comutador ou anel coletor.

A patina é uma camada semicondutora, imprescindível a uma boa comutação que, reduzindo o atrito, reduz o desgaste e geração de pó de escova. Patinas normais tem uma coloração uniforme e uma espessura ideal de 0,3 mm.



P2



P4



P6

Patinas de aparência normal

P2, P4 e P6 - são exemplos de patinas com aparência normal, indicando bom funcionamento.

A patina apresenta-se lisa, ligeiramente brilhante, coloração uniforme desde o bronzeamento, o marron claro (P2), até o marron escuro, podendo ainda conter tonalidade cinza (P6) azuladas, avermelhadas ou outras.

IMPORTANTE É A REGULARIDADE, NÃO A TONALIDADE.



P12

Patinas Anormais

P12 - aspecto: Patina raiada com pistas mais ou menos largas. A cor é alternadamente clara ou escura. Não há desgaste no comutador.

Causas: Alta umidade, vapores de óleo ou de gases agressivos ambientais, baixa densidade de correntes nas escovas.



P14

P14 - aspecto: Patina rasgada, de modo geral como P12, com pistas mais estreitas e ataque ao comutador.

Causas: Como P12, porém, a danificação perdura há tempo.



P16

P16 - aspecto: Patina gordurosa com manchas aperiódicas, forma e cor desuniforme.

Causas: Comutador deformado ou muito sujo.



P22

Patina com manchas de origem mecânica

P22 - aspecto: Manchas isoladas ou com espaçamento regular, apresentando-se em uma ou várias zonas do comutador.

Causas: Ovalização do comutador, vibração da máquina, oriundas do desbalanceamento do rotor ou de mancais defeituosos.



P24

P24 - aspecto: Manchas escuras com bordas definidas, vide também T12 e T14.

Causas: Lâmina ou grupo de lâminas defeituosos que provocam o erguimento das escovas e a consequente perda de contato.



P26

P26 e P28 - aspecto: Lâminas manchadas nas beiradas ou no centro. Causas: Frequentes dificuldades de comutação ou também comutador mal retificado.



P28



P42



P46

Patina com manchas de origem elétrica

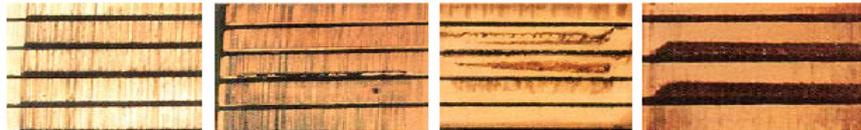
P42 - aspecto: Lâminas alternadamente claras e escuras.

Causas: Desuniformidade na distribuição de corrente em dois bobinamentos paralelos de laço duplo ou, também, diferença de indutância em caso de duas bobinas por ranhura.

P46 - aspecto: Manchas foscas em intervalo duplo - polares.

Causas: Geralmente soldagens defeituosas das conexões auxiliares ou nas asas das lâminas.

QUEIMADURAS



B2, B6 e B8 - aspecto: Queimaduras no centro ou nas bordas lâminas. Causas: Faíscamento proveniente de dificuldades de comutação.

B10 - aspecto: Patina perfurada, formação de pontos claros como densidade e distribuição variados.

Causas: Perfuração da patina com consequência de excessiva resistência elétrica da mesma.



T10



T12



T14



T16



T18

Manchas no comutador

T10 - Manchas escuras reproduzindo à área de contato das escovas.
Causas: Prolongadas paradas desenergizadas ou curtas paradas sobre carga.

T12 - aspecto: Queimaduras nas bordas de saída e na entrada da lâmina subsequente.
Causas: Indica a existência de lâminas salientes (vide L2).

T14 - aspecto: Manchas escuras.
Causas: Indica a existência de lâminas em nível mais baixo (L4), ou de zonas planas no comutador.

T16 - aspecto: Marcas escuras claramente delimitadas conjuntamente com queimaduras nas bordas das lâminas.
Causas: Isolação entre lâminas, mica saliente (vide L6).

T18 - aspecto: Manchas escuras.
Causas: arestas das lâminas mal ou não chanfradas (vide L8).

Desgaste do comutador



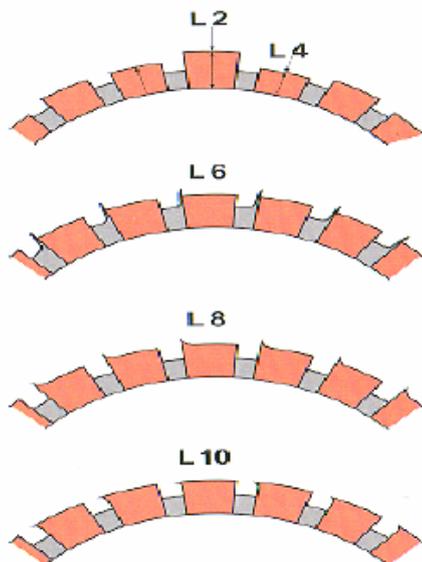
R2

R2 - Desgaste Normal: Aspecto de um comutador mostrando o desgaste do metal, pista por pista, com montagem correta, conseqüente de um desgaste normal após um longo período de funcionamento.



R4

R4 - Desgaste Anormal: Aspecto de um comutador, mostrando desgaste anormal do metal conseqüente da montagem incorreta das escovas (nº de escovas positivas diferentes do número de escovas negativas sobre a pista), ou qualidade inadequada ou ainda poluições diversas.



L2 - LÂMINA SALIENTE

L4 - LÂMINA RETRAÍDA

L6 - ISOLAÇÃO ENTRE LÂMINAS (MICA SALIENTE)

L8 - REBARBA NAS ARESTAS

L10 - COBRE ARRASTADO OU BATIDO

Fig 22 Defeitos nas lâminas

Uma operação adequada da comutação em máquinas de corrente contínua está intimamente ligada às condições dos interpolos e ao funcionamento da comutação com a linha neutra ajustada.

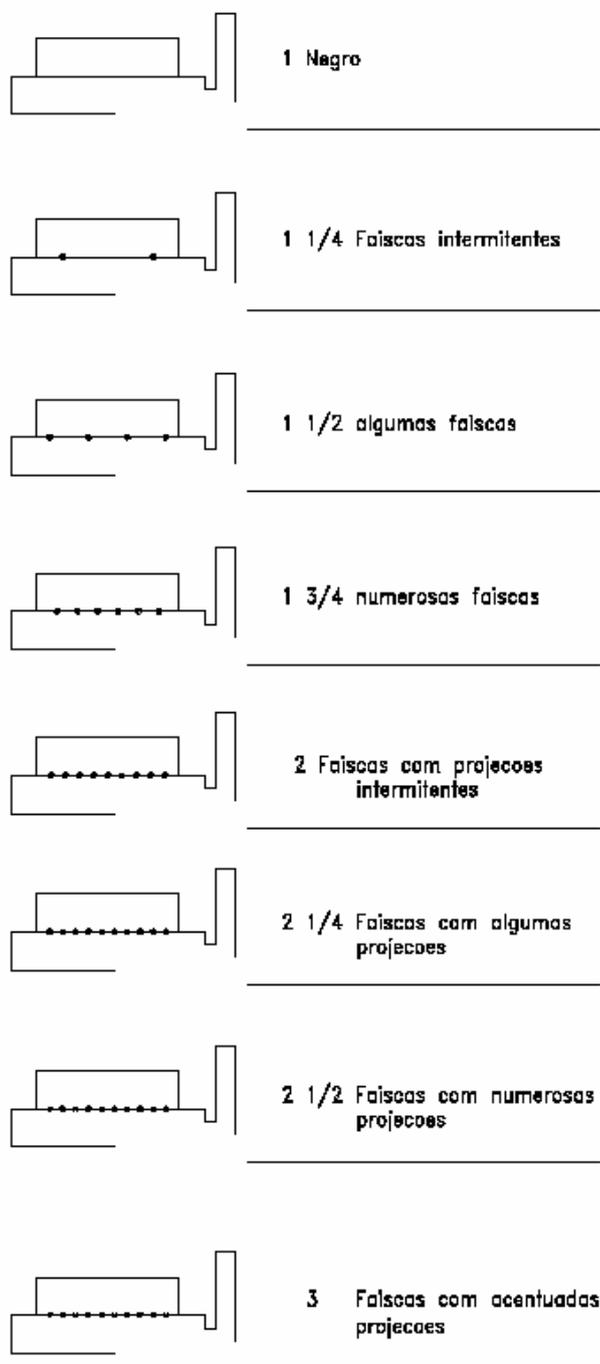


Fig 23 Níveis de faiscamento

Exercem influência na comutação também a pressão das escovas (molas), o nível de assentamento (superfície específica da escova em contato com o comutador) das escovas, a carga aplicada ao eixo (porcentagem do conjugado nominal da máquina) e condições ambientais (vapores químicos).

Uma operação ideal de uma máquina com escovas acontece quando:

1. A patina tem aspecto normal.
2. Não existe faiscamento ou existe faiscamento pouco perceptível em situações de sobrecarga.
3. As escovas têm vida longa e a taxa de formação de pó é mínima.
4. Não existe desgaste perceptível no comutador ou anéis coletores.

3.6.1 Porta Escovas e Escovas

Nem sempre as escovas originais fornecidas pelos fabricantes são as mais indicadas para uma operação confiável.

Os primeiros dias e semanas de operação de uma máquina com anéis devem ser acompanhados pelo inspetor. Se qualquer uma das quatro condições listadas não estiverem atendidas é necessário atuar rapidamente no desenvolvimento de uma outra qualidade de escova.

Esta ação é realizada em conjunto com um técnico da empresa fabricante de escovas de carvão, que de posse de informações de velocidade periférica, densidade de corrente na escova, regime de trabalho e condições ambientais, definirá uma qualidade de escova.

A troca de escovas deve ser precedida da remoção da patina formada pela escova anterior, antes que a nova seja instalada.

Após instalada, o desempenho da nova escova deve ser acompanhado intensamente até a certeza de que a comutação tem um desempenho que propicie uma operação confiável e duradoura da máquina.

Após a instalação de um jogo de escovas é sempre necessário que a superfície das escovas em contato com o comutador ou anéis coletores tenham a mesma curvatura, garantindo, pelo menos, 80% de área de contato.

Um dos métodos mais utilizados para o assentamento de escovas consiste na instalação de uma fita de lixa sobre o comutador ou anel coletor, com o dorso abrasivo voltado para o lado externo em contato com as escovas, montadas no interior do porta-escovas.

O rotor com lixa é posto a girar manualmente, atritando a superfície das escovas contra o abrasivo, até que se atinja o mínimo de 80% de área de contato em cada uma das escovas.

A lixa recomendada deve ter uma granulação em torno de 150. Após o processo o pó de carvão gerado deve ser totalmente aspirado e a limpeza complementada com pano seco.

As escovas devem trabalhar livremente no interior da bainha do conjunto porta-escovas. Para isto é necessário que as medidas interiores das superfícies das bainhas e as medidas das faces das escovas estejam dentro das tolerâncias permitidas.

Tabela 6 Tolerâncias para “t” e “a” em micrômetros e para “r” em milímetros para escovas de grafite natural e metal-grafite

VALORES NOMINAIS	PORTA-ESCOVA (1)			ESCOVA ELÉTRICA (2)			FOLGA		ESCOVA
	t	a		t	a		Máx.	Mín.	r
mm	Máx.	Mín.	Dif.	Máx.	Mín.	Dif.	Máx.	Mín.	
1,6 2 2,5	+ 54	+ 14	40	- 120	- 60	60	174	74	± 0,3
3,2 4 5	+ 68	+ 20	48	-150	- 70	80	218	90	± 0,3
6,3 8 10	+ 83	+ 25	58	- 170	- 80	90	253	105	± 0,3
12,5 16	+ 102	+ 32	70	- 260	- 150	110	362	182	± 0,5
20 25	+ 124	+ 40	84	- 290	- 160	130	414	200	± 0,5
32 40	+ 150	+ 50	100	- 330	- 170	160	480	220	± 0,8
50	+ 150	+ 50	100	- 340	- 180	160	490	230	± 0,8
64	+ 180	+ 60	120	- 380	- 190	190	560	250	± 0,8
80	+ 180	+ 60	120	- 390	- 200	190	570	260	± 0,8
100 125									± 1,0

(1) – As tolerâncias para os porta-escovas são conforme a tolerância E10 da ISO. A verificação dimensional dos porta-escovas é efetuada com o calibrador “passa”, “não passa”.

(2) – As tolerâncias para as escovas são conforme a tolerância b11 da ISO para dimensões > 12,5 mm e c11 da ISO para dimensões < 12,5 mm.

* Tabela extraída da norma ABNT.

ASPECTOS DAS FACES DAS ESCOVAS

	S1 - Aspecto: Superfície impecável, uniforme, brilhante	Boa condição de funcionamento
	S3 - Aspecto: Superfície impecável, levemente porosa, brilhante.	Boa condição de funcionamento
	S5 - Aspecto: Estrias extremamente finas.	Funcionamento normal, leve incidência de pó.
	S7 - Aspecto: Ranhuras	Causas prováveis: subcarga elétrica, presença de pó, contaminação com óleo ou graxa.
	S9 - Aspecto: Pistas com estrias e ranhuras	Causas prováveis: sub-carga elétrica, pó ambiental, contaminação por graxa ou óleo (mais pronunciado que S7).
	S11 - Aspecto: Sombras de comutação, freqüentemente difusas.	Causas prováveis: dificuldades de comutação, por ex.: mau ajuste da zona neutra ou dos pólos auxiliares.
	S13 - Aspecto: Queimaduras nas bordas de entrada ou saída.	Causas prováveis: dificuldades de comutação, forte faiscamento, interrupções de contato causadas por ovalização do comutador ou por pressão insuficiente nas escovas.
	S15 - Aspecto: Formação de crateras.	Causas prováveis: sobrecarga elétrica, interrupções de contato.
	S17 - Aspecto: Estampa das lâminas na superfície.	Causas prováveis: ocorrência de queimaduras geradas por picos de corrente durante a comutação, oriundos de anomalias no bobinamento.
	S19 - Aspecto: Dupla face de assentamento (a figura mostra uma escova gêmea).	Causas prováveis: basculamento das escovas em serviço reversível devido ao excessivo afastamento dos porta-escovas e/ou excesso de folga da escova no alojamento.
	S21 - Aspecto: Depósitos de cobre.	Causas prováveis: incrustações em consequência, por ex.: do arraste de cobre (vide L10).
	S23- Aspecto: Lascamentos.	Causas prováveis: lâminas salientes, forte ovalização do comutador, as escovas trepidam operando em vazio.

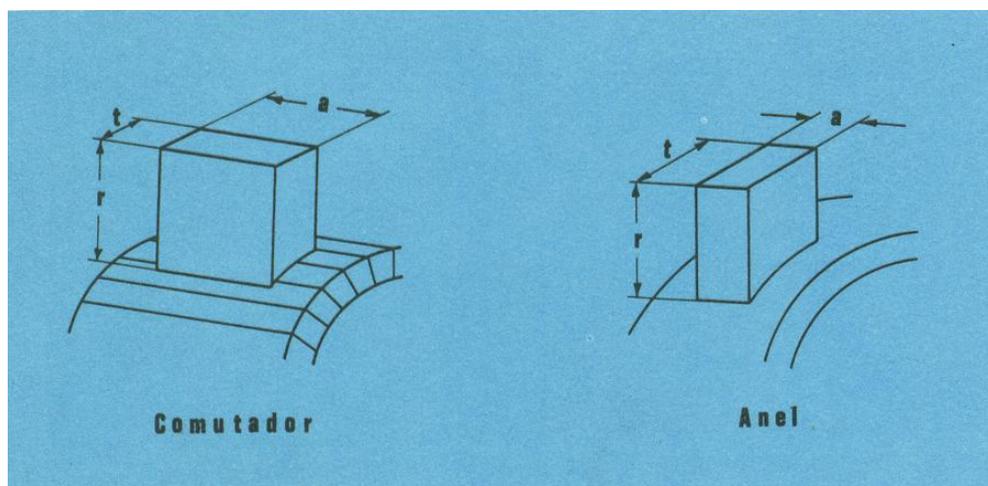


Fig 24 Dimensões de escovas elétricas

t = Dimensão da escova em sentido tangencial.

a = Dimensão da escova em sentido axial.

r = Dimensão da escova em sentido radial.

Escovas e bainhas com dimensões fora das tolerâncias permitidas devem ser eliminadas.

As escovas devem trabalhar com pressões dentro das tolerâncias recomendadas. Todas as escovas devem ter pressões aproximadamente iguais.

Tabela 7 Recomendações de pressão nas escovas para cada tipo de máquina

TIPOS DE MÁQUINAS	PRESSÃO NA ESCOVA
Máquinas estacionárias livres de vibração e ruído	150 a 200 g/cm ²
Anéis deslizantes	170 a 250 g/cm ²
Motores de tração	250 a 570 g/cm ²
Máquinas com alta vibração	até 350 g/cm ²
Motores fracionários	até 450 g/cm ²

A medição da pressão das escovas é realizada com um dinamômetro que mede a força aplicada na escova para se contrapor à força exercida pela mola. Introduce-se uma tira de

papel entre a escova e o comutador, ou anel coletor, para determinar o momento da leitura no instante em que o papel é arrastado, com leve tração exercida pela mão.

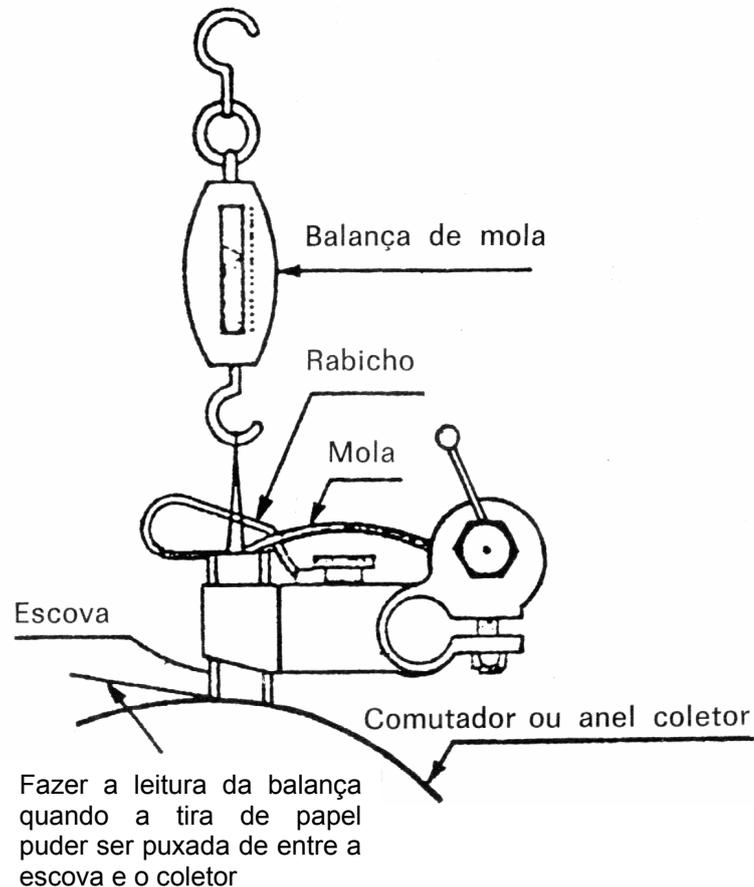


Fig 25 Medição de pressão na escova

Todas as escovas instaladas em um comutador ou anéis coletores devem ter a mesma qualidade (granulometria).

O comprimento das escovas é um item de inspeção e controle da qualidade da comutação e da confiabilidade operacional da máquina. Medir o comprimento das escovas, registrar as medições, trocar as escovas quando o comprimento atingir valores mínimos garantidos para a operação e controlar o desgaste das escovas em *mm/mês*, é importante para garantir uma vida longa com confiabilidade para a máquina. Um aumento do desgaste das escovas sem uma correspondente alteração operacional que o justifique, deve ser motivo de averiguações e de ações para que a qualidade da comutação seja reconstituída.

É muito comum a operação de motores elétricos com carga reduzida e conseqüente baixa densidade de corrente nas escovas. Na maioria das vezes uma máquina nestas condições não consegue produzir uma boa patina e a má comutação conduz a um filetamento

(raimento) do comutador com comprometimento de sua vida útil, devido à necessidade de usinagens freqüentes.

Uma das soluções, normalmente adotada, para aumentar a densidade de corrente para melhorar a comutação, é a redução do número de escovas.

Toda pista deverá ser percorrida por escovas positivas e negativas, sempre em igual número. Pista é a faixa que uma escova determina sobre o comutador quando este está em movimento, tendo a largura igual à largura da escova.

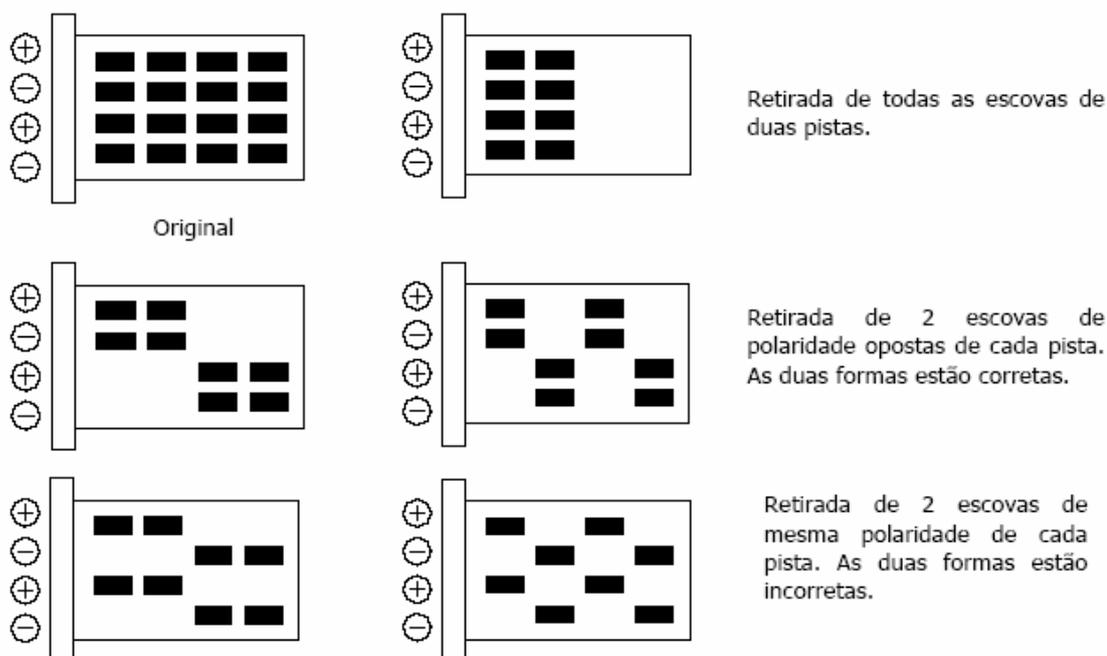


Fig 26 Disposições corretas e incorretas de escovas ao longo do comutador

Os porta-escovas devem ficar dispostos paralelamente às lâminas do comutador. A distância entre a face inferior do porta-escova e o comutador deve estar compreendida entre 1,5 e 2,0 mm.

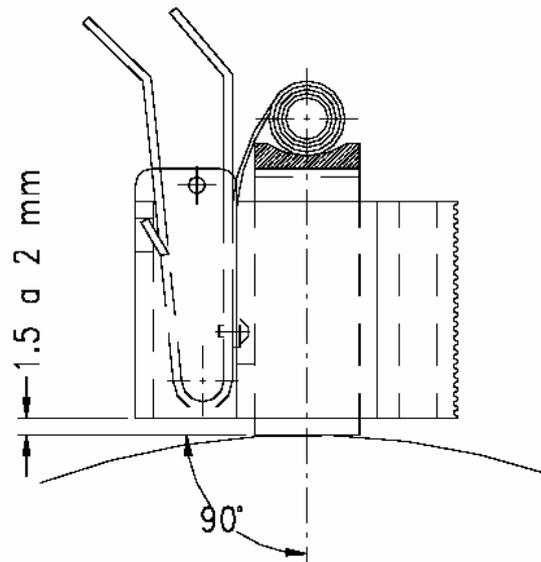


Fig 27 Distância da bainha ao comutador ou anel coletor

3.6.2 Comutadores e Anéis Coletores

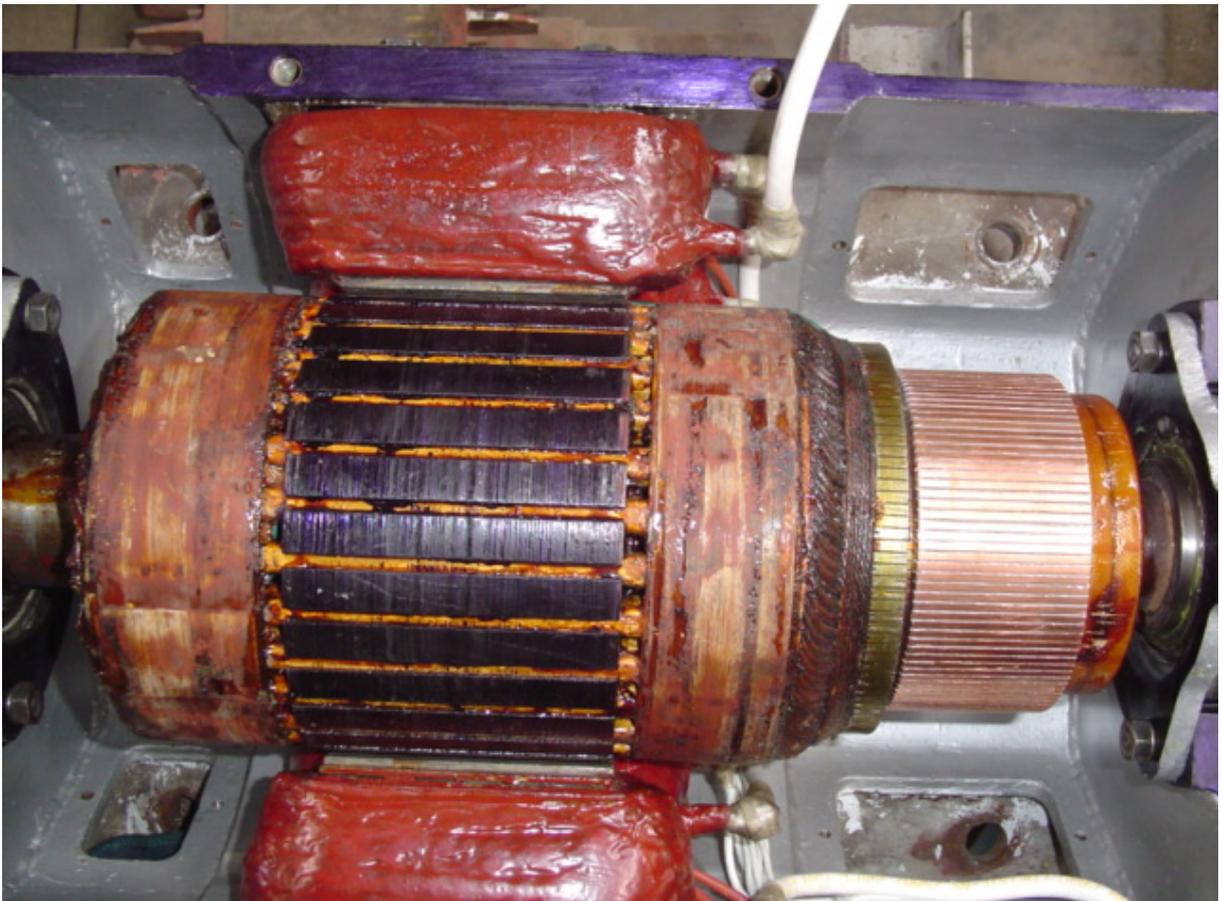


Fig 28 Vista interna de um motor de corrente contínua com comutador em primeiro plano

A inspeção de comutadores e anéis coletores deve compreender:

A excentricidade total não deve superar os $20\mu\text{m}$ e a diferença entre lâminas adjacentes deve ser inferior a $2\mu\text{m}$.

A alta excentricidade ocasiona uma dificuldade da mola em manter a escova em contato com o comutador, conduzindo ao centelhamento e à baixa qualidade da comutação. A solução passa pela usinagem do comutador ou anel coletor.

O controle da altura da mica e seu rebaixamento é um item importante de inspeção. Quando a mica está alta ou após usinagem, deve-se proceder o rebaixamento da mica com uma ferramenta cortante a uma profundidade de cerca de 1mm a 1,5 mm.

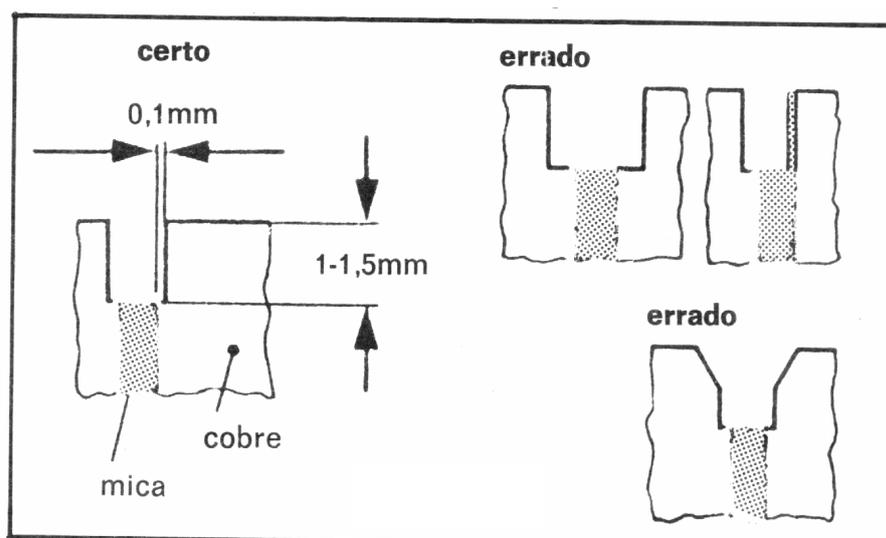


Fig 29 Rebaixamento da mica do comutador

As lâminas de cobre do comutador não podem operar com quinas vivas (ângulo de 90°). As quinas devem ser chanfradas com ângulos variáveis entre 60° e 90° , Fig 31.

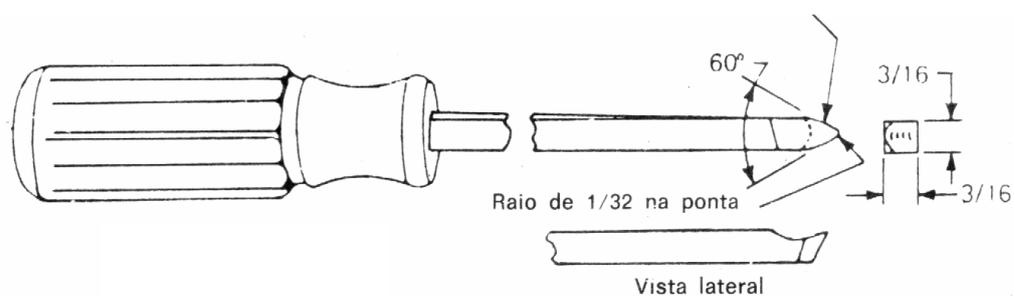


Fig 30 Ferramenta para desgaste de cantos

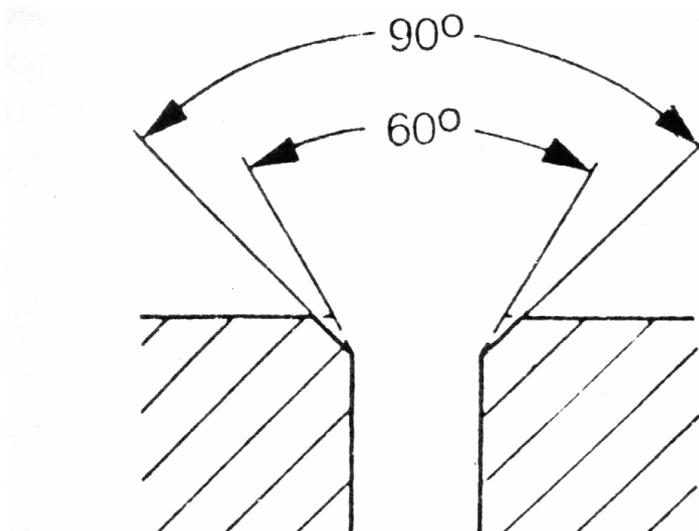


Fig 31 Valores limites do ângulo de chanfro dos cantos

A comutação é influenciada pela vibração da máquina. Altos valores de vibração provocam o trepidamento das escovas, prejudicando a qualidade da comutação.

3.6.3 Interpolos e Linha Neutra

A má qualidade na comutação pode estar associada aos defeitos no circuito dos interpolos e a operação fora da linha neutra.

Defeitos nos interpolos podem estar associados a curto-circuito nas bobinas ou erro de ligação.

A verificação do ajuste da linha neutra pode ser realizada da seguinte maneira (recomendações WEG).

Ajuste grosso

- Afrouxar os parafusos que fixam o anel do porta-escovas
- Energizar a armadura (50 a 80% da corrente nominal por no máximo 30s), com o campo desligado. Se a zona neutra estiver desajustada, o rotor irá girar. Gira-se o anel dos porta escovas em sentido contrário ao sentido de giro do rotor.
- A zona neutra estará ajustada, quando o rotor ficar parado.

Ajuste Fino

Energizar o campo e a armadura com tensão nominal e corrente nominal nos dois sentidos de rotação. A diferença de rotação não poderá ser maior que 1%.

IMPORTANTE:

Se ao girar o anel do porta-escovas para a direita o rotor girar ao contrário, os cabos dos pólos de comutação que são ligados aos porta-escovas estão invertidos. Ligar corretamente os cabos e proceder ajuste grosso da zona neutra novamente.

3.7 PRINCIPAIS CAUSAS DE FALHAS DE MÁQUINAS ROTATIVAS DE CORRENTE ALTERNADA



Fig 32 Motor de média tensão de 13,2 kV

3.7.1 Introdução

As falhas em máquinas elétricas rotativas têm como consequência, danos aos enrolamentos.

Os principais fatores de falha são os seguintes:

- Especificação incorreta da máquina para as condições reais de operação.
- Falhas de fabricação e de reparação das máquinas, tais como na fabricação de materiais, processos e falhas de mão de obra.
- Inexistência, erros de calibração e de especificação dos dispositivos de proteção.
- Falhas ou exageros de operação.
- Manutenção inadequada ou inexistente

Os fatores acima estão, em maior ou menor intensidade, presentes na quase totalidade das instalações com máquinas elétricas.

Estes fatores conduzem à condição de falha através de quatro causas principais:

- Rolamentos (mancais)
- Contaminação por agentes agressivos
- Degradação térmica do material isolante
- Abrasão mecânica

3.7.2 Rolamentos (Mancais)

Desgaste acentuado nos mancais das máquinas elétricas rotativas pode ocasionar a fricção entre rotor e estator e sobreaquecimento devido ao atrito.

As partes atritadas se apresentarão com aspecto polido ou, em casos extremos azulados, devido ao aquecimento. A isolação se apresentará danificada pelo calor na área de roçamento, freqüentemente com curto entre espiras e para a massa. Com freqüência, este tipo de defeito provoca, além da queima do enrolamento, danos ao eixo, tampas e pacote magnético, levando muitas vezes ao sucateamento da máquina.

3.7.3 Contaminação por Agentes Agressivos

Nenhuma máquina, por mais estanque que seja, está livre de contaminantes em seu interior.

Óleo, poeira, umidade, vapores químicos, etc, penetram no interior da máquina através de lubrificações mal conduzidas, fendas na carcaça, ou simplesmente através do ar ambiente, no processo de contração e dilatação do ar, em função das variações de temperatura e pressão no interior da máquina.

Em geral a atmosfera industrial está carregada destes contaminantes, em especial na faixa litorânea, onde a umidade relativa do ar é muito elevada.

Estes contaminantes penetram no sistema isolante, agredindo física e quimicamente o material, formando caminhos de menor resistência de isolamento, elevando as correntes de fuga e as perdas dielétricas, até a falha do isolamento e da máquina.

Várias medidas podem ser adotadas para impedir ou retardar este processo de degradação do isolamento:

- Utilização de máquinas totalmente fechadas.
- Especificação detalhada dos contaminantes presentes, de forma que o fabricante ou reparador possa desenvolver uma impregnação que resista a estes contaminantes.

-
- Acompanhamento da evolução da contaminação do isolamento através das medições sistemáticas de resistência de isolamento. O índice de polarização (IP) é de valor inestimável e rejuvenescimento dos enrolamentos quando a contaminação atingir níveis que possam comprometer o isolamento do motor.

3.7.4 Degradação Térmica

Os materiais isolantes são agrupados em classes térmicas estabelecidas em norma, que são basicamente, as seguintes:

CLASSE A – 105^oC
CLASSE E - 120^oC
CLASSE B - 130^oC
CLASSE F - 155^oC
CLASSE H - 180^oC
CLASSE C - 220^oC

A quase totalidade das máquinas modernas utiliza materiais isolantes das classes “B”, “F” e “H”.

Um material isolante, classificado dentro de uma classe térmica, é capaz de suportar a temperatura limite da classe, por um tempo definido, sem que as suas propriedades isolantes fiquem prejudicadas.

Quando este isolante é submetido a temperaturas superiores a de sua classe térmica, os efeitos da deterioração de suas propriedades dielétricas e mecânicas far-se-ão sentir num período de tempo menor.

Os efeitos da temperatura sobre os isolantes são função do tempo de exposição ao calor.

A figura abaixo mostra o tempo de vida de um isolante em função da temperatura.

Vida Útil (horas)

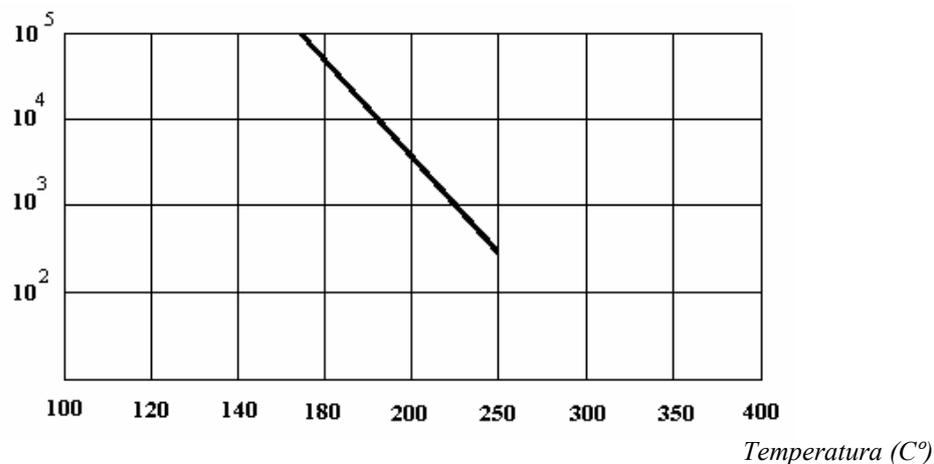


Fig 33 Redução da vida útil do isolante em função da temperatura

Em geral, a cada 10 graus de sobre-temperatura a vida útil do isolante fica reduzida à metade.

Durante o funcionamento, as máquinas elétricas liberam calor que é transferido para o meio ambiente através da carcaça.

Os motores são projetados para, em condições normais, terem uma elevação de temperatura, no ponto mais quente, de um certo valor acima da temperatura ambiente (40 °C pela ABNT), conhecido como variação de temperatura da máquina.

Escolhe-se então a classe térmica do material, igual ou superior à temperatura do ponto mais quente da máquina.

Em condições normais de operação os materiais isolantes vão ficar submetidos a uma temperatura inferior à de sua classe térmica, de forma que a deterioração térmica se dará em período de tempo muito longo, da ordem de anos e até décadas.

Entretanto, algumas condições anormais de operação dão origem a um aumento das perdas da máquina ou à redução da dissipação do calor gerado, aumentando a temperatura no enrolamento e a redução de sua vida útil.

A manutenção elétrica deve conhecer estas condições, identificá-las através de ações preventivas, corrigindo-as antes que levem as máquinas a falhas de isolamento.

3.7.4.1 Falta de Fase (Operação em Duas Fases)

Se uma fase de um motor elétrico trifásico, em funcionamento, for interrompida, o motor tentará manter-se em funcionamento, mesmo com torque reduzido, em função da alimentação monofásica.

Se o conjugado máximo do motor for superior ao conjugado resistente da carga, o motor continuará funcionando, caso contrário, irá parar.

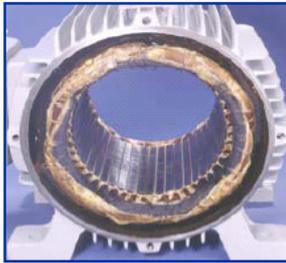
Se o motor estiver parado e for energizado com duas fases, não rodará, por falta de conjugado de partida.

Em todas estas condições, o motor estará submetido a condições de sobretemperatura em função das altas correntes circulando nos enrolamentos, salvo casos especiais em que o conjugado da carga é tão baixo que as correntes absorvidas pelo motor permanecem inferiores às correntes nominais.

Os motores deverão estar protegidos por relés térmicos com características de proteção contra falta de fase ou dispositivos sensores de temperatura no enrolamento do motor (termistores ou protetores térmicos), ou ainda relés de sequência negativa.

A identificação de um isolamento queimado por sobretemperatura em função de falta de fase é muito fácil:

- Motores ligados em estrela: dois grupos queimados, seguidos de um em bom estado e assim sucessivamente.
- Motores ligados em triângulo: um grupo queimado, seguido de dois outros em bom estado e assim sucessivamente.



a) Uma fase de enrolamento queimada

Este dano ocorre quando o motor trabalha ligado em triângulo e falta corrente numa fase. A corrente sobe de 2 a 2,5 vezes no enrolamento restante ao mesmo tempo em que a rotação cai acentuadamente.



b) Duas fases de enrolamento queimadas

Este defeito ocorrerá se faltar corrente num condutor da rede e o enrolamento estiver ligado em estrela. Uma das fases fica com $I = 0$ enquanto as outras duas absorvem toda a potência elevando suas correntes absorvidas.

Fig 34 Danos causados ao enrolamento

3.7.4.2 Sobrecarga Mecânica

É uma condição anormal em que o conjugado resistente da carga é maior que o conjugado nominal do motor, continuamente, ou em ciclos, de forma que as temperaturas do enrolamento excedem aquelas estabelecidas em projeto.

Para evitar que essas sobrecargas levem à redução da vida útil e à queima prematura do motor, os relés térmicos (ou os protetores no enrolamento) devem estar bem ajustados e aferidos.

Toda operação dos dispositivos de proteção deve ser acompanhada através de medições de correntes absorvidas pelo motor e comparadas com a corrente nominal. Corrente de operação acima da nominal pode ser uma evidência de sobrecarga mecânica.

A operação de motores com tensões inferiores à nominal pode ocasionar sobrecorrentes capazes de provocar sobretemperaturas no motor.

A queima por sobretemperatura é característica e o enrolamento se apresenta com os condutores uniformemente enegrecidos e a isolamento quebradiça, podendo ter evoluído para curto entre espiras, fase-terra ou fase-fase em função da falha de isolamento, Fig 35.



Fig 35 Queima por sobrecarga

3.7.4.3 Rotor Travado

É um caso particular de sobretemperatura que acontece quando da partida de um motor, por um tempo prolongado, em razão do travamento da máquina acionada, do próprio motor ou ainda em condições de falta de fase ou tensões reduzidas, etc.

A partida de um motor de indução, rotor de gaiola, é muito delicada em função da alta corrente – as perdas são proporcionais ao quadrado da corrente (I^2R) – e da precariedade da ventilação, em função das baixas velocidades.

Os tempos máximos permissíveis de rotor travado não passam de *20 segundos* para os motores mais modernos.

Em caso de rotor travado, o relé térmico e os protetores de temperatura no enrolamento devem desligar o motor antes que o isolamento venha a falhar.

Os dispositivos de proteção devem estar aferidos e ajustados para operar antes da degradação e falha do isolamento.

O aspecto visual de um enrolamento de um motor queimado por rotor travado é similar ao da queima por sobrecarga, Fig 36.



Fig 36 Queima por rotor travado

3.7.4.4 Temperatura Ambiente Acima de 40 °C

Motores operando com carga próxima à nominal, em locais com temperatura ambiente superiores a 40 °C, podem estar com o isolamento submetido a sobretemperatura.

Entretanto, nestes casos, o relé térmico não será capaz de proteger adequadamente o motor.

O aspecto do enrolamento queimado assemelha-se ao dos casos anteriores.

Os motores não especificados para esta condição devem ter o seu sistema isolante trocado para uma classe de maior temperatura.

Os motores novos devem ser adquiridos com informações de que a temperatura ambiente excede os 40 °C.

3.7.4.5 Partidas Sucessivas

Partidas sucessivas podem levar os enrolamentos a temperaturas muito altas, comprometendo a vida dos materiais isolantes.

Os intervalos entre partidas devem ser suficientemente longos para permitir a dissipação do calor gerado durante a aceleração do motor.

A norma NBR 7094 determina um regime de partida mínimo que os motores devem suportar:

- A frio, duas partidas sucessivas, com retorno ao repouso entre as partidas.
- A quente, uma partida após ter funcionado nas condições nominais.
- Uma partida suplementar será permitida somente se a temperatura do motor, antes da mesma, não exceder à temperatura de equilíbrio térmico sob carga nominal.

O número máximo de partidas permissível para um motor, por unidade de tempo, é difícil de ser calculado, em função do número de variáveis envolvidas: conjugado líquido de aceleração, potência requerida do motor e momento de inércia do motor e da carga.

Na especificação de motores para acionamento de cargas que requeiram um número elevado de partidas, reversões, com ou sem frenagem, etc, deve ser indicado a seqüência de funcionamento do motor e as potências exigidas pela carga ao longo do ciclo de trabalho.

3.7.4.6 Roçamento Rotor-Estator

Desgastes acentuados nos rolamentos podem ocasionar a fricção entre rotor e estator e sobreaquecimento, devido ao atrito.

As partes atritadas se apresentarão com aspecto polido ou, em casos extremos, azulados, devido ao aquecimento. A isolação se apresentará danificada pelo calor na área de fricção, freqüentemente com curto entre espiras e para a massa.

A audição sistemática do ruído dos rolamentos com estetoscópio ou a medição de vibrações nos mancais das máquinas podem reduzir a zero a ocorrência deste tipo de falha.

3.7.4.7 Tensões Anormais

Os motores de indução devem funcionar satisfatoriamente bem, dentro das condições de potência nominal, se as tensões elétricas em seus terminais não diferirem da tensão nominal, em mais ou menos 10%, com freqüência nominal.

Um motor operando próximo a potência nominal, com tensões fora do limite de 10%, pode estar com o seu isolamento submetido à sobretemperatura.

Em geral, as tensões nos terminais dos motores são inferiores às nominais. Na maioria dos casos isto se deve à especificação de transformadores com tensão secundária igual à nominal dos motores. As quedas de tensões no próprio transformador e nos cabos condutores reduzem a tensão a valores substancialmente inferiores às tensões de placa dos motores.

As tensões desbalanceadas provocam a circulação de correntes desiguais nos enrolamentos.

O efeito da tensão desbalanceada em motores trifásicos de indução é equivalente ao aparecimento de uma tensão de seqüência negativa com sentido de rotação oposto ao da tensão balanceada. Esta tensão de seqüência negativa produz um fluxo rotativo contrário à rotação do motor, acarretando altas temperaturas nos enrolamentos.

O percentual de desbalanceamento da tensão é calculado pela fórmula:

$$\% = \frac{\text{Desvio máx. da tensão da rede}}{\text{Tensão média}}$$

A percentagem de desbalanceamento não deve ser superior a 1% durante períodos prolongados, ou 1,5% durante curtos períodos.

Um desbalanceamento de tensão de 2% ocasionará uma elevação de temperatura na fase de maior corrente em torno de 8%. Em geral, a elevação de temperatura média do enrolamento, percentualmente, é um pouco menor que duas vezes o quadrado do desbalanceamento percentual.

A manutenção deve mapear, através de medições e registros, as tensões em todos os barramentos dos Centros de Controle de Motores e nos terminais dos motores mais próximos e distantes destes CCM's, corrigindo os desbalanceamentos e os níveis de tensões muito diferentes do nominal.

3.7.5 Abrasão Mecânica

A abrasão mecânica ou vibração do enrolamento é causada pela movimentação relativa entre espiras de uma bobina, entre bobinas, entre bobinas e núcleo, bobinas e estecas e bobinas e amarrações.

As forças envolvidas são de natureza eletrodinâmica e proporcionais ao quadrado da corrente.

A vibração tem uma frequência igual ao dobro da frequência da rede, ou seja, 120 hertz.

Durante a partida dos motores, quando a intensidade da corrente é algumas vezes superior à corrente nominal, a intensidade das forças pode superar em 60 vezes a força em condições de regime.

Nos motores que operam com partidas frequentes, deve-se tomar cuidados especiais com a rigidez do enrolamento.

Quando um motor em que os condutores estão soltos, entra em funcionamento, as bobinas e os condutores, individualmente, vibram no interior e nas cabeças de bobinas, desenvolvendo-se uma abrasão, por fricção mecânica, do material isolante.

À medida que ocorre a movimentação e a abrasão, as folgas aumentam, permitindo um maior grau de liberdade dos condutores, aumentando a amplitude de vibração. A abrasão provoca a fadiga do material isolante dos condutores, do isolamento das ranhuras e das cabeças de bobinas, nas regiões das amarrações.

Este tipo de falha ocorre tanto em motores de fio redondo, como nos de fio retangular.

Para evitar falhas deste tipo, deve-se tomar muito cuidado com a amarração das bobinas, enchimento das ranhuras e estecagem, escolha do verniz a ser empregado e do processo de cura do impregnante.

As falhas produzidas por abrasão podem conduzir a curto circuitos entre espiras, fase-fase e fase à massa.