

ESTUDO DA TROCA TÉRMICA DO MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO ASSÍNCRONO DE CORRENTE ALTERNADA

(STUDY OF THE THERMAL EXCHANGE OF THE THREE-PHASE ELECTRIC ASYNCHRONOUS ALTERNATING CHAIN ENGINE)

J. B. R. S. Lima e A. Cavalli

Centro Universitário Padre Anchieta

hot.reis@hotmail.com

Resumo

O motor elétrico assíncrono trifásico é destinado à transformação de energia elétrica em energia mecânica, e sua importância é vista em diversos segmentos da indústria. Seu desempenho está ligado diretamente às condições de seus componentes, que suportam e transferem a energia perdida em calor. Esta perda foi medida junto ao componente mecânico rolamento, na presença e ausência de seu fluido lubrificante. Tal conhecimento sobre fenômenos físicos de transferência de calor em motores elétricos pode contribuir para o avanço de sua eficiência, pelo correto diagnóstico de manutenção, prevendo e evitando aumento dos custos com falhas mecânicas agregadas a outras.

Palavras-chave: Motor elétrico assíncrono trifásico. Rolamento. Fluido lubrificante.

Abstract

The three-phase asynchronous electric engine is meant for the conversion of electrical energy into mechanical energy, its importance is seen in several industry follow-ups. Its performance is directly linked to the conditions of its components that support and transfer the energy lost in heat. This loss has been measured within the bearing, a mechanical component, in the presence and in the absence of its lubricating fluid. Such knowledge on physical phenomena of heat transference in electric engines can contribute to the advance of its efficiency, to the correct diagnosis of maintenance, foreseeing and preventing cost increase with mechanical failures combined to others.

Keywords: Three-phase asynchronous engine electric. Bearing. Lubricating fluid.

Introdução

As informações aqui apresentadas são baseadas em condições reais de operação de um motor elétrico trifásico assíncrono que trabalha acoplado a uma bomba de transporte de água tratada, que foi submetido a ensaios para qualificar a importância da utilização correta do fluido lubrificante; este último é aplicado ao componente rolamento e tem por finalidade a redução do atrito (entre as suas esferas e entre as pistas de contato) e conseqüentemente a conservação da temperatura em números que não prejudiquem o rendimento do motor.

Atualmente, o motor elétrico é um equipamento essencial para qualquer sociedade que almeje destaque na área tecnológica e industrial, ele que tem por objetivo a transformação de energia elétrica em energia mecânica, sendo este princípio responsável por grande parcela do salto de desenvolvimento da industrialização das nações. O motor elétrico trifásico de corrente alternada é um equipamento de ação rotativa, o qual se subdivide em dois grupos, que são: síncronos e assíncronos. (*Catálogo de motores WEG, 2004*). A característica principal de um motor assíncrono é o fato de ele ter velocidade constante. O motor assíncrono é composto fundamentalmente por duas partes: o estator (corpo indutor) e o rotor (corpo induzido) (*Catálogo de motores WEG, 2004*). Somente o estator é ligado à linha de energia elétrica (quando do tipo gaiola, como neste trabalho); o estator é composto pela carcaça, por chapas de material ferromagnético e pela bobina trifásica; já o rotor é um conjunto de chapas sem isolamento e ligado aos anéis contra curto-circuito. O núcleo de chapas possui uma geometria projetada a fim de diminuir as perdas das interações eletromagnéticas com o ferro, é confeccionado de aço tratado termicamente com o objetivo de melhorar as características magnéticas. A bobina trifásica ou corpo indutor se caracteriza por ter três conjuntos de bobinas para cada fase, formando o circuito pelo qual passa a corrente elétrica. O rotor ou indutor é composto pelo eixo, núcleo chapeado, barras e anéis contra curto-circuito. O eixo de transmissão de energia mecânica tem tratamento para suportar tensões de torção, flexão e fadiga. O núcleo chapeado possui as mesmas características do núcleo do estator. As barras e anéis contra curto-circuito de motores assíncronos tipo gaiola são feitas de alumínio injetado sob pressão em uma peça unitária. As linhas centrais deste indutor formam pólos que estão posicionados a 120° entre eles. Todos os motores elétricos atuais possuem sistema de resfriamento para trabalhar em temperatura definida; tal sistema é composto de ventoinha e aletas; outros ainda podem se utilizar de refrigeração por circuito hidráulico. De forma geral, o motor elétrico trifásico é o equipamento mais comum para diversas aplicações pela sua construção modesta em materiais e número de componentes, pela sua versatilidade e por seu baixo custo.

Os principais mecanismos de transferência de calor em um motor elétrico são a condução e a convecção natural e forçada. Roma⁷ define a condução como o mecanismo de transferência de calor que transfere a energia térmica através de um meio por transferência de energia vibracional das moléculas, isto é, o calor atravessa o meio sem levá-lo consigo. O mesmo autor⁷ define a transferência de calor por convecção como a transferência de energia que é carregada pelo meio, ou seja, a convecção acontece quando o calor é transferido com o auxílio da translação molecular, por exemplo: quando se aquece água em uma panela, o calor passa pela parede de alumínio por condução, enquanto o calor é transferido para a superfície superior da água por convecção, com auxílio das bolhas de vapor de água que possuem menor densidade e maior temperatura que a água líquida. (ROMA, 2003).

O motor é construído de forma a funcionar em regime permanente em uma temperatura máxima inferior à da degradação do verniz isolante dos cabos da bobina. Caso não ocorra a troca térmica entre o motor elétrico e o meio ambiente, a temperatura aumentará até atingir um valor superior ao de degradação do verniz, causando curto-circuito e interrompendo seu funcionamento. Os motores elétricos usam diversos dispositivos para melhorar a taxa de transferência de calor, como é o caso da ventoinha e das aletas. A ventoinha é responsável pelo mecanismo de transferência por convecção forçada, soprando o ar entre as aletas da carcaça, funcionando como um impelidor do fluxo de ar interferente na parede externa do equipamento, sendo projetada contra a tampa protetora e refletora posicionadas na parte externa da carcaça L.O.A. (lado oposto ao acoplamento). As aletas são superfícies estendidas que melhoram a troca de calor aumentando a área de contato entre a carcaça e o meio ambiente, por aumento de área, consegue-se assim maior dissipação do calor, causadas no sistema.

As principais fontes de calor são o efeito Joule, ocasionado pela corrente elétrica da bobina, e o atrito dos rolamentos nos mancais. O atrito mecânico que ocorre nos rolamentos pode ser reduzido utilizando-se óleos lubrificantes que atenuam a interferência deste contato. Segundo Young⁶, “o atrito molhado é sempre menor que o atrito seco entre mesmas superfícies de contato”. (YOUNG, 2003).

As propriedades de maior importância nestes óleos são a viscosidade e a temperatura de degradação (ROMA, 2003). Assim, a escolha da viscosidade deve ser feita levando-se em consideração a temperatura de funcionamento do equipamento. Contudo, com o passar do tempo, o fluido perde sua capacidade lubrificante por evaporação do óleo e pelo surgimento de partículas sólidas dos emulsificantes e aditivos, que são resíduos de carbono não volátil. (BIRD, 2004).

O bom funcionamento do motor depende de o óleo lubrificante ainda possuir suas características originais ou pelo menos na faixa de trabalho especificada pelo seu fabricante. A outra fonte de calor

(efeito Joule) é causada pela corrente elétrica. Segundo Sonntag, num material condutor, “a corrente elétrica é ocasionada por elétrons que pulam da camada de valência para a camada de condução, estes elétrons são denominados elétrons livres”. (SONNTAG, 2003, p. 84-90).

O elétron se desloca por um comprimento denominado livre caminho médio e depois decai para a camada de valência de outro átomo; neste processo, devido à resistividade elétrica do material, a qual é pequena, mas presente em materiais condutores, há um aquecimento do fio. A taxa de geração de calor pela corrente elétrica foi deduzida por Joule e recebeu seu nome. Esta lei relaciona a potência elétrica com a potência térmica; em outras palavras, relaciona a taxa de dissipação de calor devido ao produto da corrente e a diferença de potencial do fio entre dois pontos. Muito pouco se pode fazer para diminuir o calor dissipado desta forma, apenas se pode escolher um material que seja bom condutor elétrico e ventilar sua superfície de modo a diminuir a temperatura da camada de aderência.

A principal perda associada à energia mecânica em motores elétricos trifásicos assíncronos é a dissipação de calor gerado pelo atrito entre as partes girantes do motor. Manutenções corretivas não programadas, programadas ou preventivas são realizadas para troca dos lubrificantes, alinhamento de grupo girante e/ou substituição de peças e limpeza do motor. A periodicidade de manutenção é ditada pelo fornecedor do equipamento, então não leva em conta as condições de uso do motor elétrico.

O período de manutenção seria mais bem calculado com o acompanhamento do uso do motor em seu local de trabalho; as manutenções que podem ocorrer neste tipo de equipamento são as seguintes: manutenções corretivas – este modelo de manutenção é sempre indesejável em uma empresa, pois se trata de paradas para reparos em horas esporádicas e que elevam os custos de reforma por causar danos graves ao equipamento com longos períodos de indisponibilidade, ainda assim, pode ser programada ou não sua execução. Já as manutenções preventivas ganharam muitos adeptos por se tratar de atendimento que tem como objetivo principal evitar uma quebra em hora indesejada, com informações colhidas com antecedência; consegue-se atuar de forma precisa sobre oscilações ou variações, desde que acompanhadas com padrões, promovendo-se paradas em horários convenientes, com menores custos e maior confiabilidade em relação a sua qualidade. Um ponto muito importante deste último modelo de manutenção é que para seu êxito é necessária a utilização conjunta de outra ferramenta, a manutenção preditiva, esta que é responsável por apontar os exatos locais que requerem atenção, isso, claro, se estiverem com desvios de números considerados padrões para tal equipamento, sendo esse o objetivo de interesse deste trabalho.

A falta de manutenção do motor causa perda de sua eficiência, gerando mais gastos com manutenção e conseqüentemente um maior custo da produção. Medidas da temperatura do motor são

úteis na edição de um plano de manutenção que leva em conta as condições de uso do motor. Medir a temperatura em várias partes do motor pode também indicar qual o tipo de manutenção que é necessária, ou ainda elaborar formas de construção que diminuam a resistência ou aumentem a transferência do calor gerado. Assim, as manutenções deixam de ser periódicas ou esporádicas e apenas ocorrerão quando forem necessárias, e, ainda, a manutenção pode ser realizada de forma específica, ocorrendo uma diminuição do custo da produção. O intuito deste trabalho é estabelecer uma relação entre a dissipação de energia devido às partes mecânicas do motor elétrico trifásico assíncrono e os momentos de manutenção do mesmo.

Revisão Bibliográfica

A transferência de calor por difusão foi estudada por J. B. J. Fourier (1763-1830). A conclusão experimental de Fourier foi que a taxa de transmissão de calor por difusão é proporcional ao gradiente de temperatura. Para tornar essa proporção uma igualdade, foi estabelecida uma constante de proporcionalidade denominada condutividade térmica do material. Pode-se dizer que quanto maior a condutividade do material, menor será a gradiente de temperatura para uma mesma taxa de transferência de calor, ou quanto menor a resistência térmica do material, menor será o gradiente de temperatura para uma mesma taxa de transferência de calor.

A convecção caracteriza-se pela transferência de calor com auxílio do deslocamento da massa fluida. Num fluido que está em movimento, o calor é transferido entre duas regiões de temperaturas diferentes pelo mecanismo de convecção, com deslocamento de massa, e pelo mecanismo de condução, sem o deslocamento de massa fluida.

De forma geral, pode-se observar que bons condutores elétricos são bons condutores térmicos. Estes materiais (cobre, ouro, alumínio, entre outros) possuem um grande número de elétrons livres (elétrons na banda de condução elétrica), os quais também transportam energia térmica.

A transferência de calor por convecção é classificada como convecção forçada e convecção natural ou livre. Na convecção forçada utilizam-se agentes externos, como ventiladores, resistências elétricas ou bombas; nas convecções naturais ou livres, o agente causador da transferência é o empuxo devido à diferença de massa específica entre duas regiões ocasionada pela diferença de temperatura.

A convecção é descrita pela lei de Newton para o resfriamento, a qual considera uma situação de um contorno sólido que se encontra a uma temperatura mais alta que a temperatura da vizinhança. Em razão da diferença de temperatura, deve haver uma troca de calor entre o sólido e o meio, tendendo ao

equilíbrio térmico. O problema da transferência de calor entre o sólido e o fluido (convecção de calor) resume-se à determinação da vazão (descarga) térmica que ocorre entre o meio e o contorno. A formulação dessa questão foi iniciada por Newton, que estabeleceu o conceito de coeficiente de película. A taxa de transferência de calor, ou vazão térmica, é definida como o produto da densidade de fluxo térmico e a área de contacto entre a superfície sólida e o meio fluido. Geralmente, os problemas de transferência convectiva de calor são tão complicados que o coeficiente de transferência de calor por convecção, ou coeficiente de película, só pode ser determinado analiticamente para casos simples. Assim, os valores de coeficiente de película são obtidos experimentalmente.

O coeficiente de película é a razão entre a densidade de fluxo na superfície da placa sólida pela diferença de temperatura entre a placa e o meio fluido externo. Em geral, o coeficiente de calor por convecção é determinado experimentalmente, devido à dificuldade da análise da equação acima.

Outro fator importante para maximizar a troca de temperaturas por convecção é a utilização de aletas, que nada mais são que superfícies estendidas, pois, em razão da baixa eficiência de troca de calores de uma superfície com ar, principalmente em convecção natural, usa-se aumentar a superfície em contato com o ar; esse aumento de superfície é feito por extensões do mesmo material (aletas), de diferentes formatos, desde pinos circulares até barras de área constante ou não; quanto maior a área da aleta, maior será a quantidade de calor trocada entre a aleta e o fluido exterior, assim como quanto maior o número de aletas, mais calor será trocado entre a aleta e o fluido de refrigeração externo.

Metodologia e Materiais

Foram escolhidos quinze pontos distintos do motor marca WEG, modelo 132 m, de 3455 RPM com 5 CV de potência para a aferição da temperatura na presença e ausência do fluido lubrificante nos rolamentos fixos de esferas nº 6304 C3 e nº 6305 C3. Um termômetro da marca Ray-tech, modelo da série ST80XB fluke-68, com faixa de alcance de sete metros, com precisão de 1°C por metro referente à distância do ponto medido, foi usado para medir a temperatura. A medição foi iniciada do lado do acoplamento (L.A.), passando por sua parte superior e terminando no lado oposto ao acoplamento (L.O.A.). Os pontos estão dispostos na parte externa do equipamento com a configuração mostrada na tabela 1. O tempo de medida de temperaturas nos quinze pontos teve em torno de dois minutos de intervalo. Foram utilizados solvente e panos para remoção dos fluidos lubrificantes.

Tabela 1: pontos de medida de temperatura no motor trifásico assíncrono

P1	Eixo L.A. (lado do acoplamento)
P2	Tampa de mancal L.A
P3	Base da aleta superior L.A.
P4	Base da aleta superior no centro do equipamento
P5	Base da aleta superior L.O.A. (lado oposto ao acoplamento)
P6	Topo da aleta superior L.A.
P7	Topo da aleta superior no centro do equipamento
P8	Topo da aleta superior L.O.A.
P9	Base da aleta lateral L.A.
P10	Base da aleta lateral no centro do equipamento
P11	Base da aleta lateral L.O.A.
P12	Topo da aleta lateral L.A.
P13	Topo da aleta lateral no centro do equipamento
P14	Topo da aleta lateral L.O.A.
P15	Eixo L.O.A.

Resultados e Discussão

O primeiro ensaio foi realizado com o lubrificante nos rolamentos. A temperatura ambiente deste experimento foi de 18 °C e as medidas foram realizadas a cada 10 minutos. A temperatura medida com o motor desligado foi de $17 \pm 1^\circ\text{C}$. Após o motor ser ligado, as temperaturas em todos os pontos aumentaram até o valor médio de $39,5 \pm 1,3^\circ\text{C}$. A taxa de incremento foi mais rápida nos pontos 9, 10 e 13, ou seja, na região das aletas do motor. Após 1h40min, os valores de temperaturas medidas estavam estabilizados; nesse momento o motor foi desligado e os pontos de maior temperatura cederam calor para os pontos de menor temperatura, como pode ser visto na figura 1.

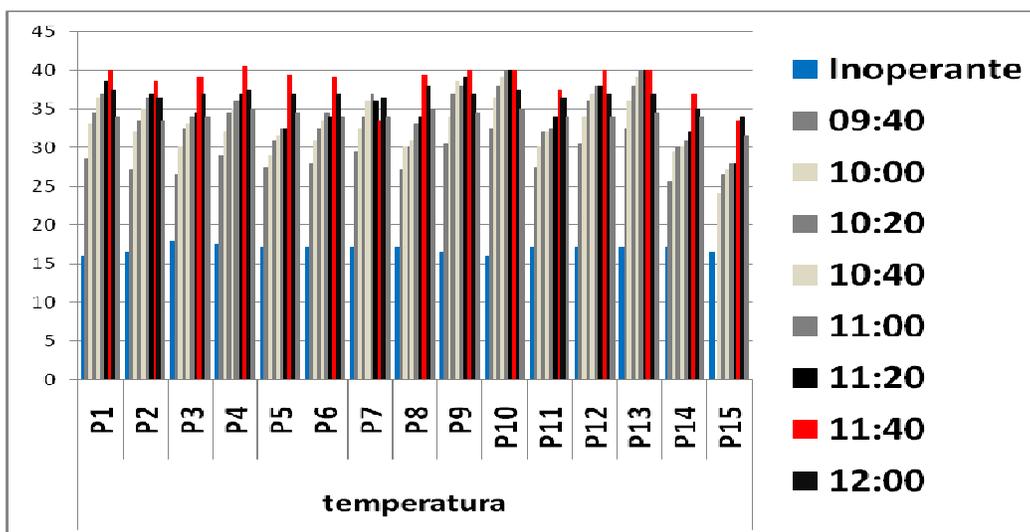


Fig. 1: Gráfico de acompanhamento térmico do motor assíncrono lubrificado.

A figura 2 mostra as medidas realizadas com os rolamentos sem lubrificante. Pode-se observar que a taxa de transferência de temperatura foi mais veloz e que em apenas 20 minutos os pontos 1 e 2 alcançaram as temperaturas respectivas de 52°C e 59°C; os pontos 9, 10, 12 e 13 atingiram a temperatura de 40°C. Nesse momento, o motor travou por causa de uma falha mecânica no rolamento próximo aos pontos 1 e 2.

Como se pode observar comparando as figuras 1 e 2, a taxa de transferência, a temperatura máxima observada e o local onde ocorreu a máxima temperatura mudaram.

A velocidade de taxa de transferência de calor é ocasionada pelos processos difusivos e convectivos de troca de calor, uma velocidade maior da transferência de calor pode ser explicada pela mudança nos materiais do meio ou por um maior gradiente de temperatura, que pode ser originada numa nova fonte de calor. Claramente, o que aconteceu para a velocidade de transferência aumentar no segundo ensaio foi a aparição de uma nova fonte de calor. A mudança dos pontos com maior temperatura evidencia que a nova fonte de calor está próxima dos pontos 1 e 2, que são, respectivamente, os pontos do eixo e da tampa do mancal do lado do acoplamento; inicialmente, os pontos com maiores temperaturas estavam próximos à parte central da carcaça, isto é, próximos às aletas do motor. Com esses dois argumentos, pode-se afirmar que uma nova fonte de calor está presente no motor.

Esta nova fonte de calor é causada pelo atrito seco no rolamento. As temperaturas máximas observadas com esta nova fonte de calor estão acima de 50°C, ou seja, acima das temperaturas do

funcionamento normal do motor que atingiram máximos próximos a 40°C.

Após o desligamento do motor, os pontos de temperatura mais alta transferiram calor para os pontos de menor temperatura; este fato evidencia que para motores trifásicos assíncronos tipo gaiola o processo de difusão é mais rápido que o processo de convecção para o meio ambiente.

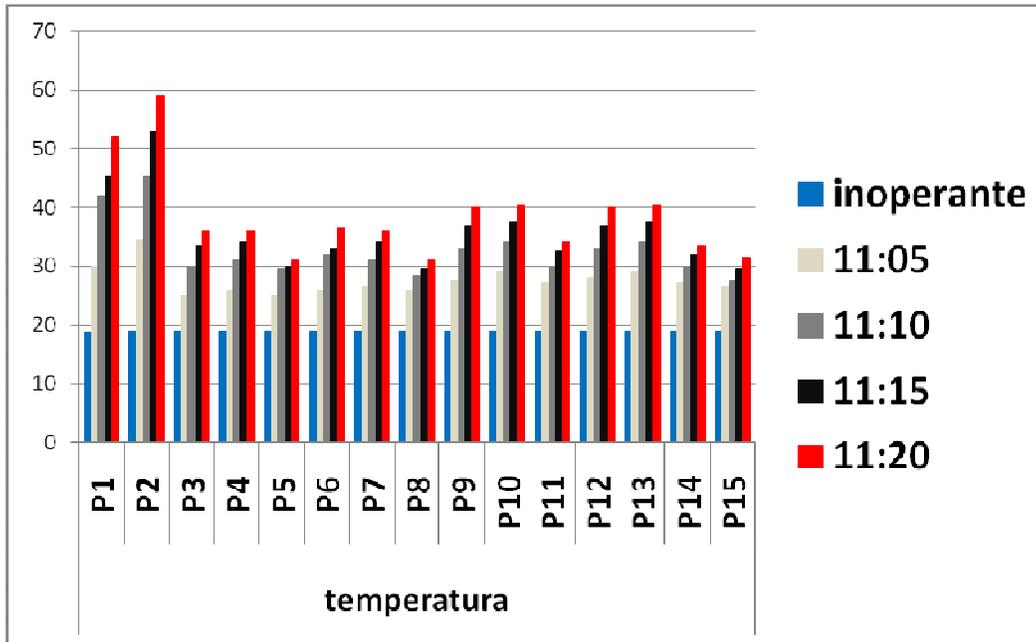


Fig. 2: Gráfico de acompanhamento térmico do motor assíncrono sem lubrificação.

Conclusão

Com um simples ensaio, foi possível acompanhar uma falha mecânica por falta de lubrificação dos rolamentos de um motor trifásico assíncrono tipo gaiola, medindo-se a temperatura em vários pontos do motor. Este experimento abre as portas para a possibilidade de se criar um método baseado em medidas de temperatura para acompanhar a eficiência do motor e prever manutenções necessárias em detrimento das datas estipuladas por seus fabricantes.

Referências

- [1] HOLMAN, Jack Philip. *Transferência de Calor*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1983.
- [2] SONNTAG, Richard. E, et al. Em *Fundamentos da Termodinâmica*, 6º ed, São Paulo, pg. 84-90, 2003.
- [3] SILVA, Hilton p. PASSOS, Alex Sandro B.; *Calculo da Curva de Perda de Carga dos Circuitos*

Axiais Internos de Refrigeração das Máquinas Elétricas Girantes da WEG Máquinas. *WEG indústrias S.A. - Motores*. Disponível em: <http://www.weg.com.br>. Acesso em: 8 set 2008.

- [4] HALLIDAY D., RESNICK R. and WALKER J.; Fundamentos de Física 3, 6^a Ed; LTC, Rio de Janeiro, RJ; 2002.
- [5] HALLIDAY D., RESNICK R. and KRANE K.; Física 3, 4^a Ed; LTC, Rio de Janeiro, RJ; 1996.
- [6] YOUNG H. D., FREEDMAN R. A.; Física 3, 10^a Ed, Pearson Education do Brasil, São Paulo, SP; 2003.
- [7] ROMA W. N. L.; Fenômenos de Transporte para Engenharia, Rima, São Carlos, SP; 2003.
- [8] HALLIDAY D., RESNICK R. and KRANE K.; Física 1, 4^a Ed; LTC, Rio de Janeiro, RJ; 1996.
- [9] FOX R. W., MCDONALD A. L. and PRITCHARD P. J.; Introdução à Mecânica dos Fluidos, 6^a Ed; LTC, Rio de Janeiro, RJ; 2006.
- [10] BIRD R. B.; STEWART W. E. and LIGHTFOOT E. N.; Fenômenos de Transporte, 2^a Ed; LTC, Rio de Janeiro, RJ; 2004.
- [11] KELLER F. J., GETTYS W. E. and SKOVE M. J.; Física Volume 2, Makron Books do Brasil Ltda, São Paulo, SP; 1999.
- [12] LIVI C. P.; Fundamentos de Fenômenos de Transporte, LTC, Rio de Janeiro, RJ; 2004.