

Estudo de falhas em rolamentos provenientes de tensões e correntes parasitas utilizando o sensor Shaft Probe

Study of damages in bearings proceeding from tensions and currents parasites using the sensor Shaft Probe

Jorge Nei Brito^{*}

Paulo Cezar Monteiro Lamim Filho^{**}

André Luis Christoforo^{***}

Neste trabalho é apresentado um estudo de falhas em rolamentos provenientes de tensões e correntes parasitas que circulam no eixo do motor utilizando o sensor *shaft probe*. A análise de tensão e corrente parasita é uma técnica preditiva, recentemente lançada no mercado. O sensor é apoiado no eixo do motor e os sinais são coletados através do coletor/analizador de dados UltraSpec 8000. Os testes foram realizados em uma bancada onde os diferentes níveis de tensões e correntes foram introduzidos no rolamento dianteiro de um motor elétrico. Um gerador de corrente contínua acoplado ao motor, através de um acoplamento flexível, foi usado como sistema de carga. O objetivo é conhecer os níveis das amplitudes de tensão e corrente nos rolamentos, permitindo uma vida útil maior. A análise de vibração, por ser uma técnica preditiva tradicional, também foi utilizada para validação dos testes experimentais.

This works presents the technique of tension analysis and current parasite in shafts of electric engines. It is a predictive technique, recently launched in the market, which uses the sensor shaft probe. This sensor is rested on the shaft of the engine and the signals are collected by the collector/data analyzer UltraSpec 8000. The tests were carried out through a didactic schematic project of the experimental setup in which the different levels of tensions and currents in the shaft of the engine were introduced in the front bearing of an electric motor. A connected direct-current generator coupled to the engine, by means of a flexible coupling, was used as load system. The objective is to know the levels of the amplitude of tension and current allowing a longer life. Vibration analysis, being a traditional predictive technique was also used to validate the experimental tests.

Palavras-chave: Rolamento. Vibração. Tensão. Corrente parasita.

Key words: Bearings. Vibration. Shaft current.

Introdução

As falhas em rolamentos são comuns em motores elétricos. Em muitas aplicações, o impacto econômico deste tipo de falha pode exceder significativamente o custo da própria máquina. Por este motivo, várias técnicas preditivas estão sendo desenvolvidas para a detecção de falhas em rolamentos (STACK et al., 2003).

^{*} Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Brasil. Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)/Projetos Mecânicos e Detecção de Falhas em Máquinas

^{**} Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Brasil.

^{***} Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Brasil. Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)/Estruturas, Mecânica dos Materiais e Métodos Numéricos

Desde 1920 tem-se estudado falhas em rolamentos provenientes de correntes que circulam no eixo do motor. Todos os motores elétricos têm algum nível de tensão no eixo, embora os níveis possam ser muito pequenos (ULTRASPEC MOTOR , 1997; STACK et al., 2003; STACK et al., 2004). O que interessa para a Manutenção Preditiva é saber a partir de que nível se tem um problema. Recentemente, este problema tem chamado atenção devido ao aumento do uso de inversores de frequência.

A presença de correntes parasitas circulando pelo eixo do motor ocasiona uma micro soldagem (fragmentação ou descascamento) nas pistas do rolamento (Figura 1), conhecida como UDE (Usinagem por Descarga Elétrica) (LAMIM FILHO, 2000). O objetivo deste trabalho é detectar, experimentalmente, falhas em rolamentos provenientes de tensões e correntes parasitas que circulam no eixo do motor. Para tanto foi utilizada a Análise de Tensão/Corrente Parasita, técnica preditiva recentemente lançada no mercado, que utiliza o sensor *shaft probe*.



Figura 1 - Usinagem por descarga elétrica na pista de um rolamento

Foram introduzidos diferentes níveis de tensão/corrente no eixo do motor, objetivando conhecer os níveis de segurança para o perfeito funcionamento do rolamento. A Análise de Vibração, por ser uma técnica preditiva tradicional, foi utilizada para validação dos testes realizados.

Bancada de teste

Os testes experimentais foram realizados em uma bancada experimental (Figura 2), montada no Laboratório de Sistemas Dinâmicos (LASID) do Departamento de Mecânica da Universidade Federal de São João Del-Rei.

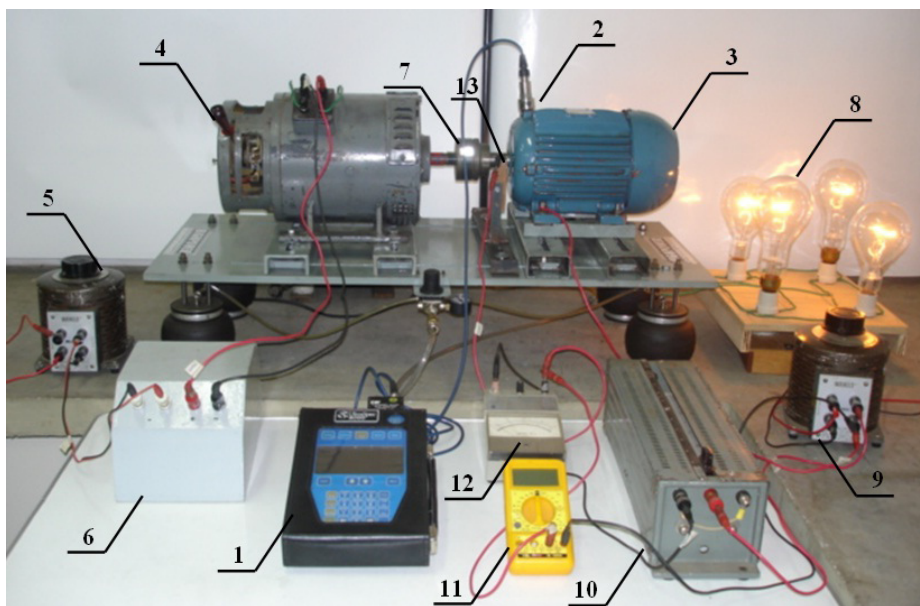


Figura 2 - Bancada de testes

Antes de iniciar os testes, a bancada foi balanceada dinamicamente e alinhada com tecnologia a laser, objetivando eliminar as fontes de vibrações indesejáveis.

Os sinais foram coletados pelo coletor e analisador de sinais UltraSpec 8000 [1] através de um acelerômetro A0720GP CSI [2], tecnologia disponível no LASID. Os defeitos foram induzidos em um conjunto de rolamentos da série 6206, pertencente ao motor trifásico de 5 CV [3]. Um gerador de corrente contínua [4], alimentado através de um variômetro [5] e de um retificador de corrente [6], acoplado ao motor, através de um acoplamento flexível e isolado eletricamente [7], foi usado como sistema de carga alimentando um conjunto de quatro lâmpadas de 500W [8].

A tensão e corrente injetadas foram controladas por um variômetro [9] e um reostato [10], objetivando, através de um multímetro [11] e um amperímetro [12], o monitoramento dos níveis de tensão/corrente que circulam pelo eixo do motor e pelo rolamento.

A injeção foi realizada através de uma escova montada em um dispositivo no eixo do motor [13].

Com o objetivo de reproduzir fielmente os defeitos, isolou-se o rolamento traseiro do motor elétrico permitindo-se que o defeito induzido atuasse somente no rolamento dianteiro. Se um dos rolamentos fosse isolado, a descarga da corrente ocorreria somente no rolamento não isolado (KREMIEN, 1997).

A estrutura flexível da bancada de teste possibilita que os defeitos introduzidos se tornem mais perceptíveis nos espectros. Isto facilita, significativamente, o estudo das tensões e correntes parasitas que circulam no eixo do motor.

Analizador UltraSpec 8000 e o Sensor Shaft Probe

A Figura 3 ilustra o coletor e analisador de sinais UltraSpec 8000 montado com o sensor *shaft probe*, modelo CSI 348SP. A escova do sensor é apoiada no eixo do motor e a garra é aterrada. Os sinais são coletados através do coletor/analizador de dados UltraSpec 8000.

Os sinais de vibração, tensão e corrente parasita são transferidos para o computador por meio do programa de apoio RBMWear. Este procedimento permite realizar análises mais detalhadas, montar bancos de dados e gerar relatórios técnicos.

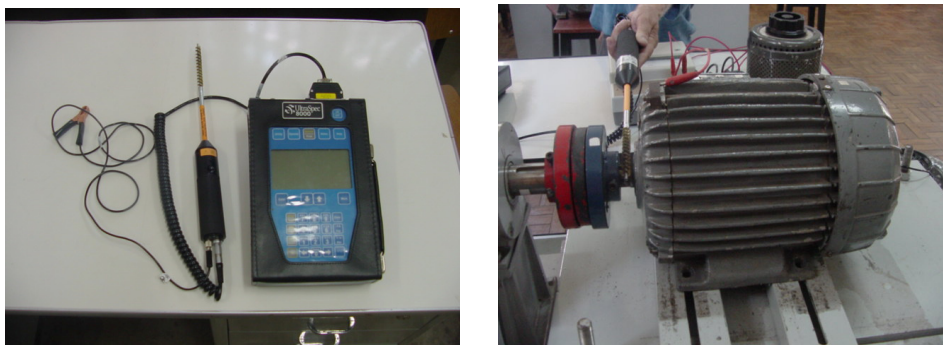


Figura 3 - UltraSpec 8000 montado com o sensor shaft probe

Circuito da Bancada

A Figura 4 ilustra, simbolicamente, um circuito representativo da corrente que circula no conjunto eixo/rolamento do motor, onde R_r representa o reostato, V_t a fonte de tensão, controlada por um varivolt, e R_{em} a resistência criada pelo conjunto eixo/motor.

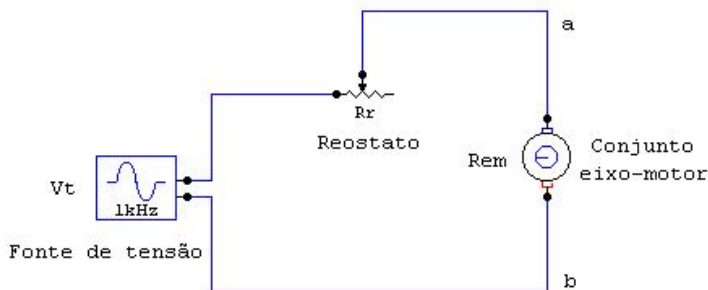


Figura 4 - Circuito representativo da corrente que circula no conjunto eixo/rolamento do motor

Por meio deste circuito calcularam-se as faixas de tensão desejáveis no rolamento. Para isto, aplicou-se a Lei de Ohm e a segunda Lei de Kirchhoff (Equação 1), sendo V_t a fonte de tensão dada em Volts (V), i a corrente dada em Ampères (A), R_r é a resistência gerada por um reostato e R_{em} a resistência do conjunto eixo motor, ambos expressos em Ohm (Ω).

$$V_t = (R_r + R_{em}) \cdot i \quad (1)$$

Procedimento utilizado

Antes do início dos testes, os rolamentos foram analisados micro e macroscopicamente. Para tanto, uma análise por amostragem foi realizada, escolhendo-se um dentre os dez rolamentos de um lote, não sendo identificada falha alguma tanto no rolamento quanto no seu lubrificante.

Relubrificação dos Rolamentos

Segundo Stack et al. (2005), para que a falha possa se manifestar mais rapidamente é necessário remover uma determinada quantidade de lubrificantes. Neste sentido, inicialmente retirou-se toda a lubrificação dos rolamentos utilizados nos testes. Posteriormente, os rolamentos foram relubrificadas com 3% a 5% da graxa de fábrica (MANUAL SKF, 1997; RELIANCE ELECTRIC INDUSTRIAL COMPANY, 1999). Essa quantidade de graxa é suficiente para produzir falhas em um curto intervalo de tempo. Esse intervalo varia de acordo com os níveis de tensão/corrente introduzidos e ainda com o nível e variação da carga mecânica.

Reduzir a quantidade de graxa em um rolamento possivelmente reduz sua expectativa de vida. Assim, com o intuito de provar que este procedimento é coerente para um rolamento que opera somente por alguns dias ou semanas em um ambiente laboratorial, um rolamento com 4% da quantidade ideal de lubrificante é aqui avaliado sem injeção, em um intervalo de tempo de 100 horas.

Tensão e Corrente no Eixo

A Equação 2 permite encontrar a tensão V_{ab} no rolamento, expressa em Volts (V), sendo R_r a resistência gerada por um reostato, R_{em} a resistência do conjunto eixo motor e V_t a fonte de tensão, dada em Volts (V).

$$V_{ab} = \left(\frac{R_{em}}{R_r + R_{em}} \right) \cdot V_t \quad (2)$$

Devido ao aumento da corrente introduzida, há um aumento na temperatura. Isto provoca uma redução na resistência do conjunto eixo/rolamento, sendo aqui introduzidas no rolamento do motor variações de tensão entre 0,5 V a 2,0 V. Estes valores também incluem as quedas de tensão associadas à escova, produzindo correntes que variaram entre 10 mA e 5 A. Essas faixas de tensão e corrente são suficientes para validar os níveis adotados (BRITO, 2002).

Frequências Determinísticas de Falhas

Nos mancais de rolamento, os defeitos locais produzem uma série de impactos que podem excitar ressonâncias na estrutura da caixa e na carcaça do motor, entre 1 kHz e 20 kHz. Recomenda-se acompanhar a evolução do espectro dos rolamentos, medindo-se a vibração preferencialmente em aceleração.

As frequências características em (Hz) da pista externa, da pista interna, do elemento rolante e da gaiola são dadas respectivamente pelas Equações 3, 4, 5 e 6, em que f_r é a frequência de rotação (Hz), d o diâmetro da esfera ou do rolo (mm), D o diâmetro primitivo do rolamento (mm), n o número de esferas ou rolos e β o ângulo de contato do rolamento, conforme apresentado na Figura 5.

$$f_{Pista\ Externa} = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \cdot \cos(\beta) \right) \tag{3}$$

$$f_{Pista\ Interna} = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \cdot \cos(\beta) \right) \tag{4}$$

$$f_{Elemento\ girante} = \frac{d}{2 \cdot D} \cdot f_r \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot \cos(\beta) \right) \tag{5}$$

$$f_{Gaiola} = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \cdot \cos(\beta) \right) \tag{6}$$

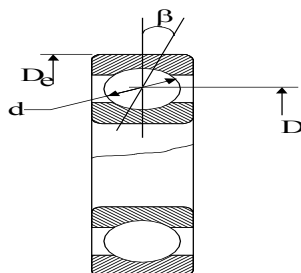


Figura 5 - Elementos do rolamento

Resultados

Foram introduzidos no eixo do motor diferentes níveis de tensões e correntes. Os dados de vibração, com sinais de aceleração em RMS foram coletados por um acelerômetro A0720GP CSI, em uma definição de 3200 linhas, em faixas de frequências que variaram de 600 Hz a 30000 Hz. Dessa forma, é possível identificar nos espectros de frequência, o aparecimento e evolução dos defeitos nos rolamentos. Essas falhas são identificadas por meio de suas frequências determinísticas nas regiões de altas frequências (ALMEIDA; GÓZ, 2000).

O rolamento foi submetido a uma variação de tensão de 0,5 V a 1,20 V. Segundo Erdman et al. (1995), o valor da tensão medida no eixo é usado geralmente como indicador do valor possível da corrente elétrica que passa através do rolamento. De acordo com os valores de tensão induzidos no eixo do motor, os dados de tensão e correntes parasitas foram coletados pelo sensor *shaft probe*.

Um dos rolamentos, com 4% de lubrificante, foi colocado em operação com carga mecânica constante a 1788 rpm, sob uma tensão de 0,5V e num período de 100 horas. Fazendo-se o diagnóstico dos espectros de vibração deste rolamento, nenhuma das frequências de falhas (Equações 3, 4, 5 e 6) calculadas pelo software RBMWear foram identificadas. Os níveis de vibração nestas frequências se mantiveram estáveis ao longo do experimento. As únicas amplitudes que apareceram foram as harmônicas da frequência de rotação do eixo do motor. Este nível de tensão possui pouca probabilidade de causar danos ao rolamento.

Foi identificada uma faixa de frequência próxima a 12000 Hz. Segundo Almeida e Góz (2000), isto é indicativo de lubrificação insuficiente. Neste caso, a redução do lubrificante foi planejada. Contudo, em ambiente industrial, o seu aparecimento deve ser levado em consideração pela equipe de manutenção. Ao longo das 100 horas, notou-se também uma redução das amplitudes nesta faixa de frequência. Segundo Erdman et al. (1995), isto se explica pelo fato de a película de lubrificante se distribuir parcialmente entre as esferas e a pista externa, reduzindo o contato entre as partes metálicas em movimento.

Quando submetido a uma tensão de 0,79 V o rolamento operou durante 100 horas e nenhuma das frequências determinísticas de defeito foram identificadas. O que se observou foi um pequeno aumento na vibração global, que será estudado detalhadamente na continuação deste trabalho.

O mesmo rolamento foi submetido a uma tensão de 0,96 V, também operando durante 100 horas e com carga mecânica constante a 1788 rpm. Notou-se o início do aparecimento de frequências determinísticas na faixa de 2000 Hz a 4000 Hz, relacionadas com a frequência de defeito na pista interna ($f_{\text{Pista Interna}}$) e suas possíveis modulações. Este comportamento se manteve constante durante as 100 horas. Contudo, só foi possível identificar estas frequências após mais 40 horas de funcionamento, com um aumento

da carga mecânica passando o conjunto a operar com 1777 rpm. As frequências foram identificadas por meio do espectro da Figura 6, onde se tem o espectro referente ao início do experimento, sem a identificação de falha, e o espectro referente à tensão de 0,96V, revelando as frequências e amplitudes indicativas de falha na pista interna. De acordo Stack et al. (2003) a variação na velocidade afeta significativamente a vibração da máquina podendo também afetar a taxa de desenvolvimento da falha do rolamento.

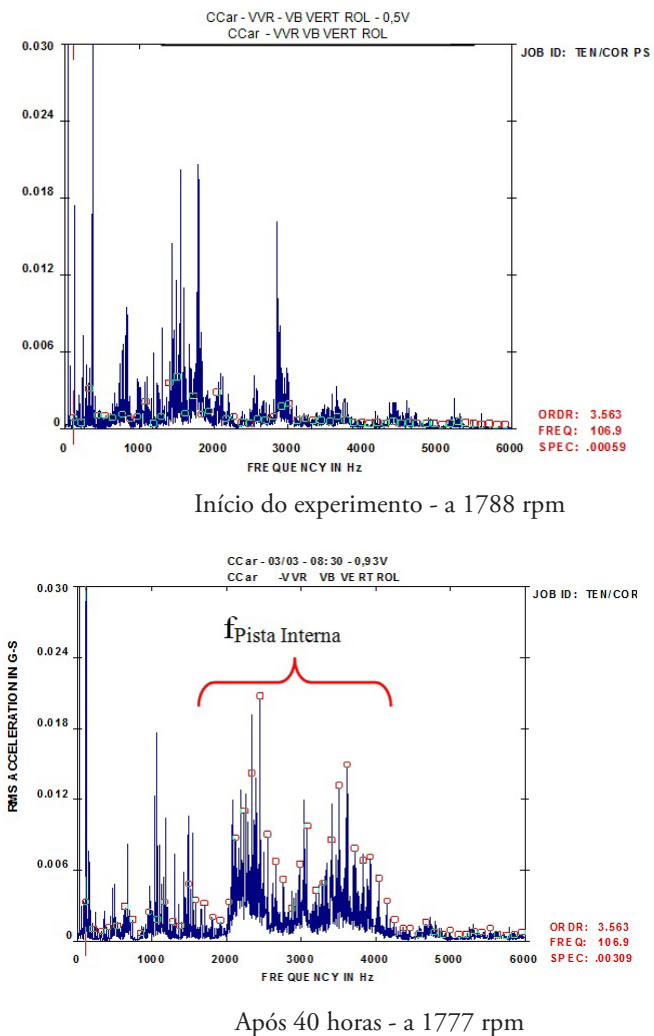


Figura 6 - Início do experimento e falha na pista interna após 40 horas e com aumento de carga

Seria necessária uma análise microscópica para revelar com clareza os defeitos na pista do rolamento. Esta análise foi realizada em outro rolamento, com os mesmos 4% de lubrificante e submetido às mesmas condições de teste, pelo qual foi possível identificar o início do desenvolvimento de defeitos nas pistas interna e externa. Por

meio do espectro proveniente do sensor *shaft probe* (Figura 7), foi possível identificar o valor da corrente atuante no rolamento sem a injeção e com a injeção de corrente correspondente a 0,96V.

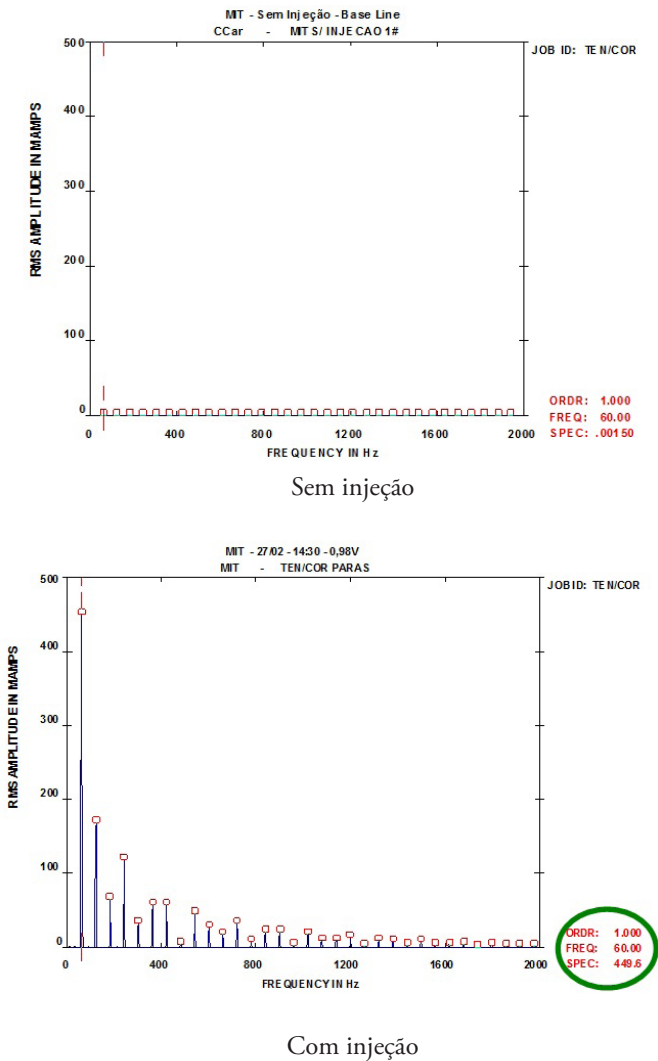


Figura 7 - Corrente atuante no rolamento sem e com a injeção correspondente a 0,96V

O rolamento em teste foi remontado e submetido a uma nova tensão de 1,20 V, durante 145 horas, operando a 1788 rpm.

As frequências determinísticas das falhas identificadas anteriormente apareceram como bandas laterais de outras vibrações presentes no espectro. Segundo Stack et al. (2005) e Fischer et al. (2002), essa alteração no espectro de vibração ocorre devido ao ato de desmontar, remontar, reinstalar e realinhar a bancada de teste.

A vibração ao longo das horas sofreu um aumento não linear. O defeito que havia começado a se desenvolver com os impactos das demais partes do rolamento geraram outras vibrações com vários componentes. Dependendo dos tipos e combinações de defeitos são criados vários padrões de espectros (ALMEIDA; GÓZ, 2000). O aumento das descargas de corrente através do rolamento também apresentam o mesmo comportamento. Dessa forma, foi possível identificar as frequências determinísticas de defeitos nas pistas externa ($f_{\text{Pista Externa}}$) e interna ($f_{\text{Pista Interna}}$) (Figura 8).

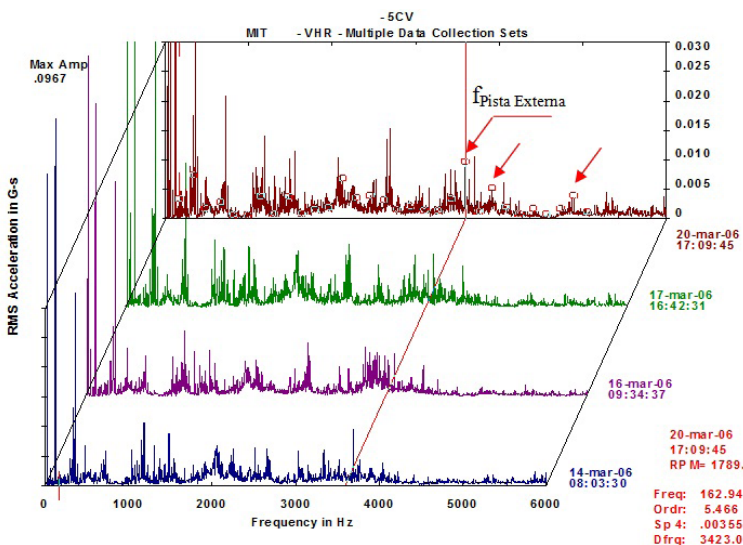


Figura 8 - Falha na pista externa ao final das 145 horas

Pela análise microscópica, com um aumento de 50 vezes, foi possível identificar ao longo das pistas interna e externa os orifícios (pitting) ou microcrateras brilhantes e irregulares. A Figura 9 ilustra o início da UDE caracterizada pelas marcas ásperas e equidistantes umas das outras, sendo presentes ao longo de toda a pista interna e externa. A Figura 10 apresenta a imagem ampliada em 50 vezes de uma das marcas causadas na pista externa pelo princípio da UDE. Nota-se também, uma coloração avermelhada ao longo da pista externa, característica de queima por descargas elétricas.

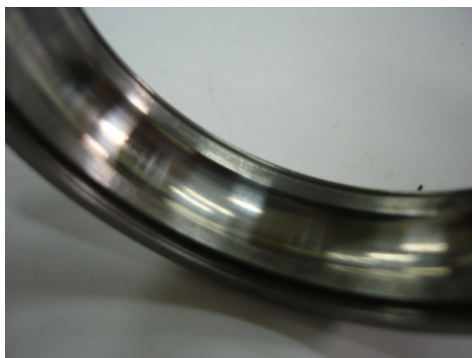


Figura 9 - Princípio da UDE



Figura 10 - Pitting causado pela UDE

De acordo com Stack et al. (2005), Busse et al. (1997) e Erdman et al. (1995), essas marcas são provenientes das descargas elétricas por meio do capacitor formado pela película lubrificante quando a tensão no eixo alcança sua tensão de avaria dielétrica. Ainda segundo Busse et al. (1997), estas marcas podem ser resultado do contato das pistas externa e interna com as esferas em uma área de contato pequena, provocando elevada descarga elétrica instantânea. Essas regiões ásperas são o estágio inicial de um defeito mais grave conhecido como fragmentação ou descascamento, ou ainda UDE.

As esferas, após a exposição de todas as faixas de tensões introduzidas no rolamento, também apresentaram *pitting* (Figura 11), além de apresentarem cores mais escuras, intensificadas em uma área que demarca o maior contato com a película lubrificante entre as pistas. Assim como as esferas, a graxa também apresenta cor mais escura com relação à graxa não utilizada. Isto se deve provavelmente a uma mudança química no lubrificante.

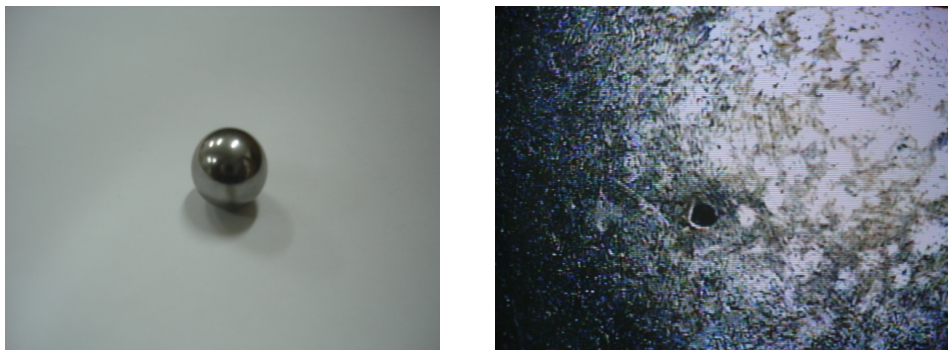


Figura 11 - *Pitting* na superfície de uma das esferas do rolamento, com aumento de 50 vezes

Conclusões

O aparecimento de amplitudes nas regiões de alta frequência é consequência do surgimento de vários orifícios nas pistas do rolamento. Com a evolução da falha, este conjunto de microcrateras compõe um único ou uma menor quantidade de orifícios maiores. Dessa forma, as frequências determinísticas deste tipo de falhas migram para menores valores. No entanto, o surgimento inicial de menor quantidade de orifícios implica o surgimento de frequências determinísticas de falhas em faixas menores. Não necessariamente, as frequências determinísticas de falhas aparecem em regiões de altas frequências.

Por meio da análise microscópica do lubrificante utilizado foi possível identificar partículas de metal. Esses corpos são provenientes da oxidação das pistas durante a descarga elétrica, dando origem aos orifícios (*pitting*) localizados nas pistas. Esta é mais uma característica do estágio inicial da fragmentação ou UDE.

Para níveis de tensão menores e ou iguais a 0,5 volts e ao longo das 100 primeiras horas percebeu-se nos espectros de vibração somente as frequências de rotação do motor, não caracterizando um nível prejudicial de tensão no rolamento. Para valores entre 0,5 e 1 volt tem-se o início da UDE e que se pôde perceber mais claramente com a aplicação de tensões acima de 0,96 volts. A tensão de 0,79 volts resultou somente em um pequeno aumento na vibração global. Contudo por meio dos espectros para a tensão de 0,96 volts notou-se o início do aparecimento das frequências determinísticas de falha, identificadas após a variação da velocidade do motor. Essa variação afetou o desenvolvimento da falha. A tensão de 1,20 volts causou um aumento não linear na vibração, mesmo estando o motor operando em velocidade constante.

Para trabalhos futuros, pretende-se estudar mais detalhadamente o nível de tensão entre 0,5 volts e 1 volt, de tal forma a se obterem níveis de tensão mais próximos do início da falha.

Referências

ALMEIDA, M., T.; GÓZ, R. D. S. *Análise de vibrações II - rolamentos e engrenagens*. Itajuba-MG, Brasil: Fundação de Pesquisa e Assessoramento a Indústria, 2000. p. 102-106.

BRITO, J. N. *Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos*. 2002. 214p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, 2002.

BUSSE, D.; ERDMAN, J.; KERKMAN, R. J.; SCHLEGEL, D.; SKIBINSKI, G. Bearing currents and their relationship to pwm drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 12, n. 2, 1997.

ERDMAN, J.; KERKMAN, R. J.; SCHLEGEL, D.; SKIBINSKI, G. Effect of pwm inverters on ac motor bearing currents and shaft voltages. In: IEEE APEC CONFERENCE DALLAS, 1995.

FISCHER, A.; SCHLEGEL, D. W.; SKIBINSKI, G. L. Experience with variable-frequency drives and motor bearing reliability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 37, n. 5, 2002.

KREMIEN, Z. The additional phenomena which appear in induction motors fed from pwm inverters. In: Proc. EPE'97, 1997, Trondheim, Norway.

LAMIM FILHO, P. C. M. *Programa de manutenção preditiva da planta unidade motor fire unidade 7514*. Relatório (Estágio Supervisionado) - Universidade Federal de São João del-Rei, 2001. 110p.

MANUAL SKF de Manutenção de Rolamentos. Publicação 4100 PB, reg. 70.13000, 1997.

RELIANCE ELECTRIC INDUSTRIAL COMPANY. Instalação, operação e manutenção de motores de indução industriais. Armações (NEMA) 180 - 449, (IEC) 112 - 280P, 1999.

STACK, J. R.; HABETLER, T. G.; HARLEY, R. G. Experimentally generating faults in rolling element bearings via shaft current. *IEEE Transactions Industrial Applications*, v. 41, n. 1, 2005.

STACK, J. R.; HABETLER, T. G.; HARLEY, R. G. Effects of machine speed on the development and detection of rolling element bearing faults. *IEEE Power Electron Lett.*, v. 1, n. 1, p. 19-21, 2003.

STACK, J. R.; HABETLER, T. G.; HARLEY, R. G. Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines. *IEEE Transaction Industrial Application*, v. 40, n. 3, p. 735-739, 2004.

ULTRA SPEC MOTOR. *Motor analysis application*, n. 1.10, 1997.

Artigo recebido em: 27 jun. 2011

Aceito para publicação em: 13 set. 2011

