

Análise de desgaste em mancais de rolamento através de lubrificação assistida por ultrassom

Bearing wear monitoring by ultrasound condition-based lubrication

Renato Trevisan

Eng. Mec, Engenheiro de Confiabilidade, Braskem
Aluno de Pós-Graduação em Eng. Materiais – PPGEM/UFRGS
Av. Osvaldo Aranha, 99, 6º andar - sala 610
Porto Alegre, RS, Brasil
renato.trevis@gmail.com

Afonso Reguly

Prof. Dr. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Departamento de Metalurgia
Av. Osvaldo Aranha, 99, 6º andar - sala 610
Porto Alegre, RS, Brasil
reguly@demet.ufrgs.br

Resumo

Este artigo objetiva apresentar uma técnica de identificação de falhas em mancais de rolamento até então praticamente inexistente no Brasil. Ela refere-se à mudança da tradicional lubrificação base-tempo, baseada em recomendações de fabricante e fórmulas retiradas de ábacos clássicos para a lubrificação base-condição. Mancais de rolamento são peças obrigatórias em uma infinidade de equipamentos, em sua grande parte, rotativos. A técnica mais difundida de identificação de falhas é a análise de vibração, em seus mais diversos graus de tecnologia embarcada. No entanto, o que ocorre por inúmeras vezes é a identificação da falha já em um estágio onde a falha não pode mais ser reparada, e sim apenas ter seu desenvolvimento monitorado. Isto, pois a frequência de coleta de dados é baseada em cartas de severidade, e a falha pode se propagar de uma forma acelerada entre-medidas. A partir desta nova técnica o que se busca é proporcionar à outra técnica de manutenção preditiva conhecida por lubrificação, que por muitas vezes é tão menosprezada dentro das indústrias, a aquisição de informações importantes a partir de coleta de ultrassom dos mancais. Desta forma se fornecem condições para que a lubrificação atue de modo a auxiliar a técnica de análise de vibração, evitando lubrificações em demasia e prevenindo a falta de lubrificante nos mancais, a partir de inspeção baseada em condição.

Palavras-chave: rolamentos, ultrassom, lubrificação.

Abstract

The aim of this article is to develop a root cause fail identification technique in rolling bearings almost not known in Brazil up to now. This technique refers to the changing from traditional time-based lubrication, done upon manufacturers' recommendation and formulas taken from classic abacus to condition based lubrication. Rolling bearing are mandatory parts in a large amount of equipments, especially in dynamics. The most known technic for fail identification is vibration analysis, in its lots of technology degrees. However in many times the identification is made in a stage of the fail where it is not possible to fix, only it is possible to monitore it. That situation happens because of data collection is made based in severity charts, and fail can propagate in a fast mode between collections. With this condition based technique, it follows to purpose to the other predictive maintenance technique known as lubrication, which is so many times undervalued inside industries, the aquisition of important information from bearing ultrasound data collection. Since this important model apparatus are given to that lubrication acts in order to help vibration analysis technique to avoid over greasing and preventing bearing lack of lubrication, inspection based on condition.

Key words: rolling bearing, ultrasound, lubrication.

1. Introdução

No âmbito das empresas de classe mundial, a manutenção tem fator estratégico. Pois a disponibilidade dos equipamentos por um tempo que tende ao infinito é exigida cada vez mais. Desta forma, existe uma constante busca por melhorias que se concentram muitas vezes em novas tecnologias. No entanto, a mudança nos modos de execução tradicionais da manutenção é tão ou mais importante que a utilização de novas tecnologias. É muito importante quebrar paradigmas dentro de uma estrutura que muitas vezes peca por ser demasiadamente pragmática. É preciso construir fatos e cenários novos.

Dentro deste contexto, e sendo um dos expoentes de todo o convencionalismo apontado anteriormente está a lubrificação, técnica conhecida há milhares de anos, utilizada desde que se tem os primeiros registros da humanidade, sob as mais diversas formas. Buscando acompanhar todo o desenvolvimento que várias técnicas trouxeram à manutenção, especialmente a partir dos anos 80 e 90, e percebendo a importância da lubrificação e dos lubrificantes dentro deste contexto, a NASA passou a testar a técnica de análise por ultrassom. Esta técnica já existente e que era amplamente utilizada em outros segmentos tanto da manutenção como da medicina, para a inspeção e detecção de falhas de rolamentos, mostrou que a mesma detectava falhas muito incipientes, inclusive antes da técnica de vibração e da medição de temperatura (PEG, 2010).

Após êxito nos testes a NASA, a empresa americana *UE Systems Inc.* passou a comercializar o aparelho que utilizava a referida técnica, no final dos anos 90. A partir de então, nos últimos 10 anos esta técnica tem se difundido dentro do setor de manutenção, pois está aliada com os mais modernos conceitos de manutenção preditiva base tempo.

No entanto, no Brasil esta técnica ainda vem caminhando muito lentamente. São poucas as empresas que se utilizam desta tecnologia, e mesmo as empresas de vanguarda ainda não dão à lubrificação o valor que a mesma merece receber.

Sabe-se que a lubrificação tem um custo baixo, quando se compara com os custos da manutenção onde ela está inserida. Conforme PETROBRAS (2010), estes custos ficam em torno de 5%. Estatisticamente, sabe-se que a lubrificação inadequada e a contaminação são responsáveis por 70% de todas as perdas prematuras de rolamentos (Applied Industrial Technologies, 2010). A partir do momento em que o desenvolvimento na pureza dos materiais para rolamentos levou à redução dos perigos por defeitos iniciais de materiais, iniciaram-se os perigos de defeitos na superfície devido à contaminação do lubrificante, que acaba por se tornar uma das maiores causas de falhas de rolamentos (Maru *et al.*, 2007). Considera-se que no Brasil a manutenção corresponda a mais de 4% do faturamento bruto das empresas, conforme pode ser verificado na Figura 1 (ABRAMAN, 2009).

Através deste rápido cálculo mostrado chega-se (em uma análise macro) a um valor de R\$MM 4,2 perdidos pelas empresas brasileiras anualmente devido a problemas relacionados às falhas em rolamentos causadas por problemas relacionados à lubrificação. É importante ressaltar que não estão contabilizados nesta rápida análise os lucros cessantes das empresas, além de nenhuma outra variável que possa estar envolvida no contexto. Fala-se apenas em gastos com reposição de material e mão-de-obra envolvida.

Ano	Custo Total da Manutenção / Faturamento Bruto
2009	4,14 %
2007	3,89 %
2005	4,10 %
2003	4,27 %
2001	4,47 %
1999	3,56 %
1997	4,39 %
1995	4,26 %

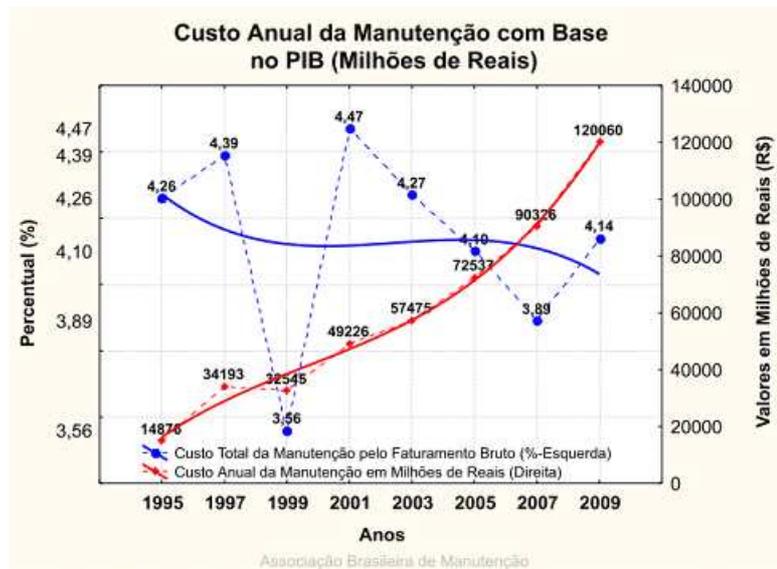


Figura 1: Custo anual da manutenção com base no PIB e custo total da manutenção/faturamento bruto (adaptado de Anuário da ABRAMAN, 2009).

A manutenção base condição é o tipo de manutenção que propicia a maior assertividade do investimento feito em manutenção. Isto porque neste modo de trabalho, a execução de uma tarefa é feita apenas quando o monitoramento da condição da máquina fornece subsídios para tal, inclusive indicando o tipo de problema a ser enfrentado, além de prevenir maiores conseqüências. Segundo Almeida (2007), a manutenção preditiva é uma filosofia ou atitude que usa a condição operacional real do equipamento e sistemas da planta industrial para otimizar a operação total da planta industrial.

Segundo métodos tradicionais de manutenção, trabalha-se com manutenção base tempo, sendo que este tempo é por sua vez estimado em análises estatísticas do histórico de uma gama vastíssima de equipamentos. Por outro lado, a manutenção base condição fornece consistentes subsídios para execução de uma intervenção, sempre considerando que os equipamentos podem ser de um mesmo modelo, no entanto mesmo assim cada um tem um comportamento individual.

As intervenções para manutenção nos equipamentos em empresas de classe mundial são vistas como uma oportunidade para se aumentar a confiabilidade de projeto (Lima e Souza, 2003).

2. Modos de Falha dos Mancais de Rolamentos

As análises da causa das falhas de rolamentos podem ser bastante facilitadas utilizando-se guias desenvolvidos pelas próprias empresas fabricantes dos mesmos. Nestes guias pode-se encontrar figuras que ilustram a falha ocorrida, bem como as prováveis causas e as formas de evitar os danos.

As Figuras 2 a 18 ilustram falhas ocorridas devido a desvios de lubrificação e/ou lubrificante. Ambas são originadas em longos estudos desenvolvidos e estão apresentadas normalmente em um Guia de Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos (NSK, 2001; SKF, 2005).



Figura 2: Anel interno de rolamento de contato angular (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: escamamento em metade da circunferência da pista.
Causa: lubrificação deficiente gerada pela entrada de fluido de corte no interior do rolamento.



Figura 3: Anel interno de rolamento autocompensador de rolos (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: escamamento em apenas uma carreira.
Causa: lubrificação deficiente.



Figura 4: Anel interno de rolamento de contato angular (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: ao longo da pista ocorre descascamento.
Causa: lubrificação deficiente.



Figura 5: Ampliação da Figura 4 (adaptado de NSK, 2001).



Figura 6: Rolamento autocompensador de rolos da Figura 3 (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: o descascamento ocorreu no centro da superfície de rolamento de rolos.
Causa: lubrificação deficiente.



Figura 7: Anel externo de rolamento autocompensador de rolos (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: o descascamento ocorreu próximo à borda.
Causa: lubrificação deficiente.



Figura 8: Anel interno de rolamento de rolos cônicos. (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: arranhadura na face do rebordo do anel interno.
Causa: partículas oriundas do desgaste misturadas ao lubrificante e rompimento do filme lubrificante devido ao excesso de carga.



Figura 9: Rolos de um rolamento de dupla carreira de rolos cilíndricos. (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: arranhadura na face lateral do rolo.
Causa: lubrificação deficiente e carga axial excessiva.

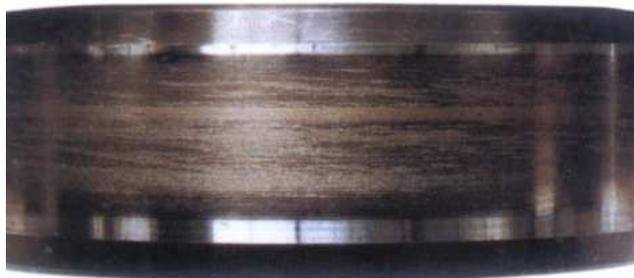


Figura 10: Anel interno de rolamento de rolos cilíndricos (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: escorregamento ocorreu circunferencialmente na superfície da pista.
Causa: escorregamento dos rolos por excesso de graxa.



Figura 11: Anel externo do rolamento da Figura 10 (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: escorregamento ocorreu circunferencialmente na superfície da pista.
Causa: escorregamento dos rolos por excesso de graxa.



Figura 12: Rolos de rolamento axial de rolos cônicos (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: trincas na face dos rolos.
Causa: geração de calor devido à deficiência de lubrificação no contato com o rebordo do anel interno.



Figura 13: Anel interno de rolamento autocompensador de rolos (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: pista com alteração na coloração. Partes da gaiola laminadas na superfície da pista.
Causa: lubrificação insuficiente.



Figura 14: Rolos do rolamento da Figura 13 (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: rolos com alteração na coloração. Partículas da gaiola laminadas na superfície do rolamento.
Causa: lubrificação insuficiente.



Figura 15: Anel externo de rolamento de rolos cilíndricos (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: oxidação na face de rebordo e superfície da pista.
Causa: lubrificação deficiente devido à penetração de umidade.

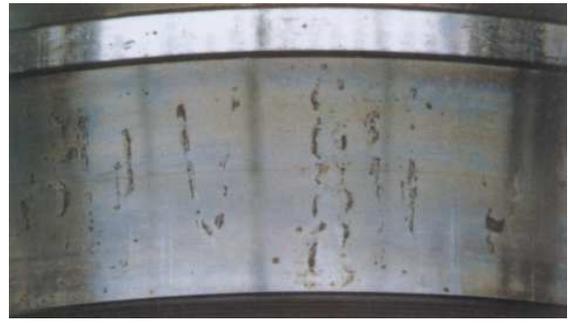


Figura 16: Anel interno de rolamento autocompensador de rolos (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: corrosão na superfície da pista no espaçamento dos rolos.
Causa: entrada de água no lubrificante.



Figura 17: Anel interno do rolamento de contato angular (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: alteração na coloração da superfície da pista.
Causa: geração de calor devido à lubrificação deficiente.



Figura 18: Anel interno do rolamento de quatro pontos contato angular (adaptado de NSK, 2001).
Sintoma: alteração na coloração da superfície da pista.
Causa: geração de calor devido à lubrificação deficiente.

3. Frequências Audíveis e Inaudíveis

As ondas acústicas ou som propriamente dito são classificados de acordo com suas frequências e medidos em ciclos por segundo, ou seja, o número de ondas que passam por segundo pelos nossos ouvidos.

A unidade "ciclos por segundos" é normalmente conhecida por "Hertz", abreviatura "Hz". Assim sendo se houver um som com 280 Hz, significa que por segundo passam 280 ciclos ou ondas por nossos

ouvidos. Note que frequências acima de 20.000 Hz são inaudíveis denominadas frequências ultrassônicas e as abaixo de 20 Hz infra-som.

No campo de Audibilidade das Vibrações Mecânicas, considera-se 20 kHz o limite superior audível e denomina-se a partir desta, frequência ultrassônica.

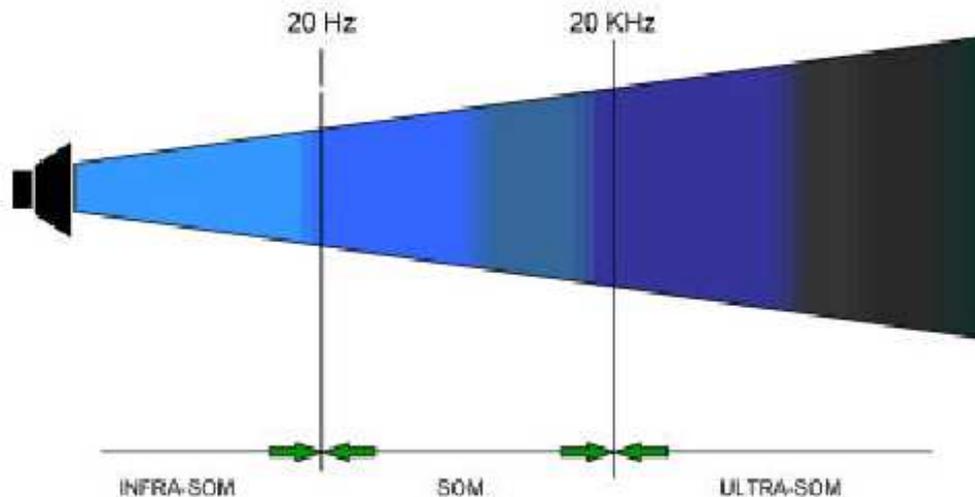


Figura 19: campo da audibilidade das vibrações mecânicas (adaptado de Andreucci, 2003).

3.1 O ouvido humano

O ouvido consiste em 3 partes básicas - o ouvido externo, o ouvido médio, e o ouvido interno. Cada parte serve para uma função específica para interpretar o som. O ouvido externo serve para coletar o som e o levar por um canal ao ouvido médio. O ouvido médio serve para transformar a energia de uma onda sonora em vibrações internas da estrutura óssea do ouvido médio e finalmente transformar estas vibrações em uma onda de compressão ao ouvido interno. O ouvido interno serve para transformar a energia da onda de compressão dentro de um fluido em impulsos nervosos que podem ser transmitidos ao cérebro. As três partes do ouvido podem ser vistas na Figura 20, a seguir.



Figura 20: O ouvido humano (adaptado de Surtec - Surdez e Tecnologia, 2010).

4. O ultrassom

4.1 Princípio do ultrassom

O som nada mais é do que uma vibração mecânica que se propaga elasticamente pelo ar, a uma velocidade média de 344 metros por segundo a temperatura de 20 graus (Hallyday *et al.*, 1994). Conforme já comentado no item 3, ondas ultrassônicas são ondas de som que atravessam o alcance de escuta humano (maiores que 20kHz). Para serem detectadas, precisa-se usar equipamentos com a capacidade de receber frequências ultrassônicas e convertê-las em correspondentes sons audíveis.

Frequências ultrassônicas viajam através de qualquer meio (ar, água, vidro, metal, etc) em uma natureza bastante direcional, diferentemente dos sons audíveis, que se dispersam em todas as direções. Ultrassons são ondas de som de baixa energia, portanto são rapidamente absorvidas pelo meio através do qual viajam. As ondas sônicas e as ultrassônicas diferenciam-se conforme as Figuras 21 e 22.



Figura 21: Ondas ultrassônicas – comprimento de onda variando de 0,32cm a 1,6cm (Hall e Rienstra, 2003).

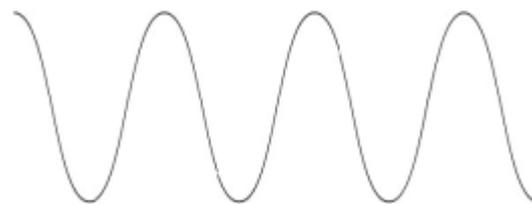


Figura 22: Ondas sônicas – comprimento de onda variando de 1,7cm a 17m (Hall e Rienstra, 2003).

A partir das diferenças físicas das ondas mostradas nas Figuras 21 e 22, pode-se entender melhor como o ultrassom provê vantagem no monitoramento de condição. Os sons em baixa frequência, sendo grandes, tendem a manter uma grande intensidade do volume do som através de distâncias maiores que os sons de alta frequência. Os sons em alta frequência, tendo magnitudes menores que os sons em baixa frequência, não viajarão tão longe. Portanto, a amplitude cairá rapidamente à medida que as ondas de som em alta frequência se movam a partir do gerador do som. E é justamente pela característica da onda ultrassônica ser bastante direcional que com ela se torna fácil identificar a origem do ultrassom, mesmo em ambientes ruidosos (como os ambientes industriais, por exemplo).

Quando se utiliza o equipamento ultrassom como ferramenta de manutenção preditiva em planta industrial, se descobre que os ruídos de fundo (lixadeira, máquina de solda, etc.), são normalmente muito abaixo em relação aos sinais de ultrassom que é detectado, tais como efeito descargas elétricas, pontos de vazamentos e rolamentos mal lubrificados, ficam muito evidentes. Neste meio o equipamento pode rejeitar um alto nível de ruídos de fundo focando na faixa de frequência desejada de sons.

Um típico ambiente industrial pode conter níveis de ruído de fundo em excesso. De 100 dB de ruído numa faixa audível que se está ouvindo, somente 15 dB de ruído estão em torno de 40 kHz. Por causa do alto nível de ruídos de fundo em ambientes industriais é profundamente necessário que os fones de ouvido sejam utilizados para minimizar os efeitos dos ruídos de fundo na audição. Os fones de ouvido são capazes de bloquear um alto valor em dB de ruídos de fundo quando corretamente utilizados.

Ondas de sons de baixa frequência (audíveis) tendem a percorrer grandes distâncias, refletindo em paredes, equipamentos, etc., antes de atenuar completamente. Essas reflexões se adicionam aos ruídos de fundo numa faixa audível. Pelo contrário, o ultrassom normalmente é atenuado completamente (principalmente por transmissão, interferência e dispersão do feixe) antes deste ter uma chance para refletir. Esta rápida atenuação tende a manter níveis de fundo de ultrassom baixo mesmo nos piores ambientes. Por causa do baixo nível de fundo de ruídos ultrassônicos em ambientes industriais é possível aumentar a amplitude de pequenos sinais produzidos por vazamentos e rolamentos na faixa ultrassônica para apresentar informações úteis.

4.2 Inspeção e medição do sinal de mancais

As falhas de rolamentos iniciam-se em altas frequências, acima do limite audível. Desta forma, com a medição da energia gerada pelo rolamento na região ultrassônica é possível solucionar problemas (principalmente os relacionados com lubrificação) de forma bastante antecipada, comparando-se com as outras técnicas de preditiva até então utilizadas. James e Ly (1995) afirmaram que investigações prévias já vinham demonstrando que métodos de emissão acústica têm a capacidade de detecção mais antecipada que a alcançada através dos dados de vibração. Os níveis do sinal ultrassônico sobem à medida que o lubrificante na área da pista de rolamento diminui (Johnson, 2010). A conversão de sinal ultrassônico para audível pelo aparelho é feito através de técnica chamada heteródina, que nada mais é do que a demodulação do sinal de uma forma similar a um rádio AM (UE Systems INC., 2004). Enquanto nós não podemos ouvir ondas de rádio, este método nos ajuda a identificar facilmente diferentes vozes e instrumentos musicais quando nós escutamos o rádio. De forma análoga este processo heteródino provê uma precisa tradução do ultrassom produzido ao operar um equipamento e permite aos usuários diferenciar o som de um componente do outro. Aliado à utilização de fones de ouvido para uma melhor audição dos sons gerados em meio a um ambiente industrial ruidoso, permitem ao inspetor identificar se um mancal está mais ou menos ruidoso que outro.

Esta técnica é utilizada principalmente em mancais de motores lubrificados a graxa. A partir dela, pode-se identificar rolamentos com pouca ou sem lubrificação e com desgaste avançado. Também se consegue impedir a lubrificação em excesso, que é causadora de muitas falhas nos equipamentos lubrificados a graxa, pois gera superaquecimento, além de vazamentos externos e internos ao equipamento. Abaixo são ilustradas duas situações. Na Figura 23, tem-se uma falha gerada por falta de lubrificante em mancal de rolamento. Já na Figura 24 é mostrado um rolamento com falha gerada por contaminação do lubrificante.



Figura 23: Rolamento com falha causada por falta de lubrificação (Braskem/Triunfo, 2007).



Figura 24: Rolamento com falha causada por contaminação do lubrificante com água (Braskem/Triunfo, 2008).

5. Materiais e Métodos

5.1 Motivação para escolha do Projeto Experimental

A Braskem Unidade de Insumos Básicos localizada em Triunfo, Rio Grande do Sul, é uma das 23 Unidades de Negócio da Braskem. Nesta Unidade trabalham 900 trabalhadores diretos e 2000 indiretos. A Unidade participa com cerca de 35% (mais de 2 milhões de toneladas/ano) da produção de petroquímicos básicos do Brasil.

Dentro desta Unidade, existem 1668 motores elétricos, dos quais 540 possuem mancais lubrificados, e destes 504 são lubrificados a graxa.

A partir deste número final de motores elétricos lubrificados com graxa, foram definidas duas premissas para a escolha do grupo de motores que faria parte do projeto experimental de lubrificação por condição:

- os motores obrigatoriamente deveriam ser classificados como motores críticos, ou seja, uma eventual parada espúria destes equipamentos acarretaria em altos custos de reparo, perdas para a Produção e riscos relacionados à segurança, saúde, meio ambiente e à Segurança de Processo;

- o trabalho deveria ser feito em motores que são considerados *Bad Actors*, ou seja, equipamentos que estão entre os que mais falham, dentro da sua categoria.

Desta forma, foram então escolhidos em um primeiro momento os motores elétricos de uma das Torres de Resfriamento da Unidade, responsáveis pelo acionamento dos ventiladores que têm a importante função da troca térmica da água utilizada para resfriamento no Processo Industrial. Esta "bateria" de motores elétricos é composta de 12 motores. Estes equipamentos são considerados *bad actors* pois a graxa utilizada para a lubrificação dos mancais de rolamentos dos mesmos não suporta o período recomendado pelo fabricante, e por isso alterou-se o Plano de Lubrificação destes motores para que a relubrificação seja feita a cada 15 dias, com uma quantidade reduzida de lubrificante. No entanto, esta relubrificação constante já gerou inúmeros problemas, dentre os quais alguns são ilustrados abaixo.



Figura 25: Rolamento de motor elétrico lado oposto ao acoplamento com graxa em demasia, causadora de superaquecimento (Braskem/Triunfo, 2010).



Figura 26: Rolamento de motor elétrico lado acoplado com graxa em demasia, causadora de superaquecimento (Braskem/Triunfo, 2010).



Figura 27: Motor elétrico que sofreu curto circuito entre fases na cabeceira de bobinas. A causa básica da falha foi contaminação com acúmulo de graxa na respectiva cabeceira, que bloqueou totalmente a possibilidade de refrigeração entre as bobinas (Braskem/Triunfo, 2010).



Figura 28: Motor elétrico que sofreu curto circuito entre fases na cabeceira de bobinas. A causa básica da falha foi contaminação com acúmulo de graxa na respectiva cabeceira, que bloqueou totalmente a possibilidade de refrigeração entre as bobinas (Braskem/Triunfo, 2010).

5.2 Caracterização do aparelho para as medições

Segundo Murphy e Rienstra (2009), o sensor ultrassônico de contato é um dispositivo piezoelétrico similar em muitas formas a um acelerômetro. A diferença é a frequência de resposta requerida.

Um acelerômetro é tipicamente projetado para prover uma resposta em frequência ampla e linear quando conectado a uma máquina. Um acelerômetro de linha deve ter uma medição linear em range até 10 ou 15kHz, +/- 3dB. Um detector ultrassônico normalmente trabalha em apenas uma estreita faixa de frequência – tipicamente entre 36 e 40kHz, e por isso o sensor ultrassônico de contato é otimizado para apenas esta frequência.

Conforme comentado anteriormente, para fazer o som inaudível tornar-se audível, utiliza-se a técnica heteródina. Em outras palavras, se você iniciar com um sinal de 36kHz e misturá-lo com outro sinal de frequência 38kHz, você terá um sinal final de 2kHz e de 74kHz. Você não poderá ouvir 36kHz, mas poderá ouvir 2kHz. Além disso, a natureza do sinal original permanece inalterada.

Para se fazer as medições utilizou-se um aparelho coletor de dados de ultrassom, similar ao aparelho mostrado abaixo.



Figura 29: Ilustração do aparelho SDT 170MD (adaptado do site SDT 170, 2010).



Figura 30: Ilustração dos acessórios aplicáveis para o monitoramento de condição dos mancais de rolamento. Da esquerda para a direita: (i) sensor tipo "caneta"; (ii) derivação para rosqueamento do acelerômetro e acoplamento da bomba de graxa; (iii) acelerômetro; (iv) sensor magnético; (v) cabo de extensão; (vi) aparelho coletor; (vii) fones de ouvido (Braskem/Triunfo, 2010).

Para fazer a leitura do som, o cristal piezoelétrico capta as ondas ultrassônicas recebidas, e como tem a espessura calculada para ressonar na frequência citada anteriormente, este então altera suas propriedades elétricas e gera um sinal de tensão proporcional.

A apresentação dos dados coletados se dá através do sinal de tensão gerado pelo sensor ultrassônico, porém em decibel ($dB\mu V$). É uma medida adimensional da razão entre duas tensões (μV) e é obtida a partir da equação 1 (Murphy e Rienstra, 2009). A definição do dB é obtida com o uso do logaritmo, o que torna possível substituir multiplicação e divisão por soma e subtração. Na Tabela 1 encontra-se uma breve conversão entre a medida $dB\mu V$ e a tensão μV .

$$X_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{X}{X_0} \right) \quad (1)$$

sendo:

X_{dB} = Medida da Razão entre X e X_0 ;

X = Valor da tensão medida;

X_0 = Valor da tensão de referência ($1 \mu V$).

Tabela 1: Conversão de valores, de $dB\mu V$ para μV (adaptado do site SDT 170, 2010).

40 $dB\mu V$	20 $dB\mu V$	6 $dB\mu V$	0 $dB\mu V$	-6 $dB\mu V$	-20 $dB\mu V$	-40 $dB\mu V$
100 μV	10 μV	2 μV	1 μV	0,5 μV	0,1 μV	0,01 μV

Para se interpretar os dados da Tabela 1, deve-se verificar que o valor de $6\text{ dB}\mu\text{V}$, por exemplo, equivale à duplicação do valor de tensão μV , pois esta altera-se de 1 para $2\mu\text{V}$. Este mesmo conceito deve ser aplicado para todos os valores apresentados. Da mesma forma, um aumento de $40\text{ dB}\mu\text{V}$ equivale a um aumento de 100 vezes na tensão gerada.

5.3 Definição do modo de coleta de dados

Para se coletar os dados de ultrassom dos mancais de rolamento, era inicialmente necessário montar uma base de dados, a fim de se garantir quais valores de leitura correspondiam a uma condição normal dos motores e quais correspondiam a uma condição de alarme, onde era necessária a relubrificação.

Por isso, todas as leituras de dados de ultrassom no período inicial de testes, correspondente a três meses, foram acompanhadas da leitura de vibração da máquina. A seguir, o local da coleta de ultrassom é caracterizado, bem como as máquinas onde a mesma era feita.

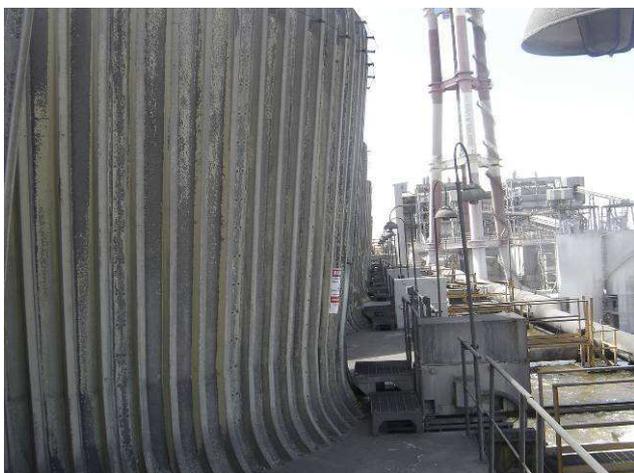


Figura 31: Ilustração da "bateria" de motores elétricos onde foi feita a coleta de dados de ultrassom (Braskem/Triunfo, 2010).



Figura 32: Momento da coleta de dados em um dos motores, com a utilização do sensor magnético (Braskem/Triunfo, 2010).



Figura 33: Momento da coleta de dados em um dos motores, com a utilização do sensor tipo "caneta" (Braskem/Triunfo, 2010).

6. Discussão dos resultados

Após os 3 meses da primeira fase do Projeto Experimental, foram feitas 10 leituras em cada um dos 12 motores, totalizando 120 leituras, sendo que para cada valor de $dB\mu V$ encontrado se tem também a aceleração medida com o coletor de dados de vibração.

6.1 Assertividade das lubrificações

Como já era esperado, a assertividade da lubrificação base tempo, até então o método utilizado nestes motores, é muito baixa, ou seja, a lubrificação base tempo não considera se o equipamento recebeu manutenção poucos meses atrás, enquanto outro equipamento ao lado recebeu manutenção há vários anos, ou então se um deles está submetido a uma condição muito mais severa de operação, por exemplo.

A Tabela 2 mostra os equipamentos acompanhados, as datas das medições, e a necessidade de relubrificação.

Tabela 2: Assertividade da lubrificação base condição X lubrificação base tempo.

Equipamento	24/jun	8/jul	15/jul	22/jul	29/jul	4/ago	19/ago	3/set	17/set	1/out
01A	Red	Red	Blue	Green	Red	Blue	Red	Green	Red	Red
01B	Red	Red	Blue	Red	Red	Green	Red	Red	Green	Green
01C	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
01D	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
01E	Red	Red	Green	Green	Red	Green	Red	Green	Green	Red
01F	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Red	Red
01G	Green	Red	Green	Red	Red	Green	Red	Green	Blue	Blue
01H	Green	Red	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Green	Red
01J	Green	Red	Green	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Red
03 ^A	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
03B	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
03C	Red	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Red	Red	Green

Legenda:

Houve necessidade de lubrificação?

Green Sim

Red Não

Blue Equipamento parado

Considerando-se o período de lubrificação base condição, foram feitas 25 relubrificações. Se tivesse sido mantida a lubrificação base tempo, com relubrificação a cada 15 dias, seriam feitas 84 relubrificações. Além disso, pode-se perceber que durante os três meses, não foi necessário lubrificar 04 dos motores, ou seja, para estes motores seriam bombeadas 96 gramas (visto as 12 gramas que constavam no Plano a cada 15 dias) desnecessariamente, e que contribuiriam fortemente para os problemas relacionados à lubrificação excessiva.

Assim sendo, das 84 lubrificações que seriam feitas em base-tempo, apenas 33 coincidiriam com a lubrificação executada a partir do monitoramento de condição, o que corresponde a uma assertividade de aproximadamente 40% no plano de lubrificação base-tempo, o que é um resultado muito baixo, principalmente considerando-se empresas de classe mundial.

6.2 Comparação das leituras de ultrassom e vibração

Conforme comentado anteriormente, foi considerado o apoio da técnica de análise de vibração, já utilizada há muitos anos na empresa, para auxiliar a embasar a formação da base de dados para a coleta de dados de ultrassom. Esta comparação demonstra claramente a eficiência da lubrificação quando há alteração de sinais de energia em alta frequência. As Figuras 34 a 36 mostram um exemplo típico da queda dos valores de vibração medidos em aceleração para o motor 01B, antes e após a relubrificação feita em 1º de outubro de 2010, demonstrando a eficácia citada.

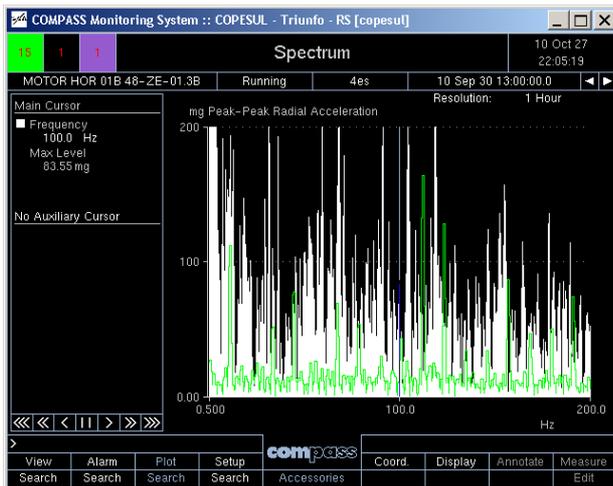


Figura 34: Ilustração do "carpete" de aceleração de vibração do motor 01B com valores acima do normal, porém sem picos de alta amplitude ao longo da faixa de frequência medida, um indicativo clássico de falta de lubrificação. A medida foi tomada no rolamento lado acoplado, instantes antes à lubrificação de 01/outubro (Braskem/Triunfo, 2010).

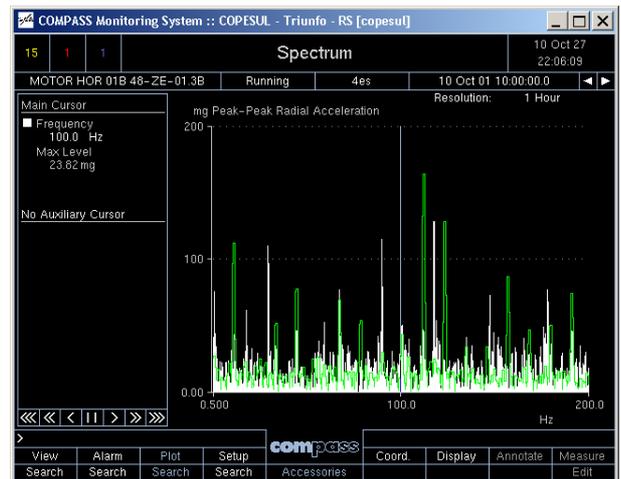


Figura 35: Ilustração do "carpete" de aceleração de vibração do motor 01B com valores dentro do normal ao longo da faixa de frequência medida. A medida foi tomada no rolamento lado acoplado, instantes antes à lubrificação de 01/outubro (Braskem/Triunfo, 2010).

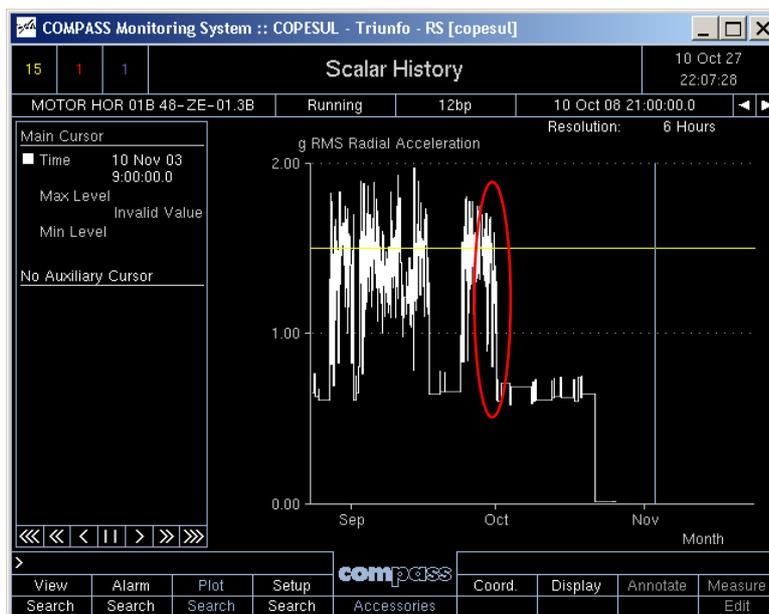


Figura 36: Ilustração do valor global de aceleração de vibração do motor 01B, medido no rolamento lado acoplado. Está assinalado o momento da relubrificação de 01/outubro, onde o valor da aceleração apresentou queda de 1,399g para 0,647g (Braskem/Triunfo, 2010).

7. Conclusões

Diferenças a partir de $8\text{ dB}\mu\text{V}$ na medição do ultrassom correspondem a um sinal de alerta, onde haveria a necessidade da relubrificação (Hall e Rienstra, 2009; Goodman, 2003). O que se percebeu no experimento prático é que este “guia causa X efeito” dos fabricantes dos coletores de dados de ultrassom não reflete a regra nas medições executadas.

Em muitos casos, como o detalhado nas Figuras 34 a 36, a coleta de ultrassom indicou valores dentro da faixa normal (10 a $16\text{ dB}\mu\text{V}$) para o histórico deste equipamento, apesar de um som bastante diferente do normal, ouvido a partir dos fones. Para certificar-se da real existência de um problema, foi feita a medição de vibração que, conforme detalhado nas figuras citadas, mostrou a necessidade de relubrificação. Comprovadamente, após a lubrificação a aceleração (energia transmitida pelo rolamento devido aos choques internos) caiu de $1,399\text{g}$ para $0,647\text{g}$, enquanto que o valor do ultrassom caiu cerca de $2\text{ dB}\mu\text{V}$ em cada mancal medido. De qualquer forma, existe a atenuante de que a técnica ainda está em fase experimental, e o fator humano na medição também precisa ser considerado e nesta fase do experimento ele tem, sem dúvida, influência significativa.

Além disso, observou-se que o software onde é possível o armazenamento dos dados coletados é muito limitado, pois não trabalha em rede e não tem funções além das básicas. É mais interessante criar um controle em planilha eletrônica para poder extrair gráficos de tendências, por exemplo.

Por outro lado, neste período de medições pôde-se constatar a assertividade das medições, que comprovaram que a lubrificação base tempo “acerta” o momento da falta de lubrificante em menos da metade das vezes. Além disso, no momento da lubrificação, o executante está às cegas, pois a quantidade de graxa é obtida através de uma fórmula, porém ninguém vai saber se esta é realmente suficiente para a situação enfrentada pelo equipamento naquele momento. Da mesma forma, no caso de haver a necessidade de uma relubrificação por demanda do intervalo entre relubrificações excedido, também o equipamento pode não estar necessitando de lubrificante, pois pode ter ficado um tempo considerável desde a última intervenção sem trabalhar, por exemplo.

Pelos motivos citados no parágrafo anterior, principalmente, a técnica da lubrificação base condição é muito bem-vinda ao mundo da manutenção, pois irá quebrar muitos paradigmas existentes, além de permitir uma readequação da mão-de-obra para execução destas atividades, pois os mesmos irão aos equipamentos, após uma boa base de dados montada, menos vezes que na sistemática tradicional. Isto permitirá aos Gestores direcionar a mão-de-obra para inspeções que agreguem muito mais no dia-a-dia.

O ganho na redução da quantidade de graxa é marginal, no entanto o aumento da confiabilidade dos equipamentos é de extrema importância para as empresas, visto a necessidade cada vez mais premente de equipamentos com vida útil tendendo ao infinito.

Referências

- ABRAMAN. 2009. Documento nacional 2009 – A situação da manutenção no Brasil. Disponível em: <http://www.abraman.org.br>. Acesso em: 30/09/2010.
- ALMEIDA, M.T. 2007. Manutenção preditiva. *Revista Indústria em Foco*, **1**:4-6
- ANDREUCCI, R. 2003. *Aplicação industrial: ensaio por ultrassom*. São Paulo, ABENDE, 80 p.
- APPLIED INDUSTRIAL TECHNOLOGIES. 2010. *Bearing Facts*. Disponível em: http://web.applied.com/base.cfm?page_id=3549. Acesso em: 17/09/2010.
- BRASKEM/TRIUNFO. 2007-2010. Históricos de manutenção em equipamentos industriais.
- GOODMAN, M. 2003. Condition-based lubrication using ultrasound technology. *Machinery Lubrication*, **2003**(9). Disponível em <http://www.machinerylubrication.com/Read/535/condition-based-lubrication>. Acesso em: 17/09/2010.
- HALL, J.; RIENSTRA, A. 2003. Applying acoustic vibration monitoring to predictive maintenance. *Maintenance World*. Disponível em: www.maintenanceworld.com/Articles/rienstraA/ultrasonic.pdf. Acesso em: 29/07/2010.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; MERRILL, J. 1994. *Fundamentos da física: gravitação, ondas e termodinâmica*. 3ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 280 p.
- JAMES, L.C.; LI, S.Y. 1995. Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring. *Wear*, **185**(1-2):67-74. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06591-1](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(95)06591-1)
- JOHNSON, M. 2010. Developing an electric motor lubrication plan. *Tribology & Lubrication Technology*, **66**(9):34-40.
- LIMA, C.R.C.; SOUZA, S.S. 2003. Manutenção centrada em confiabilidade como ferramenta estratégica. In: ENCONTRO NAC. DE ENG. DE PRODUÇÃO (ENEGEP), XXIII, Ouro Preto, 2003. *Anais...* Ouro Preto, Brasil, 8 p.
- MARU, M.M.; CASTILLO, R.S.; PADOVESE, L.R. 2007. Study of solid contamination in ball bearing through vibration and wear analyses. *Tribology International*, **40**(3):433-440. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2006.04.007>
- NSK. 2001. NSK BEARING DOCTOR. *Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos*. São Paulo, 36 p.
- MURPHY, T.; RIENSTRA, A. 2009. *Hear more: a guide to using ultrasound for leak detection and condition monitoring*. Fort Myers, Reliabilityweb.com, 166 p.
- PEG – PLATINUM ENERGY GROUP. 2010. Bearing Failure. Disponível em: <http://www.enerchecksystems.com/bearings.html>. Acesso em: 02/11/2010.
- PETROBRAS. 2010. Disponível em: <http://www.br.com.br>. Acesso em: 15/09/2010.

SDT 170 MD. 2010 - Disponível em: <http://www.sdtheardware.com/products/sdt170>. Acesso em: 14/10/2010.

SKF - SKF DO BRASIL. 2005. Tabela de possíveis falhas em rolamentos. Disponível em http://www.skf.com/portal/skf_br/home/literature?contentId=514292. Acesso em 21/09/2010.

SURTEC - SURDEZ E TECNOLOGIA. 2010. *Ouvido humano*. Disponível em: <http://surtec.sur10.net/audicao-e-som/ouvido-humano/>. Acesso em: 21/09/2010.

UE SYSTEMS INC., 2004. Lubrication handbook, Ultrasonic Condition-Based Lubrication. 7 p. Disponível em: <http://www.uesystems.com/media/19241/lubrication%20guide.pdf>. Acesso em: 17/08/2010.

Submissão: 12/11/2010
Aceite: 09/12/2010