

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**FERRAMENTA PREDITIVA POR ULTRASSOM
PARA DETECÇÃO DE FALHAS DE
LUBRIFICAÇÃO EM ROLAMENTOS**

Pedro Henrique Ortiz de Sá Menezes

Prof. Orientador: Alexandre Silva
Prof. Co-Orientador: José Paulo Vogel

**Rio de Janeiro
Junho de 2018**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**FERRAMENTA PREDITIVA POR ULTRASSOM
PARA DETECÇÃO DE FALHAS DE
LUBRIFICAÇÃO EM ROLAMENTOS**

Pedro Henrique Ortiz de Sá Menezes

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Alexandre Silva

Prof. Co-Orientador: José Paulo Vogel

Rio de Janeiro

Junho de 2018

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

M543 Menezes, Pedro Henrique Ortiz de Sá
Ferramenta preditiva por ultrassom para detecção de falhas de
lubrificação em rolamentos / Pedro Henrique Ortiz de Sá
Menezes.—2018.

xiii, 73f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.

Bibliografia : f. 71-73

Orientador : Alexandre Silva

Coorientador : José Paulo Vogel

1. Engenharia mecânica. 2. Rolamentos. 3. Ultrassom. 4.
Lubrificação e lubrificantes. I. Silva, Alexandre (Orient.). II. Vogel,
José Paulo (Coorient.). III. Título.

CDD 621

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, aos meus pais Ana Paula Ortiz de Sá Hermógenes de Menezes e Miguel Hermógenes de Menezes, aos meus irmãos, à minha família aos quais sem a dedicação para a minha educação pessoal e profissional de todos, eu não estaria aqui realizando este trabalho. Além dos mesmos que de certa forma me incentivaram a sempre buscar ser um melhor profissional e um melhor cidadão.

In memoriam do justo, profissional e ético professor José Paulo Vogel.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por terem sempre me dado todas as condições necessárias para que, independente da área escolhida como profissão, buscasse sempre fazer o meu melhor, com sabedoria, humildade e inteligência.

A toda equipe da Manutenção e Engenharia de Confiabilidade da Braskem S.A., unidade de Duque de Caxias, que me deram suporte e me incentivaram a buscar sempre o melhor conhecimento a ser aplicado na melhor forma de manutenção de uma planta industrial. Especialmente aos engenheiros David Lima e Fábio Guimarães, além dos técnicos Márcio Duarte e Kelvis Gil.

Agradeço também todo o suporte prestado pela equipe de lubrificação de rotativos da empresa Lubrin e por todas as dúvidas sanadas pelo engenheiro Luiz Enrique Assis e a gestora Ingrid Freitas.

E de forma especial a todos os demais que de algum modo possam ter contribuído para a elucidação das dúvidas e criação deste trabalho.

RESUMO

O trabalho tem como finalidade apresentar e demonstrar como se deu a implantação de uma nova técnica de identificação de falhas em mancais de rolamento lubrificados por graxa em equipamentos rotativos. Deste modo modificando o paradigma de lubrificação realizado em função do tempo e passa a ser realizada uma lubrificação base-condição. Os mancais de rolamento ou deslizamento são partes integrantes e fundamentais de quaisquer equipamentos dinâmicos, especialmente os rotativos. O que esta nova técnica busca é a partir do retorno de emissões acústicas em frequências ultrassônicas emitidas pelos mancais identificar, precocemente, possíveis falhas de lubrificação. Por meio da análise constante dos níveis de ruído emitidos em alta frequência a partir de rotas predefinidas de coleta de dados nos equipamentos, acompanhamento de tendências de ruído e comparação entre máquinas semelhantes. Deste modo espera-se prevenir possíveis falhas por excesso ou falta de lubrificante a partir das inspeções de rotina, dados históricos e recomendações do fabricante da ferramenta. Além disso, espera-se complementar as técnicas preditivas já utilizadas e a modificação do plano de lubrificação da companhia em função das análises, valores de referência e histórico de ruído da máquina medida, logo lubrificar os rolamentos quando necessário, diminuindo a quantidade de lubrificante utilizado e aumentando a confiabilidade do ativo e as rotinas de inspeção dos equipamentos.

Palavras chave: Lubrificação, Rolamentos, Ultrassom.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to present and demonstrate how the implementation of a new technique for the identification of failures in grease lubricated bearing bearings in rotary equipment. Thus, by modifying the lubrication paradigm as a function of time, a base-condition lubrication is performed. The bearing or sliding bearings are integral and fundamental parts of any dynamic equipment, especially the rotary. What this new technique seeks is from the return of acoustic emissions in ultrasonic frequencies emitted by the bearings to identify, at an early stage, possible lubrication failures. By means of constant analysis of the noise levels emitted in high frequency from predefined routes of data collection in the equipments, monitoring of tendencies of noise and comparison between similar machines. In this way it is expected to prevent possible excess or lack of lubricant failures from the routine inspections, historical data and recommendations of the tool manufacturer. In addition, it is expected to complement the predictive techniques already used and the modification of the lubrication plan of the company according to the analyzes, reference values and noise history of the machine, thus lubricating the bearings when necessary, reducing the amount of lubricant used and increasing the reliability of the asset and equipment inspection routines.

Key words: Lubrication, Bearing, Ultrasound.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação	3
1.2 Justificativa	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Metodologia	4
1.5 Organização do Trabalho.....	7
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2 Manutenção.....	9
2.1 Técnicas de manutenção preditiva	14
2.1.1 Líquido Penetrante	15
2.1.2 Partículas Magnéticas.....	15
2.1.3 Radiografia.....	16
2.1.4 Ultrassom	17
2.1.5 Corrente Parasita	18
2.1.6 Termografia.....	18
2.1.7 Análise de óleo.....	19
2.1.7.1 Propriedades do lubrificante.....	22
2.1.7.2 Contaminantes	23
2.1.7.3 Espectrometria	24
2.1.7.4 Ferrografia	25
2.2 Tribologia.....	28
2.2.1 Lubrificação	28
2.2.1.1 Lubrificação hidrodinâmica.....	31
2.2.1.2 Lubrificação limite	32
2.2.1.3. Lubrificação mista	33

2.2.1.4	Lubrificação elastrohidrodinâmica (EHL).....	33
2.2.1.5	Lubrificação por graxa.....	34
2.3	Rolamentos	36
2.4	Vibração.....	41
FERRAMENTA PREDITIVA EM ROLAMENTOS.....		49
3	Emissão Acústica e Ultrassom em rolamentos	49
3.1	Materiais e métodos	51
CONCLUSÕES		65
4.1	Sugestões de trabalhos futuros.....	66
4.2	Referências.....	67

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Medição de mancal com Ultraprobe 9000 ATEX. (UE SYSTEM, 2004)
- Figura 2: Ultraprobe 201 – Grase Cady acoplado em uma bomba de graxa manual. (UE SYSTEM, 2004)
- Figura 3: Comparativo de custos de manutenção. (ABRAMAN, 2017)
- Figura 4: Gráfico de barras de custos de manutenção. (ABRAMAN, 2017)
- Figura 5: Curva da banheira para a vida útil de uma máquina. (LEVIN, M. A.; KALAL, T.T., 2003)
- Figura 6: Distribuição organizacional de acordo com setores industriais. (ABRAMAN, 2017)
- Figura 7: Gráfico de barras da distribuição organizacional de acordo com setores. (ABRAMAN, 2017)
- Figura 8: Comparação de disponibilidade de diferentes setores industriais. (ABRAMAN, 2017)
- Figura 9: Gráfico de barras do custo de manutenção *versus* disponibilidade. (ABRAMAN, 2017)
- Figura 10: Técnica Yoke de indução de campo magnético. (NEPOMUCENO, 1989)
- Figura 11: Fundamentos e contraste da radiografia industrial. (NEPOMUCENO, 1989)
- Figura 12: Termografia lateral de um redutor de uma célula de resfriamento. (BRASKEM, 2018).
- Figura 13: Termografia frontal de um redutor de uma célula de resfriamento. (BRASKEM, 2018).
- Figura 14: Curva PF. (MGS PRUFTECHNIK, 2018).
- Figura 15: Escala de números NAS. (HYDAC, 2002 - Modificado)
- Figura 16: Escala de número de partículas ISO 4406. (PARKER, 2000)
- Figura 17: Classificação das partículas de desgaste. (USP, 2004)
- Figura 18: Imagens ampliadas das partículas na análise de óleo. (HYDAC, 2002 - Modificado)
- Figura 19: DCL de um rolamento. (CARRETEIRO, R.,; BELMIRO, P., 2006)
- Figura 20: Curva ZNP. (CARRETEIRO, R.,; BELMIRO, P., 2006)
- Figura 21: Formação de cunha de óleo e distribuição de pressão. (CARRETEIRO, R.,; BELMIRO, P., 2006)

Figura 22: Pressão e velocidade de óleo lubrificante no interior de um contato EHL. (CARRETEIRO, R.; BELMIRO, P., 2006)

Figura 23: Principais causas de paradas de máquinas. (FAG, 2008)

Figura 24: Ciclo de vida do rolamento. (FAG, 2008)

Figura 25: Surgimento da falha na pista de um rolamento. (NSK, 1998)

Figura 26: Tabela de possíveis falhas de rolamento. (SKF, 1997 – Modificado)

Figura 27: Gráfico de (a) aceleração por tempo e (b) aceleração por frequência. (RAO, B. K. N., 1996)

Figura 28: Espectro de vibração. (MVI TECHNOLOGIES GROUP, 2003 - Modificado)

Figura 29: Média, valor RMS e Pico de uma onda. (BEZERRA, R. A., 2004)

Figura 30: (a) Comportamento de um valor de Pico e RMS (b) Fator de Crista. (BEZERRA, R. A., 2004)

Figura 31: Fator K para desgaste. (MITCHELL, 1993)

Figura 32: Sequenciamento de procedimentos da técnica do envelope. (BEZERRA, R. A., 2004)

Figura 33: Ruído de fundo e faixa audível conforme a faixa de frequência. (ROSA, S. L., 2007)

Figura 34: Enrolamento do motor com excesso de graxa. (BRASKEM, 2018).

Figura 35: Rolamento o motor com excesso de graxa. (BRASKEM, 2018).

Figura 36: Vista frontal do Ultraprobe 9000 ATEX. (UE SYSTEM, 2004 - Modificado)

Figura 37: Vista Frontal do Ultraprobe 201. (UE SYSTEM, 2004 - Modificado)

Figura 38: Pontos de coleta de dados de um motor. (BRASKEM, 2011).

Figura 39: Coleta de dados pelo operador. (BRASKEM, 2018).

Figura 40: Fluxograma de processo de coleta e análise de dados. (BRASKEM, 2017).

Figura 41: Motor 1 LA em 30 kHz (a) Motor 1 LOA em 30 kHz (b).

Figura 42: Motor 1 LA em 38 kHz (a) Motor 1 LOA em 38 kHz (b).

Figura 43: Motor 1 LA em 46 kHz (a) Motor 1 LOA em 46 kHz (b).

Figura 44: Motor 1 LA em todas as frequências (a) Motor 1 LOA em todas as frequências (b).

Figura 45: Motor 2 LA em 30 kHz (a) Motor 2 LOA em 30 kHz (b).

Figura 46: Motor 2 LA em 38 kHz (a) Motor 2 LOA em 38 kHz (b).

Figura 47: Motor 2 LA em 46 kHz (a) Motor 2 LOA em 46 kHz (b).

Figura 48: Motor 2 LA em todas as frequências (a) Motor 2 LOA em todas as frequências (b).

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Calendário de medições (em semanas).

Tabela 2: Ensaio de análise de óleo para sistemas hidráulicos e compressores.

Tabela 3: Ensaio de análise de óleo para redutores e mancais de deslizamento.

Tabela 4: Ensaio de análise de óleo para motores de combustão interna e turbo geradores.

Tabela 5: Ensaio de análise de óleo para óleos de selagem (fluido barreira).

Tabela 6: Aplicação em função do fator NDm.

Tabela 7: Graxas em número crescente de consistência.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABRAMAN - Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos.

AGMA - American Gear Manufactures Association – Associação Americana dos Fabricantes de Engrenagem.

AM - Amplificação Modulada.

ATEX - Atmosfera Explosiva.

EHL - Elastohydrodynamic lubrication - Lubrificação Elastro Hidrodinâmica.

ERP - Enterprise Resource Planning – Planejamento dos Recursos da empresa.

END - Ensaio Não-Destrutivo.

FFT - Fast Fourier Transform – Transformada Rápida de Fourier.

FMEA - Failure Mode and Effect Analysis – Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos.

H/H - Relação homem por hora trabalhada.

IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis.

ISO - International Organization for Standardization – Organização para Padronizações Internacionais.

IT - Instrução de Trabalho.

kHz - quilo Hertz (10^3 Hz).

LA - Lado Acoplado.

LOA - Lado Oposto ao Acoplado.

MTBF - Mean Time Between Failure – Tempo Médio Entre Falhas.

NASA - National Aeronautics and Space Administration – Administração Nacional Aeronáutica e do Espaço.

NBR - Norma Brasileira.

NLGI - National Lubricating Grease Institute – Instituto Nacional de Lubrificação por Graxa.

RCA - Root Cause Analysis – Análise de Causa Raiz.

RCM - Realiability Centred Maintenance – Manutenção Centrada na Confiabilidade.

RMS - Root Mean Square - Valor Médio Quadrático.

RPM - Rotações por Minuto.

SAP - System, Anwendungen, Produkte in der Datenverarbeitung – Sistemas, Aplicações e Programas em processamento de dados.

SPIE - Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos.

TAN - Total Acid Number – Número de Acidez Total.

TBN - Total Base Number – Número Básico Total.

Δt - intervalo de tempo.

B - filtro de passagem de banda.

$dB\mu V$ - unidade de engenharia obtida por meio da razão entre duas tensões, que apresenta os valores dos dados coletados.

f_c - frequência central de corte.

F_{cr} - fator de crista analisado no domínio da frequência.

F_k - fator K.

f_l - frequência inferior de corte.

f_u - frequência superior de corte.

g - aceleração da gravidade (m/s^2).

$L10ah$ - vida de fadiga.

X - Valor da tensão medida.

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

X_{dB} - Medida da Razão entre X e X_0 .

X_{med} - valor média absoluta.

X_{rms} - valor RMS nível global.

X_{pico} - valor de pico.

$x(t)$ - sinal de deslocamento que se desenvolve ao longo do tempo.

$X(\omega)$ - sinal de deslocamento que se desenvolve no domínio da frequência.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O constante desenvolvimento das indústrias com a utilização de equipamentos rotativos requer uma boa gestão do processo produtivo, afim de maximizar a produção com maior disponibilidade dos ativos na planta industrial, deste modo a maior atenção no setor de manutenção dentro de uma companhia são os mancais de rolamentos. Historicamente, há um significativo número de falhas de rolamentos ocasionadas por lubrificação. Sendo esta realizada com base em intervalos de tempo e quantidade definidos pelo fabricante dos equipamentos ou pela experiência de campo dos técnicos e engenheiros responsáveis.

A medição da energia emanada pelos rolamentos e seus componentes internos quando estes estão em funcionamento é a principal variável mensurada e analisada deste componente. Contudo diversos fatores podem influenciar na vida útil de um rolamento, ou quaisquer outros componentes: seja uma maior carga operacional, temperaturas maiores, ambiente contaminado, falhas de montagens e, até mesmo, defeitos de fabricação de um determinado lote de peças. Portanto na análise da variável deve-se levar em consideração toda e qualquer modificação operacional fora do escopo ao qual este elemento foi projetado.

A análise de vibração há várias décadas foi e é a principal ferramenta de análise da energia emanada pelos rolamentos e seus componentes internos. Esta ferramenta é consolidada como a mais abrangente em termos de prever possíveis falhas. Dado seu acompanhamento histórico dos espectros de vibração e assim identificando melhor os tipos e modos de falhas, porém, por ser já estar consolidada acabou se tornando como a única ferramenta eficaz dentro da manutenção preditiva.

No final de século XX já se tinha a analogia entendida que a lubrificação seria para a máquina assim como o sangue é para o corpo humano. Logo, desta maneira foram iniciados os processos de análise físico-química dos lubrificantes utilizados de forma a auxiliar o já existente trabalho de análise vibracional. A partir do trabalho em conjunto de diferentes técnicas de análises, juntamente com o avanço tecnológico dos transdutores, foi possível uma evolução na detecção de falhas cada vez mais precoces, ou seja, em faixas de frequência cada vez maiores. Conforme aprofundado o conhecimento dos especialistas no assunto e juntamente com as análises, foram descobertos modos de falhas determinados para cada tipo de componente interno dos rolamentos. Assim sendo, em diversos softwares desenvolvidos

estes mesmos modos de falha já acompanham a plataforma a fim de ajudar o corpo técnico a elucidar algum problema, ou até mesmo apontar para fácil entendimento alguma falha já existente no componente, mesmo que o operador ou profissional não seja especialista no assunto.

A partir do contínuo e crescente avanço da análise e aliado à crescente necessidade de campanhas maiores, ou seja, de disponibilidade de tempo de funcionamento dos ativos maior e uma melhor relação custo *versus* benefício, passou-se a perceber que a utilização de ensaios não destrutivos (END's) seria uma excelente alternativa. Visto que outras especialidades já o utilizavam e era sabido o poder de coleta de dados por meio deste. Dentre esses ensaios estava a possibilidade de medição de energia liberada pelos mancais de rolamento para que, além de mensurar a vibração, houvesse também a técnica de emissão acústica aliada à manutenção preditiva dos equipamentos com o intuito de coletar dados em frequências ultrassônicas, faixas maiores as quais a vibração consegue analisar.

Historicamente, as falhas oriundas da lubrificação podem ter duas causas-raízes distintas, ou por falta de lubrificante, como na maioria dos casos, ou por excesso de lubrificação. O excesso causa aquecimento demasiado nos mancais, rompimento das vedações internas e até curto circuito de motores, pois que graxas utilizadas nos rolamentos de motores elétricos são fabricadas em bases metálicas, logo condutores elétricos. Já a falta de lubrificante também causa aquecimento e o contato entre as partes metálicas leva a falha rapidamente se não for reparada.

Pois que considerando esses fatores apresentados, o trabalho foi iniciado a fim verificar, realimentar e validar o plano de lubrificação vigente dos principais equipamentos rotativos em uma planta industrial, sabendo que estes equipamentos estão sendo analisados periodicamente por vibração. E identificar por meio da emissão acústica possíveis mancais de rolamento com tendências de falha por lubrificação, independentemente do modo ao qual se manifeste. Logo com a ferramenta implantada, os ganhos esperados seriam mensuráveis em confiabilidade, MTBF, diminuição de quantidade de lubrificantes utilizada, maior disponibilidade dos ativos, diminuição dos custos de manutenção, maior disponibilidade de mão de obra, maior eficiência do plano de lubrificação dos equipamentos rotativos e um maior número de inspeções das máquinas, ou seja, um maior contato entre executor e operação.

Portanto, a análise de vibrações, a emissão acústica ultrassônica e a lubrificação seriam parceiras integradas na prevenção e predição de possíveis falhas.

1.1.Motivação

Em grandes companhias industriais, o setor de Manutenção e Confiabilidade, juntamente com suas diretrizes e estratégias de atuação são os principais elementos aos quais descrevem como a empresa irá atuar e gerenciar seus recursos para uma disponibilidade dos equipamentos cada vez maior visando uma produção contínua e sem interrupções e falhas inesperadas. Sabendo deste esforço de melhoria contínua e em conjunto com desenvolvimento tecnológico, há a necessidade constante de adaptar e modificar, quando necessário, os atuais e tradicionais paradigmas de atuação do setor.

Deste modo a Lubrificação, já difundida e sabida a sua importância há centenas de anos, necessita de atenção e desenvolvimento permanentes, a fim de obter melhores níveis de produção, eficiência energética e menores níveis de falha.

Visto isso, este trabalho tem como motivo principal apresentar uma nova técnica para melhor gerenciamento e confiabilidade da Lubrificação em uma indústria com equipamentos rotativos.

1.2.Justificativa

A sistemática de manutenção se mostra em evolução desde que há preocupação com a confiabilidade e a disponibilidade do equipamento para a produção. A partir do pressuposto que a função da manutenção é garantir esses pilares de disponibilidade e confiabilidade dos ativos, de modo a atender o programa de produção com segurança e dentro dos custos previstos. A manutenção preditiva aumentou de importância juntamente com o desenvolvimento do pensamento empresarial de gestão de ativos.

Partindo do princípio de pensamento anteriormente citado, a NASA no início da década de 1970 publicou um relatório técnico onde recomendava que, a partir da captação de dados em frequências ultrassônicas o monitoramento da condição de mancais de rolamento (NASA, 1972). E com o desenvolvimento tecnológico, a técnica passou a se desenvolver bastante a partir da década de 1990, tendo se difundindo dentro das companhias e congressos especializados desde então.

No Brasil, somente algumas grandes companhias, como a Cargill, Vale e a própria Braskem tem desenvolvido o interesse internamente agindo frente às concorrentes. Uma vez

que em congressos internacionais e companhias no exterior a difusão já é em grandes proporções. Colocando a área de lubrificação com a importância necessária à manutenibilidade do ativo fixo.

Assim sendo, em uma unidade industrial operando interruptamente, quanto mais dados para os mantenedores analisarem das diversas ferramentas disponíveis, melhor para a saúde do equipamento em operação e a garantia de continuidade do processo produtivo como um todo. Contudo a implantação de uma nova ferramenta de diagnóstico preditivo em uma unidade industrial já operando necessita de adaptações para a sua operacionalização e implantação por completa. Desde as rotinas de coleta de dados, até um novo ambiente ao qual a Engenharia de Confiabilidade da empresa irá se situar em fornecer e apontar diagnósticos baseados em dados de emissão acústica, como é o caso.

1.3. Objetivos

O presente trabalho busca explicitar como foi a implantação da ferramenta de emissão acústica em frequências ultrassônicas. Esta utilizada na planta industrial da Braskem S.A. em Duque de Caxias em três unidades operacionais: Q4, PE9 e PP5. Para um total de quarenta unidades industriais no mundo, sendo vinte e nove no Brasil. As quais, as unidades do estado do Rio de Janeiro, correspondem com parte de uma produção anual de dezesseis milhões de toneladas de resinas termoplásticas e outros produtos químicos e petroquímicos por ano. Desta forma a ferramenta busca de maneira preditiva e complementar fornecer dados para diagnósticos de possíveis falhas de equipamentos rotativos dentro da Engenharia de Confiabilidade e Manutenção da companhia de modo que estes se tornem mais precisos e mais incipientes.

1.4. Metodologia

A metodologia baseada na detecção do diagnóstico por ultrassom é realizada de forma experimental e em conjunto com outras técnicas preditivas disponíveis no setor da indústria em questão. Para tal a técnica se baseia em dois princípios básicos para a coleta de dados: comparação e tendência.

O método comparativo vai avaliar rolamentos de esferas com carga, formas construtivas e velocidades iguais. Além da definição do ponto de medição ser o mesmo, independente do executor da tarefa de medição. Já o método de tendência, para a observação da variação dos níveis de ruído conforme há variação de carga, tempo, velocidade, entre outros fatores externos.

As instruções e os equipamentos utilizados foram o Ultraprobe 9000 ATEX, como visto na Figura 1 e o Ultraprobe 201, Figura 2. Onde o primeiro afirma que para o monitoramento de rolamentos as frequências entre 24 kHz e 50 kHz detectam mudanças de amplitude das ondas vibracionais antes de diagnósticos com outras ferramentas preditivas, como a análise de vibrações. Já a ferramenta Ultraprobe 201 é específico e foi desenvolvido para análise em aplicações de lubrificação por graxa e este vem de fábrica calibrado na frequência de 38 kHz.



Figura 1: Medição de mancal com Ultraprobe 9000 ATEX. (UE SYSTEM, 2004)



Figura 2: Ultraprobe 201 – Grase Cady acoplado em uma bomba de graxa manual. (UE SYSTEM, 2004)

Logo, em um primeiro momento do início da implantação e operacionalização da ferramenta, ambos iriam realizar o diagnóstico na faixa de 38 kHz. E, em vista de melhor aprimoramento de coleta de dados, a Engenharia decidiu por também coletar nas faixas de 30 kHz e 46 kHz com a ferramenta Ultraprobe 9000 ATEX.

Estas três frequências buscam uma melhor aquisição de dados, porque segundo o manual do fabricante os defeitos característicos de rolamentos podem estar presentes desde 24 kHz até 50 kHz. Portanto como serão utilizadas duas ferramentas, uma com a frequência inalterada de 38 kHz e outra que pode variar de 20 kHz a 100 kHz, optou-se por tentar abranger a maior possibilidade de coleta de dados sem prejudicar a viabilidade operacional com tempo em campo, nem tão pouco a interferência de ruídos externos. Esta última ocorrendo com maior intensidade a partir de frequências abaixo de 30 kHz.

A expectativa seria de alguns meses coletando dados da emissão acústica tendo em vista gerar alguns gráficos com curvas características de tendências, o que já seria possível definir uma linha base e os limites superiores e inferiores. Além disso quando houvesse alguma modificação expressiva nos valores de decibéis do comportamento de cada rolamento específico para cada faixa de operação e em cada regime de trabalho indicaria já o início do processo de falha do rolamento em análise. Contudo houve o cuidado para que a partir do início da coleta de valores de emissão acústica em decibéis, estes não significariam que seriam os valores baseados para predizermos a saúde do rolamento a partir de então. Pois que poderiam já haver falhas instaladas nestes rolamentos e os valores indicados serem os correspondentes ao diagnóstico de alguma falha presente, sejam de pista externa, pista interna, gaiola, esfera ou de natureza do próprio lubrificante escolhido.

A parte organizacional da coleta de dados de emissão acústica foi definida principalmente para sabermos como seria o comportamento de cada rolamento em diferentes regimes de trabalho para diferentes equipamentos, sejam bombas centrífugas, sopradores, compressores centrífugos, compressores de parafusos e por fim diferentes motores elétricos de indução. Logo em cada caso deste teríamos que limitar um valor de decibéis ao qual a ferramenta irá nos retornar na coleta – chamada de *base line* ou linha de base - a fim de que a partir de uma diferença de oito a doze decibéis (como indica o manual da ferramenta) há a necessidade da lubrificação deste mancal. Tendo em vista este desafio, a Engenharia propôs revisar este valor-base após quinze rotas de coleta nos ativos selecionados.

As rotas de coleta eram pré-definidas com base no plano de lubrificação já existente e expostas no portal on-line LabitWeb™ da empresa Lubrin™ (Lubrificação Industrial Ltda.).

Onde as rotas foram executadas nas duas semanas anteriores à lubrificação programada, na semana da lubrificação e nas duas semanas posteriores à lubrificação. A fim de se enxergar as diferenças em valores e o comportamento da emissão acústica quando a lubrificação é realizada nos mancais, além do comportamento em fases críticas.

Tabela 1: calendário de medições (em semanas).

PLANILHA COMPLETA DE TAGS ANALISADOS											Próximas Medições:								
ÁREA	TAG	FREQ DE LUB (DIAS):	PROX DATA DE LUB (SEMANA)																
			MANCAL LA:			MANCAL LOA:			MANCAL DE ESCORA:										
UNIB4	1-GA-301	90	16	28	40	16	28	40	-	-	-	16	17	18	26	27	28	29	30
UNIB4	1-GA-301S	90	25	37	49	25	37	49	-	-	-	23	24	25	26	27	35	36	37
UNIB4	1-GA-401	180	23	47	-	23	47	-	-	-	-	21	22	23	24	25	45	46	47
UNIB4	1-GA-401S	180	21	45	-	21	45	-	-	-	-	19	20	21	22	23	43	44	45
UNIB4	1-GA-402	180	27	51	-	27	51	-	-	-	-	25	26	27	28	29	48	49	51
UNIB4	1-GA-402S	180	31	-	-	31	-	-	-	-	-	16	17	18	19	20	40	41	42
UNIB4	1-GA-404	180	18	42	-	18	42	-	-	-	-	16	17	18	19	20	40	41	42
UNIB4	1-GA-404S	180	18	42	-	18	42	-	-	-	-	16	17	18	19	20	40	41	42
UNIB4	1-GA-405	90	26	38	50	26	38	50	-	-	-	24	25	26	27	28	36	37	38
UNIB4	1-GA-405S	90	26	38	50	26	38	50	-	-	-	24	25	26	27	28	36	37	38
UNIB4	1-GA-406	90	25	37	49	25	37	49	-	-	-	23	24	25	26	27	35	36	37
UNIB4	1-GA-406S	90	25	37	49	25	37	49	-	-	-	23	24	25	26	27	35	36	37
UNIB4	1-GA-410	90	16	28	40	23	35	47	-	-	-	16	17	18	26	27	28	29	30
UNIB4	1-GA-410S	90	16	28	40	16	28	40	-	-	-	16	17	18	26	27	28	29	30
UNIB4	1-GA-412	7	16	17	18	-	-	-	-	-	-	16	17	18	19	20	21	22	23
UNIB4	1-GA-412S	7	16	17	18	-	-	-	-	-	-	16	17	18	19	20	21	22	23

A expectativa da utilização da ferramenta era complementar e aprimorar, baseado na condição do mancal, o plano de lubrificação já existente. Visto que o mesmo era baseado, principalmente em recomendações do fabricante e experiência do corpo de Engenharia nesta unidade industrial, que já estava operando há mais de doze anos. Modificando desta maneira o paradigma existente dos profissionais de lubrificação ser somente “executores de lubrificação” e passem a ser parte integrante da equipe de manutenção preditiva como inspetores da condição e saúde dos mancais e rolamentos subsequentes. Aumentando em confiabilidade a parte de lubrificação dos ativos, diminuído a chance de haver falhas decorrentes da falta, ou mais possivelmente, do excesso de lubrificante dentro de um mancal de rolamento.

1.5. Organização do Trabalho

No Capítulo 1 foram definidos os objetivos específicos, motivação sobre o tem e estruturação acerca do desenvolvimento da monografia.

No capítulo 2 apresentam-se uma revisão da literatura, contextualização da manutenção desenvolvida, os diagnósticos de falhas e abordagem específica da ferramenta de análise de ultrassom para a lubrificação. Além do modo ao qual como a tecnologia é baseada.

No Capítulo 3 é abordada a ferramenta preditiva após a revisão dos princípios e como foi desenvolvida a implantação da ferramenta num no ambiente industrial de uma petroquímica.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais, as conclusões sobre o mesmo e proposta de trabalhos futuros complementares a esse.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. Manutenção

Toda instalação industrial, ou qualquer outro tipo de atividade que pretende fabricar algum componente, seja desde o mais simples até o processo produtivo mais complexo necessita de soluções para desgastes, falhas, quebras, fraturas e outros incidentes que ocorrem durante a produção. As máquinas apresentam durante seu funcionamento certo grau de desgaste naturalmente, logo por esses motivos, toda atividade contínua requer uma manutenção, sem a qual todo o sistema, por mais simples ou complexo, poderá vir a falhar e consequentemente colapsar.

O pensamento mais comum que se observa é que o setor de Manutenção é um “mal necessário”, já onde se espera a ocorrência da quebra e alguém precisa reparar o dano causado. Mas, um estudo detalhado sobre custos de manutenção se mostra como parcela ínfima perto dos ganhos a qual a disponibilidade do maquinário possibilita na produção, como visto nas Figuras 3 e 4, no estudo feito pela ABRMAN (2017). Embora este tipo de pensamento ainda esteja presente em diversos setores e companhias, a importância da manutenção é rapidamente percebida no pronto momento da falha e estagnação do fluxo de operação. Porém, como são observados os custos totais da manutenção frente aos benefícios da disponibilidade ou faturamento são valores muito pequenos. O que reforça a tese de que uma melhor eficiência da companhia vem juntamente com boa gestão da manutenção estratégica de acordo com a ABNT NBR ISO 55.000 sobre a Gestão de Ativos.

Setores	Custo Manutenção / Faturamento (%)	Custo Manutenção / Valor Imobilizado (%)	Custo Relativo Pessoal Próprio (%)	Custo Relativo Material (%)	Custo Relativo a Contratação (%)	Outros Custos Relativos (%)
Açúcar e Alcool, Alimentos e Bebidas	4%	6%	40%	40%	20%	0%
Aeronáutico e Automotivo	3%	13%	54%	32%	15%	0%
Eletroeletrônicos - Energia Elétrica	7%	6%	44%	29%	27%	4%
Químico e Sanamento	5%	5%	46%	38%	16%	0%
Mineração e Siderúrgico	5%	10%	50%	37%	14%	0%
Petróleo e Petroquímico	4%	15%	41%	31%	28%	0%
Papel e Celulose e Plástico	3%	8%	39%	49%	12%	6%
Predial e Prestação de Serviços (EQ e MO)	4%	4%	49%	23%	28%	2%
Máquinas e Equipamentos - Metalúrgico	3%	1%	51%	37%	12%	3%
Média Geral	4%	7%	46%	35%	19%	2%

Figura 3: Comparativo de custos de manutenção. (ABRAMAN, 2017)

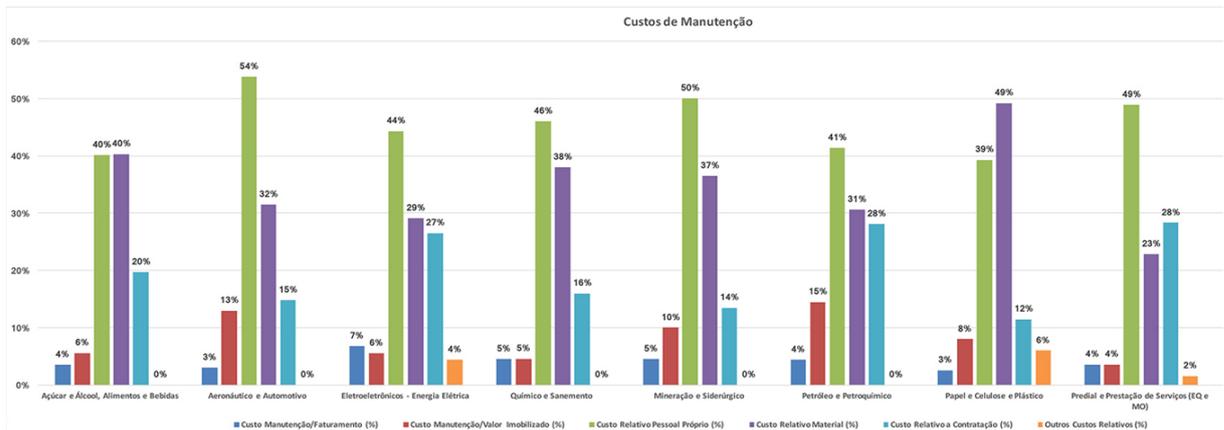


Figura 4: Gráfico de barras de custos de manutenção. (ABRAMAN, 2017)

Ainda que o objetivo final seja a realização da produção em si, a mesma somente se dará de forma integrada e com planejamento, ou seja, quanto melhor for o entrosamento entre as áreas correlatas, menores serão os custos de paradas forçadas com benefícios mútuos de maneira apreciável. Segundo NEPOMUCENO (1989), o gasto com métodos, processos, instrumentos e ferramentas destinadas à manutenção representa um aumento da vida útil do equipamento muitas vezes superior ao investido na própria manutenção.

A vida útil da máquina é seguida pela forma clássica e já bastante difundida “Curva da Banheira” na Figura 5, onde se separa a mesma em três partes principais. A primeira fase, chamada de “mortalidade infantil” significa as falhas que ocorrem no início da vida do equipamento, sendo estes causados por erro de projeto, instalações mal executadas, problemas de fabricação ou de algum subcomponente. Já a segunda, e maior fase, é uma região de grande estabilidade, onde as falhas são provenientes de causas aleatórias, como alguma carga extra no processo, problemas de sobre tensão elétrica, cavitação, ou seja, relacionados à forma de utilização dos equipamentos. Por fim, a terceira, e última fase, é responsável pela parte final da vida útil do equipamento, onde as principais causas de falhas são causadas pelo desgaste dos componentes. Onde a solução seria a troca dos mesmos.

A curva da banheira sempre é representada no eixo das abscissas o tempo, seja em horas, meses ou anos, e no eixo das ordenadas poderá ser a taxa de falhas, a probabilidade de ocorrência de falha ou quaisquer outros fatores que meçam a quantidade de ocorrências de falhas em um determinado conjunto total de ativos.

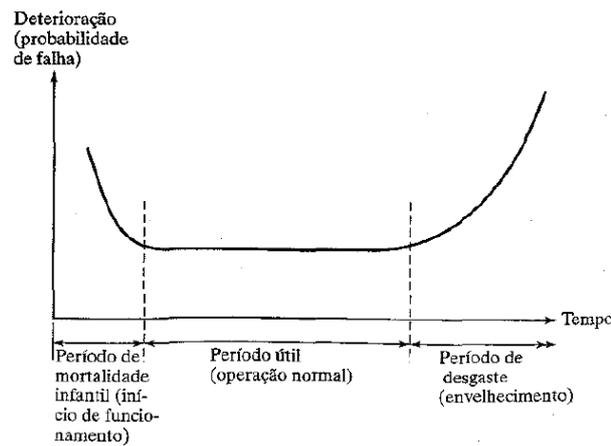


Figura 5: Curva da banheira para a vida útil de uma máquina. (LEVIN, M. A.; KALAL, T.T., 2003)

A fim de que uma função determinada de uma empresa tenha sucesso, é preciso ter eficiência no que se propõe realizar. A eficiência é mensurada de forma organizacional com metas, objetivos e ações as quais os responsáveis são submetidos. Assim, os serviços prestados na área de mantenebilidade também requerem uma estrutura organizada. Logo, a filosofia empregada na manutenção delimitará o método de como todo o fluxo de trabalho transcorrerá. Como podemos ver nas Figuras 6 e 7, de acordo com o Documento Nacional da Abraman de 2017, a organização central é responsável por 45% das companhias de petróleo e petroquímico (objeto de estudo nesse caso), além de existir 33% das companhias com uma organização descentralizada, além de 22% restantes de organização mista dentro das companhias do setor.

Setores	Organização Central (%)	Organização Descentralizada (%)	Organização Mista (%)
Açúcar e Alcool, Alimentos e Bebidas	67%	11%	22%
Aeronáutico e Automotivo	50%	0%	50%
Eletroeletrônicos - Energia Elétrica	33%	50%	17%
Químico e Sanamento	67%	33%	0%
Mineração e Siderúrgico	50%	0%	50%
Petróleo e Petroquímico	45%	33%	22%
Papel e Celulose e Plástico	75%	0%	25%
Predial e Prestação de Serviços (EQ e MO)	45%	33%	22%
Máquinas e Equipamentos - Metalúrgico	60%	20%	20%
Média Geral	55%	20%	25%

Figura 6: Distribuição organizacional de acordo com setores industriais. (ABRAMAN, 2017)

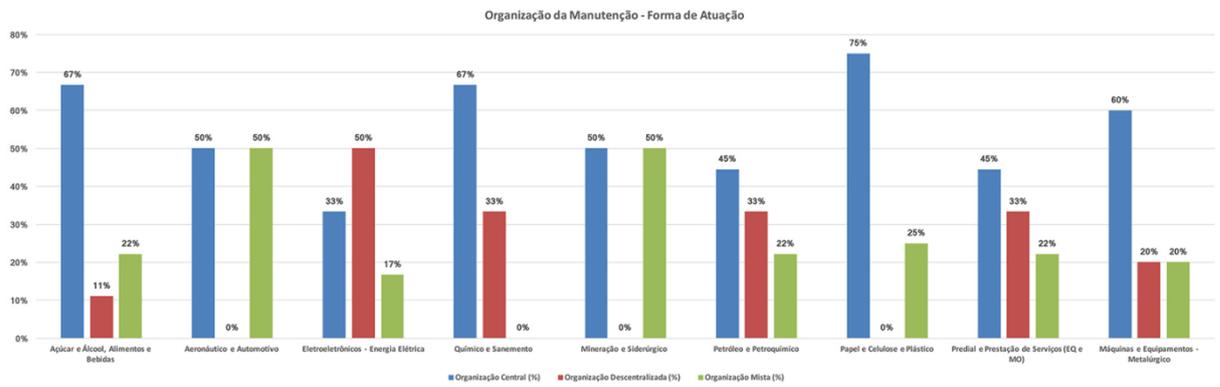


Figura 7: Gráfico de barras da distribuição organizacional de acordo com setores. (ABRAMAN, 2017)

Toda companhia tem em seu pilar estratégico como deverá ser conduzido o tipo de manutenção de determinado equipamento, este baseado em alguns fatores, tais como a criticidade do equipamento (real importância da máquina para o funcionamento da fábrica), custo de manutenção, impacto em segurança e meio ambiente se ocorrer alguma falha repentina, se existe equipamento reserva ou em *stand by*, entre outros, segundo DORIGO e NACIF (2009).

A partir da compilação destas variáveis são associadas às políticas de engenharia, organização e fluxo de peças sobressalentes no almoxarifado, planejamento de parada da máquina e alocação de mão de obra.

Nas indústrias em geral são encontrados três estratégias básicas de programação e planejamento de manutenção:

- Corretiva: manutenção realizada após a ocorrência da falha do equipamento, onde o mesmo não impacta significativamente em nenhuma dos elementos anteriormente citados. Portanto, não é de interesse da companhia deslocar tempo e H/h e não há planejamento e nem preocupação demasiada com a operação do mesmo.
- Preventiva: a intervenção de manutenção é realizada baseada em intervalos fixos de tempo (pode ser tempo corrido ou de operação). Desta forma há uma forma de planejamento prévio para alocação de materiais e mão de obra. Os intervalos são previamente definidos segundo as experiências prévias e o histórico de falhas (disponível em arquivo ou software de gestão, tipo ERP, como o SAP). Embora este método reduza a chance de quebras e falhas repentinas, visto que são aplicados em máquinas de média importância dentro

do parque industrial, pode não ser o mais viável economicamente para a companhia.

- Preditiva (baseado em condição): ao invés de intervalos fixos para a ocorrência da intervenção, como na manutenção preventiva, o método preditivo busca mensurar em intervalos regulares, ou até de forma on-line, as variáveis disponíveis de acordo com as condições de operação. Deste modo é possível saber de forma antecipada se há alguma modificação em parâmetros regulares na operação, onde o aumento da condição da falha pode ser detectado e ser acompanhado a sua evolução.

Os custos de intervenção para manutenção são reduzidos, devido às menores falhas catastróficas, melhor gestão de sobressalentes e eliminação de paradas desnecessárias. Este tipo estratégico proporciona a maior assertividade do investimento realizado. Pois que as execuções da tarefa somente serão realizadas quando necessário, de acordo com o monitoramento da máquina. O que aumenta proporcionalmente a disponibilidade dos equipamentos para a operação contínua, além de reduzir estoques de almoxarifados em comparação com o valor total dos ativos, conforme as Figuras 8 e 9.

Setores	Disponibilidade dos Equipamentos (%)	Indisponibilidade Devido a Manutenção (%)	Valor do Estoque / Custo de Manutenção (%)
Açúcar e Alcool, Alimentos e Bebidas	81%	26%	41%
Aeronáutico e Automotivo	82%	6%	39%
Eletroeletrônicos - Energia Elétrica	95%	4%	39%
Químico e Sanamento	88%	13%	13%
Mineração e Siderúrgico	88%	8%	27%
Petróleo e Petroquímico	88%	2%	32%
Papel e Celulose e Plástico	92%	3%	26%
Predial e Prestação de Serviços (EQ e MO)	83%	7%	24%
Máquinas e Equipamentos - Metalúrgico	90%	4%	33%
Média Geral	87%	8%	30%

Figura 8: Comparação de disponibilidade de diferentes setores industriais. (ABRAMAN, 2017)

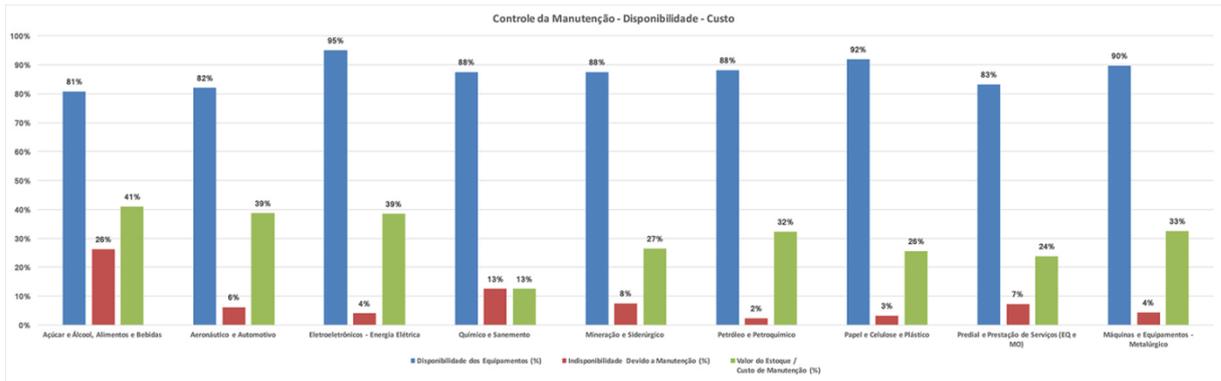


Figura 9: Gráfico de barras do custo de manutenção *versus* disponibilidade. (ABRAMAN, 2017)

2.1. Técnicas de manutenção preditiva

Diversos métodos são utilizados por diferentes especialidades para mensurar e analisar todas as variáveis importantes durante da operação contínua dos inúmeros equipamentos dentro de uma planta química e petroquímica sejam os mesmos estáticos ou rotativos, este último objeto de estudo do presente trabalho. As variáveis mais fáceis de serem indicadas são as sensitivas (visão e audição na grande maioria), porém estas não são menos importantes. Ainda que não ofereçam os diagnósticos mais precisos, acabam por indicar algumas mudanças inesperadas da operação do equipamento em uma primeira análise de possível ocorrência de falha.

Os principais métodos utilizados são: o monitoramento de vibração (em níveis globais e específicos), análise de óleo (ferrografia e espectrometria), medição de espessuras, termografia, monitoramento de desempenho, corrente, tensão, entre outras variáveis de processo.

Para equipamentos estáticos, como vasos e tubulações, a equipe responsável pela manutenção preditiva destes equipamentos é o SPIE ou o setor de Inspeção dentro da Manutenção. Caso o setor seja certificado pelo órgão regulador, no caso, o IBP – Instituto Brasileiro do Petróleo, Gás e Biocombustíveis. Logo os principais ensaios utilizados buscam mensurar e prever quando poderá ocorrer alguma falha.

Para equipamentos rotativos, a própria Manutenção se divide em suas especialidades: mecânica e elétrica principalmente. Contudo algumas companhias têm equipes interdisciplinares para tratar casos e ações específicas sobre a manutenção preditiva.

2.1.1. Líquido Penetrante

Os ensaios realizados por Líquido Penetrante (LP) são utilizados amplamente desde a 2ª Guerra Mundial, com o desenvolvimento tecnológico da chamada “química fina”, de acordo com NEPOMUCENO (1989). O baixo custo e a rápida execução permitiram grande desenvolvimento das inspeções superficiais.

O princípio da análise é baseado onde um líquido de baixa tensão superficial e capacidade de infiltrar em descontinuidades superficiais de magnitude microscópicas, invisíveis à olho nu, ou seja, alta capilaridade. Desta maneira estes penetram nas aberturas e, mesmo após a limpeza, o líquido permanece no interior da descontinuidade e só é revelado posterior ação da cobertura absorvente, chamado de revelador. O revelador se assemelha a um talco extremamente fino e branco, em sua grande maioria. Visto que o líquido penetrante, em geral, é vermelho para permitir o alto contraste durante o END.

O desempenho do ensaio dependerá de diversos fatores, tais como:

- Limpeza da superfície ou do material a ser ensaiado;
- Aplicação do LP e tempo de infiltração do mesmo;
- Retirada e limpeza do excesso de LP;
- Justapor o talco revelador e tempo adequado para a revelação;
- Exame visual e interpretação dos resultados obtidos.

Logo, com o desenvolvimento tecnológico do método de ensaio e materiais utilizados, a sensibilidade e confiabilidade do resultado dos mesmos resultaram em um aumento significativo. Sendo este hoje, um dos ensaios não destrutivos de maior utilização na indústria.

2.1.2. Partículas Magnéticas

Os ensaios de partículas magnéticas juntamente com os de líquido penetrante são os mais utilizados no dia a dia industrial e constituem os ensaios chamados de métodos superficiais. Porque detectam principalmente descontinuidades nas camadas mais externas do material ou sub-superficiais. Pois que, também de acordo com NEPOMUCENO (1989), é possível haver detecção até alguns micrometros de profundidade.

O fundamento físico deste método é baseado no fenômeno físico do campo magnético de fuga. Com a indução de um campo magnético no material, as descontinuidades localizadas na transversal e na perpendicular do campo provocam o aparecimento destes campos de fuga. E as partículas ferromagnéticas se depositam e acumulam nesses campos de fuga de modo a demonstrar a descontinuidade, conforme a Figura 10. O método deste ensaio tem a limitação de ser somente aplicado a materiais ferromagnéticos, ou seja, aqueles capazes de se magnetizarem com a introdução de um campo magnético sobre eles.

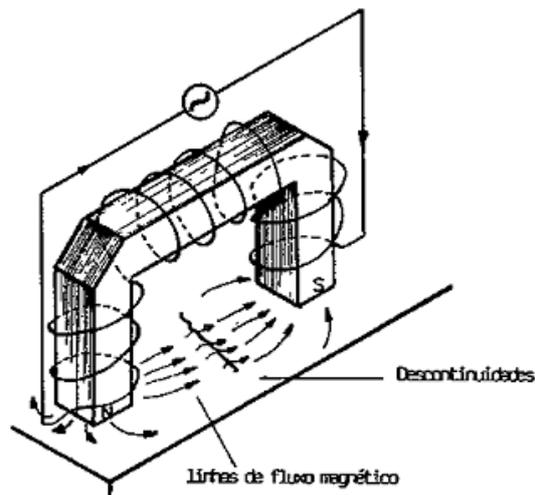


Figura 10: Técnica de Yoke de indução de campo magnético. (NEPOMUCENO, 1989)

2.1.3. Radiografia

A radiografia teve grande difusão de seu uso com os raios-X na década de 1920 e com os raios gama na década de 1930, logo é um dos métodos mais antigos utilizados. E desde a sua criação não houve grande desenvolvimento tecnológico, sendo substancialmente a mesma técnica desde a sua criação. A grande vantagem é sua versatilidade de materiais que podem ser ensaiados, revelando as condições internas e registrando de maneira permanente. Contudo a grande desvantagem é sobre a segurança radiológica, limitando o local físico onde possa ser aplicado e as medidas de proteção a serem adotadas.

O princípio da absorção diferencial por meio do contraste produzido no meio de registro (filme) entre a imagem de uma área sem descontinuidade e uma área com defeitos permite ao observador / inspetor distinguir com clareza, como é visto na Figura 11.

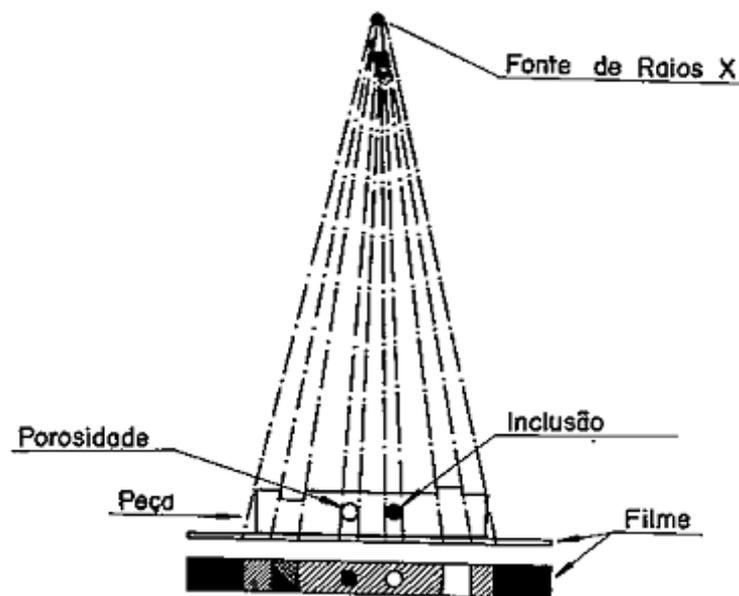


Figura 11: Fundamentos e contraste da radiografia industrial. (NEPOMUCENO, 1989)

A fonte da radiação emite ondas eletromagnéticas com energia suficiente para as mesmas atravessarem o material sob inspeção e provoca um efeito fotoquímico no filme revelador. O contraste presente no filme é resultante da atenuação da intensidade da radiação de forma diferenciada na passagem através do material. As principais fontes radiológicas são os aparelhos e os radioisótopos, como explicita NEPOMUCENO (1989).

2.1.4. Ultrassom

A parte preditiva utilizada com a técnica de ultrassom visa obter discontinuidades as quais não conseguem ser identificadas em outros ensaios mais simples. Logo seriam as que se apresentam em maior profundidade. Deste modo, a partir dos sinais de pulsos emitidos e os de retorno para o transdutor é possível analisar a peça mecânica.

A partir de parâmetros como amplitude, posição e forma de onda resultante do sinal é possível distinguir o tamanho das discontinuidades presentes na peça analisada. Logo, permitindo um melhor controle de qualidade além dos ensaios superficiais.

Segundo NEPOMUCENO (1989) as principais utilizações no meio industrial e metal-mecânico atualmente são encontrados na área de qualidade e visam garantir a confiabilidade do equipamento que será incorporado à produção. Portanto, as soldagens, forjamentos e

outros métodos de fabricação são submetidos aos controles de espessura e corrosão e testes de pressão.

2.1.5. Corrente Parasita

A bobina indutora alimentada a partir de uma corrente alternada gera um campo magnético primário, que por sua vez gera uma corrente parasita no material. Estas correntes por sua vez também geram outro campo magnético secundário em direção contrária ao primário. Desta maneira, o campo magnético primário tanto será atenuado quanto maior for a intensidade do campo magnético secundário, ou seja, a superposição dos campos, a partir do valor sabido do campo primário irá determinar o resultado do ensaio, como diz NEPOMUCENO (1989).

Logo a partir da detecção de variações nas propriedades eletromagnéticas do material por meio de um campo magnético alternado. Contudo, para o material ser inspecionado este deve ter permeabilidade magnética e condutividade magnética.

O grande objetivo central desta técnica é detectar falhas ou defeitos de tamanho, tipo, geometria, forma e posição.

2.1.6. Termografia

A ferramenta termográfica contribui de forma substancial de forma a complementar as técnicas de diagnóstico, como a análise de vibração. Onde por meio diferentes contrastes da imagem a variação de temperatura é definida, além de ser possível afirmar e complementar um diagnóstico de desgaste prematuro, por exemplo. Logo, há diversas pesquisas que buscam correlacionar possíveis falhas que poderiam ser evitadas com o diagnóstico preditivo pela termografia.

O desgaste quando presente normalmente é acompanhado de um aquecimento anormal que tende a aumentar antes da falha do equipamento conforme informado por GABERSON e CAPPILLINO (1996) e BORTNEN et.al. (1995). Assim sendo a termografia vem se mostrando uma ferramenta auxiliar na detecção desses desgastes, conforme podemos ver nas Figuras 12 e 13.

Além da linha de pesquisa com objetivo da manutenção, há uma crescente atenção do novo modelo industrial, denominado de Indústria 4.0, onde a eficiência energética é de crescente importância visando um crescimento mais sustentável. O que desalinhamentos em

equipamentos rotativos podem prejudicar de forma significativa o *saving* energético, além da ocorrência de possíveis falhas por fadiga, devido ao esforço cicloidal.



Figura 12: Termografia lateral de um redutor de uma célula de resfriamento. (BRASKEM, 2018).



Figura 13: Termografia frontal de um redutor de uma célula de resfriamento. (BRASKEM, 2018)

2.1.7. Análise de óleo

Segundo MOBLEY (2002), as técnicas de menteneabilidade e de confiabilidade utilizadas para a determinação dos melhores intervalos de manutenção preditiva são baseadas nas análises de degradação de diversos parâmetros de uma análise preditiva e do estudo dos

melhores intervalos de tempo até o momento da intervenção. Para o caso da análise de óleo lubrificante, os parâmetros utilizados são provenientes das análises físico-químicas (concentração de água, número de acidez / TAN, número de basicidade / TBN, viscosidade, contagem de partículas), análises espectrométricas para desgastes de metais (Ferro, Cobre, Cromo, Alumínio, Chumbo, Estanho, Níquel, Prata, Vanádio, Titânio, Manganês e Cádmiio), análises espectrométricas para aditivos (Fósforo, Zinco, Molibdênio, Magnésio, Cálcio) e análises espectrométricas para contaminantes (Sódio, Silício, Potássio, Boro). Todos os parâmetros de ensaio são regidos por normalizações internacional e amplamente difundidas, como as normas ASTM D6595, ASTM D445, ASTM D974, a ISO 4406, entre outras.

Essas análises buscam encontrar desvios e possíveis falhas incipientes nas máquinas. Além de em conjunto com outras técnicas preditivas possibilitem descrever e exprimir um diagnóstico mais assertivo quanto ao tempo disponível de vida produtiva da máquina até o momento de falha (vide curva PF, figura 14). O que permite um melhor planejamento das ações da manutenção.

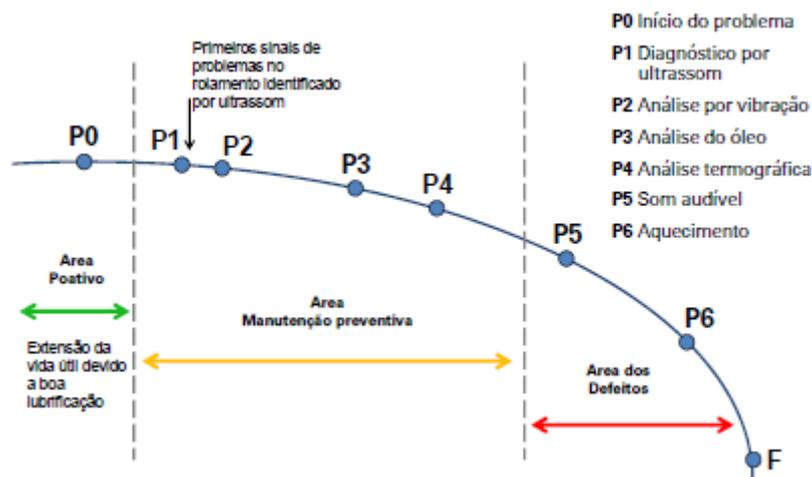


Figura 14: Curva PF. (MGS PRUFTECHNIK, 2018).

O princípio histórico da análise de óleo lubrificante é definido a partir do momento em que há desgaste das superfícies e as partículas oriundas do desgaste ficam em suspensão no óleo lubrificante. Para uma boa análise de óleo, deve-se partir dos preceitos que podem ser recolhidos dados de três diferentes formas. Para de verificar a qualidade do óleo lubrificante em funcionamento, os níveis de desgaste do equipamento e/ou a contaminação da máquina. Baseado na convenção dos sistemas mecânicos em que, na sua maior parte, se desgastam antes de falharem, logo os mesmos geram partículas metálicas, a natureza morfológica e a

quantidade dessas partículas irão determinar qual a causa provável da falha, além de sua severidade. O estudo das diferentes concentrações de partículas no ensaio é normalizado pela ISO 4406, revisada em 1999. E também pela norma NAS 1638, escrita em 1964 e agora substituída pela SAE AS4059: As quais são quantificadas por meio comparativo em padrões de análise a seguinte forma, segundo a ISO 4406:

- Desgaste normal: contagem de partículas até quatro μm (micrometros) inclusive;
- Desgaste acentuado: contagem de partículas até seis μm (micrometros) inclusive;
- Desgaste severo: contagem de partículas maiores de quatorze μm (micrometros) inclusive.

Estes tamanhos de partícula foram definidos como o tamanho menor que as folgas médias dos equipamentos ($4\mu\text{m}$), o tamanho das folgas ($6\mu\text{m}$) e o tamanho de partículas maior que as folgas ($14\mu\text{m}$). Esta última representaria desgaste catastrófico em grandes quantidades, pois seria resultante de uma abrasão severa dentro do equipamento, como diz a NORIA (2017).

Para a classificação NAS é atribuído um número escalar correspondente ao número da quantidade de partículas presente na amostra, essa quantidade cresce de forma exponencial para cada classe indicada, conforme Figura 15.

	2 • 5 μm	5 • 15 μm	15 • 25 μm	25 • 50 μm	50 • 100 μm	> 100 μm
00	625	125	22	4	1	0
0	1.250	250	44	8	2	0
1	2.500	500	88	16	3	1
2	5.000	1.000	178	32	6	1
3	10.000	2.000	356	63	11	2
4	20.000	4.000	712	126	22	4
5	40.000	8.000	1.425	253	45	8
6	80.000	16.000	2.850	506	90	16
7	160.000	32.000	5.700	1.012	180	32
8	320.000	64.000	11.400	2.025	360	64
9	640.000	128.000	22.800	4.050	720	128
10	1.280.000	256.000	45.600	8.100	1.440	256
11	2.560.000	512.000	91.200	16.200	2.880	512
12	5.120.000	1.024.000	182.400	32.400	5.760	1.024
13	-	2.048.000	364.800	64.800	11.520	2.048
14	-	4.096.000	729.000	129.600	23.040	4.096

Figura 15: Escala de números NAS. (HYDAC, 2002 - Modificado)

Para a classificação segundo a norma ISO as faixas de partículas são apresentadas nas duas primeiras colunas e a escala correspondente à quantidade é apresentada na última coluna, esta podendo variar de zero a vinte oito, como visto na Figura 16.

Numero	Numero de partículas pôr ml	
	mais que	até e incluindo
24	80.000	160.000
23	40.000	80.000
22	20.000	40.000
21	10.000	20.000
20	5.000	10.000
19	2.500	5.000
18	1.300	2.500
17	640	1.300
16	320	640
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	2,5	5
8	1,3	2,5
7	,64	1,3
6	,32	,64

Figura 16: Escala de número de partículas ISO 4406. (PARKER, 2000)

Segundo SMITH (2003), o desgaste anormal evolui de partículas menores para as partículas cada vez maiores, ou seja, é possível calcular uma taxa de desgaste conforme o histórico do equipamento. A mudança de tamanho das partículas desgastadas está diretamente relacionada ao aumento de tensão à medida que as superfícies submetidas a pressão alteram as suas formas originais e sua rugosidade. O aumento da temperatura do filme lubrificante, alinhado ao efeito crescente de dano são os principais alertas iniciais de uma possível ocorrência de desgaste acentuado. Assim sendo, é possível diagnosticar precocemente o desgaste anormal conforme são analisadas as evoluções da morfologia e quantidade de partículas a partir do contínuo programa de análise de óleos.

2.1.7.1. Propriedades do lubrificante

Os ensaios realizados nessa seção contemplam procurar desvios quanto às propriedades físico-químicas do lubrificante, como a viscosidade (mensurada em 40 °C e/ou 100 °C) dependendo da aplicação e da formulação do óleo. Por exemplo, para os óleos térmicos, que operam em altas temperaturas os ensaios realizados devem reproduzir a condição a qual o lubrificante opera, desta forma a análise de viscosidade será realizada em 100 °C. Segundo a NORIA (2017), poderá haver variações aceitáveis de até 10% do valor de viscosidade do ensaio ao informado pelo fabricante, a depender do lote fabricado, variáveis laboratoriais, entre outros. O ensaio é normalizado pela ASTM D445, tendo como unidade de medida amplamente utilizada o ISO VG ou o cSt (centiStokes), para as aplicações industriais.

Contudo, no SI a unidade é N.s/m² para a viscosidade absoluta. Além das escalas Saybolt, AGMA e SAE as quais também são empregadas em outros segmentos industriais, como a automotiva e aeronáutica.

O número de acidez total, ou TAN, é a medida em miligramas de KOH/g, ou seja, de quantos radicais - OH (hidroxila) estão diluídos na amostra de modo a neutralizar qualquer presença de ácidos que sejam nocivos ao desempenho do lubrificante. Contudo, se a formulação do óleo base não conter ácidos em sua formação, um alto índice TAN poderá indicar uma ocorrência de degradação do óleo, ou seja, como os ácidos podem se formar a partir do tempo de utilização e a oxidação via contaminação do lubrificante, este valor poderá indicar envelhecimento e assim calcular a vida útil residual do composto. O número de basicidade total, ou TBN, tem o mesmo princípio anteriormente dito. Todavia, somente é aplicado em óleos de motores de combustão, devido à alta presença de ácidos formados a partir dos gases residuais da combustão e ao próprio regime de trabalho extremo dos motores. Logo, também pode indicar o tempo de vida útil residual dos lubrificantes de motores.

O ponto de fulgor (PF) é analisado de modo a tentar diagnosticar se houve alguma contaminação com combustíveis ou fluidos de arrefecimento, como em casos em radiadores ou outros tipos de trocadores de calor, por exemplo. O ponto de fulgor é definido como a menor temperatura, sob as condições de testes, a qual o produto se vaporiza em quantidade suficiente para formar uma mistura, junto com o oxigênio, inflamável momentaneamente quando se aplica uma chama sob a mesma. Como esperado, a seleção de um bom lubrificante deve se atentar para a temperatura de trabalho do equipamento e sua redução em 20 °C ou 30°C indicaria uma contaminação por combustível, por exemplo.

2.1.7.2. Contaminantes

Os ensaios de contaminantes procuram demonstrar os possíveis desvios quanto à contaminação externa do lubrificante. Desta forma, os principais ensaios são o de presença de água (crepitação ou por Karl Fischer) e contagem de partículas (NAS ou ISO).

Segundo a ASTM-D4377, o método de ensaio de água por Karl Fischer permite mensurar amostras de 0,02% (200 ppm) até 2% (20.000 ppm). Tendo pressuposto que as mesmas não sofram interferência de análise por compostos sulfurados (enxofre). Mas, para diferentes equipamentos os níveis aceitáveis de contaminação por água podem variar. Isso desde os mais baixos níveis permissíveis para equipamentos de extrema precisão, como

turbinas a gás e vapor, até para níveis mais altos, como em redutores de velocidade, por exemplo. O ensaio de água por crepitação não possui normalização internacional, mas nacional, a NBR 16358 regulamenta o ensaio. Inúmeros procedimentos internos ou de Instruções de Trabalho (IT) complementam como o ensaio é feito nos laboratórios químicos. Assim sendo, no geral, o ensaio demonstra um resultado de baixa eficiência, pois o mesmo só resulta em positivo ou negativo para a presença de água, sem a identificação da quantidade da mesma.

A contagem de partículas seja NAS ou ISO-4406, têm valor fundamental em uma análise de óleo. Onde a partir de padrões comparativos, consegue medir a quantidade de partículas de acordo com a escala, vide Figuras 15 e 16.

A confiabilidade operacional passar por um baixo nível de contaminação do lubrificante da máquina, independente da origem a contaminação. Por isso as blindagens instaladas em reservatórios de óleo procuram isolar o sistema do meio externo (atmosfera, vapor d'água, poeira, sujeira), as vedações e boas práticas durante a troca e o reabastecimento se fazem necessárias e importantes.

2.1.7.3. Espectrometria

A espectrometria por infravermelho de metais, regulamentada pela ASTM-D6595, em níveis de ppm (partes por milhão) a quantidade dos diferentes metais presentes na amostra. Os elementos químicos podem ser provenientes de desgaste interno dos componentes, como bucha, dentes de engrenagem, gaiola e pista de rolamento, entre outros; ou ainda, metais de contaminação, como o Silício, o Boro e o Sódio presentes na poeira suspensa na atmosfera. Logo, os principais compostos quantificados a partir de desgaste da máquina são: Ferro, Cromo, Chumbo, Cobre, Estanho, Alumínio, Níquel e Titânio. Os resultados expostos funcionam como uma impressão digital da amostra analisada, pois que para cada amostra poderá haver alterações nos compostos e na posterior análise da Engenharia. Todavia, para uma boa consistência de dados se faz necessário a análise de uma amostra de óleo nova para a qual o laboratório terá os parâmetros de fábrica do lubrificante a fim de melhor identificar a depleção dos aditivos e/ou contaminações em geral.

2.1.7.4. Ferrografia

A técnica de ferrografia baseia-se em dois princípios, a quantificação das partículas e a classificação das mesmas. Pois que a partir de técnicas de filtragem e separação magnéticas laboratoriais é possível diferenciar a origem das partículas e encontrar a causa raiz do problema. Ainda que seja uma das melhores técnicas de detecção e diferenciação do tamanho das partículas, sua limitação principal é a necessidade da propriedade magnética para a visualização da mesma.

A parte analítica do ensaio após a filtragem e separação deve ser realizada por microscópio ótico capaz de aumento de até 1000x. Onde as seguintes propriedades são observadas:

- Dimensão;
- Morfologia;
- Cor e brilho;
- Tipo de superfície.

Desta forma algumas características de desgaste são associadas às partículas identificadas, além do material ao qual estão sendo desgastada, vide Figuras 17 e 18. Por exemplo: fadiga, abrasão, corrosão, arrastamento e esfoliação, como indicam o manual da HYDAC (2002).

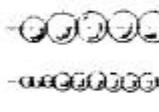
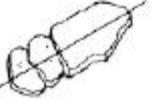
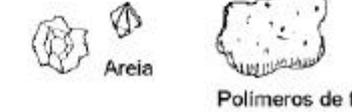
1	ESFOLIAÇÃO  * Escamas * Superfície lisa * 0,5 – 5µm	2	CORTE POR ABRASÃO  * Cavacos * Existência de areia * 10 ~ 100µm
3	FADIGA (rolamento e engrenagem)  * Esferas * ~ Regulares * ~ 3µm	4	ARRASTAMENTO (engrenagens)  * Superfície rugosa * Coloração por temperatura * >20µm
5	DESGASTE SEVERO POR DESLIZAMENTO  * Estrias * Corte reto * > 20µm	6	PARTÍCULAS DIVERSAS  Areia Polímeros de fricção

Figura 17: Classificação das partículas de desgaste. (USP, 2004)

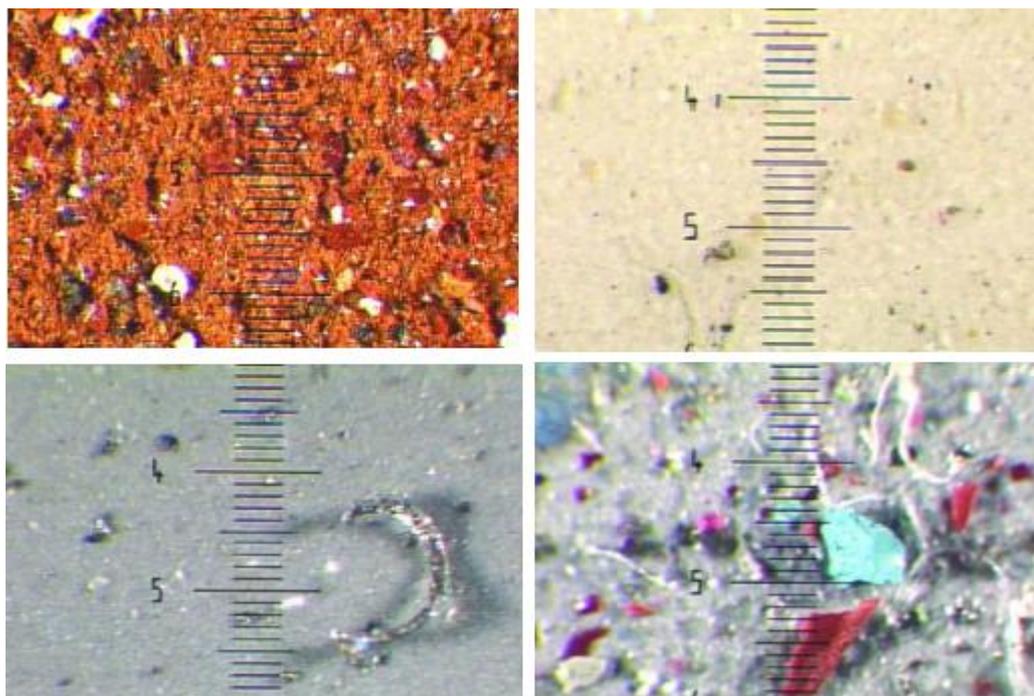


Figura 18: Imagens ampliadas das partículas na análise de óleo. (HYDAC, 2002 - Modificado)

Por tanto uma boa análise de óleo consegue, além de identificar os compostos que indicam uma degradação prematura e evitando possíveis ocorrências de quebras e expressam recomendações, como a utilização de unidades de filtragem off-line, desumidificadores, troca total ou parcial do óleo, acompanhamento de tendências dos dados amostrais, entre outros.

Posterior às recomendações, para cada tipo de equipamento em determinados regimes de trabalho diferentes tipos de ensaios são recomendados. Visto que nem todas as análises são aplicáveis aos diferentes tipos de óleo base e aos diversos regimes de trabalho das máquinas. Como é exemplificado nas tabelas 2, 3, 4 e 5.

Tabela 2: Ensaios de análise de óleo para sistemas hidráulicos e compressores.

SISTEMAS HIDRÁULICOS / COMPRESSORES	
Número de acidez	A.N
Viscosidade	VC1
Água por Karl Fischer	KF
Espectrometria	EEA
Contagem de partículas	CP
Ferrografia analítica	WC

Tabela 3: Ensaio de análise de óleo para redutores e mancais de deslizamento.

REDUTORES E MANCAIS DE DESLIZAMENTO	
Número de acidez	A.N
Viscosidade	VC1
Água por Karl Fischer	KF
Espectrometria	EEA
Ferrografia quantitativa	DR
Ferrografia analítica	WC

Tabela 4: Ensaio de análise de óleo para motores de combustão interna e turbo geradores.

MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA E TURBOGERADORES	
Viscosidade	VC1
Oxidação por Infravermelho	IR
Água por Karl Fischer	KF
Espectrometria	EEA
Ponto de fulgor (Vaso Aberto)	PFA
Número de basicidade	BN
Insolúveis em Pentano	IN
Ferrografia analítica	WC

Tabela 5: Ensaio de análise de óleo para óleos de selagem (fluido barreira).

ÓLEO DE SELAGEM	
Viscosidade (40°C)	VC1
Viscosidade (100°C)	VC1
Morfologia das partículas	MP
Contagem de Partículas	CP
Índice de viscosidade	IV
Formação de espuma	FE
Densidade	D
Infravermelho (completo)	IR
Água por Karl Fischer	KF
Espectrometria	EEA
Ponto de fulgor (Vaso Aberto)	PFA
Acidez	NA
Potencial de verniz	PV
Ferrografia analítica	WC

2.2. Tribologia

A palavra tribologia deriva seu significado do grego *triben*, em tradução literal significa atritar, ou seja, é denominada como a ciência do estudo do atrito. Logo a definição adotada em geral é a ciência e tecnologia de superfícies atuantes em movimento relativo entre eles e todos os fenômenos decorrentes. Segundo BELMIRO e CARRETEIRO (2006), após diversas análises de falhas atribuídas ao desgaste e concentração de estudos na Grã-Bretanha no início da década de 1960, foi publicado no dicionário chamado “Supplement of the Oxford English Dictionary” onde a palavra *tribolgy* foi descrita. Um relatório final divulgado em 1966 pelo Dr. H. P. Jost anunciava que a indústria britânica poderia economizar R\$ 2,2 bilhões por ano utilizando os conhecimentos existentes na época devido aos desperdícios e falhas causadas pela lubrificação realizada incorretamente, alta taxa de desgaste e atrito elevado.

A importância da rugosidade das superfícies é alta dentro do estudo em análise, pois ainda que estas estejam em um regime hidrodinâmico de lubrificação, o contato entre as asperezas é inevitável. O que poderá resultar em um desgaste mais acentuado se os parâmetros de fabricação das peças não forem definidos considerando a operação da máquina. Logo, a partir do conhecimento da superfície se faz necessário boas definições dos parâmetros de rugosidade e qualidade do acabamento e maior controle durante a fabricação.

2.2.1. Lubrificação

Como parte fundamental dentro do estudo da Tribologia, a lubrificação é parte integrante de diversos estudos do atrito. Segundo BELMIRO e CARRETEIRO (2006), a lubrificação pode ser definida como fenômeno da redução de atrito entre duas superfícies em movimento relativo, por meio da introdução de uma substância entre as mesmas. Estas podem ser sólidas ou fluidas (correspondentes aos óleos e graxas).

A função primária do lubrificante é permitir e substituir o atrito direto pelo atrito fluido. Assim sendo, espessura do filme lubrificante deverá ser superior às somas das alturas das rugosidades das superfícies. Além disso, o lubrificante, salvo algumas aplicações especiais ou limitações físicas da substância, também possui algumas funções, como:

- Controle de desgaste
- Controle de corrosão
- Controle de temperatura
- Controle de contaminação

- Transmissão de força

O atrito como fenômeno físico intrínseco ao movimento entre corpos pode ser dividido em dois grandes grupos: o atrito sólido e o atrito fluido. O sólido ainda pode ser separado em atrito de deslizamento, quando uma superfície se desloca diretamente em contato com a outra; e atrito de rolamento, quando o deslocamento se dá por meio da rotação de corpos cilíndricos ou esféricos. Mas como a área de contato é menor, o atrito é proporcionalmente menor. O atrito fluido, que é objeto de estudo, se apresenta quando há uma camada fluida separando as superfícies.

Uma força chamada resistência de rolamento se manifesta quando uma superfície esférica ou cilíndrica desliza ou rola sobre outra superfície (uma pista interna ou externa de um rolamento, por exemplo). A distância μr é chamada de coeficiente de resistência ao rolamento. A partir da presença de uma força F , irá atuar uma força $F_a < F$, desta forma impedindo o deslizamento e promovendo o rolamento. Seja a superfície de rolamento deformada plasticamente pela esfera (ou cilindro), que recebe uma carga de força peso P . A resultante da reação superficial ocorrerá em um ponto B , logo pela análise estática da Equação 1 e Figura 19:

$$F = \frac{\mu r}{r} P \quad (1)$$

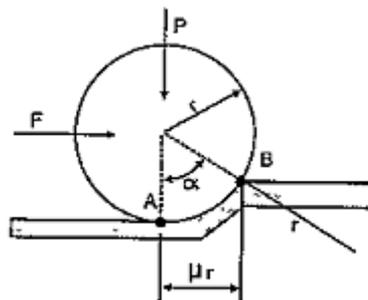


Figura 19: DCL de um elemento rolante de rolamento. (CARRETEIRO, R., BELMIRO, P., 2006)

Este coeficiente de atrito dependerá de inúmeros fatores, tais como:

- Propriedades elásticas dos elementos rolantes
- Propriedades elásticas das pistas
- Acabamento superficial (rugosidade)

- Direção da carga
- Rotação do elemento rolante
- Temperatura de operação
- Tipo de mancal aplicado
- Dimensões dos elementos
- Raio de curvatura da superfície de contato (α)

Assim como o atrito, o desgaste das superfícies também está presente de modo imprescindível e a mesma possui três leis primárias:

- A quantidade de desgaste D é diretamente proporcional à carga P;
- A quantidade de desgaste D é diretamente proporcional à distância deslizante, d;
- A quantidade de desgaste D é inversamente proporcional à dureza da superfície, H.

Logo, de acordo com a Equação 2:

$$D \sim \frac{Pd}{H} = \frac{\text{carga} \times \text{distância}}{\text{dureza}} \text{ ou } D = K \frac{Pd}{H}, \quad (2)$$

Em que K é uma constante característica do sistema de deslizamento. Típicos valores de K são:

- 0,007 ($7,0 \cdot 10^{-3}$) para aço com aço sem lubrificação;
- 0,000 000 001 (10^{-9}) para aço com aço com lubrificação.

Ademais a curva demonstrada na Figura 20, chamada de curva de Stribeck ou ZNP, relaciona a viscosidade Z, a rotação do eixo N (velocidade), com a pressão P (carga) dentro do mancal de deslizamento. O que nos permite em função do coeficiente de atrito μ observar o seu comportamento e a formação dos diferentes regimes de lubrificação a partir dos parâmetros analisados.

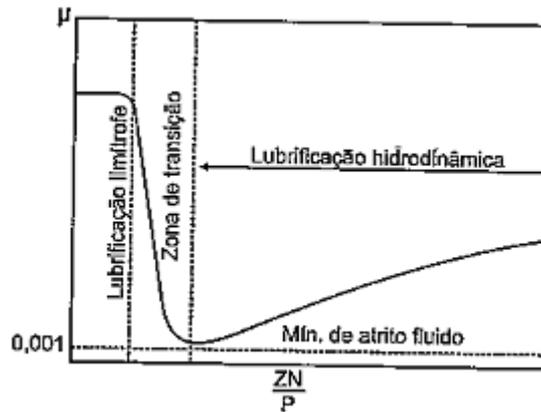


Figura 20: Curva ZNP. (CARRETEIRO, R.; BELMIRO, P., 2006)

2.2.1.1. Lubrificação hidrodinâmica

A presença da lubrificação hidrodinâmica é caracterizada quando o filme do fluido lubrificante se desenvolve, separa e torna esta separação de tamanho maior que as asperezas das superfícies que estavam em contato entre si. Na teoria de haver totalmente uma lubrificação hidrodinâmica, não haveria desgaste, pois, as superfícies nunca estariam em contato entre si e com uma distância média entre cinco micrômetros ($5 \mu\text{m}$) e podendo chegar a até duzentos micrômetros ($200 \mu\text{m}$). Contudo, não é verdade, pois no regime de trabalho diferentes tipos de lubrificação se manifestam de acordo com o processo. A viscosidade do fluido é a principal propriedade para a manutenção deste regime de lubrificação.

O coeficiente de atrito do filme lubrificante em regime hidrodinâmico poderá variar entre 0,001 e 0,03, dependendo da viscosidade, das superfícies em contato, da velocidade relativa, da área das superfícies, da espessura do filme fluido, da forma geométrica das superfícies e da carga exercida sobre o filme fluido BELMIRO e CARRETEIRO (2006).

Por exemplo, em mancais de deslizamento inicialmente são projetados com uma determinada folga entre o eixo e o mancal para a formação da cunha de óleo lubrificante. Todavia, como os pontos críticos para a formação do filme são da partida e parada da máquina, este filme e a distribuição de pressão correta estará completamente formado somente com a plena velocidade de rotação do eixo fixado ao mancal, como podemos ver na Figura 21. Onde na posição (a), não há rotação, em (b) é o início da rotação de é formada uma camada denominada lubrificação limítrofe (abordada no próximo tópico). Em (c) a rotação do eixo já foi elevada e há desprendimento do mesmo na parte inferior do mancal e em (d) já a plena carga, o atrito é reduzido ao valor mínimo, não há desgaste (teoricamente) e o único

atrito presente é devido à fricção interna do óleo (viscosidade). Além de para cada rotação nominal do eixo, há uma posição de equilíbrio do mesmo no mancal pelo descolamento da cunha de óleo abaixo do próprio eixo. O que é demonstrado pelo diferente gradiente de pressão em (e).

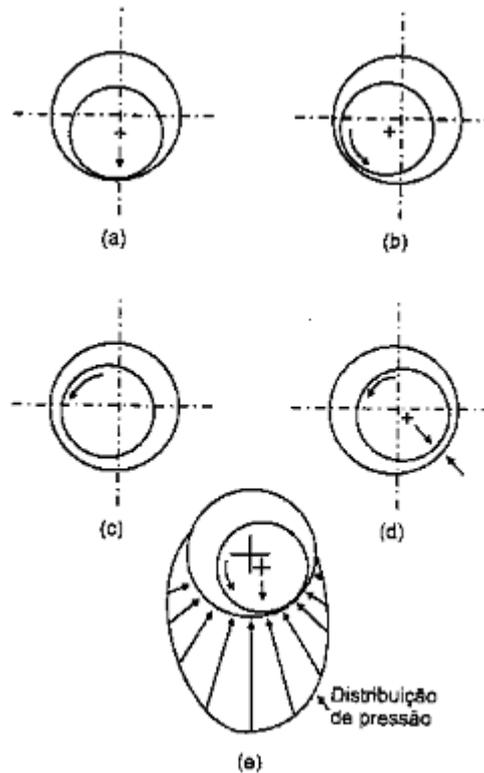


Figura 21: Formação de cunha de óleo e distribuição de pressão. (CARRETEIRO, R.; BELMIRO, P., 2006)

2.2.1.2. Lubrificação limite

Diferentemente da lubrificação hidrodinâmica, o principal fator físico do filme lubrificante não será a viscosidade. Pois durante a ocorrência deste fenômeno, há ruptura ou espessura do filme lubrificante e, posteriormente, contato entre as superfícies, o que acarretará em um desgaste acentuado. Portanto nesses casos o comportamento das superfícies seguirá o comportamento do atrito seco ou atrito de Coulomb. Segundo BELMIRO e CARRETEIRO (2006), o valor do coeficiente de atrito é de dez a cem vezes maiores que na hidrodinâmica, chegando a ordem de 0,03 até 0,1.

Assim como citado anteriormente, na Figura 21 (b), deve-se passar por este regime o mais breve possível, afim de que o desgaste proveniente do fenômeno seja o mínimo

aceitável. Mas devemos salientar que, ainda que não haja separação suficiente entre as superfícies, existe uma fina camada de lubrificante entre as mesmas, porém ineficiente.

2.2.1.3. Lubrificação mista

A lubrificação mista irá ocorrer na fase de transição, como apostada na Figura 20 anteriormente. Onde apresenta ao mesmo tempo, um comportamento, tanto hidrodinâmico, quanto limítrofe, ou seja, em certas situações onde há características de filme fluido plenamente desenvolvido, mas ao mesmo tempo desgaste devido às interações superficiais.

Para fins de estudo acadêmicos, em regimes de lubrificação mista, deve-se levar em consideração tanto as interações físicas de filme fluido quanto às químicas entre fluido, aditivos e superfícies. Além disso, não é aconselhável a operação durante grandes intervalos de tempo nesse regime de lubrificação, uma vez que o filme lubrificante não está plenamente desenvolvido e conseqüentemente irá acentuar os desgastes das partes internas.

2.2.1.4. Lubrificação elastohidrodinâmica (EHL)

Este tipo de lubrificação decorre das interações superficiais por frações de segundo e aumento abrupto da viscosidade no mesmo intervalo de tempo, esta elevada devido às pressões de contato, podendo chegar até 500.000 psi. Ocorre principalmente nas regiões onde a lubrificação limite estava presente e tem como consequência a deformação elástica das superfícies em contato, como rolos e pistas de mancais de rolamento, cames, mancais, entre outros. A partir deste conjunto de fatores internos e externos podem transformar o filme lubrificante em sólido na zona de carga (vitificação do óleo ou graxa).

Para a lubrificação EHL, ou EHD como também é denominada, a película lubrificante normalmente tem menos de um micrômetro de espessura (1 μ m). E seria necessário quadruplicar a viscosidade do fluido para dobrar a espessura da película. Logo, o contato entre as asperezas irá ocorrer, elevando o desgaste mais acentuado onde o filme fluido não for plenamente formado.

Deste modo, a descrição do fenômeno torna-se de suma importância para saber o comportamento de mancais impostos a altas cargas de trabalho, vide Figura 22.

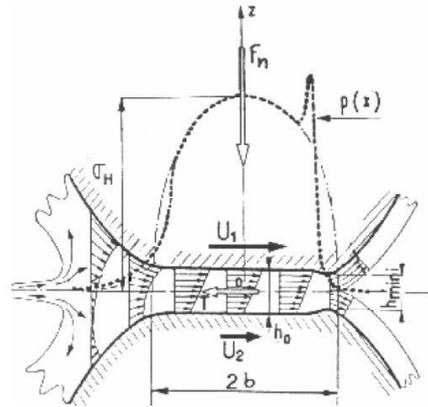


Figura 22: Pressão e velocidade do óleo lubrificante no interior de um contato EHL.
(FERREIRA, 2013)

2.2.1.5. Lubrificação por graxa

As definições de literatura para lubrificação por convergem para uma definição básica, como uma combinação ou um fluido semissólido produzido a partir de um óleo base (em geral mineral ou sintético) e um espessante (também chamado de sabão).

Em sua formulação básica, as graxas são formas em geral por 70% a 95% de óleo básico, 3% a 30% de espessante e 0% a 10% de aditivos. Os óleos básicos podem ser minerais, sintéticos e, até mesmo, vegetais. Já os espessantes, podem ser da forma de sabões metálicos simples ou complexos, ou não sabões (como a argila, poliuréia e sílica). Além da presença facultativa dos aditivos, para melhorarem propriedades desejadas, suprimirem as indesejadas e adicionam novas propriedades conforme a necessidade da aplicação.

A aplicação da graxa foi uma excelente solução encontrada onde os óleos não tinham desempenho satisfatório, principalmente em virtude da propriedade física do escorrimento ocorrer, independentes de sua viscosidade. Além disso, funcionam como uma barreira contra contaminações externas, mas uma das principais desvantagens de seu uso é a baixa capacidade transferência térmica, a limitação de velocidade na aplicação do material lubrificado, a baixa compatibilidade entre os diferentes tipos de espessantes presentes e uma menor resistência à oxidação.

Para o cálculo efetivo da definição de qual tipo de lubrificante é mais bem empregado em uma determinada aplicação, utiliza-se o fator ND_m , de acordo com a Equação 3:

$$NDm = \frac{N(Di + Do)}{2} \text{ ou } DN = Di \times N \quad (3)$$

Onde:

N = velocidade (RPM)

Di = Diâmetro interno (mm)

Do = Diâmetro externo (mm)

Dm = Diâmetro médio ou primitivo (mm)

A partir do cálculo deste fator, Tabela 6, é possível definir a aplicação do melhor tipo de lubrificante.

Tabela 6: Aplicação em função do fator NDm.

Aplicação / Tipo de Lubrificante	NDm máximo*
Lubrificação seca	1.500
Graxa típica	500.000
Graxa especial	1.000.000
Óleo (reservatório úmido)	500.000
Óleo (reservatório seco)	1.000.000
Óleo (spray)	4.000.000
Óleo (gotejamento)	1.500.000
Óleo (névoa)	1.500.000

A classificação das diferentes consistências das graxas é normatizada pelo grau NLGI, este possui uma tabela de padronização conforme o ensaio de penetração normatizado pela ASTM D-217, conforme mostra a Tabela 7. Porém, há diversas características importantes para aplicação em determinados equipamentos, como bombeabilidade, por exemplo. Além de ensaios aos quais determinam o desempenho da graxa, como:

- Ponto de gota (ASTM D566)
- Resistência ao cisalhamento (ASTM D1831)
- Estabilidade à oxidação (ASTM D942)
- Capacidade de carga (ASTM D2509 e ASTM D2596)
- Ação de lavagem pela água (ASTM D1264)

Tabela 7: Graxas em número crescente de consistência.

Número de consistência NLGI	Penetração ASTM trabalhada a 25°C, em mm
000	445 – 475
00	400 – 430
0	355 – 385
1	310 – 340
2	265 – 295
3	220 – 250
4	175 – 205
5	130 – 160
6	85 - 115

As aplicações especiais, como extremas temperaturas (altas ou baixas) e altíssimas rotações, as formuladas com óleo-base sintético e com maior carga de aditivos serão as mais recomendadas. Todavia, os tipos mais comuns encontrados na maioria das aplicações do mercado são provenientes de base de sabões metálicos. Como é sintetizado a seguir:

- Graxa de cálcio: resistentes à água, mas com limitação de temperatura de trabalho de 80°C, não recomendada para elevadas pressões e muito aplicadas em mancais de bucha.
- Graxa de sódio: boa resistência ao calor e à ferrugem e pode ser usada em aplicações de até 120°C, mas não são resistentes à água.
- Graxa de alumínio: boa resistência à água, boa adesividade, mas não pode ser aplicada a altas temperaturas.
- Graxa de lítio: boa para aplicações de até 150°C e ambientes com água, estabilidade mecânica e qualidade de extrema pressão. Além de bom bombeamento.
- Graxa de sabões complexos: versatilidade de aplicações, alto ponto de gota, resistência ao calor e água, além de qualidade de aditivos de extrema pressão (EP).

2.3. Rolamentos

Os rolamentos exercem há décadas aplicações únicas nos equipamentos rotativos em geral, sejam estes de escala doméstica ou industrial. Desta maneira, a sua criteriosa seleção envolve diversos fatores aos quais determinarão a melhor aplicação do componente. Em geral,

não existem regras sólidas a qual tipo escolher, contudo os principais fabricantes mundiais já possuem aplicações existentes para todas as situações. O espaço disponível, as cargas aplicadas, desalinhamento máximo permissível, precisão; a velocidade, atrito, ruído, rigidez, deslocamento axial, montagem e desmontagem são os principais fatores de seleção.

De forma geral, todos os mancais de rolamentos têm a mesma forma construtiva, desta forma os rolamentos podem ser separados em quatro partes: pista externa, elementos rolantes, gaiola e pista interna. Onde cada parte é responsável e igualmente importante para um bom funcionamento. As principais funções dos componentes dos rolamentos são:

- Pista Externa: garantir a fixação do rolamento no mancal, assegurar que a gaiola e os elementos rolantes não saiam do lugar projetado.
- Elementos rolantes: responsáveis por realizar a rotação do eixo sem deslizar. As formas mais comuns são esfera, rolos, cilindros e agulha além de serem dispostos de diversas maneiras dependendo da finalidade construtiva (rígida, contato angular, toroidal, autocompensados, entre outros).
- Gaiola: têm a principal função de manter a separação dos elementos rolantes. No geral podem ser feitas de aço, bronze ou poliamida.
- Pista Interna: anel que fica em contato direto com o eixo girante do componente acionador e a fixação normalmente é feita por interferência com o eixo.

A vida útil do sistema de rolamento será modelada, segundo SKF (1997), de acordo com a Equação 4:

$$L_{rolamento} = f (L_{pistas}, L_{corpos\ girantes}, L_{gaiola}, L_{lubrificação}, L_{vedações}) \quad (4)$$

De modo ao qual é expressa em número de revoluções ou número de horas trabalhadas em uma dada velocidade projetada sem que haja desgaste significativo dos componentes. Assim, de acordo com a fabricante, são esperados que cerca de 99,5% dos rolamentos fabricados atinjam ou superem a vida útil, dada a confiabilidade do processo de fabricação e o controle das variáveis já citadas anteriormente.

Para o cálculo de vida nominal básica, a norma ISO 281 determina de acordo com a Equação 5:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad \text{ou} \quad L_{10h} = \frac{10^6}{60n} L_{10} \quad (5)$$

Onde:

L_{10} = vida nominal básica (com 90% de confiabilidade) [milhões de revoluções]

L_{10h} = vida nominal básica (com 90% de confiabilidade) [milhões de revoluções]

C = classificação de carga dinâmica básica [kN]

P = carga dinâmica equivalente do rolamento [kN]

n = velocidade de rotação [rpm]

p = expoente da equação de vida (Rol. de esfera, p = 3. Rol. de rolos, p = 10/3).

Segundo a SKF (1997), apenas uma pequena parcela dos rolamentos fabricados mundialmente falha por defeitos de fabricação. Logo, os rolamentos que apresentam falhas operacionais têm como causa atribuída a várias razões: como cargas mais altas das especificadas em projeto, vedações e/ou blindagens equivocadas, ajustes inadequados, entre outros. E para cada um desses fatores, seja em conjunto ou não, provocará um tipo específico de falha.

Já FAG (2008) afirma, segundo a Figura 23, que cerca de um quarto dos rolamentos que falham são causados por erros de montagem e um terço por falha de lubrificação, para todos os rolamentos que causam parada de máquina.

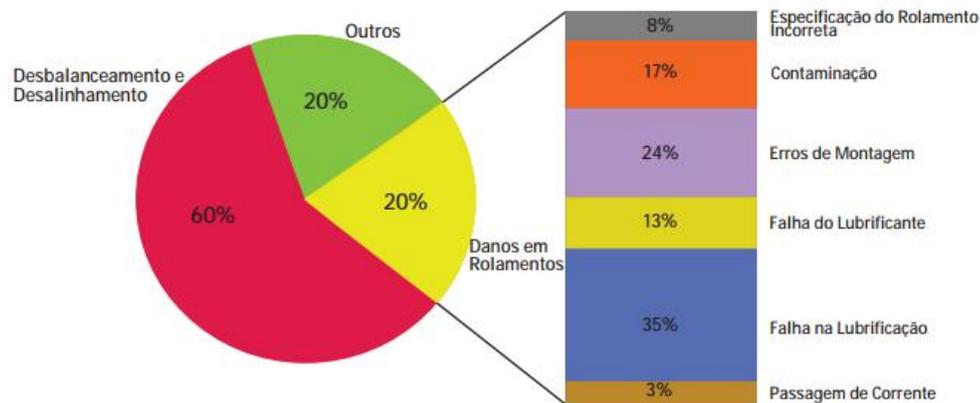


Figura 23: Principais causas de paradas de máquinas. (FAG, 2008)

.As causas variam em função do ambiente de trabalho a qual a peça opera, por exemplo, em indústrias siderúrgicas e de papel e celulose as principais falhas decorrem da degradação do lubrificante e/ou contaminação do lubrificante. Seja pela grande presença de água no regime de trabalho, seja por contato direto com produtos químicos, processo térmico, entre outros. E por final as petroquímicas possuem causas mais variadas, dependendo do tipo

de processo utilizado, ou seja, uma planta de cloro-soda, não possuirá, a princípio, as mesmas causas-raízes de uma planta de polímeros.

Entretanto, se um rolamento foi corretamente selecionado quanto à velocidade relativa, à carga dinâmica, à lubrificação, à viscosidade cinemática do lubrificante e seu índice de limpeza for adequado, então a sua vida de serviço deveria atingir a vida de fadiga (L10ah). Além do uso correto das ferramentas de monitoramento do ativo, a Engenharia poderá tomar alguma ação preventiva e preditiva caso haja presença de desbalanceamento, desalinhamento ou partículas contaminantes no lubrificante.

Assim sendo, a identificação prematura de alguma condição que poderá resultar em falha pode permitir ao engenheiro ações para prolongar a vida de serviço deste material. Como é visto no ciclo de vida o rolamento na Figura 24.

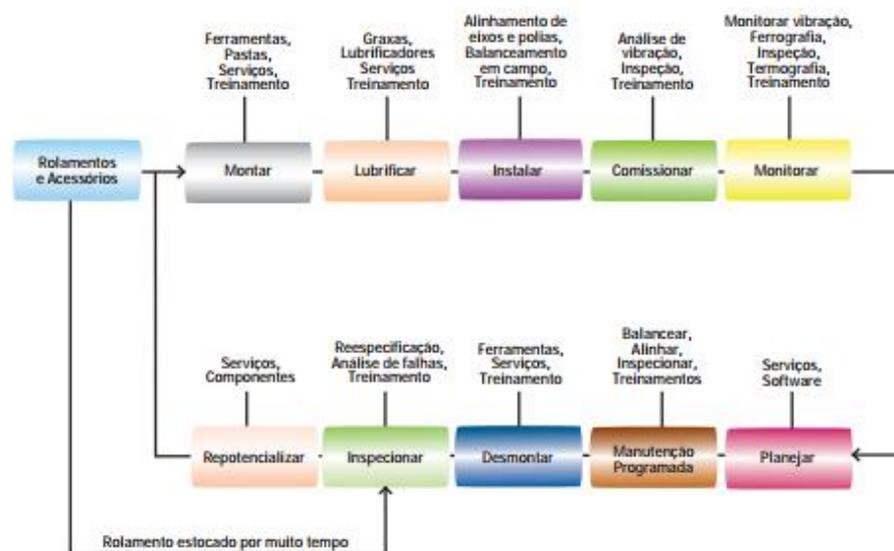


Figura 24: Ciclo de vida do rolamento. (FAG, 2008)

Logo, se um rolamento foi especificado no momento do comissionamento e/ou do projeto da máquina levando em consideração alguns fatores relevantes, como:

- Velocidade relativa
- Carga dinâmica
- Lubrificação
- Posicionamento (vertical, horizontal, variável)
- Viscosidade cinemática
- Sistema de filtragem e granulação de filtros

Então o componente deveria atingir a L10ah, ou seja, sua vida de fadiga, ao qual o comente está determinado a trabalhar sem a ocorrência de falhas segundo o fabricante. As ferramentas preditivas conseguem monitorar as tendências de forma que a partir de análises das variáveis, possa ser possível adotar ações antes da continuidade da falha.

Logo, por exemplo, a partir de uma falha de lubrificação, inicia-se o processo de contato metal com metal entre os componentes do rolamento. Seja gaiola, pista interna ou externa, os rolos, esferas, entre outros dependendo da forma construtiva. Todavia, a partir do contato, criam-se microsoldas e estas pequenas fissuras ou microcavidades (pitts) nas partes metálicas arrancando pedaços (spalls, desprendendo material que será identificado na análise de óleo), como mostra a Figura 25. Para a vida do equipamento, não necessariamente, estas cavidades serão fatores que condenem a operação do mesmo e qualquer elemento que sofre carregamento alternado (anéis internos e externos e elementos girantes) estão sujeitos a sofrerem esse tipo de desgaste. Mas a partir deste estágio inicial, a evolução do desgaste é constante e classificada em quatro fases.

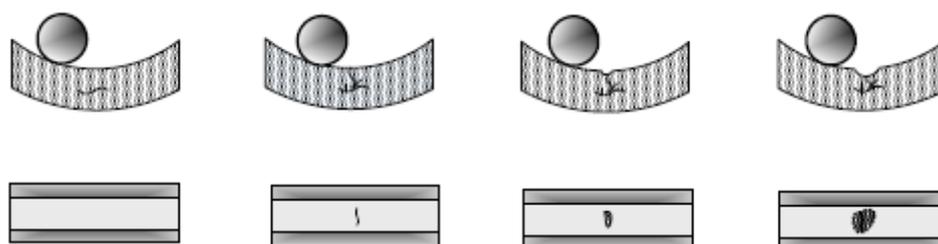


Figura 25: Surgimento da falha na pista de um rolamento. (NSK, 1998)

O primeiro estágio é onde o rolamento, apesar de possuir características de bom tempo de operação futura, já possui pequenas cavidades nas pistas. Deste modo, pela força a qual os rolos/cones/esferas batem nas cavidades, os sinais já são mensuráveis no domínio de velocidade para a análise de vibração, como será abordada no tópico a seguir.

O segundo estágio é onde o dano já está instalado, como é observado nas harmônicas da análise de vibração, mas o rolamento ainda é operacional, apesar de requerer atenção maior. Pois que a medida a qual as harmônicas aumentam de amplitude, a frequência de coleta deve aumentar (se o sistema não for *on-line*). A sua degradação se apresenta de forma linear com o tempo, mas com o encurtamento da vida em serviço, a mesma se caracteriza de forma exponencial.

O terceiro estágio, a vida em serviço está chegando ao fim, sendo possível visualizar as frequências fundamentais de defeitos nos espectros da análise de vibração. Além das harmônicas indicarem bandas laterais do rolamento na velocidade de rotação do eixo (1x).

O quarto, e último estágio, é onde a vida residual é extremamente curta e a parada do equipamento deve ser eminente. As frequências de defeito devem aparecer em altas amplitudes, com também em bandas laterais de velocidade 1x e 2x. Aparecendo indicações de folgas e defeitos de gaiolas, entre outros.

As análises de causa-raiz, ou RCA's podem ser bastante facilitadas no momento de serem realizadas. Pois os principais fabricantes de rolamentos já possuem em seu histórico guias especialmente desenvolvido com as principais causas e fotos demonstrativas de como estas falhas se caracterizam, como mostra a Figura 26. Logo, a partir das marcas e impressões deixadas nas pistas, gaiolas, rolos/esferas, além do conjunto de dados preditivos, podemos determinar as possíveis causas e mitigar as ocorrências de modo ao qual esta não volte a repetir.

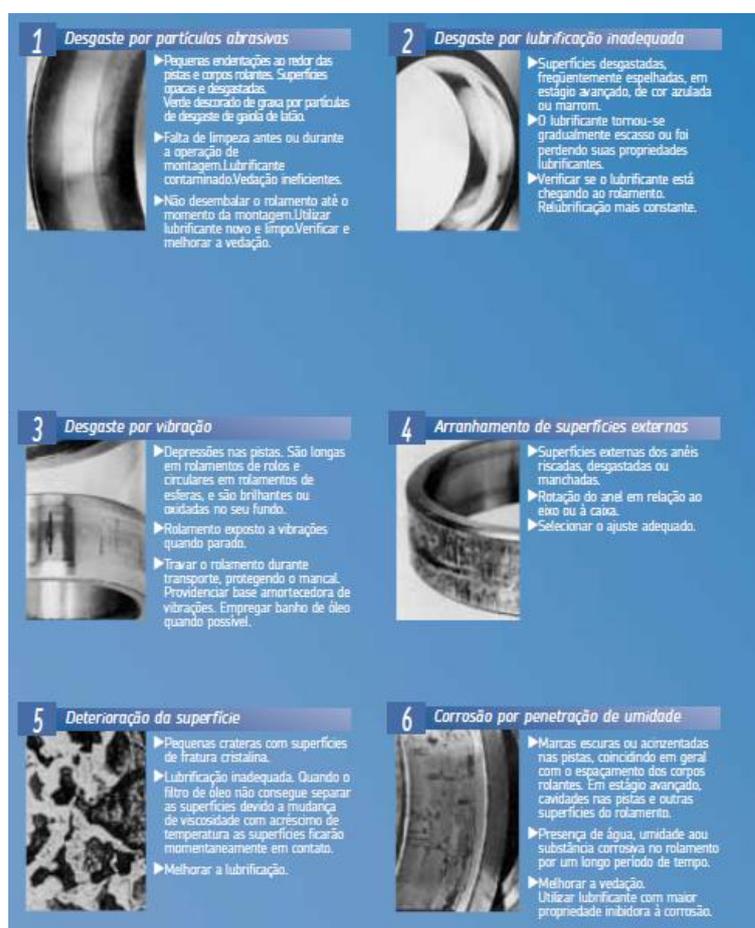


Figura 26: Tabela de possíveis falhas de rolamento. (SKF, 1997 - Modificado)

2.4. Vibração

Segundo RAO (1996), qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é chamado de vibração ou oscilação, logo a vibração pode ser determinada como uma

oscilação periódica ao redor de um ponto de equilíbrio. Além disso, pode ser caracterizada como um fenômeno periódico ou não de forma de onda mais simples ou mais complexa. Para a Engenharia e a Manutenção em geral a análise de vibração é fundamental e consolidada como ferramenta preditiva dentro das indústrias.

Deste modo a medição das vibrações funciona como variável de monitoramento do estado da máquina rotativa a partir de suas condições e identificação de falhas. Tal variável pode ser analisada em diversas faixas de frequência e parâmetros, como deslocamento, velocidade ou aceleração. As frequências analisadas normalmente variam até 6.000 Hz, para os defeitos analisados durante a rotina. A operação dos equipamentos rotativos pode levar à aproximação de frequências de ressonância do material, uma vez que a tendência do desenvolvimento tecnológico é a utilização de novos materiais, mais leves, com maior velocidade para implicar em uma maior produção, resistência e/ou disponibilidade da máquina. O que impactaria na rigidez do equipamento, ou seja, uma das principais variáveis para a medição e análise correta do espectro de frequências.

Um sistema analisado por vibração é composto basicamente por alguns fatores básicos, onde a força dinâmica oscilatória (vibração) é medida a partir da conversão da força em sinal elétrico pelo transdutor. Em geral, um transdutor é um dispositivo que transforma grandezas mecânicas em grandezas elétricas e para a leitura do sinal de saída (tensão ou corrente) poder ser efetuada, o mesmo deve passar por um conversor para ser amplificado. Conforme os valores medidos, o instrumento de medição de vibração pode ser chamado de vibrômetro, medidor de velocidade, acelerômetro, medidor de fase ou medidor de frequência.

Há diversos tipos de transdutores disponíveis, contudo os principais para a utilização em escala industrial são os piezelétricos e/ou os acelerômetros, onde ambos satisfazem as necessidades de acordo com a análise a qual se espera, em termos de deslocamento, velocidade e/ou aceleração, por exemplo.

Para a análise do sinal, é determinada a resposta do sistema sob uma excitação conhecida. Todavia, a frequência de resposta mostrará algumas frequências mais discretas, no entorno ao qual a energia está concentrada. Logo, a partir do conhecimento das características dinâmicas dos componentes do sistema, podem-se relacionar os componentes das frequências distintas, para os componentes específicos. Assim sendo, um gráfico do tempo de aceleração de uma máquina com alto índice de vibração deve ser apresentar, como a Figura 27 a. A partir deste dado não podemos identificar a causa da vibração excessiva, mas se transformamos o domínio de frequência por aceleração, como na Figura 27 b. a mesma indicará uma frequência de 25 Hz como a energia de maior concentração e sendo a causadora.

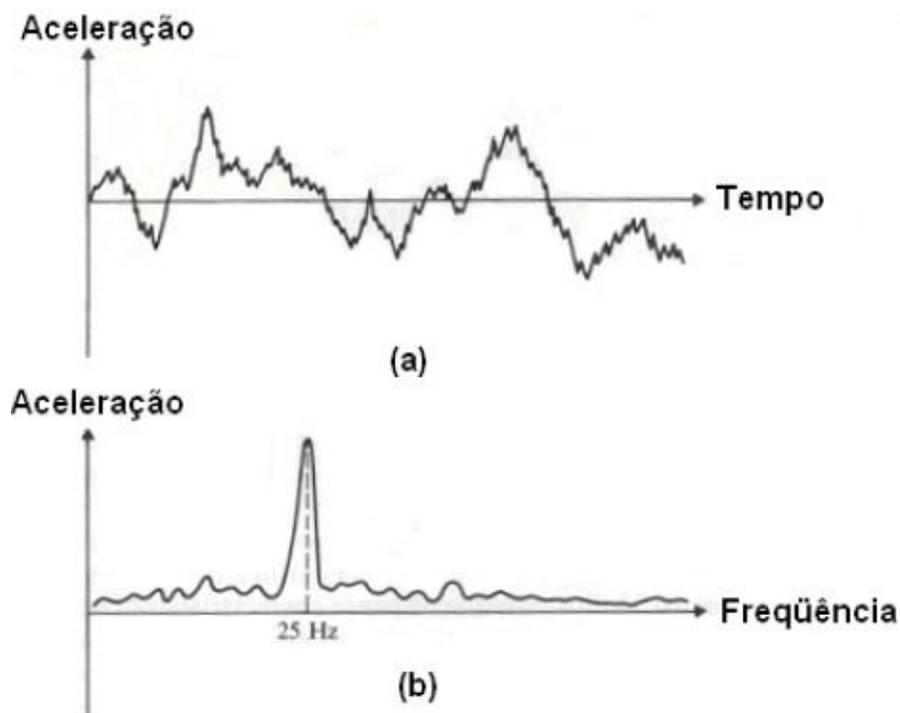


Figura 27: Gráfico de (a) aceleração por tempo e (b) aceleração por frequência. (RAO, B. K. N., 1996)

Como são analisadas diversas frequências durante a medição, existe um tipo gráfico que consegue modular todas em uma mesma tela, o espectro, como exemplo na figura 28. O espectro serve como dispositivo onde a separação da energia em várias bandas de frequência é realizada e fisicamente o espectro não existe, mas serve como ferramenta de melhor entendimento e análise técnica. O gráfico onde o eixo x é o tempo, o eixo y a frequência e o z a amplitude. Logo a classificação dos espectros varia de acordo com o filtro utilizado.

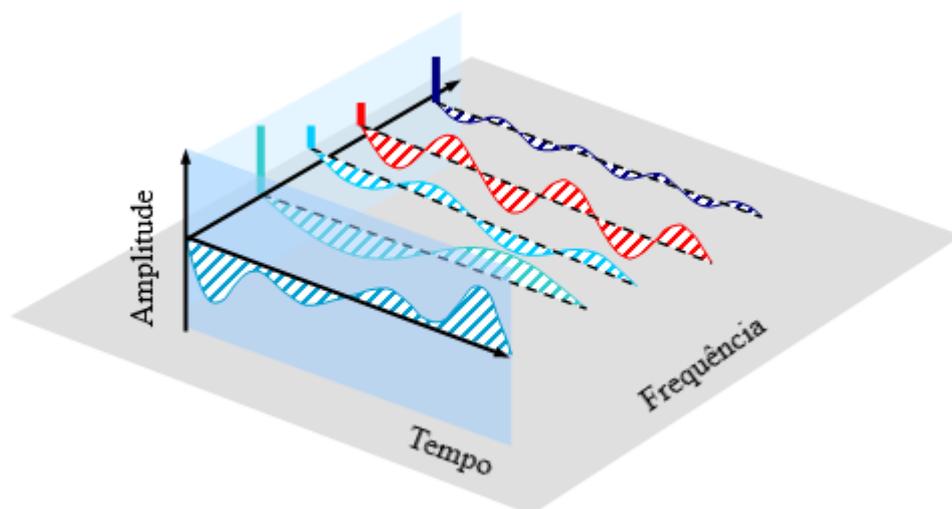


Figura 28: Espectro de vibração. (MVI TECHNOLOGIES GROUP, 2003 - Modificado)

Para a análise de o sinal ser feita de forma clara, é necessário um filtro de passagem de banda, desta maneira os ruídos de fundo são descartados e as ondas dentro da banda serão mínimas e as inclinações dos contornos do filtro serão íngremes, para manter a atual passagem de banda fechada para o valor ideal. Este sendo caracterizado pela Equação 6:

$$B = fu - fl \quad (6)$$

Para um bom filtro, estas frequências são chamadas de frequência de corte nas quais a resposta é 3 dB menos que a média da resposta da passagem de banda. Na análise de sinal contante existem dois tipos distintos de filtros, o percentual de comprimento de onda constante e o de comprimento de onda constante. O primeiro se resume onde a razão do comprimento de onda à frequência central $(fu - fl) / fc$ é uma constante. Já o segundo o comprimento de onda $(fu - fl)$ é independente da frequência central (fc) .

A diferença entre ambos é basicamente na coleta de informações mais detalhas, no tempo de coleta e na análise dos dados. Desta forma cada filtro é sintonizado em um centro de frequência diferente, para cobrir o maior número de regiões de interesse possíveis. Contudo se um filtro de comprimento de banda for utilizado com a frequência de centro variando constantemente, ele é chamado de heteródino.

Segundo a UE SYSTEM (2004), o método heteródino funciona de forma similar ao rádio AM. De modo que, enquanto nós não podemos ouvir ondas de rádio, este método nos ajuda a identificar os diferentes sons presentes na música. Logo, o processo heteródino prevê uma tradução do ultrassom produzido pelo equipamento e permite diferenciarmos um som de um componente do outro. Como no objeto de estudo.

Ao longo das últimas décadas a análise de vibração tem sido objeto de estudo em diferentes técnicas para a detecção de falhas de rolamentos. Seja pelo domínio do tempo, da frequência, ou uma combinação de ambas. Todas, basicamente, envolvem a média absoluta (X_{med}), o nível global RMS (X_{rms}) e o fator de crista (F_{cr}) para caracterizar o estado do defeito.

Segundo TANDON (1999), os métodos mais simples de detecção de falhas no domínio do tempo são o nível RMS e o fator de crista. Contudo ambos têm limitações de uso e aplicações. Todavia, segundo MITCHELL (1993), o fator de crista é mais eficiente que o nível RMS para a detecção de falhas em estágio inicial, quase imperceptíveis. Tendo em vista que a falha se propaga pela superfície da pista e o valor de pico permanece quase inalterado conforme a propagação, enquanto RMS cresce de forma visível. Logo haverá uma diminuição

do fator de crista, e MITCHELL (1993) propõe utilizar um fator K (produto entre o valor de RMS e valor de pico). Essas três grandezas são descritas de acordo com as Equações 7, 8 e 9.

$$X_{med} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} f(t) dt \quad (7)$$

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} f^2(t) dt} \quad (8)$$

$$Fcr = \frac{X_{pico}}{X_{rms}} \quad (9)$$

Onde:

$f(t)$ = grandeza a ser medida

Δt = intervalo de tempo dos dados históricos

A Figura 29 apresenta a relação entre as grandezas apresentadas e o sinal de vibração. Já na figura seguinte (30a e 30b), podemos ver a relação entre os fatores de pico (X_{pico}) e o RMS (X_{rms}) para situações distintas de defeito de rolamento junto ao fator de crista (Fcr) e a forma como se apresenta.

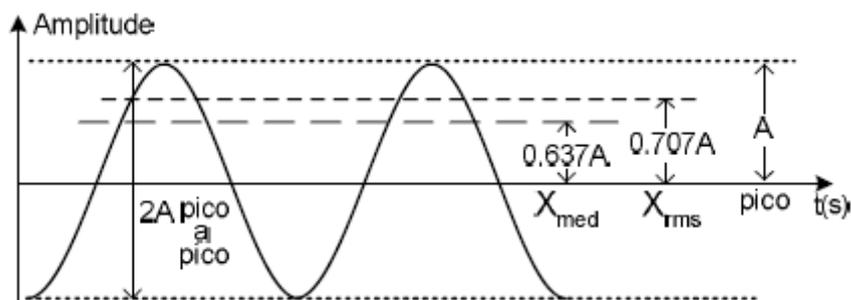


Figura 29: Média, valor RMS e Pico de uma onda. (BEZERRA, R. A., 2004)

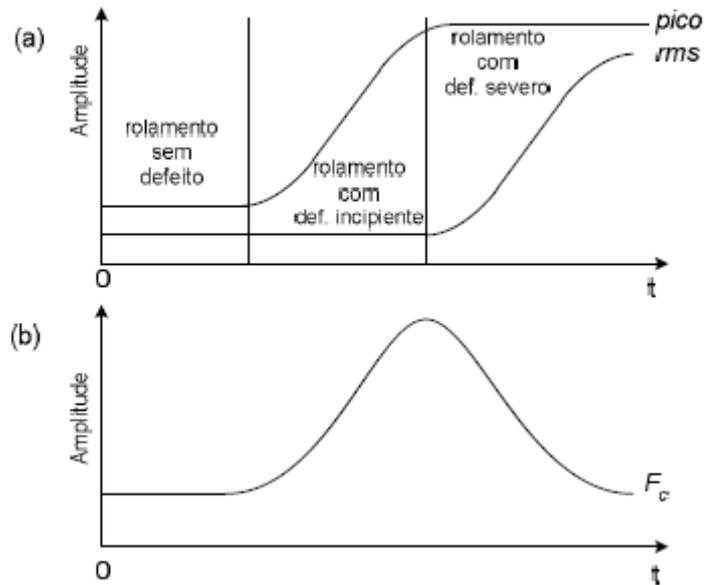


Figura 30: (a) comportamento de valor de Pico e RMS (b) fator de Crista. (BEZERRA, R. A., 2004)

Uma forma de contornar a questão foi apresentada por MITCHELL (1993), como citado anteriormente o fator K, logo pela Equação 10:

$$Fk = X_{pico} \cdot X_{rms} \quad (10)$$

Desta forma, como apresentado, o fator K condiciona o rolamento de acordo com a amplitude, vide figura 31 abaixo.

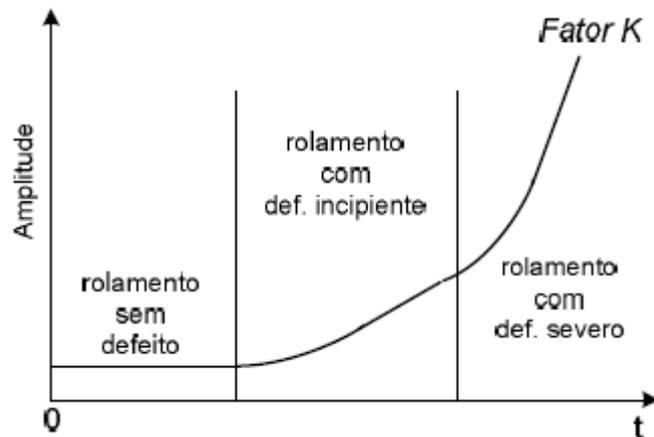


Figura 31: Fator K para desgaste. (MITCHELL, 1993)

Os métodos de análise para domínio com o tempo são apenas qualitativos, como afirma BEZERRA (2004). O que descreve esses métodos aos quais permitem apenas identificar o surgimento da falha, mas sem precisar a sua localização (elementos rolantes,

pistas e/ou gaiolas). Logo, há necessidade das análises complementares em outros métodos existem para uma informação mais completa e abrangente, como o domínio por frequência e a combinação de domínio tempo-frequência.

O que surge como solução do problema é a utilização da FFT (Fast Fourier Transform), a transformada rápida de Fourier, desenvolvida pelo cientista e matemático Jean Baptiste Fourier (1768 – 1830), aplicada a um sinal $x(t)$ que se decorre no tempo o transpõe em um domínio da frequência $X(\omega)$. A transformação possibilita a identificação separada e de forma mais clara os diversas componentes de frequências as quais estavam mascaradas no domínio de tempo, mensurando as suas amplitudes e possíveis defasagens. A transformada na forma complexa é escrita de forma completa pela Equação 11:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (11)$$

A melhor e mais eficaz técnica aplicada para a detecção precoce de falhas em rolamento é a “técnica do envelope”. Pode também ser referida como “demodulação de amplitude”, ou seja, uma técnica a qual o seu processamento potencializa a habilidade da identificação de uma possível falha por quem está analisando os dados. De modo que intensifica componentes repetitivos de um sinal dinâmico para poder advertir de forma antecipada antes da deterioração do componente mecânico, segundo SKF (2012). Pois que na falha incipiente as frequências de defeitos se apresentam de forma muito pequenas e não são discerníveis no espectro de forma clara. Logo, durante essas fases o “envelopamento” é necessário para garantir a amplificação do sinal de resposta aos impactos no rolamento, por exemplo.

A técnica em si é um conjunto de procedimento aplicado ao sinal para tratamento do mesmo, como mostra a Figura 32.

- Aplicação da FFT (Transformada Rápida de Fourier) para localizar frequências onde houve aumento, ou seja, definir as faixas de filtragem. Em relação às medidas anteriores de picos de frequência, que terá sido causada à excitação de frequências naturais características do rolamento ou da própria estrutura do equipamento (Mitchell, 1993).
- Aplicar o filtro passa-banda ao sinal, para eliminação das baixas frequências de alta amplitude, pois em geral, estes sinais caracterizam desalinhamentos e desbalanceamentos. Pode haver confusão quanto ao tamanho da faixa de banda do filtro, uma vez que especialistas aconselham a definir a banda de corte em torno da

região de excitação. Contudo isso pode ser de difícil definição se a falha ocorre em níveis baixos de energia, por exemplo.

- Aplicar a Transformada de Hilbert, para obter envelope do sinal do defeito, ou seja, o sinal de baixa frequência, a demodulação em si.
- E, por último, aplicar novamente a FFT ao envelope, para obter as frequências dos defeitos.

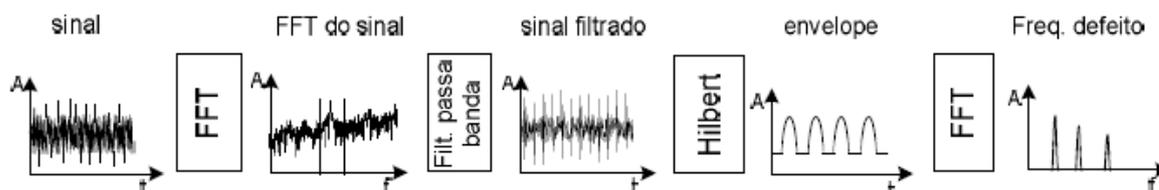


Figura 32: Sequenciamento de procedimentos da técnica do envelope. (BEZERRA, R. A., 2004)

Caso as frequências das bandas laterais encontradas sejam múltiplas simples da frequência definida, pode-se concluir que a falha está na região da pista parada em relação à região de carregamento. Contudo, caso as bandas laterais esteja igualmente espaçadas com valores de frequência em relação à frequência de rotação, pode-se concluir que a falha está na pista girante em relação à região de carregamento. Se por outro lado a frequência principal tem bandas laterais com frequências iguais à frequência de gaiola, pode-se concluir que a falha é na esfera MCFADDEN (1984).

Além da aplicação da transformada de Hilbert como procedimento de demodulação, existem outras técnicas aplicáveis a sinais mais específicos, de modo que os tipos de filtros adaptativos possam eliminar quaisquer tipos de ruídos de fundo e o sinal seja tratado e lido da melhor forma pelo analista. Esses tipos de filtros adaptativos podem ser o Filtro de Kalmann, o algoritmo Least-Mean Square (LMS), a análise Cepstrum, entre outros.

Capítulo 3

FERRAMENTA PREDITIVA EM ROLAMENTOS

3. Emissão Acústica e Ultrassom em rolamentos

O princípio físico do som é de que uma onda dotada de energia necessita de um meio para a sua propagação. As ondas ultrassônicas são aquelas as quais alcançam e ultrapassam o limite de frequência da audição humana, cerca de 20 kHz. Logo, para obtermos a faixa audível os equipamentos devem ser capazes de receber essas ondas de alta frequência e convertê-las em um sinal correspondente à faixa audível.

A implantação do equipamento de aquisição de dados ultrassônicos em uma planta industrial coleta diversos sinais, dentre os quais estão os ruídos de fundo, como ferramentas em geral, vazamentos, ruídos do próprio processo e rotação das máquinas. Contudo, o projeto do equipamento permite a eliminação de grande parte do ruído de fundo e filtragem na faixa de frequência desejada e selecionada na ferramenta. Por exemplo, cerca de 100 dB audíveis para o ser humano, somente 15 dB serão audíveis em torno de 40 kHz, devido aos ruídos de fundo.

Uma das principais características das ondas ultrassônicas é a atenuação das mesmas antes de sofrerem reflexão, principalmente por transmissão, interferência e dispersão do feixe. Devido ao baixo índice de ruídos de fundo com características dessas frequências em ambientes de indústria, isto possibilita a utilização e captação de pequenos sinais como vazamentos, efeitos Corona, falhas de rolamentos, sinais de fuga elétrica, entre outros.

A Figura 33 abaixo ilustra as características das frequências por decibéis, de acordo com ROSA (2007).

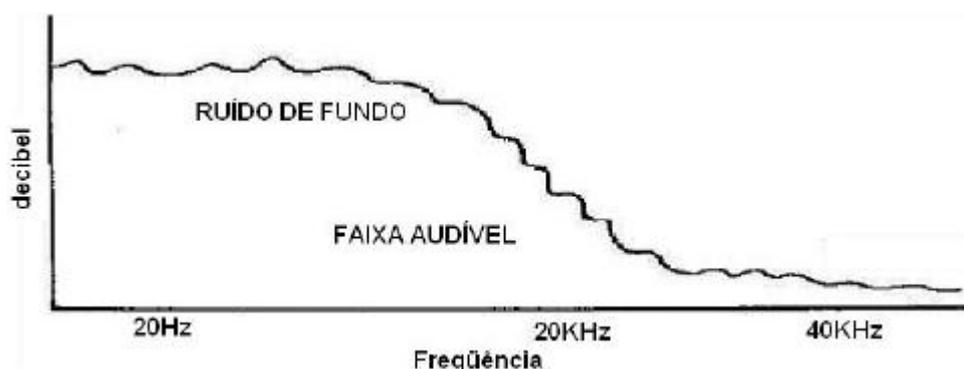


Figura 33: Ruído de fundo e faixa audível conforme a faixa de frequência. (ROSA, S. L., 2007)

A utilização da tecnologia como ferramenta preditiva é de relativamente nova no âmbito industrial em relação à outras técnicas, como a vibração, por exemplo. Contudo, não somente para o indício precoce de diagnóstico de falha de lubrificação, mas também, como inspeções elétrica, vazamento de vapor, passagem de válvulas, testes de purgadores, além da medição do próprio sinal proveniente dos mancais.

A partir do princípio anteriormente citado, onde, segundo a UE SYSTEM (2004), as falhas de rolamento são diagnosticadas a partir de sinais de altas frequências entre 24kHz e 50kHz, logo a partir da medição destes sinais é possível prever e diagnosticar problemas de forma mais precoce em comparação com outras técnicas preditivas. Assim a principal utilização em equipamentos rotativos, e objeto deste estudo, são os mancais de rolamento lubrificados à graxa. De modo que os mesmos não sejam danificados com excesso ou falta do lubrificante, visto que em ambos cenários são igualmente prejudiciais na confiabilidade do ativo. As Figuras 34 e 35 ilustram um motor elétrico que falhou por excesso de lubrificação, causando o curto do mesmo, uma vez que houve diversas falhas durante os procedimentos aos quais levaram o equipamento à falha.



Figura 34: Enrolamento do motor com excesso de graxa. (BRASKEM, 2018)



Figura 35: Rolamento do motor com excesso de graxa. (BRASKEM, 2018)

3.1. Materiais e métodos

As ferramentas utilizadas, segundo o documento da UE SYSTEM (2004) com o Ultraprobe, os utilizadores ouvem a “qualidade do som” de um rolamento, monitorizando também as mudanças na amplitude no visor/medidor. É possível assim analisar tendências, resolver problemas e confirmar problemas potenciais nos rolamentos. Apenas com um ponto de teste e pouca formação, os executores aprenderão a testar os rolamentos em poucos minutos e anotar os dados necessários. A sintonização de frequência facilita o ajuste de um rolamento e o respectivo isolamento para análise independentemente dos sinais concorrentes.

A ferramenta utilizada nas rotinas principais, ou seja, aquelas as quais são sempre feitas sem a necessidade da lubrificação no momento da coleta dos dados, é o Ultraprobe 9000 ATEX. A especificação ATEX somente há necessidade para utilização em atmosferas potencialmente explosivas. Desta forma as especificações principais e mais úteis são:

- Faixa de seleção de frequência de 20 kHz a 100 kHz (sintonizável em incrementos de 1 kHz).
- Modos de apresentação de tempo real (real time), instantânea (snap shot), pico de manutenção (peak hold) e armazenamento (storage display).
- Tempo de resposta menor de 10 milissegundos.
- Saída heteródina calibrada, frequência em dB e saída de dados USB.
- Tecnologia de filtragem de sons Ultratrend.

Além dessas características técnicas, a ferramenta possui display com as indicações de frequência, nível de dB, bateria e faixa de sensibilidade de acordo com o ruído, como visto na Figura 36.



Figura 36: Vista frontal do Ultraprobe 9000 ATEX. (UE SYSTEM, 2004 - Modificado)

A outra ferramenta utilizada foi o modelo Ultraprobe 201, modelo visivelmente mais simples e acoplável nas bombas de graxa manuais. Este tem como configuração padrão de fábrica a frequência de 38 kHz, pois a mesma, segundo a NASA (1972) seria a de maior incidência de frequência das falhas por lubrificação de rolamentos. Logo há mudança em algumas configurações e se apresenta conforme Figura 37:

- Receptor heteródino de estado sólido.
- Display de LED de 10 barras para indicar o nível de ruído (cada LED corresponde à diferença três dB, de acordo com o manual).
- Sensibilidade variável em oito níveis de posições.



Figura 37: Vista Frontal do Ultraprobe 201. (UE SYSTEM, 2004 - Modificado)

Segundo a UE SYSTEM (2004), podemos saber quando deve lubrificar definindo um nível de base onde o ruído deste nível será considerado como o estado natural do rolamento. Poderá optar por lubrificar sempre que um rolamento exceder o nível base predefinida de 8

Além disso, o processo ao qual foram feitas as coletas e análise de dados seguem princípios do fluxograma da Figura 40. Onde há modificação da frequência de coleta de acordo com o plano de lubrificação de cada equipamento, pois que se deve observar o comportamento da máquina antes, durante e depois de realizada a lubrificação. Assim sendo, como decisão da Engenharia de Confiabilidade, foram definidas rotas semanais de coleta de dados, pois o plano está estratificado em semanas dentro do software de gestão Lubit.

A definição do acompanhamento anterior e posterior foi realizada durante duas semanas as quais antecederiam e precediam a própria lubrificação como o manual do equipamento especifica. Afim de que se possam identificar possíveis desgastes acentuados em cenários críticos (como a proeminente falta e/ou excesso de lubrificante). E desta forma se obter um acompanhamento melhor dos equipamentos.

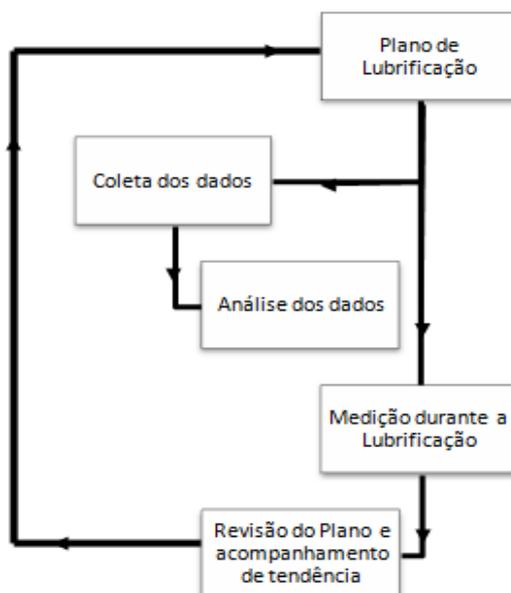


Figura 40: Fluxograma de processo de coleta e análise de dados.

Logo para análise em questão do trabalho foram separados dois motores WEG idênticos em fabricação, potência, corrente e solicitação de torque, ambos com 6 kV de tensão, trifásicos, 250 kW de potência e 3580 rpm de rotação nominal. Uma vez que ambos motores trabalham em linhas iguais para a produção de resinas termoplásticas. A diferenciação se dá pela densidade da resina produzida. De forma construtiva, os motores são os comandos acionadores de seus respectivos compressores centrífugos aos quais desempenham papel fundamento na dinâmica de produção da indústria em questão.

Como citado anteriormente, a coleta de dados foi realizada de forma similar nos equipamentos, ou seja, ainda que houvesse erros e/ou interferência na mesma a metodologia seria feita para ambos equipamentos, o que possibilita uma melhor análise comparativa entre

ambos. O início da aquisição de dados com as rotas foi de Abril de 2017 a Dezembro de 2017. Este período possibilitou uma melhor aprendizagem com a ferramenta e, além disso, o debate de diversas situações as quais não era esperado o comportamento. Contudo houve um aprendizado contínuo de como deveriam ser estruturados os estudos e a sistemática de análise.

Portanto foi definido que, a partir do momento ao qual a metodologia de vibração não identificasse alguma característica anormal no rolamento este seria considerado em bom estado. O que possibilitou o início do experimento em conjunto com uma técnica preditiva mais assertiva e com maior confiabilidade.

Além da comparação entre dois motores de forma construtiva idêntica, houve também a comparação entre os rolamentos presentes em ambos lados de um mesmo motor, ou seja, para o Motor 1, teríamos os valores de emissão acústica na parte LA e LOA do mesmo, o que naturalmente também ocorre no Motor 2. Para este caso, os lados do motor utilizam o mesmo rolamento. Todavia esta forma construtiva não é regra e a mesma varia de fabricante, carga, rotação, número de polos, potência, corrente, entre outras variáveis dos motores de indução.

Como podemos ver na Figura 41a e 41b, para a frequência de 30 kHz em ambos lados temos a tendência de crescimento do ruído. Logo ao que indica em um primeiro momento o início de um desgaste uniforme. Visto que, como citado no início do capítulo o aumento do ruído teria como causa o aumento do atrito. Além disso, não há dados significativamente distintos entre os lados.

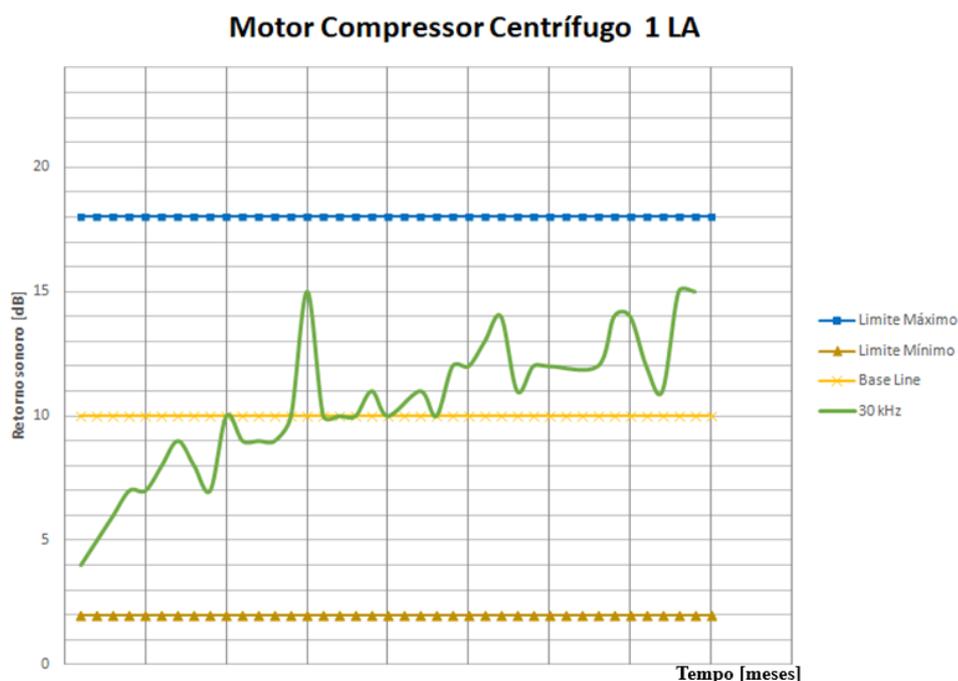


Figura 41a: Motor 1 LA em 30 kHz.

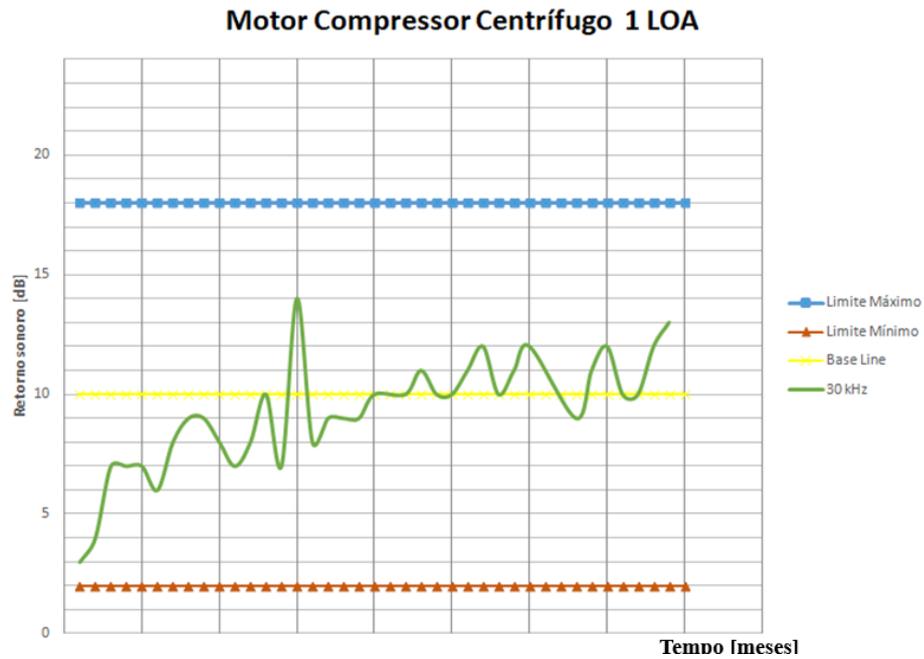


Figura 41b: Motor 1 LOA em 30 kHz.

A partir das Figuras 42a e 42b, onde o Motor 1 em ambos lados ratificam a tendência de crescimento do ruído na emissão acústica. Desta forma, corrobora os dados coletados na frequência anterior, uma vez que esta seria mais suscetível aos ruídos externos, pois estar mais próxima à faixa audível. Mas observa-se, como era esperada a diminuição em valor de decibéis conforme o aumento da frequência escolhida.

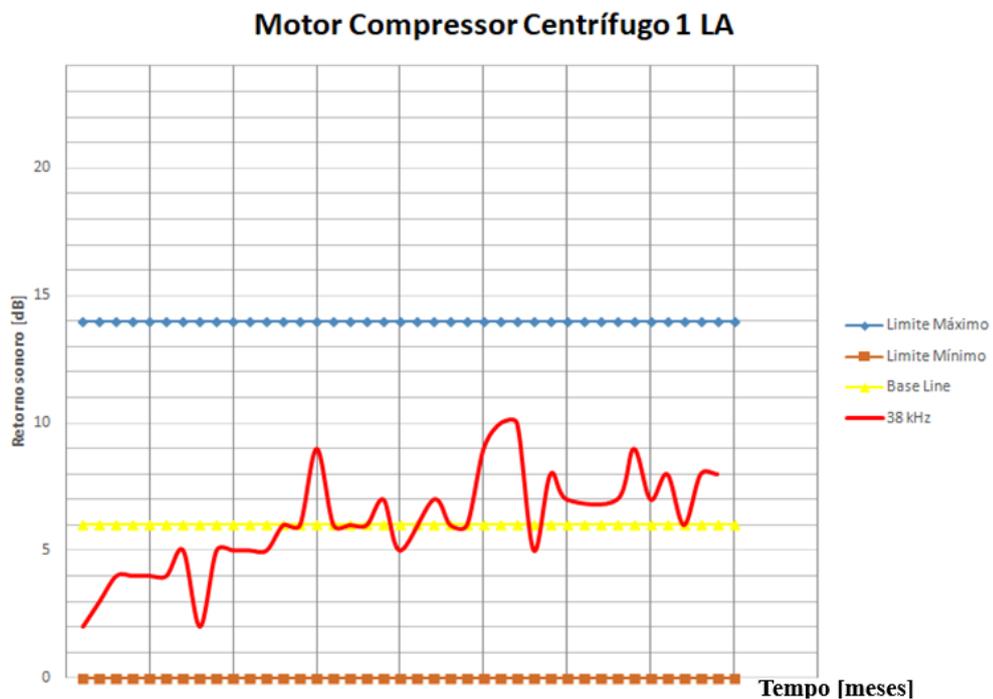
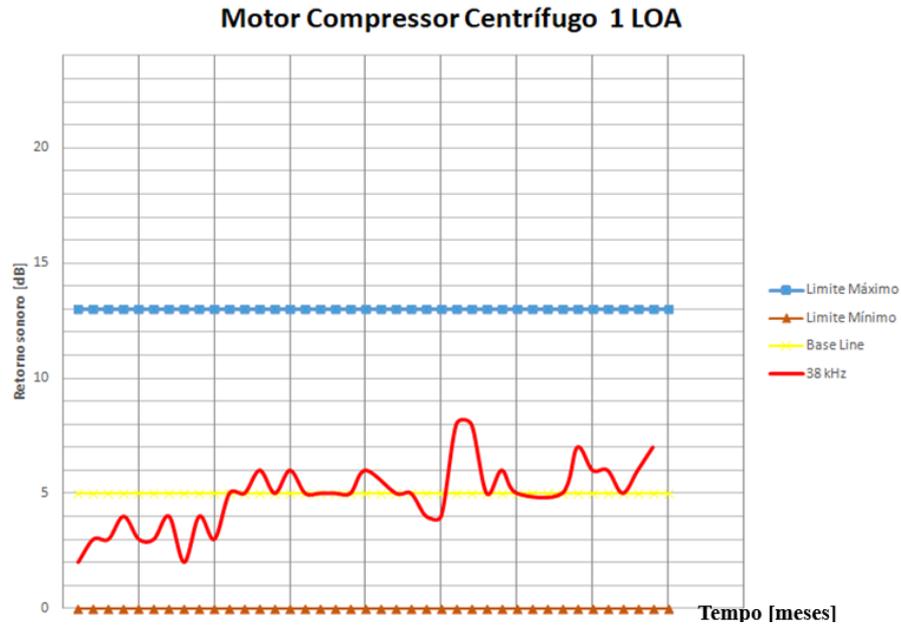
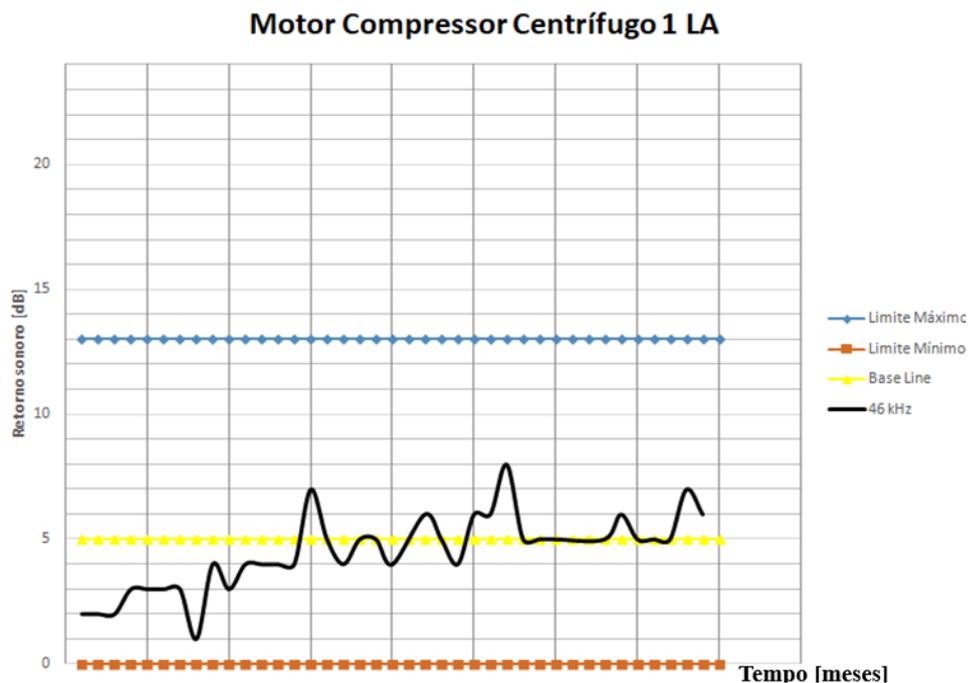
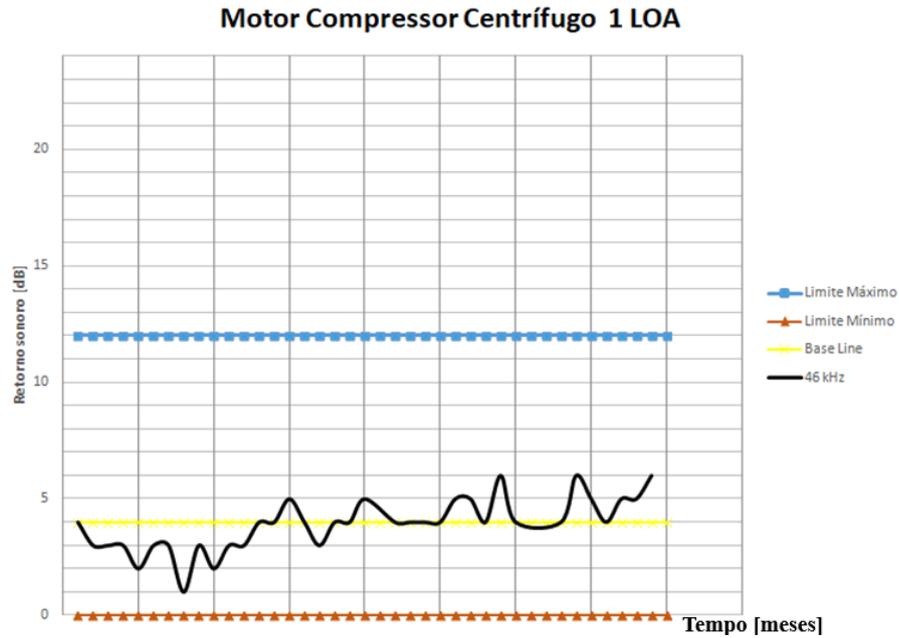


Figura 42a: Motor 1 LA em 38 kHz.

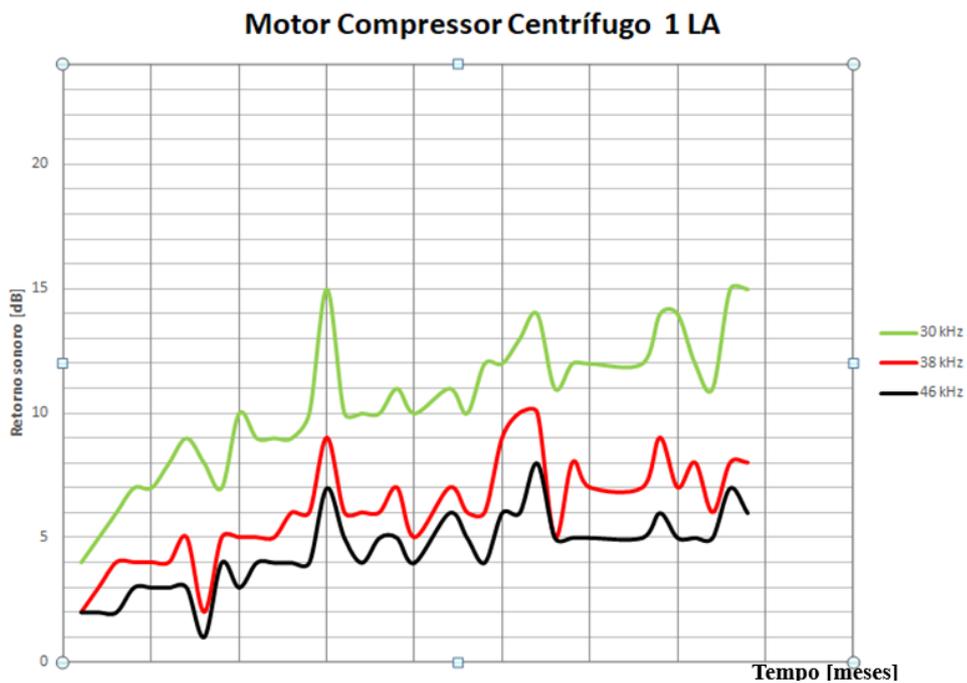


Por fim os dados em 46 kHz, a maior frequência analisada, ainda que de forma mais sucinta também validam a tese de crescimento do ruído ao longo dos meses aos quais o equipamento foi acompanhado, conforme Figuras 43a e 43b. Desta forma, após a observação deste comportamento foi alertado à equipe de preditiva que a mesma acompanhasse com mais atenção a máquina. Contudo, com é a proposta da ferramenta em realizar um diagnóstico mais cedo possível e acompanhar seus níveis de tendência conforme crescimento da mesma.

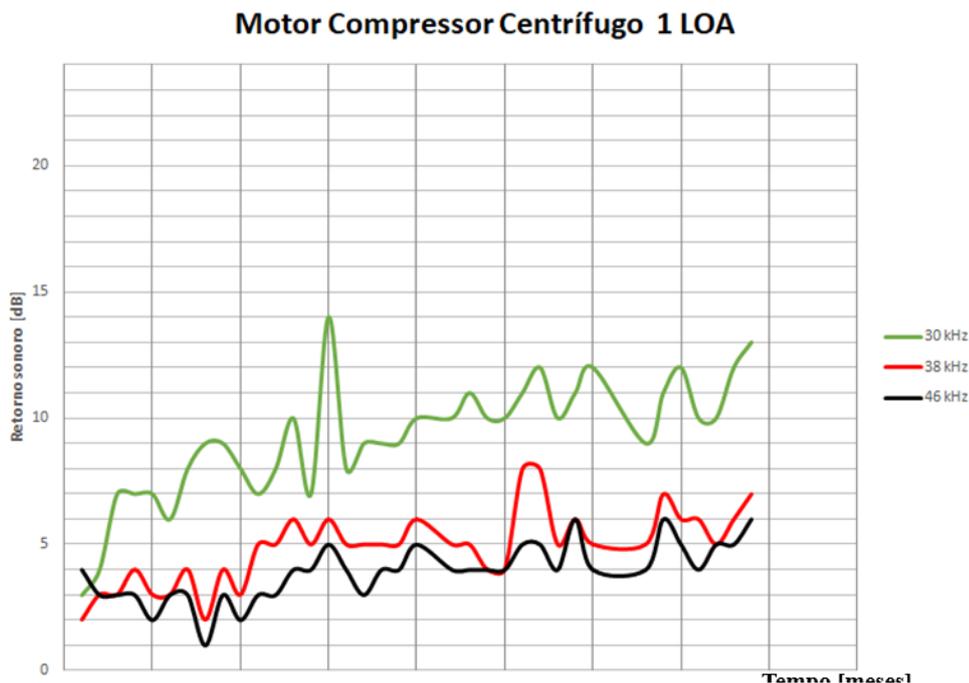




De forma a melhorar a visualização do comportamento parecido de todas as frequências analisadas, as Figuras 44a e 44b demonstra o conjunto global para o lado acoplado do motor. O que possibilita a análise e o diagnóstico do início da falha deste rolamento. Uma vez que a lubrificação do mesmo estava sendo feito de forma como recomendado pelo fabricante, em período, quantidade, material e metodologia correta.



A partir do comportamento, e como era esperado no início do experimento, o lado LOA se apresentou de forma muito semelhante ao lado LA. Uma vez que ambos estão sob mesma carga, intempéries e possíveis contaminações.



O comportamento esperado para as análises dos gráficos de emissão acústica para ao Motor 2 deveriam ser próximos aos do Motor 1, em teoria. Contudo como podemos ver nas Figuras 45a e 45b isto não ocorre. A falta de repetitividade dos dados nesse caso não necessariamente serve como fator para descartar os mesmos. Pois que ainda que ambos motores sejam de formas construtivas idênticas, os mesmos podem ter sofrido um histórico de manutenção bem diferente. Como citado anteriormente, estes ativos estão em duas linhas distintas na produção de polímero. Mas estas linhas de produção não necessariamente operam em série. Ou seja, quando uma produz a outra necessariamente deve produzir, ou o contrário.

Logo, de acordo com as figuras abaixo, podemos perceber um constante aumento do ruído logo após a lubrificação em intervalos espaçados. O que levanta a tese de que a frequência ao qual está sendo realizada a lubrificação não está sendo suficiente para haver o contato entre as partes metálicas. Uma vez que o comportamento se apresenta de forma parecida dos dois lados do motor.

Mas, como citado anteriormente, a frequência de 30 kHz seria a mais propensa às interferências externas e ruídos. Desta forma esta não pode ser analisada de forma isolada para um efetivo diagnóstico do equipamento.

Motor Compressor Centrífugo 2 LA

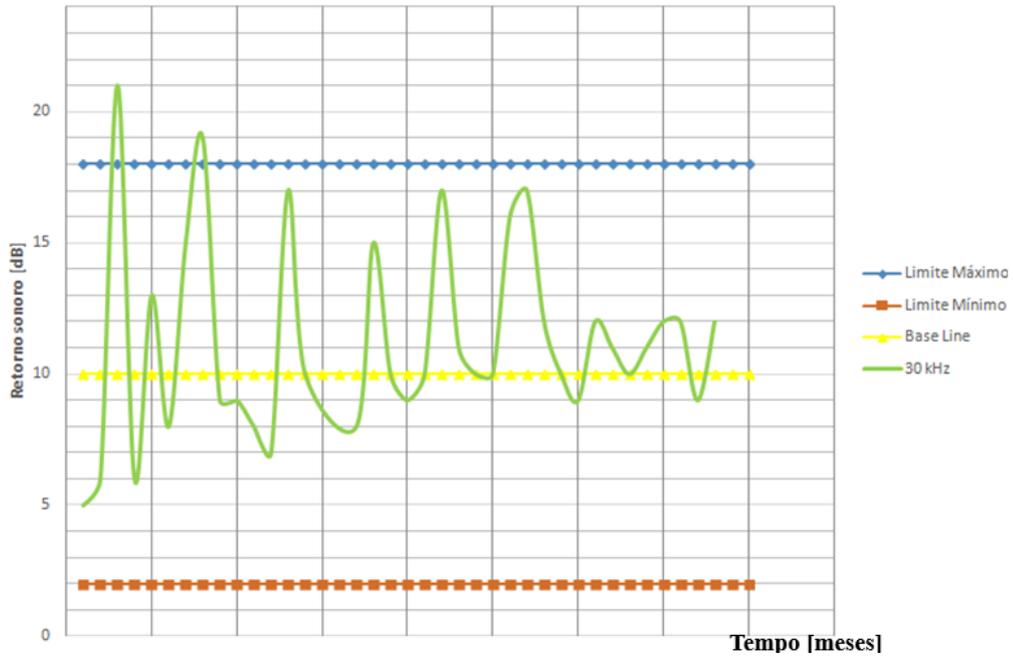


Figura 45a: Motor 2 LA em 30 kHz.

Motor Compressor Centrífugo 2 LOA

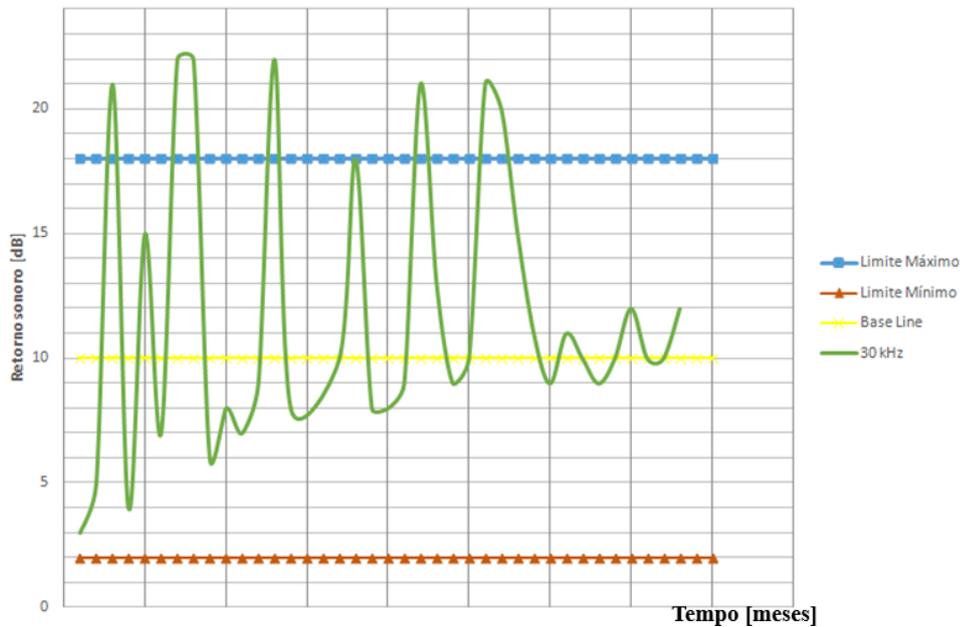
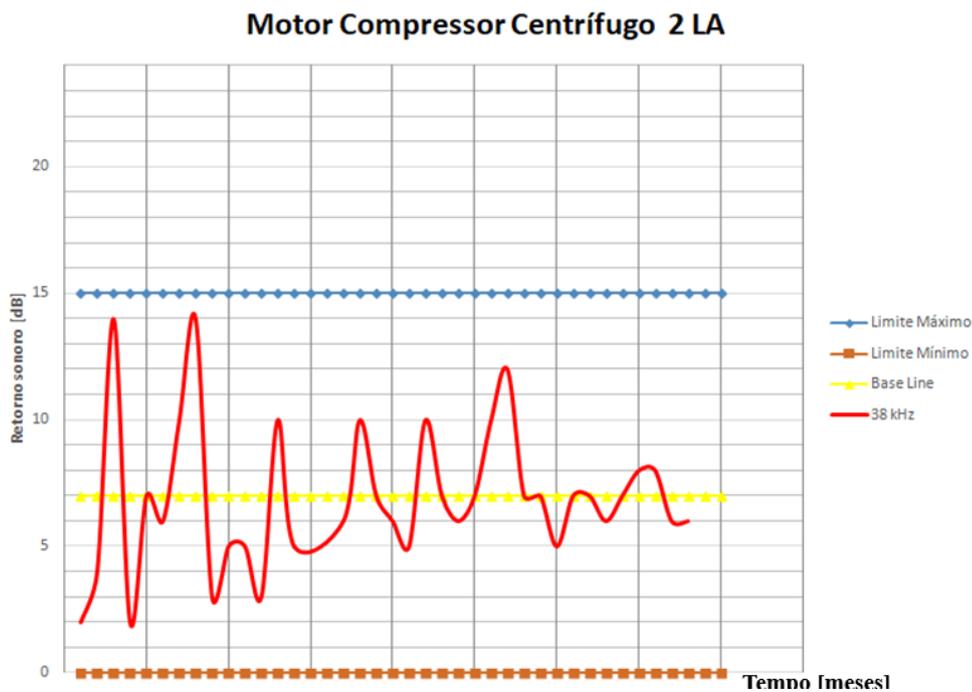


Figura 45b: Motor 2 LOA em 30 kHz.

Como era esperado, de acordo com a hipótese a partir das informações obtidas pela análise em 30 kHz, o comportamento se manteve de forma expressiva, conforme Figuras 46a e 46b. O que indica um alto ruído em diferentes frequências e sem a atenuação esperada com

o aumento da frequência analisada, inclusive ultrapassando o nível de alarme superior, determinado a partir de uma diferença entre o nível base acrescido de 8 dB, como citado anteriormente.

A partir do cenário descrito fica evidente e se espera a continuidade do comportamento de alto contato e manutenção dos altos níveis da emissão periodicamente. Caracterizando claramente ou rompimento do filme lubrificante, ou sua diminuição drástica de forma perigosa, ou seja, a separação das faces de contato estava ocorrendo, mas sem a capacidade de se manter entre os intervalos. Isso justifica a grande amplitude entre picos e vales no gráfico abaixo.



Uma vez que o lado LOA do motor se apresenta em um cenário pior que o lado LA, a equipe de Manutenção preditiva foi alertada sobre tal fato. A solicitação de atenção se mostrou evidente, uma vez que a partir da análise vibracional do equipamento foi solicitada a parada para intervenção no mesmo.

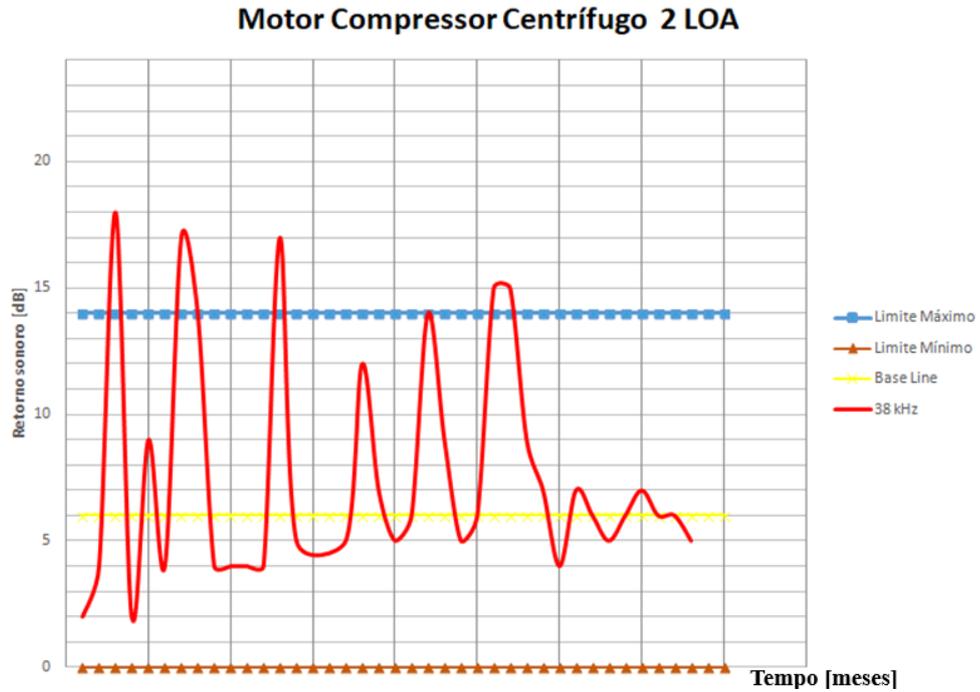


Figura 46b: Motor 2 LOA em 38 kHz.

Como complemento e parte importante para ratificar o diagnóstico, as Figuras 47a e 47b demonstram de forma mais atenuada o desgaste no lado LA, como esperado. Porém do lado mais crítico, LOA, não há dúvidas quanto à criticidade do dano já presente no equipamento.

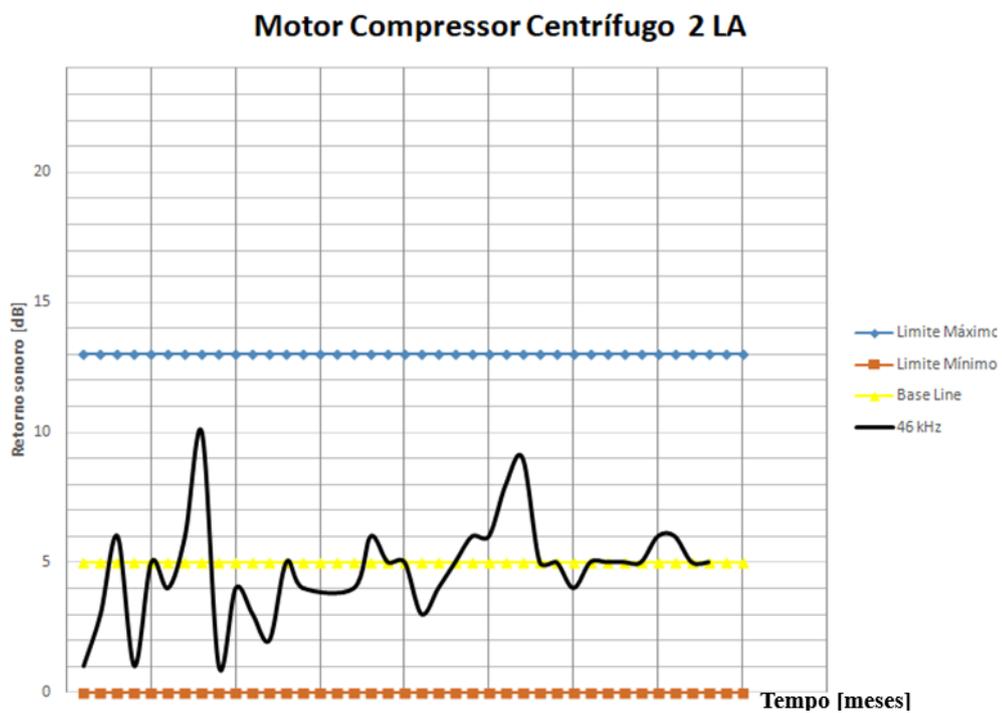


Figura 47a: Motor 2 LA em 46 kHz.

Motor Compressor Centrífugo 2 LOA

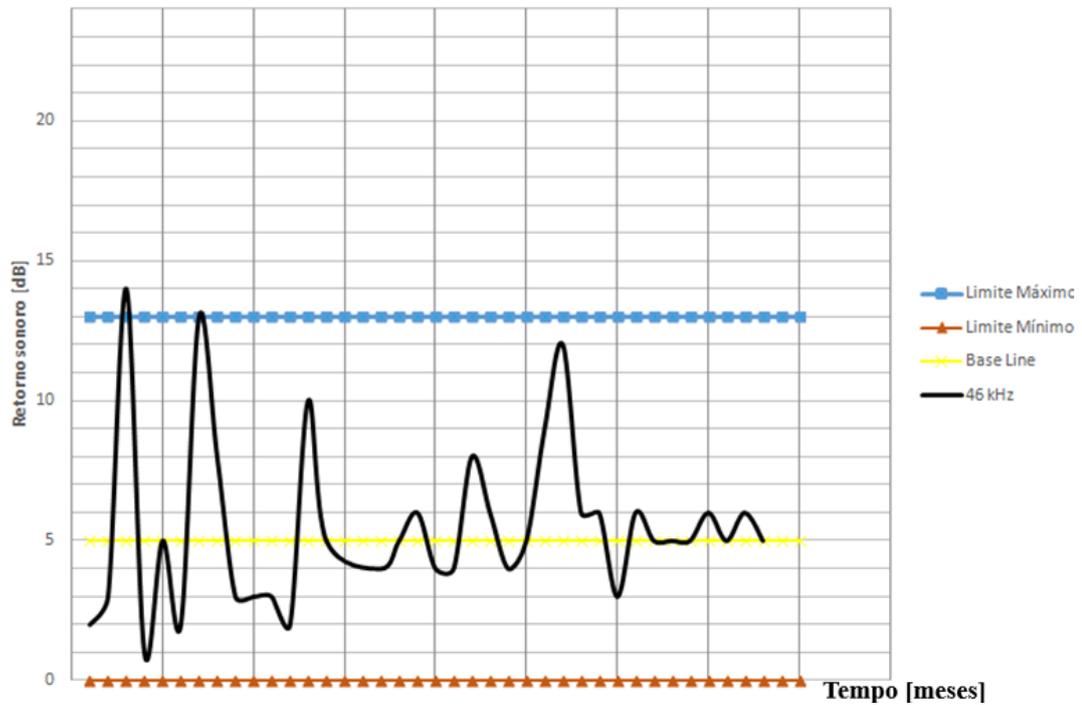


Figura 47b: Motor 2 LOA em 46 kHz.

As Figuras 48a e 48b apresentam de forma global a comparação da evolução e o comportamento do ativo até a parada para intervenção. Esta intervenção está sinalizada abaixo, e uma vez realizada, os níveis vibracionais e de emissão acústica voltaram aos patamares esperados, ou seja, próximo ao nível base respectivo de acordo com o grupo de frequência correspondente.

Motor Compressor Centrífugo 2 LA

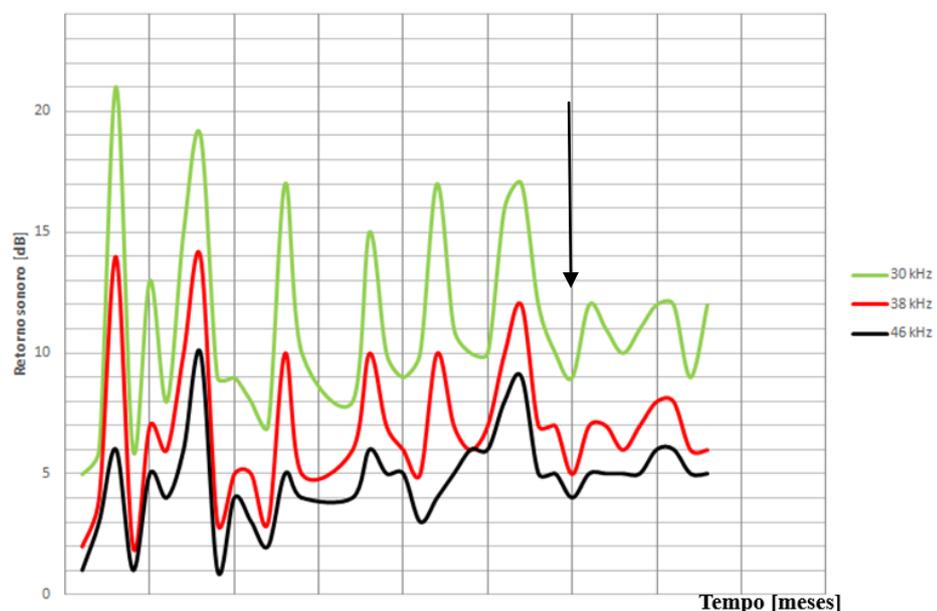


Figura 48a: Motor 2 LA em todas as frequências.

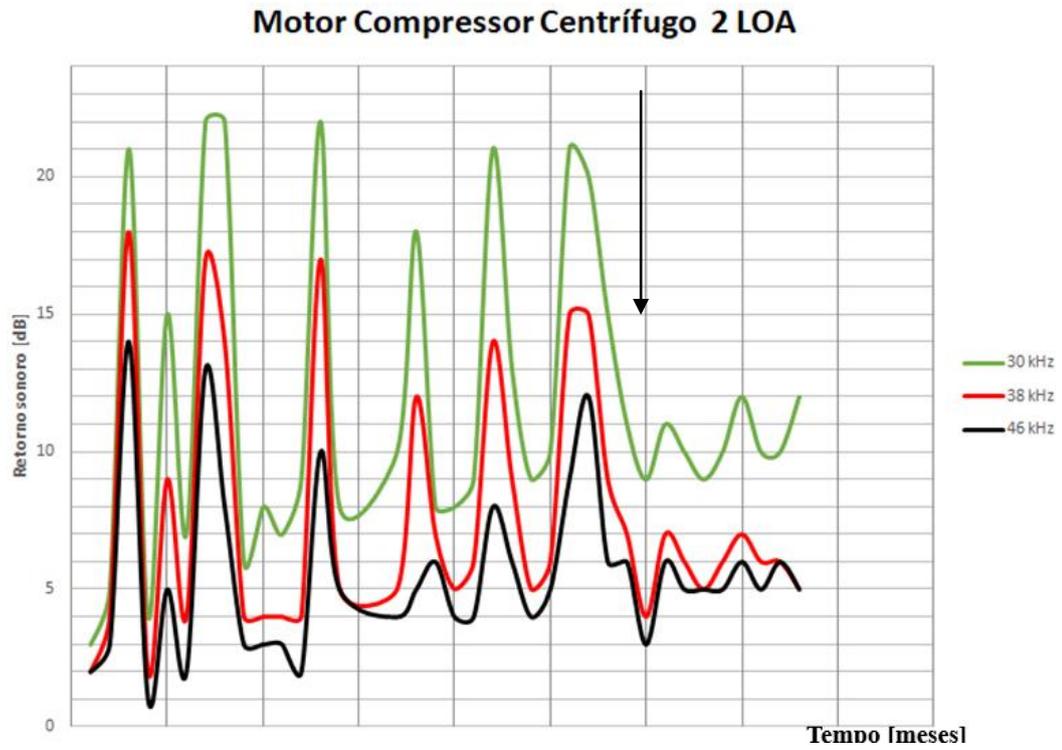


Figura 48b: Motor 2 LOA em todas as frequências.

Capítulo 4

CONCLUSÕES

A abordagem em conjunto com a técnica da vibração foi imprescindível para a análise em segurança aos quais os rolamentos não apresentaria uma falha já pré-existente e analisar os mesmos de maneira mais limpa e sem falhas inesperadas. Pois era sabido que os equipamentos instalados já operavam há mais de uma década e se fazia necessário a garantia de que já não havia um defeito instalado no rolamento a partir do momento de início da análise pelo ultrassom. A implantação de uma nova ferramenta preditiva requer análise mais minuciosa em relação à rapidez de resposta a qual a mesma pode fornecer, além disso, se deve ter cautela quanto à precisão dos dados coletados. Uma vez que a metodologia de coleta e análise deve estar bem estruturada e com o fluxo de tarefas definido, a fim de que tenham confiabilidade, reprodutibilidade e repetibilidade nas coletas em rotas.

Após a implantação e coleta durante oito meses e confrontos com as variáveis de processo o resultado foi satisfatório, mas ainda preliminar com a potencialidade de utilização da ferramenta. Uma vez que a mesma ainda possui softwares de apoio e outras funcionalidades ainda não exploradas. Contudo foi possível verificar durante a intervenção de manutenção do Motor 2 a presença de marcas na pista externa do rolamento, além de ranhuras nos elementos rolantes. A parada da máquina para manutenção foi possível devido ao diagnóstico integrado entre as ferramentas preditivas, mas com o início realizado conforme a rota do ultrassom.

Todavia é possível afirmar que agregou valor à execução da tarefa de lubrificação no site como todo, desta maneira houve menos desperdício de material lubrificante utilizado. Pois que a tarefa era realizada de forma mais assertiva, ou seja, só quando necessário. E em aspectos de ganho imaterial, houve aumento da confiabilidade dos ativos contemplados. Uma vez que os mesmos estão sob constante supervisão e inspeção da equipe, o que não ocorria com a mesma frequência no passado. Logo a mudança na cultura e paradigma da manutenção da equipe em realizar a lubrificação por base-tempo, como especificado pelo fabricante das máquinas e dos lubrificantes, para uma base-condição por meio de mais uma ferramenta preditiva. Além dos executantes da lubrificação serem submetidos a novos treinamentos e constante reciclagem.

4.1 Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros em desenvolvimento do tema, existem alguns aspectos ainda que ficaram sob dúvida, por exemplo:

- Ensaio em bancada variando carga, tamanho de rolamento, lubrificante e realizando uma falha proposital para fazer a relação entre essas variáveis e os níveis de ruídos em decibéis.
- Comportamento de outros tipos de elementos rolantes (rolos, agulhas, cilindros, entre outros)
- Separação melhor dos níveis de frequência desejados para o efetivo defeito de lubrificação.

4.2 Referências

- ABRAMAN. 2017. Documento Nacional 2017: a manutenção no Brasil. *32º Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos*. Rio de Janeiro. 2017.
- BEZERRA, R. A. *Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração*. São Paulo. UNICAMP, 2004.
- BIBLIOTECA VIRTUAL do ESTUDANTE BRASILEIRO. *Manutenção Preditiva*. Disponível em: <http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursoprofissionalizante/tc2000/manutencao/06manu.pdf> Acesso em: Março, 2004.
- BORTNEM, BRUCE, PRAY, F., BREWING, M., GROVER, P., *Measuring Shaft Misalignment with Thermography*, EUA.1995.
- CARRETEIRO, R. P. *Lubrificantes e Lubrificação*, São Paulo. 1998.
- CARRETEIRO, R. P.; BELMIRO, P. N. A. *Lubrificantes e Lubrificação Industrial*, São Paulo, 2006.
- FAG. *Produtos e Serviços para Manutenção de Rolamentos*. São Paulo, 2008.
- Ferreira, L. A., *Tribologia. Notas De Curso – Lubrificação e Lubrificantes*. Porto. 2013.
- FITCH, J. *Practicing Oil Analysis*. EUA, Noria Corporation. Disponível em: <<https://www.machinerylubrication.com/Magazine/Issue/Practicing%20Oil%20Analysis/1/2002>>. Acessado em: 01/09/2017.
- GABERSON, H.A., CAPPILLINO, R., *Rotating Machinery Energy Loss Due to Shaft Misalignment, Proceedings of the Society for Machinery Failure Preventive Technology*, EUA. 1996.
- GOODMAN, M. *Condition-Based Lubrication Using Ultrasound Technology*. UE Systems. Disponível em: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/535/conditionbasedlubrication>>. Acessado em: 03/04/2017.
- HYDAC FILTERTECHNIK. *Prospector Nr 76061/12*. Alemanha. 2002.
- JUVINALL, R. C., MARSHEK, K. M., *Fundamentals of Machine Component Design*, 2ed, New York, John Wiley & Sons, U.S.A., 1991, pp. 305 – 322
- LEVIN, M.A.; KALAL, T.T. *Improving Product Reliability: Strategies and Implementation*. Chichester, John Wiley & Sons, USA, 2003. 313p.

- MCFADDEN, P. D.; SMITH J. D. *Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique – A review*. Tribol Int., USA, Volume 17, Number 1. 1984.
- MESSER, A. *Using ultrasound to Improve Lubrication Practices*. Disponível em: <<http://machinerylubrication.com/Read/30077/ultrasoundlubricationpractices>>. Acessado em: 18/04/2017.
- MGS PRUFTECHNIK, *Aplicação do Ultrassom Acústico em Manutenção Preditiva*. Minas Gerais, 2018.
- MITCHELL, J. S. *From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance – Seventy Years of Continuous Progress*. Sound and Vibration, USA, 1993.
- MOBLEY, R. K. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2 ed. Plant Engineering. Butterworth- Heinemann, USA, 2002.
- MVI TECHNOLOGIES GROUP, *Análise de Vibrações de Máquinas Rotativas*, Rio de Janeiro. 2003.
- NACIF, J; DORIGO, L. C. *Manutenção Orientada para Resultados*. Ed Qualitymak, São Paulo, 2009. 296 p.
- NASA Tech Brief B72-10494. *A System for Early Warning of Bearing Failure*. Marshall Space Flight Center, USA. 1972.
- NEPOMUCENO, L. X. *Técnicas de Manutenção preditiva, vol. 1 e 2*. Edgar Blucher, São Paulo. 1989, 952 p.
- NSK ROLAMENTOS. *Catálogo Técnico de Seleção*. NSK. São Paulo, 1998.
- PARKER. *The Handbook of Hydraulic Filtration*, USA. 2000.
- RAO, S. S. *Mechanical Vibrations*. 3. ed. Massachusetts: Addison-Wesley, USA. 1995. 912p.
- ROSA, S. L. *Técnica de manutenção preditiva com receptor ultrassônico*. São Paulo, 2007.
- TANDON, N.; CHOUDHURY, A. *Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defect in Rolling Element Bearing*. Tribology International – volume 32, USA, 1999. 469-480p.
- TREVISAN, R. *Utilização de Medições Ultrassônicas de Vibração e da Emissão Acústica para Implantação de Lubrificação Base-Condição Visando a Prevenção de Falhas em Mancais de Rolamentos*. Dissertação UFRGS, Rio Grande do Sul. 2011.
- SKF. *Tabela de possíveis falhas em rolamentos*. São Paulo. 1997. Disponível em <www.skf.com/portal/skf_br/home/literature?contentId=514292>. Acesso em 21/09/2017.
- SKF. *Análise de Vibrações I – ISO 18436 – Categoria I*. São Paulo, 2012.

SMITH, M., *Oil Analysis Vs. Microscopic Debris Analysis - When And Why To Choose*.

Noria Corporation, USA. Disponível em:

<<https://www.machinerylubrication.com/Read/600/microscopic-debris-analysis>>. Acessado em: 03/04/2018.

UE SYSTEMS INC., 2004. *Lubrication handbook, Ultrasonic Condition-Based Lubrication*.

USA, 7 p. Disponível em:

<<http://www.uesystems.com/media/19241/lubrication%20guide.pdf>> Acesso em: 17/08/2017.

WRIGHT, J. *Electric Motor Lubrication*. Disponível em

<<http://www.machinerylubrication.com/Read/1125/electricmotorlubrication>.> Acessado em: 03/04/2017.

WRIGHT, J. *Technologies, Techniques for Acoustic/ultrasonic Regreasing*. Disponível em:

<<http://machinerylubrication.com/Read/22934/acousticultrasonicregreasing>> Acessado em: 18/04/2017.