

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Henrique Junqueira Braga
Thiago Jabour Moreira

Análise De Vibração em Bombas e Ventiladores
Visando Redução De Custos e Manutenção

Taubaté - SP
2018

**Henrique Junqueira Braga
Thiago Jabour Moreira**

**Análise De Vibração em Bombas e Ventiladores
Visando Redução De Custos e Manutenção**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Me. Lucas Giovanetti

**Taubaté – SP
2018**

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

B813a Braga, Henrique Junqueira
Análise de vibração em bombas e ventiladores visando redução de custos e manutenção / Henrique Junqueira Braga; Thiago Jabour Moreira. – 2018.
50 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2018.

Orientação: Prof. Me. Lucas Giovanetti, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Lubrificação. 2. Manutenção. 3. Preditiva. 4. Rolamento.
5. Vibração. I. Título. II. Moreira, Thiago Jabour. III. Graduação em Engenharia Mecânica.

CDD – 620.0046

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

**Henrique Junqueira Braga
Thiago Jabour Moreira**

**Análise de vibração em bombas e ventiladores visando redução de custos
e manutenção**

**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO APROVADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE GRADUADO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE
GRADUAÇÃO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



Prof. Msc. Fabio Henrique Fonseca Santejani
Coordenador de Trabalho de Graduação

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Me. Lucas Giovanetti
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ



Prof. Me. José Carlos Sávio de Souza
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

(31, outubro de 2018)

AGRACEDIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus pelo dom da vida e por ter nos proporcionado chegar até aqui. A nossa família por toda a dedicação e paciência contribuindo diretamente para que eu pudesse ter um caminho mais fácil e prazeroso durante esses anos.

Agradecemos aos professores que sempre estiveram dispostos a ajudar e contribuir para um melhor aprendizado em especial ao nosso professor e orientador. Agradecemos também a nossa instituição por ter nos dado à chance e todas as ferramentas que permitiram chegar hoje ao final desse ciclo de maneira satisfatória.

Agradecemos a oportunidade de poder apresentar este trabalho de conclusão de curso aos mestres presentes nessa banca.

EPÍGRAFE

“O insucesso é apenas uma oportunidade para
recomeçar com mais inteligência.”
(HENRY FORD)

RESUMO

Gestores de manutenção buscam aumentar a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos. O caminho para alcançar maior produtividade com custos reduzidos é a implementação da manutenção preditiva como base do departamento. Nesse sentido, utilizando o método de análise de vibração, é possível identificar diversos tipos de falhas em equipamentos rotativos. São gerados espectros de vibração que indicam o modo e o efeito da falha nos componentes mecânicos. Essas falhas podem ser eliminadas ou amenizadas sem que haja necessidade de substituição de componentes. Foram selecionados equipamentos críticos ao processo, sendo eles uma bomba e um ventilador. Dessa forma, foi aplicado o método preditivo visando a identificação exata das falhas que geravam perturbação ao funcionamento adequado dos equipamentos. Foi apontado severo desvio de lubrificação. Também foi identificado uma baixa rigidez estrutural, que gerava um desalinhamento. No problema de lubrificação foi aplicado um produto condicionador de metais, reduzindo o atrito interno e recompondo a superfície metálica danificada. No problema de baixa rigidez estrutural foi feito um projeto de travamento da estrutura próxima da base do motor, impedindo seu movimento horizontal e vertical que, gerava um desalinhamento. A aplicação do método preditivo foi prática e eficaz, nos levando a alcançar excelentes resultados de redução de custos e evitando quebras inesperadas que poderiam impactar na produção. Conclui-se que a aplicação correta da manutenção preditiva eleva o patamar do departamento de manutenção e cria equipes de alta performance, capazes de solucionar problemas empregando simples ações, que se revertem em bons resultados financeiros para a companhia.

Palavras-chave: Manutenção. Preditiva. Vibração. Rolamento. Lubrificação. Condicionador de metais. Redução de custos.

ABSTRACT

Maintenance managers seek to increase the reliability and availability of equipment. The way to achieve higher productivity at reduced costs is to implement predictive maintenance as the basis of the department. In this sense, using the vibration analysis method, it is possible to identify several types of failures in rotating equipment. Vibration spectrum are generated that indicate the mode and effect of failure on the mechanical components. These faults can be eliminated or mitigated without the need for component replacement. Equipment critical to the process was selected, being a pump and a fan. In this way, the predictive method was applied aiming at the exact identification of the faults that generated disruption to the proper functioning of the equipment. Severe drift of lubrication was reported. It was also identified a low structural rigidity, which generated a misalignment. In the lubrication problem a metal conditioning product was applied, reducing the internal friction and recomposing the damaged metal surface. In the problem of low structural rigidity a design was made to lock the structure near the base of the motor, preventing its horizontal and vertical movement, which generated a misalignment. The application of the predictive method was practical and efficient, leading us to achieve excellent results in reducing costs and avoiding unexpected breaks that could impact production. It is concluded that the correct application of the predictive maintenance raises the level of the maintenance department and creates high-performance teams capable of solving problems using simple actions that revert to good financial results for the company.

Keywords: Maintenance. Predictive. Vibration. Bearing. Lubrication. Metal Conditioner. Reduced Costs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quadro da Evolução da Manutenção	166
Figura 2 - Parâmetros de Vibração	211
Figura 3 - Carta de Severidade de Vibração	212
Figura 4 - Bomba Centrífuga	222
Figura 5 - Ventilador Radial	233
Figura 6 - Superfície de Lubrificação	244
Figura 7 - Benefícios da Manutenção Preditiva	255
Figura 8 - Componentes de um Rolamento	277
Figura 9 - Desbalanceamento de Massa	288
Figura 10 - Desbalanceamento Acoplado	2828
Figura 11 - Desbalanceamento de Rotor	288
Figura 12 - Problemas de Arqueamento	299
Figura 13 - Desalinhamento Angular	299
Figura 14 - Desalinhamento Paralelo	299
Figura 15 - Folga Mecânica Tipo A	30
Figura 16 - Folga Mecânica Tipo B	30
Figura 17 - Folga Mecânica Tipo C	311
Figura 18 - Correias Desequilibradas	311
Figura 19 - Desalinhamento das Polias	322
Figura 20 - Polias Excêntricas	322
Figura 21 - Ressonância da Correia	322
Figura 22 - Cronograma de Acompanhamento	333
Figura 23 - Pontos de Medição na Máquina	344
Figura 24 - Bomba Centrífuga Analisada	366
Figura 25 - Tolerâncias de Desalinhamento	377
Figura 26 - Fixação da Bomba Centrífuga	377
Figura 27 - Oxidação da Graxa no Rolamento	388
Figura 28 - Gráfico da Temperatura nos Rolamentos	399
Figura 29 - Resumo da Ação Tomada na Bomba	411
Figura 30 - Espectro da Velocidade Antes na Bomba Centrífuga	411
Figura 31 - Espectro da Velocidade Após na Bomba Centrífuga	422
Figura 32 - Resumo da Ação Tomada no Ventilador	433
Figura 33 - Espectro da Velocidade Antes no Ventilador Radial	433
Figura 34 - Espectro da Aceleração Após no Ventilador Radial	444
Figura 35 - Cascata de Espectro do Ventilador	444

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cronograma de Acompanhamento	45
Tabela 2 - Custos de Reparo para Ventilador Radial	466
Tabela 3 - Custos de Monitoramento Preditivo	477
Tabela 4 - Custos de Manutenção Emergencial.....	477

LISTA DE SIGLAS

RMS - *Root mean square*

BPFI - Frequência de defeito na pista interna

BPFO - Frequência de defeito na pista externa

FTF - Frequência de defeito na gaiola

BSF - Frequência de defeito nos elementos girantes

FFT - Transformada rápida de Fourier

CG - Centro de gravidade do Rotor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivos Gerais	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
1.1.2.1	Bomba Centrífuga.....	14
1.1.2.2	Ventilador Radial.....	15
1.2	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	15
1.3	RELEVÂNCIA DO ESTUDO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	HISTÓRIA DA MANUTENÇÃO	16
2.1.1	Primeira Geração	17
2.1.2	Segunda Geração	17
2.1.3	Terceira Geração.....	17
2.1.4	Quarta Geração	18
2.2	CLASSIFICAÇÃO DA MANUTENÇÃO.....	18
2.2.1	Manutenção Corretiva	19
2.2.2	Manutenção Preventiva	19
2.2.3	Manutenção Preditiva.....	19
2.3	TÉCNICA PREDITIVA - ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	20
2.3.1	Parâmetros de Vibração.....	20
2.3.2	Norma 10861-1.....	21
2.4	BOMBA CENTRÍFUGA	21
2.5	VENTILADOR RADIAL	22
2.6	LUBRIFICAÇÃO.....	23
2.7	CONDICIONADOR DE METAIS (Alfa-X)	24
2.8	REDUÇÃO DE CUSTOS	25
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	26
3.2	ANÁLISE ESPECTRAL.....	27
3.3	ESPECTRO TÍPICO POR DEFEITO	27
3.3.1	Desbalanceamento de Massa	27
3.3.2	Eixo Arqueado.....	29
3.3.3	Desalinhamento	29
3.3.4	Folga Mecânica.....	30
3.3.5	Correias.....	31
3.4	DEFINIÇÃO PERIODICIDADE DE MONITORAMENTO.....	33
4	DESENVOLVIMENTO.....	34
4.1	MÉTODO APLICADO.....	34
4.2	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS	35
4.3	PROCEDIMENTO DE ANÁLISE	35
4.3.1	Caso 1: Bomba Centrífuga	35
4.3.2	Caso 2: Ventilador Radial.....	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1	APLICAÇÃO DA TÉCNICA	40
5.2	DESALINHAMENTO ENTRE EIXOS DA BOMBA	40
5.3	FALHA DE LUBRIFICAÇÃO NOS ROLAMENTOS DO VENTILADOR	42
5.4	PERDAS EVITADAS	45
5.5	CUSTO DE MONITORAMENTO PREDITIVO.....	46

6	CONCLUSÃO.....	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, os gestores de manutenção buscam aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos. Lançando mão dessas medidas, ocorre o aumento da produção com redução de custos. Estudos comprovam que o caminho para alcançar maior produtividade com custos reduzidos é a implementação da manutenção preditiva como base do departamento. Esta medida consegue apontar a falha em um componente logo em seu estágio inicial e, neste momento, é possível realizar ações a fim de reduzir os impactos negativos sobre este, suprimindo a necessidade de sua substituição. Entretanto, é necessário ter cautela ao empregar essa técnica de substituição, pois ela pode gerar custos elevados caso a implementação não seja executada de maneira adequada.

Utilizando o método de análise de vibração, é possível identificar diversos tipos de falhas em equipamentos rotativos tais como: bombas centrífugas e ventiladores radiais. Após a coleta de dados com o instrumento adequado e o posterior descarregamento no programa específico, são gerados espectros de vibração, que permitem associar as características predominantes encontradas aos defeitos vigentes, tais como desalinhamento, excentricidade, folga mecânica, baixa rigidez estrutural, frequência de engrenamento, falha de lubrificação, defeitos em rolamentos, entre outros. Todas estas falhas podem ser eliminadas e/ou amenizadas sem que haja necessidade de substituição de componentes.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

Implementar a manutenção preditiva baseada em condições reais do equipamento visando aumento da disponibilidade, eficiência energética e confiabilidade da máquina. Reduzindo os custos de manutenção e aumentando a produtividade.

1.1.2 Objetivos Específicos

1.1.2.1 Bomba Centrífuga

a) Explorar ao máximo a vida útil dos componentes através do monitoramento do estado vibratório deste.

b) Gerar parâmetros de comparação entre as normas preestabelecidas ou definidas pelo fabricante e as condições do regime de funcionamento.

c) Permitir a programação das intervenções, tendo como base indicadores do próprio equipamento monitorando-o periodicamente.

1.1.2.2 Ventilador Radial

a) Recuperar condições satisfatórias de trabalho de um rolamento cilíndrico auto compensador de rolos, o qual sofreu danos na pista externa devido a lubrificação ineficiente.

b) Empregar um condicionador de metais para recompor as avarias que causam vibração excessiva do conjunto e assim eliminar possível falta de refrigeração nas paredes de um forno de fundição de vidro e danos estruturais no mesmo.

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Este estudo de caso foi desenvolvido em uma empresa da cidade de Guaratinguetá - SP. A empresa fabrica vidros planos no Brasil há 5 anos, voltados para construção civil e indústria automobilística.

Após análises dos indicadores de manutenção foi constatada a necessidade da implementação da manutenção preditiva (análise de vibração) devido à grande incidência de troca de rolamentos condenados antes de explorar sua vida útil.

1.3 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

O tema abordado neste trabalho tem o objetivo de mostrar a importância da utilização da técnica de análise de vibração a fim de melhorar o desempenho dos equipamentos, aumentar a vida útil dos componentes presentes em equipamentos rotativos e reduzir os custos de manutenção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRIA DA MANUTENÇÃO

Segundo Kardec e Nascif (2009) o departamento de manutenção tem atravessado várias mudanças nas últimas três décadas. O rápido aumento do número de instalações, projetos requintados, aparecimento de novas técnicas, novos sentidos sobre a organização da manutenção e destaque da manutenção como parte estratégica para melhoria dos resultados, são as causas para estas mudanças. A evolução da manutenção pode ser dividida em quatro gerações distintas, conforme Figura 1.

Figura 1 - Quadro da Evolução da Manutenção

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO								
	Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração				
ANO	1940 1950		1960 1970		1980 1990		2000 2010	
Aumento das expectativas em relação à Manutenção	- Conserto após a falha	- Disponibilidade crescente - Maior vida útil do equipamento	- Maior confiabilidade - Maior disponibilidade - Melhor relação custo-benefício - Preservação do meio ambiente	- Maior confiabilidade - Maior disponibilidade - Preservação do meio ambiente - Segurança - Influir nos resultados do negócio - Gerenciar os ativos				
Visão quanto à falha do equipamento	- Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham	- Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira	- Existência de 6 padrões de falhas (Nowlan & Heap e Moubray)	- Reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões A e F. (Nowlan & Heap e Moubray)				
Mudança nas técnicas de Manutenção	- Habilidades voltadas para o reparo	- Planejamento manual da manutenção - Computadores grandes e lentos - Manutenção Preventiva (por tempo)	- Monitoramento da condição - Manutenção Preditiva - Análise de riscos - Computadores pequenos e rápidos - Softwares potentes - Grupos de trabalho multidisciplinares - Projetos voltados para a confiabilidade - Contratação por mão de obra e serviços	- Aumento da Manutenção Preditiva e Monitoramento da Condição - Minimização das Manutenções Preventiva e Corretiva não Planejada - Análise de Falhas - Técnicas de Confiabilidade - Manutenibilidade - Engenharia de Manutenção - Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e Custo do Ciclo de Vida - Contratação por resultados				

Fonte: Kardec; Nascif (2009).

2.1.1 Primeira Geração

Segundo Kardec e Nascif (2009) a primeira geração da manutenção, teve início antes da Segunda Grande Guerra, estendendo-se até o início da década de 50. Onde surgiu a necessidade de mecanizar as atividades industriais. A preocupação com o desempenho dos equipamentos e a produtividade praticamente não existiam, os projetos eram superdimensionados evitando a incidência de diversas falhas. Onde ações simples de limpeza e lubrificação eram suficientes para manter a integridade das máquinas. Assim seu funcionamento não era prejudicado. Quando uma falha ocorria, a mesma era sanada e assim a produção era retomada. Tinham que as falhas faziam parte do processo, já que todos os componentes se desgastam com o passar dos anos, e as falhas ou quebras eram sua consequência.

Segundo Siqueira (2009), a primeira geração foi predominantemente baseada na manutenção corretiva não programada.

2.1.2 Segunda Geração

Segundo Siqueira (2009) a segunda geração se deu entre a década de 50 e 70, depois da Segunda Grande Guerra. Neste período tornou-se necessário o início da produção com linhas contínuas, em alta proporção devido ao aumento do mercado consumidor. Nesta fase, ocorreu a escassez de mão de obra qualificada para manter essa indústria, pois a necessidade de aumentar a disponibilidade das máquinas, a qualidade dos produtos e a redução de custos provocou estudos sobre novas técnicas de manutenção. Surgindo o conceito da manutenção preventiva, acrescentando as atividades mais simples de limpeza e lubrificação. Logo após aparece as técnicas preditivas.

2.1.3 Terceira Geração

Segundo Siqueira (2009) a partir da década de 70 a indústria inicia uma melhora em seus processos. Maior tecnologia é utilizada na fabricação dos equipamentos a fim de operar no limite de sua capacidade, e em alguns casos, ocorrem melhorias para render além da possibilidade do projeto, solicitando maiores cuidados de manutenção e operação para sua sequência operacional. Também surgem alguns fatores como: concorrência, redução de custos, solicitações do cliente relacionados à qualidade e desempenho dos produtos e serviços prestados.

Segundo Kardec e Nascif (2007) para perdurar a esta nova realidade, a manutenção deixa de ter a função apenas de substituir componentes ou peças desgastadas antes do rompimento destes. A manutenção é inserida como parte do processo produtivo, exercendo novas funções e trabalhando estrategicamente dentro da organização.

Conforme ABNT NBR 5462/1994 neste período aparecem vários conceitos de gestão de manutenção, procurando manter o desempenho do sistema produtivo. O resultado alcançado com a manutenção passar a ser avaliado pela confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos que fazem parte do processo produtivo, dos impactos que causados pelas falhas e dos custos de manutenção. Desta forma, a manutenção tem como objetivo manter a integridade do equipamento ou do sistema produtivo, onde o grande conhecimento do profissional é exigido.

2.1.4 Quarta Geração

Segundo Kardec e Nascif (2009) a quarta geração da manutenção é constituída com algumas expectativas da terceira geração. A disponibilidade é um dos parâmetros mais importantes da manutenção, senão a mais importante. Temos ainda a confiabilidade e a manutenibilidade como maiores razões de sua existência. O objetivo da manutenção é diminuir as falhas prematuras de componentes ou falhas de mortalidade infantil. Para melhorar a performance dos componentes de um determinado equipamento e aumentar os bons resultados de uma empresa, utiliza-se a metodologia da análise de falhas.

Conforme Kardec e Nascif (2009) a maiores práticas de manutenção preditiva e monitoramento baseado em condições dos equipamentos, acarretam em uma menor quantidade de intervenções de manutenções preventivas, corretivas planejadas e não planejadas. A maior incidência dessas manutenções indesejadas impactam negativamente nos indicadores de manutenção, e conseqüentemente nos resultados da organização.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DA MANUTENÇÃO

Os principais métodos de manutenção são a corretiva (não programada e programada), preventiva (baseada em horas), preditiva (baseada na condição).

2.2.1 Manutenção Corretiva

Segundo Otani e Machado (2008) a manutenção corretiva foi o primeiro conceito utilizado, que tinha como objetivo apenas reestabelecer seu funcionamento após a quebra do equipamento.

Segundo Otani e Machado (2008) a manutenção corretiva não programada implica em elevados custos e baixa performance de produção. Ela é sempre realizada após a pane ocorrer sem qualquer tipo de planejamento.

Conforme Otani e Machado (2008) a manutenção corretiva programada geralmente parte por uma decisão da gerência que assume o risco de operar até que a falha ocorra. Dessa forma o trabalho tende a ficar mais barato, mais rápido e seguro.

2.2.2 Manutenção Preventiva

De acordo com a norma ABNT NBR 5462/1994 a manutenção preventiva é executada em intervalos determinados pelo fabricante ou por experiência do manutentor. Ela tende a reduzir a ocorrência de falhas ou desgaste de um componente.

2.2.3 Manutenção Preditiva

Conforme a ABNT NBR 5462/1994, a manutenção preditiva é realizada tomando-se como base as condições de operação do equipamento, reduzindo a substituição de peças preventivamente e a quebra inesperada de alguma parte mecânica.

Segundo Kardec e Nascif (2009) a manutenção preditiva embasa-se em um monitoramento de parâmetros operacionais do equipamento, onde o avanço destes indicam possíveis desvios, desgastes, perda de rendimentos entre outros.

Segundo Filho (2006), o monitoramento auxilia na previsão de uma falha nociva ao processo produtivo, às pessoas ou ao meio ambiente. Este tipo de manutenção pondera que um componente pode ter performance diferente dependendo do equipamento e condições de trabalho a que está submetido. Comumente são monitorados os parâmetros de vibração, temperatura, condições de lubrificação e parâmetros elétricos.

2.3 TÉCNICA PREDITIVA - ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Conforme CT Vibrações (2018), com análise de vibração se consegue descobrir falhas em componentes rotativos de uma máquina, através da taxa de variação das forças dinâmicas geradas. Estas estão relacionadas com o nível de vibração e são medidas sem a necessidade de desligamento da máquina.

2.3.1 Parâmetros de Vibração

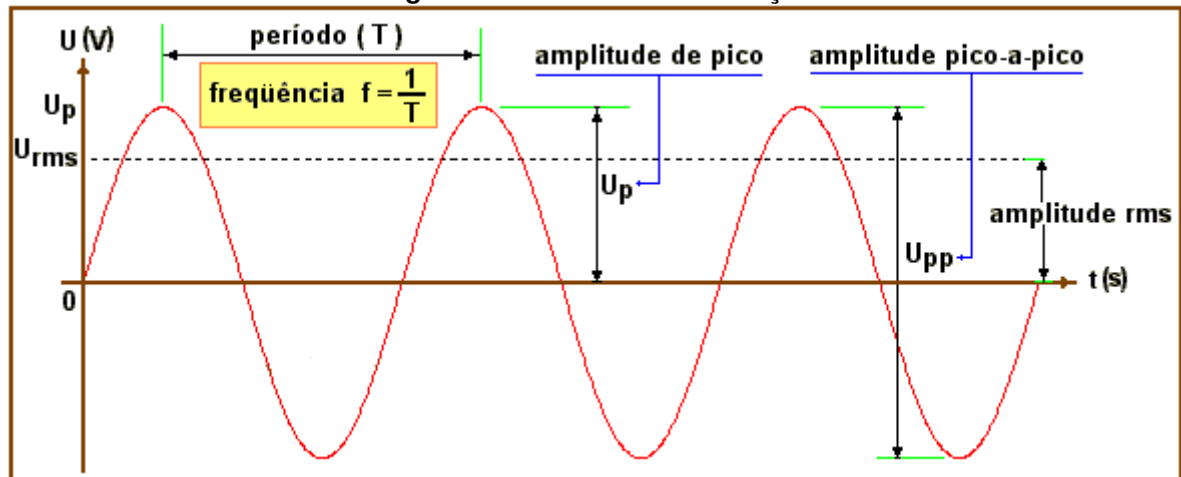
Segundo Kardec e Nascif (2009) a vibração faz parte de qualquer sistema quando este é excitado. Os parâmetros medidos são expressos em termos de deslocamento, velocidade, aceleração e envelope, que caracterizam “o quanto” a máquina vibra de acordo com as frequências características dos seus componentes. Como cada componente possui frequência própria de vibração, esta pode ser facilmente destacada e identificada, revelando a origem do defeito.

Medindo em velocidade, se detecta falhas como desbalanceamento, desalinhamento, folgas, rolamentos em fase 3. Aceleração se detecta falhas de engrenamento e cavitação. Deslocamento se detecta falhas em baixa rotação, abaixo de 600 RPM. Envelope realça os defeitos provocados por choques, como: rolamento, engrenamento, folgas, etc.

Segundo Fabiano (2013) o nível de vibração em função do tempo em um espectro, pode ser medido em valores de pico a pico, pico e RMS.

Conforme Fabiano (2013) o valor pico a pico mostra o curso máximo da onda, e se torna útil quando o descolamento é crítico para a tensão máxima ou a folga mecânica é limitante. Indica o defeito no seu estágio inicial ou avançado. O valor pico indica choques de breve duração, mas indica somente a ocorrência do pico, sem considerar o histórico no tempo da onda. O valor RMS é a mais utilizada e importante, pois leva em consideração o histórico da onda no tempo e aponta um valor referente à energia contida no sinal, portanto, à capacidade destrutiva causada pela vibração. Conforme a Figura 2, fica exemplificado os parâmetros de vibração.

Figura 2 - Parâmetros de Vibração



Fonte: Gatec Gestão Agroindustrial (2017)

2.3.2 Norma 10861-1

Segundo a norma ISO STANDARD 10861-1 se adota alarmes com a seguinte carta de severidade de vibrações, conforme Figura 3.

Figura 3 - Carta de Severidade de Vibração

CARTA DE SEVERIDADE VIBRAÇÕES - ISO STANDARD 10861-1				
Severidade de Velocidade	Classe de Máquinas e Limites de Faixa de Velocidade			
mm/s RMS	Pequenas Máquinas	Máquinas Médias	Suportação Rígida	Suportação Rígida
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0,36	BOM	BOM	BOM	BOM
0,54	BOM	BOM	BOM	BOM
0,72	SASTIFATÓRIO	BOM	BOM	BOM
1,08	SASTIFATÓRIO	SASTIFATÓRIO	BOM	BOM
1,80	ALERTA	SASTIFATÓRIO	SASTIFATÓRIO	BOM
2,87	ALERTA	ALERTA	SASTIFATÓRIO	SASTIFATÓRIO
4,50	ALERTA	ALERTA	ALERTA	SASTIFATÓRIO
7,18	ALERTA	ALERTA	ALERTA	ALERTA
11,14	ALERTA	ALERTA	ALERTA	ALERTA
17,96	PERIGO	PERIGO	PERIGO	PERIGO
28,00	PERIGO	PERIGO	PERIGO	PERIGO
44,90	PERIGO	PERIGO	PERIGO	PERIGO
70,94	PERIGO	PERIGO	PERIGO	PERIGO

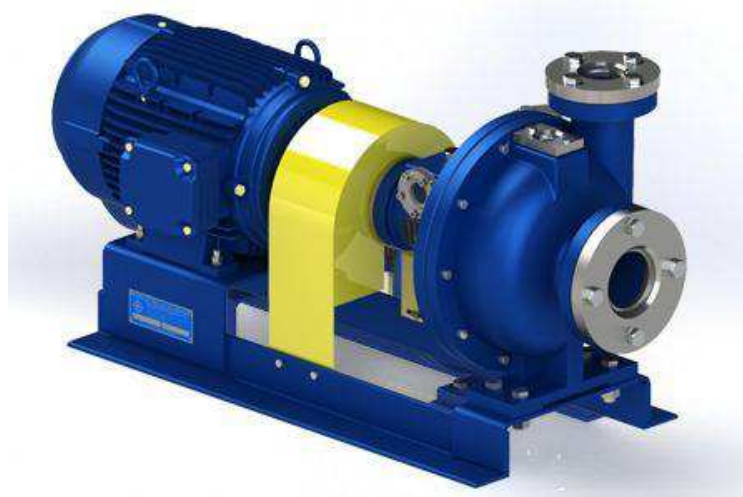
Fonte: ISO STANDARD 10861-1 (1995)

2.4 BOMBA CENTRÍFUGA

Segundo Brasil (2013), as bombas são máquinas responsáveis pela realização do deslocamento de um fluido por escoamento. Elas geram energia de pressão e cinética ao fluido, através do trabalho mecânico recebido para seu

funcionamento. Nas bombas centrífugas o escoamento do fluido ocorre pela ação de forças que se desenvolvem na massa do mesmo, em decorrência da rotação de um eixo no qual é ligado a um rotor, o qual recebe o fluido pelo seu centro e o expulsa pela periferia, pela ação da força centrífuga. Conforme a Figura 4, vemos uma bomba centrífuga.

Figura 4 - Bomba Centrífuga



Fonte: Frigostella do Brasil (2017)

2.5 VENTILADOR RADIAL

Segundo Brasil (2013) ventiladores são maquinários que geram fluxos de ar ou de outros gases, com escoamentos relativamente altos e pressões baixas. São classificados como turbo máquinas geratrizes que se designam a gerar deslocamento de fluidos gasosos. Desta forma transformam energia ao gás. Nas máquinas de fluxo radiais as partículas de fluido transitam em rotas num plano transversal ao eixo do equipamento de forma que a componente de velocidade absoluta meridiana do fluido está na direção radial. Na indústria são empregados em siderúrgicas nos altos-fornos, em transporte pneumático, etc. Como exemplo de ventilador radial, temos a Figura 5.

Figura 5 - Ventilador Radial

Fonte: Soluções Industriais (2016)

2.6 LUBRIFICAÇÃO

Segundo Runge (1989) A principal função de um lubrificante é a de impedir o contato de metal com metal.

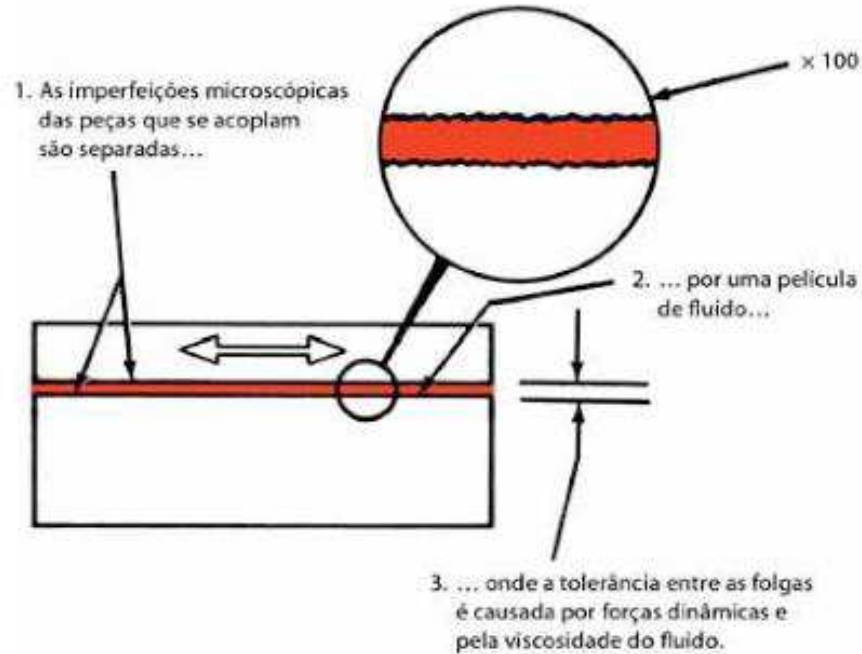
Segundo Kardec e Nascif (2013) o emprego do óleo de boa qualidade é um pré-requisito para se alcançar uma longa vida útil de funcionamento regular dos mancais dos equipamentos rotativos. O óleo não deve conter substâncias estranhas (contaminação) como ácidos, resinas, água, partículas metálicas, etc.

Segundo Moreira (2012) o óleo lubrificante se encontra em contato com partes metálicas dos equipamentos, ficando sujeito a impregnação de partículas desprendidas de elementos móveis. Quando isso ocorre, os elementos da máquina em movimento sofrem degradação excessiva, deixando alojadas ou em suspensão as partículas, o que torna a lubrificação precária.

Segundo Moreira (2012) os elementos móveis dos componentes mecânicos trabalham separados por uma faixa de óleo, chamada de película de lubrificação. Caso esse óleo possuir uma viscosidade adequada, as irregularidades das superfícies das peças não ficam em contato direto, assim evitando o atrito e o consecutivo desgaste. Entretanto, em alguns casos, com o aumento da velocidade e da pressão, a membrana lubrificante torna-se pequena, dando origem a condição limite de lubrificação. Nessas ocorrências, poderá haver o contato direto entre as

imperfeições das superfícies das partes metálicas, ocasionando atrito e desgastes indesejados, de acordo com a Figura 6.

Figura 6 - Superfície de Lubrificação



Fonte: Moreira (2012)

Considerando esse caso de deficiência na lubrificação de acordo com a condição de uso (velocidade e pressão), encontra-se uma grande probabilidade de desgaste e quebra dos componentes mecânicos.

2.7 CONDICIONADOR DE METAIS (Alfa-X)

Segundo Saito Tecnologia (2018), Alfa-X é um condicionador de metais, que sob a ação da pressão e temperatura tem a característica de migrar para uma superfície metálica onde existe uma necessidade de proteção extra. Sua composição moderna utiliza componentes de alto desempenho e nanotecnologia, regularmente utilizado para formulação de lubrificantes, conjugados de forma sinérgica, sucedendo em um produto altamente eficiente na redução de atrito. A nanotecnologia garante um ótimo acabamento superficial, fazendo com que a camada protetora adicional criada seja indefinidamente duradoura.

Segundo Saito Tecnologia (2018), o condicionador de metal é usado em baixas proporções, não alterando as folgas originais do componente mecânico, não

altera as propriedades químicas dos lubrificantes e pode ser utilizado preventivamente ou corretivamente.

2.8 REDUÇÃO DE CUSTOS

Os custos de manutenção representam a parte primordial dos custos operacionais totais de todas as indústrias. De acordo com a pesquisa realizada pela organização *Plant Performance Group (2018)* em indústrias, os custos de manutenção podem corresponder entre 15% a 30% do custo dos bens produzidos.

Uma pesquisa realizada com 500 fábricas, as quais foram incluídas em um programa de manutenção preditiva, mostra o quanto é eficiente a redução de custos caso esta seja implementada e utilizada de maneira adequada. Países do grupo de amostra: Estados Unidos, Canadá, Grã-Bretanha, França, e Austrália conforme Figura 7.

Figura 7 - Benefícios da Manutenção Preditiva

Benefícios Manutenção Preditiva	Percentual
Redução dos custos de manutenção	50 a 80%
Redução de falhas nas máquinas	50 a 60%
Redução de estoque de sobressalentes	20 a 30%
Redução de horas extras para manutenção	20 a 50%
Redução do tempo de parada de máquinas	50 a 80%
Aumento na vida das máquinas	20 a 40%
Aumento da produtividade	20 a 30%
Aumento dos lucros	25 a 60%

Fonte: *Plant Performance Group (2018)*

3 METODOLOGIA

3.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

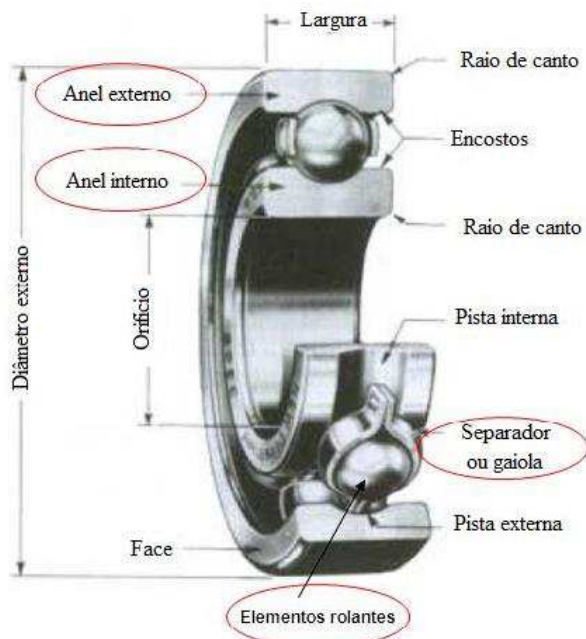
A técnica preditiva por análise de vibração é amplamente utilizada para se revelar problemas ocasionados em equipamentos rotativos. Em todas as máquinas existe uma vibração, porém dependendo do nível e amplitude dessa vibração, os rolamentos, mancais, eixos, polias, correias e engrenagens podem sofrer danos irreversíveis que remetem a sua substituição imediata. Conforme as diretrizes atuais e constante busca pela redução de custos e aumento da performance dos equipamentos, a implementação da técnica preditiva de análise de vibração é de suma importância para que os resultados esperados sejam alcançados.

Utilizando-se de acelerômetros em pontos pré-definidos da máquina, captam-se frequências de vibração provenientes de todos os componentes e estrutura do equipamento. Após a análise feita através de um *software*, o mesmo nos apontará uma variedade de falhas e dentre as mais comuns podemos citar:

- a) Desbalanceamento;
- b) Desalinhamento;
- c) Defeitos em mancais de rolamentos;
- d) Defeitos em rolamentos;
- e) Defeitos em sistemas de engrenamento;
- f) Defeitos em motores elétricos;
- g) Defeito de rotor excêntrico;
- h) Defeito de ressonância;
- i) Defeito de folga mecânica, entre outros.

Em um rolamento pode ser identificado qual o componente deste que está com indicações de defeito. Analisando o rpm e as dimensões do mesmo, sabemos qual a frequência típica de defeito na pista interna (BPFI), na pista externa (BPFO), na gaiola (FTF) ou nos elementos girantes (BSF).

Figura 8 - Componentes de um Rolamento



Fonte: Offset3blog (2018)

3.2 ANÁLISE ESPECTRAL

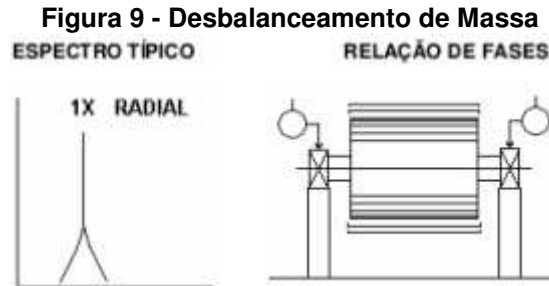
Os sinais de frequência de vibração são coletados no domínio do tempo e o *software* converte esses sinais através da FFT, onde são gerados os espectros que contém as frequências que serão analisadas conforme um padrão já determinado por estudiosos da área.

É importante saber que a amplitude do sinal determina a severidade do defeito, o problema vai se agravando conforme a amplitude aumenta. A frequência característica no espectro determina qual componente está causando o distúrbio.

3.3 ESPECTRO TÍPICO POR DEFEITO

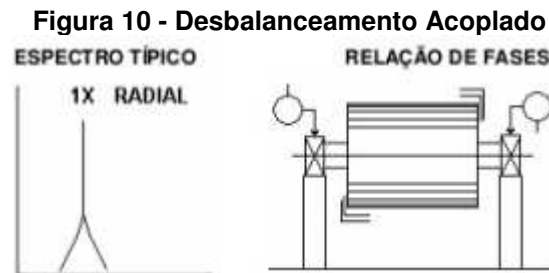
3.3.1 Desbalanceamento de Massa

Temos três tipos de Desbalanceamento de Massa descritos nas Figuras 9, 10 e 11.



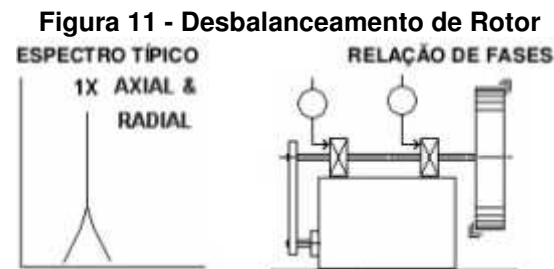
Fonte: SKF Reliability Systems(2004)

O Desbalanceamento de Forças estará em fase e será permanente. A amplitude devida ao desbalanceamento crescerá com o quadrado da velocidade (3X de aumento da velocidade = 9X de aumento na vibração). 1X RPM sempre está presente e normalmente domina o espectro. Pode ser corrigida pela colocação, simplesmente, de um peso de balanceamento em um plano no centro de gravidade do Rotor (CG) (SÁ, 2000, p.17).



Fonte: SKF Reliability Systems(2004)

O Desbalanceamento Acoplado tende a ficar 180° fora de fase no mesmo eixo. 1X está sempre presente e normalmente domina o espectro. A amplitude varia como quadrado do crescimento da velocidade. Pode provocar vibrações axiais e radiais elevadas. A correção exige a colocação de pesos de balanceamento em pelo menos 2 planos. Observe que pode existir aproximadamente 180° de diferença de fase entre as horizontais OB e IB, bem como entre as verticais OB e IB (SÁ, 2000, p.17).



Fonte: SKF Reliability Systems(2004)

O Desbalanceamento do Rotor em Balanço causa elevado 1X RPM tanto na direção axial como na direção radial. Leituras axiais tendem a estar em fase, enquanto leituras de fase radiais podem ser instáveis. Rotores em balanço comumente têm desbalanceamento de força e de acoplamento, cada um dos quais exigirá igualmente que se faça a correção (SÁ, 2000, p.17).

3.3.2 Eixo Arqueado

Vemos na Figura 12 o problema de arqueamento do eixo.



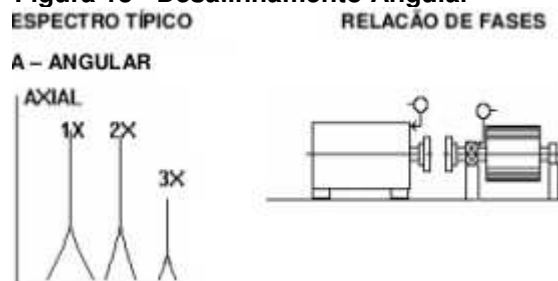
Fonte: SKF *Reliability Systems*(2004)

Problemas de Arqueamento do eixo causam alta vibração axial com as diferenças de fase axial tendendo para 180° no mesmo componente da máquina. A vibração dominante é normalmente de 1X se a curvatura for próxima ao centro do eixo, mas será de 2X se a curvatura estiver próxima ao acoplamento (Ao fazer as medições seja cuidadoso com a orientação do transdutor, invertendo a direção do transdutor para cada medição axial) (SÁ, 2000, p.19).

3.3.3 Desalinhamento

Com as Figuras 13 e 14 exemplificamos os tipos de desalinhamento.

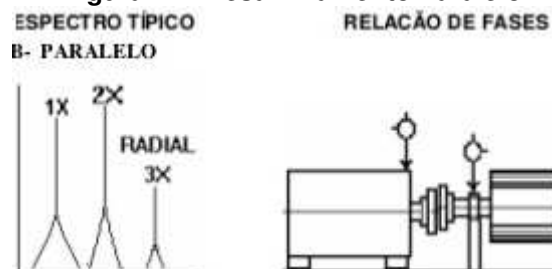
Figura 13 - Desalinhamento Angular



Fonte: SKF *Reliability Systems*(2004)

O Desalinhamento Angular é caracterizado pela alta vibração axial, 180° fora de fase através do acoplamento. Caracteristicamente haverá alta vibração axial tanto com 1X quanto com 2X RPM. Entretanto não é incomum que 1X, 2X ou 3X sejam dominantes. Estes sintomas podem indicar também problemas de acoplamento (SÁ, 2000, p.19).

Figura 14 - Desalinhamento Paralelo



Fonte: SKF *Reliability Systems*(2004)

Desalinhamento Paralelo tem sintomas similares ao Angular, mas apresenta vibração radial alta que se aproxima de 180° fora de fase através do acoplamento. $2X$ é muitas vezes maior que $1X$, mas sua altura relativa para $1X$ é habitualmente ditada pelo tipo e construção do acoplamento. Quando o Desalinhamento Angular ou Radial se torna severo, pode gerar picos de alta amplitude em harmônicos muito mais altos ($4X-8X$) ou mesmo toda uma série de harmônicos de alta frequência similar na aparência à folga mecânica. A construção do acoplamento influenciará muitas vezes a forma do espectro quando o Desalinhamento é severo (SÁ, 2000, p.19).

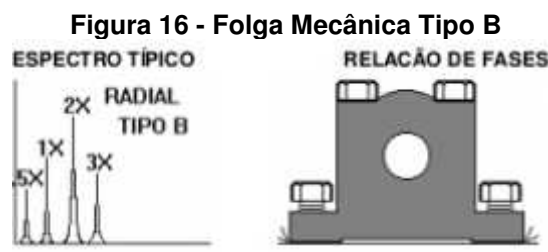
3.3.4 Folga Mecânica

Vemos nas Figuras 15, 16 e 17 distúrbios causados pela folga mecânica.



Fonte: SKF Reliability Systems(2004)

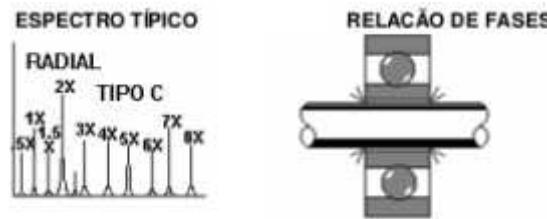
A folga Mecânica é indicada pelos espectros dos tipos A, B e C. O Tipo A é causado por folga/fragilidade Estrutural nos pés, base ou fundação da máquina; também pela deterioração do apoio ao solo, folga de parafusos que sustentam a base; e distorção da armação ou base (ex.: Pé frouxo). A análise de fase revelará aproximadamente 180° de diferença de fases entre medições verticais no pé da máquina, local onde está a base e a própria base (SÁ, 2000, p.20).



Fonte: SKF Reliability Systems(2004)

“O tipo B é geralmente causado por parafusos soltos no apoio da base, trincas na estrutura do *skid* ou no pedestal do mancal.” (SÁ, 2000, p.20).

Figura 17 - Folga Mecânica Tipo C



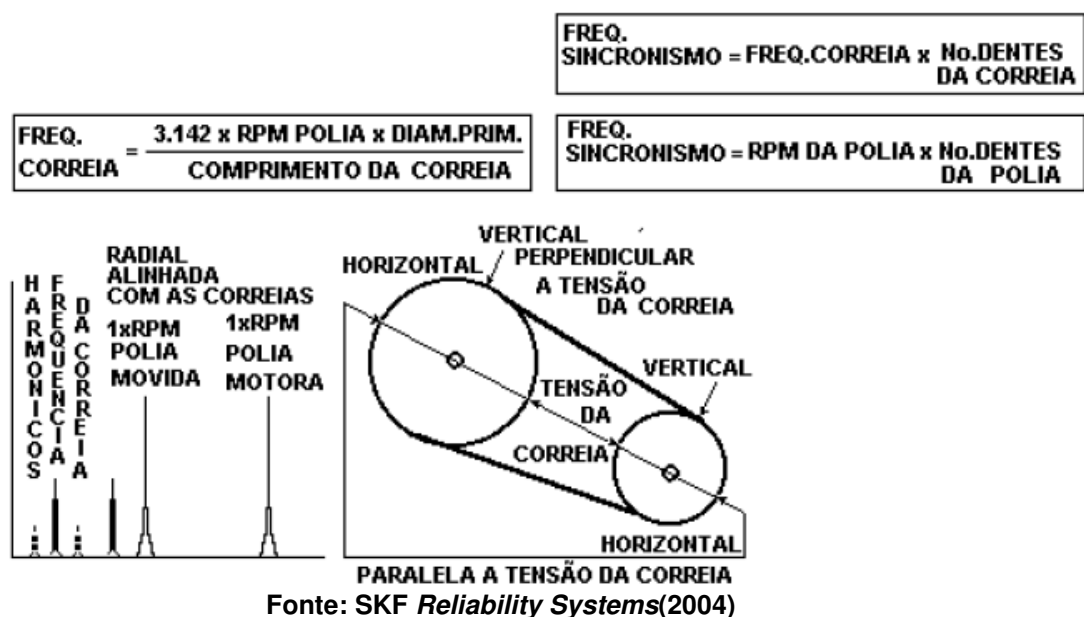
Fonte: SKF Reliability Systems(2004)

O tipo C é normalmente provocado por ajuste impróprio entre partes componentes para forças dinâmicas do rotor. Causa o truncamento da forma de onda no tempo. O tipo C é muitas vezes provocado por uma folga linear do mancal em sua tampa, folga excessiva em uma bucha ou de elemento rotativo de um mancal de rolamento ou um rotor solto com folga em relação ao eixo. A fase tipo CX é muitas vezes instável e pode variar amplamente de uma medição para a seguinte, particularmente se o rotor muda de posição no eixo à cada partida. A folga Mecânica é, geralmente, altamente direcional e pode causar leituras bem diferentes se comparamos incrementos de 30° de nível na direção radial em todo o caminho e torno de uma caixa de mancal. Observe também que a folga causará muitas vezes múltiplos de sub-harmônicos a exatamente 1/2 ou 1/3 RPM (.5X, 1.5X, 2.5X, etc.) (SÁ, 2000, p.20).

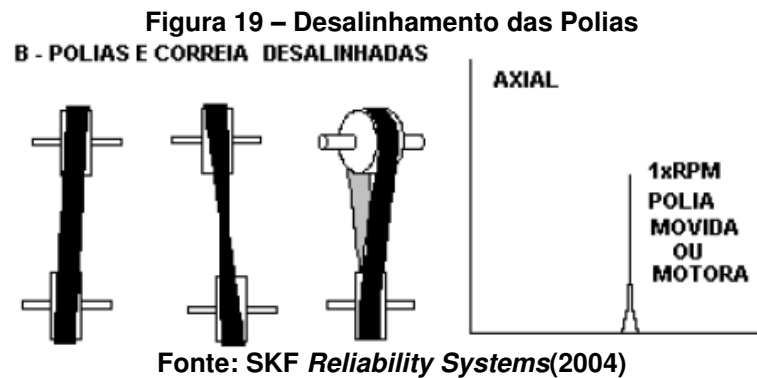
3.3.5 Correias

Existem quatro tipos de problemas causados pelas correias, como vemos nas Figuras 18, 19, 20 e 21.

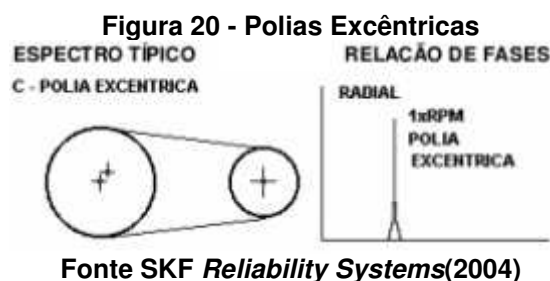
Figura 18 – Correias Desequilibradas
A- CORREIAS DESEQUILBRADAS , FROUXAS OU SOLTAS



Frequências de correias estão abaixo tanto da RPM do motor como da RPM do equipamento acionado. Quando elas estão gastas, frouxas ou desiguais, elas causam normalmente frequências múltiplas, de 3 a 4, da frequência da Correia. Muitas vezes à 2X a frequência da Correia é o pico dominante. Amplitudes são normalmente instáveis, algumas vezes pulsando com a RPM do equipamento acionador ou do acionado. Em equipamentos com correias dentadas, o desgaste ou o desalinhamento da polia é indicada por altas amplitudes na frequência da Correia Dentada (SÁ, 2000, p.21).

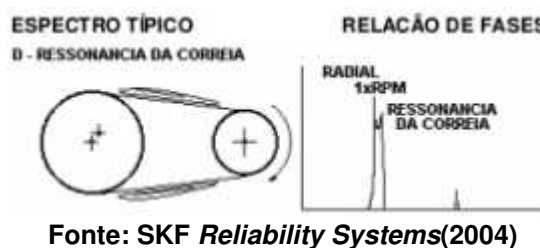


O Desalinhamento das polias produz alta vibração em 1X RPM, predominantemente na direção axial. A relação de amplitudes da RPM do acionador para a do acionado depende do local de obtenção dos dados, bem como da massa relativa e da rigidez da armação. Muitas vezes, com o Desalinhamento dos eixos, a vibração axial mais alta no motor ocorrerá a RPM do acionado (ex.: ventilador) (SÁ, 2000, p.21)



Polias excêntricas ou desbalanceadas ocasionam alta vibração em 1X RPM da polia. A amplitude é normalmente mais elevada quando em linha com as correias, e poderá ser identificada nos mancais do acionador e do acionado. Algumas vezes é possível balancear polias excêntricas prendendo arruelas aos parafusos de fixação. Entretanto, mesmo balanceada, a excentricidade induzirá à vibração e às tensões de fadiga reversíveis na correia (SÁ, 2000, p.21).

Figura 21 - Ressonância da Correia

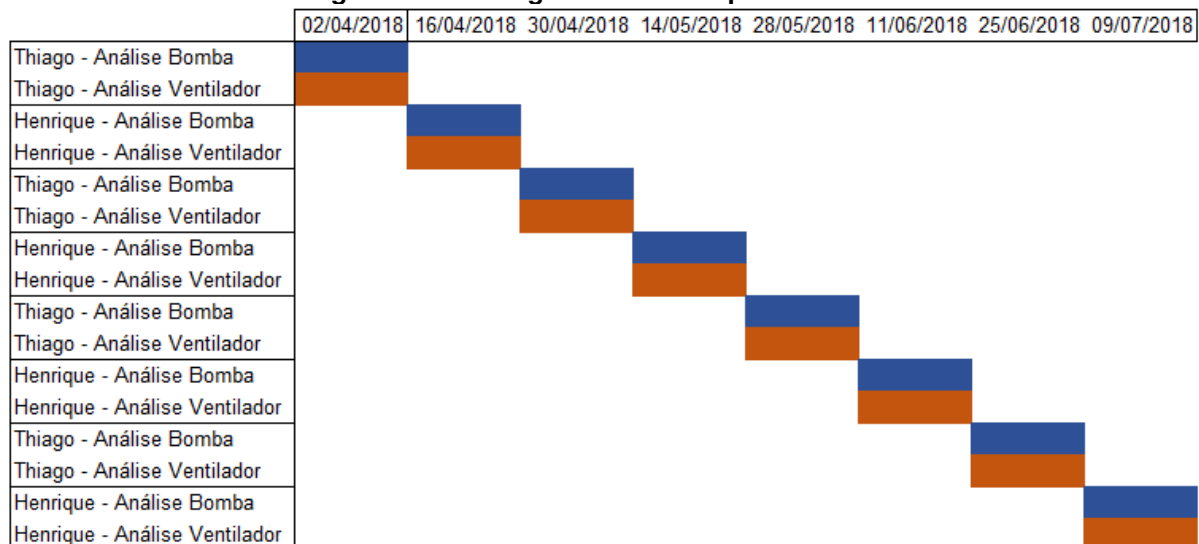


A Ressonância da Correia pode provocar amplitudes elevadas, se ocorrer que a Frequência Natural da Correia se aproxima ou coincide com a RPM do acionador ou da polia acionada. A Frequência Natural da Correia pode ser alterada tanto pela mudança da Tensão da Correia como do seu Comprimento. Ela pode ser detectada tencionando e depois reduzindo a tensão da correia enquanto se mede a resposta nas polias ou nos mancais (SÁ, 2000, p.22).

3.4 DEFINIÇÃO PERIODICIDADE DE MONITORAMENTO

Para este trabalho foi definido uma frequência quinzenal de monitoramento dos pontos de coleta nos equipamentos, a fim de assegurar que nenhum parâmetro se desviasse da curva pretendida para que a saúde do equipamento não fosse comprometida, gerando custo indesejado e conseqüente diminuição da disponibilidade do equipamento. Conforme a Figura 22 demonstramos as melhores datas onde se pode realizar as medições e monitoramento dos equipamentos.

Figura 22 - Cronograma de Acompanhamento



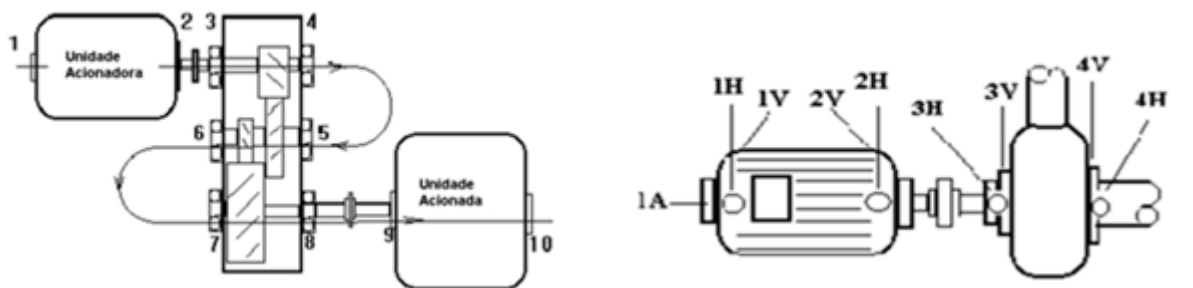
Fonte: Próprio autor (2018)

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 MÉTODO APLICADO

Nos casos selecionados para estudo, foi aplicado a análise de um conjunto de parâmetros, tais como: aceleração, velocidade, deslocamento e envelope. Por convenção seguimos o padrão de identificação em cada ponto medido. Na Figura 23 fica exemplificado a numeração dos pontos seguindo o fluxo de potência pelo sistema mecânico e a nomenclatura convencionalmente adotado conforme o local de coleta do maquinário.

Figura 23 - Pontos de Medição na Máquina



Fonte: Ct Vibrações (2018)

Cada número se refere a um mancal específico (1, 2, 3, ..., N), que foi padronizado iniciando-se à partir da traseira do motor (mancal LOA – lado oposto ao acoplamento), e assim sucessivamente, de acordo com a quantidade de mancais do equipamento. Também são padronizados os sentidos de medição, tal como:

- a) H – sentido horizontal;
- b) V – sentido vertical;
- c) A – sentido axial.

Complementando-se assim a identificação de cada ponto de medição, como: 1H, 1V, 1A, ...

Exemplos:

- a) 1H – 1º ponto no sentido horizontal, localiza-se no mancal LOA (lado oposto ao acoplamento) traseiro do motor;
- b) 4V – 4º ponto no sentido vertical, localiza-se no mancal LOA (lado oposto ao acoplamento) da bomba.

4.2 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

- a) Coletor de vibrações Idear Vibracheck 100 – com acelerômetro de 100mV/g
Range de frequências: 0 a 10 KHz;
- b) Software MAINTraQ Predictive;
- c) Alinhador de polias laser SKF TKBA 40 base magnética, precisão de medição angular de 0,2°, distância de medição de 50 mm a 6000 mm;
- d) Alinhados de eixos laser Fixturlaser GO Basic distância de medição até 5 m, precisão da medição 0,3% $\pm 7\mu\text{m}$;
- e) Condicionador de metais Alfa X;
- f) Ventilador radial de resfriamento de refratário;
- g) Bomba centrífuga circuito de resfriamento de água;
- h) Bomba de graxa manual 500gr marca Bozza;
- i) Máquina de solda elétrica.

4.3 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

Inicialmente foi selecionado equipamentos críticos ao processo de fabricação do vidro, onde foram identificados uma bomba e um ventilador que geravam um alto custo de manutenção devido as trocas constantes de rolamentos, eixos e mancais.

Foi aplicado o método preditivo de análise de vibração visando a identificação exata das falhas que geravam perturbação ao funcionamento adequado dos equipamentos. Seguindo as recomendações da norma ISO STANDARD 10861-1 adotou-se alarmes conforme a carta de severidade de vibrações no qual se pode determinar se os níveis de vibração encontrados na coleta de dados eram aceitáveis ou inaceitáveis para o bom funcionamento e conservação da saúde do equipamento.

4.3.1 Caso 1: Bomba Centrífuga



Na bomba centrífuga selecionada para o estudo, identificamos um severo sintoma de desalinhamento através da coleta dos parâmetros de vibração em análise. No parâmetro de velocidade encontramos um valor muito elevado em comparação com a tabela de severidade da NORMA ISO STANDARD 10861-1. A bomba analisada se encontra na Figura 24.

Figura 24 - Bomba Centrífuga Analisada

Fonte: Próprio autor (2018)

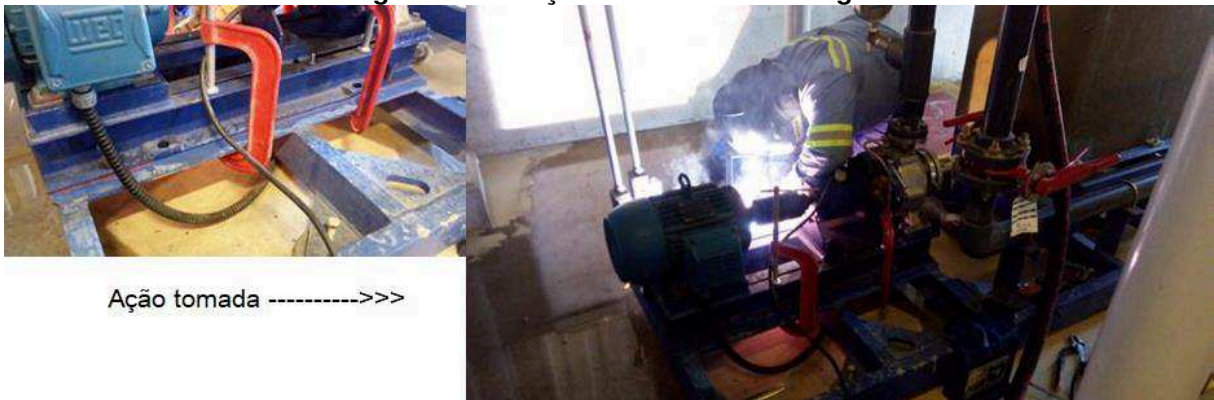
Através da análise das frequências encontradas no espectro de vibração ficou evidente que o gerador dos distúrbios era um desbalanceamento ou desalinhamento entre os eixos do motor e da bomba. Utilizamos o alinhador a laser para a correção do alinhamento, porém os valores encontrados estavam dentro dos limites aceitáveis conforme a Figura 25, onde foi iniciada uma inspeção minuciosa a fim de identificar onde o sintoma estava sendo gerado. Foi encontrado uma falha na solda entre as estruturas sustentadoras do conjunto, que se movia gerando um desalinhamento no momento do funcionamento. O problema foi eliminado através da soldagem da estrutura. Após efetuar novas medições os valores reduziram drasticamente, ficando em conformidade com a tabela de severidade.

Figura 25 - Tolerâncias de Desalinhamento

rpm	 mm	 mm / 100 mm
0 - 1000	0.13	0.10
1000 - 2000	0.10	0.08
2000 - 3000	0.07	0.07
3000 - 4000	0.05	0.06
4000 - 6000	0.03	0.05

Fonte: Foco técnico em Melhores Práticas em Manutenção Preditiva (2018).

Uma foto foi tirada para mostrar o que foi feito na estrutura da base da bomba, a fim de ficar mais claro o processo. Conforme a Figura 26.

Figura 26 - Fixação da Bomba Centrífuga

Ação tomada ----->>>

Fonte: Próprio autor (2018)

Foi determinado que uma análise quinzenal é necessária para se garantir que mais desvios não voltem a ocorrer, assim os custos de manutenção podem ser controlados com maiores eficiências uma vez que a corretiva não planejada pode ser praticamente eliminada aplicando-se este método preditivo.

4.3.2 Caso 2: Ventilador Radial

No ventilador radial apontado para o estudo, foi encontrado valores de aceleração (g) muito acima do recomendado que indicava uma falha de lubrificação severa que por sua vez estava gradativamente danificando o rolamento. Esta condição de lubrificação ineficiente não poderia persistir por

muito tempo pois nas análises de vibração semanais a evolução do defeito no rolamento era bastante preocupante.

Inicialmente foi constatado que a graxa utilizada XHP222 do fabricante Mobil foi selecionada de maneira inadequada, pois sua temperatura máxima de trabalho não suportava o ambiente onde o ventilador estava instalado. Com esse regime de trabalho a oxidação da graxa no rolamento era evidente conforme a Figura 27.

Figura 27 - Oxidação da Graxa no Rolamento

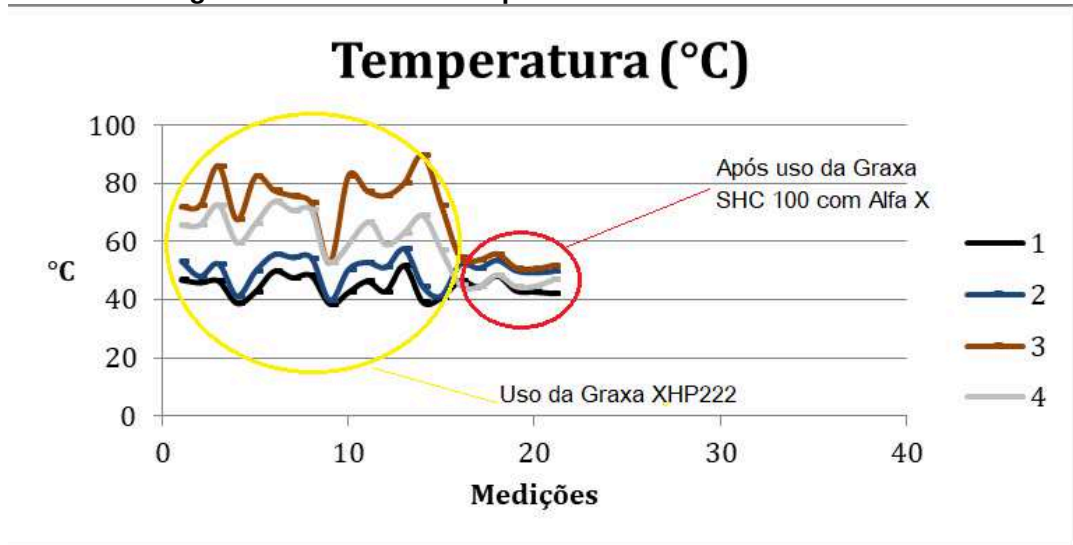


Fonte: Próprio autor (2018)

Com base nos catálogos de diversos fabricantes de lubrificantes, foi selecionada a graxa adequada SHC 100, para suportar a exigência do equipamento para uma lubrificação eficiente, porém alguns danos na pista externa do rolamento, já haviam sido evidenciados. Para evitar que o rolamento fosse substituído, gerando custos não programados, foi empregado o produto condicionador de metais Alfa X, a fim de recuperar a superfície metálica interna do rolamento com a utilização da nanotecnologia empregada na lubrificação.

Medições de temperatura dos quatro rolamentos do conjunto deixaram evidentes os benefícios gerados após a substituição da graxa e aplicação do condicionador de metais, conforme a Figura 28.

Figura 28 - Gráfico da Temperatura nos Rolamentos



Fonte: Próprio autor (2018)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 APLICAÇÃO DA TÉCNICA

Para realizar as análises, utilizamos uma técnica preditiva de análise de vibração, que traz benefícios ao bom funcionamento do equipamento e permite um melhor planejamento referente aos custos de manutenção. Uma vez que o rolamento ou qualquer outro componente possa a ser aproveitado durante toda sua vida útil, eliminando a necessidade de uma substituição periódica que geralmente ainda poderia ser utilizado por mais tempo.

5.2 DESALINHAMENTO ENTRE EIXOS DA BOMBA

O desalinhamento entre eixos eleva os níveis de vibração condenando o rolamento precocemente. O tempo de vida útil de um rolamento e dos mancais está diretamente relacionado ao correto alinhamento do conjunto somado a uma lubrificação eficiente.

Através dos espectros fica evidenciado a diminuição dos valores de velocidade encontrados, que caíram de 16,817 mm/s para 1,935 mm/s, ficando comprovado que ação tomada, de alinhamento e reforço da estrutura do conjunto foi crucial para que o equipamento entrasse em um regime aceitável de funcionamento.

Com a melhora das condições de funcionamento do equipamento evita-se problemas futuros em todos os componentes da bomba, o que nos proporciona menores custos de operação, tendo em vista a utilização de toda vida útil possível dos componentes.

Foi evitado 8 horas homem de trabalho, 4 horas de indisponibilidade da máquina, a substituição de componentes tais como rolamentos, eixo, rotor, mancal, motor entre outros, assim tendo uma redução de custos não planejados.

Vemos na Figura 29 um resumo do que foi encontrado e feito para corrigir o defeito.

Figura 29 - Resumo da Ação Tomada na Bomba

Perdas Evitadas: OSMOSE – BC 701

Desvio Identificado: *Desalinhamento.*

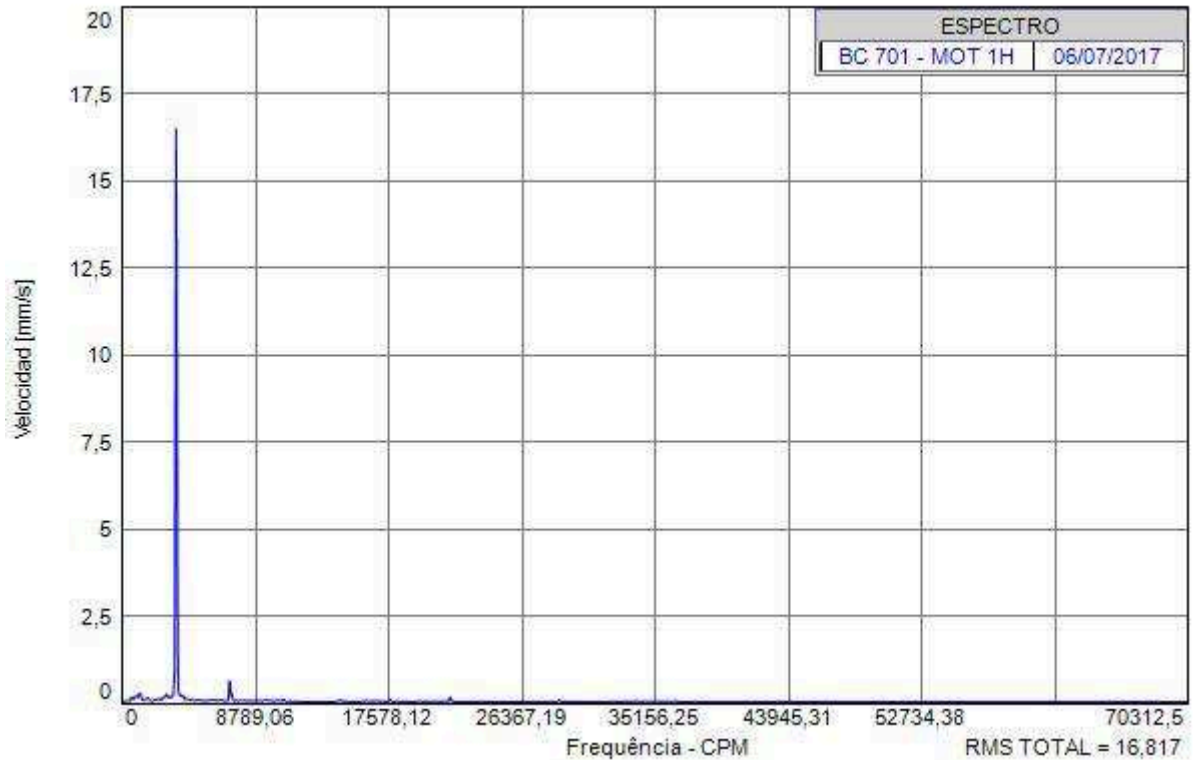
Ação Tomada: *Alinhamento e reforço da estrutura do conjunto.*



Fonte: Próprio autor (2018)

Antes da ação tomada tínhamos encontrado no espectro a velocidade de 16,817 mm/s. Configurado na Figura 30.

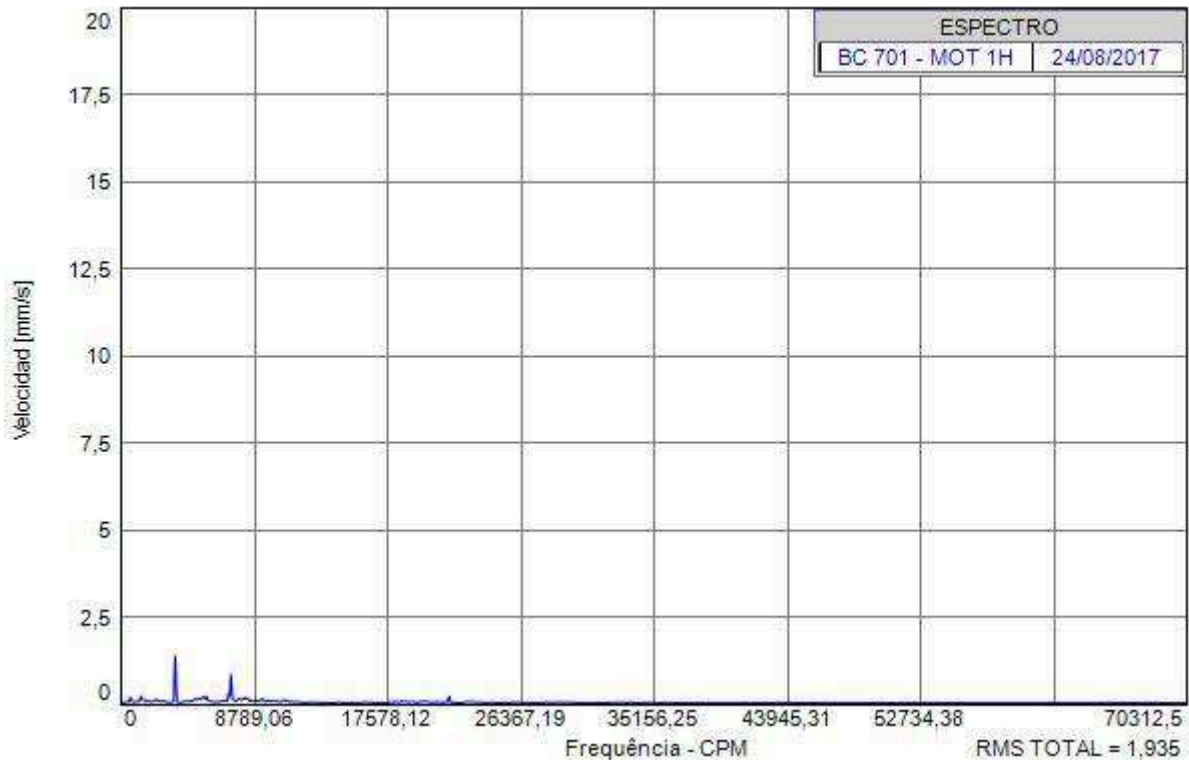
Figura 30 - Espectro da Velocidade Antes na Bomba Centrífuga



Fonte: Próprio autor (2018)

Depois da ação tomada, encontramos um espectro totalmente diferente, com a velocidade em 1,935 mm/s, comprovando que o procedimento foi realizado com sucesso. Conforme a Figura 31.

Figura 31 - Espectro da Velocidade Após na Bomba Centrífuga



Fonte: Próprio autor (2018)

5.3 FALHA DE LUBRIFICAÇÃO NOS ROLAMENTOS DO VENTILADOR

A lubrificação eficiente é um dos itens primordiais para um correto funcionamento e longevidade de um rolamento. O lubrificante deve atender as condições de operação solicitadas durante o ciclo de funcionamento, tendo em vista que as condições podem se alterar durante este ciclo. Diversos fatores devem ser analisados para uma correta seleção do lubrificante adequado, como temperatura de funcionamento, temperatura ambiente, rotação versus tamanho do rolamento entre outros. Com a análise de vibração podemos monitorar as condições de lubrificação de cada rolamento do conjunto através do parâmetro de aceleração.

Através dos espectros fica evidenciado a diminuição dos valores de aceleração encontradas, que caíram de 7,461g para 3,138g, ficando comprovado que ação tomada, de substituição da graxa e a aplicação do Alfa X, foram essenciais

para que o equipamento entrasse em um regime aceitável de funcionamento. De acordo com a Figura 32, mostramos a ação tomada para que isso ocorresse.

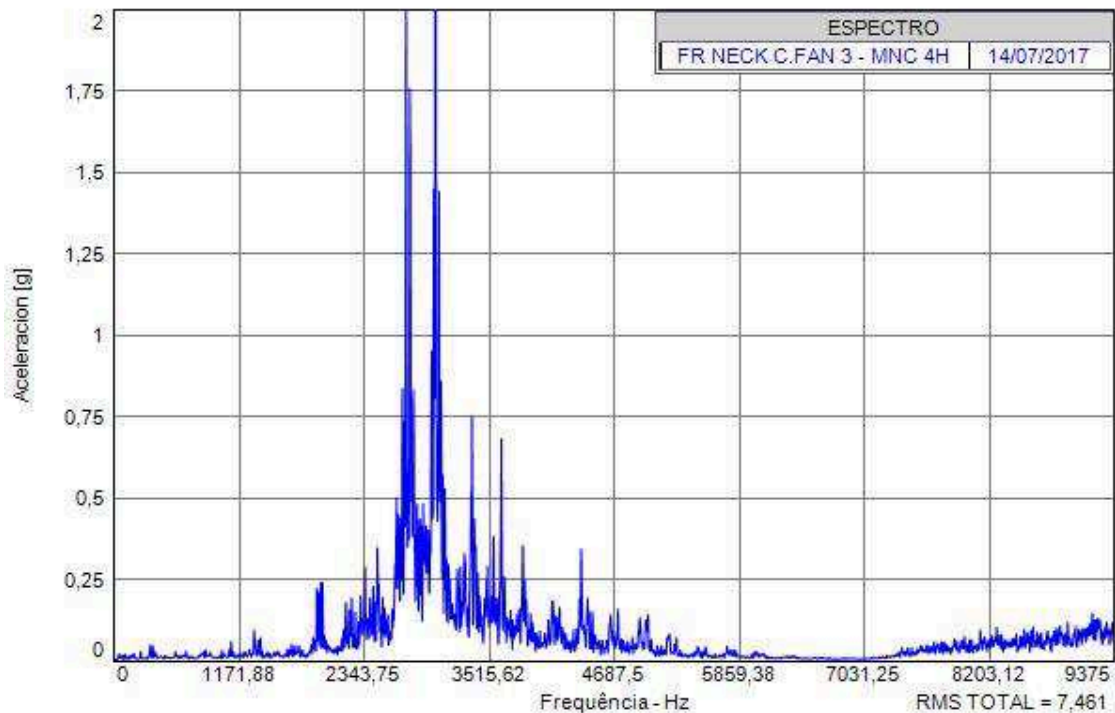
Figura 32 - Resumo da Ação Tomada no Ventilador



Fonte: Próprio autor (2018)

Antes da ação executada vemos no espectro da Figura 33 a aceleração de 7,461g, era encontrada no rolamento lado rotor do ventilador radial.

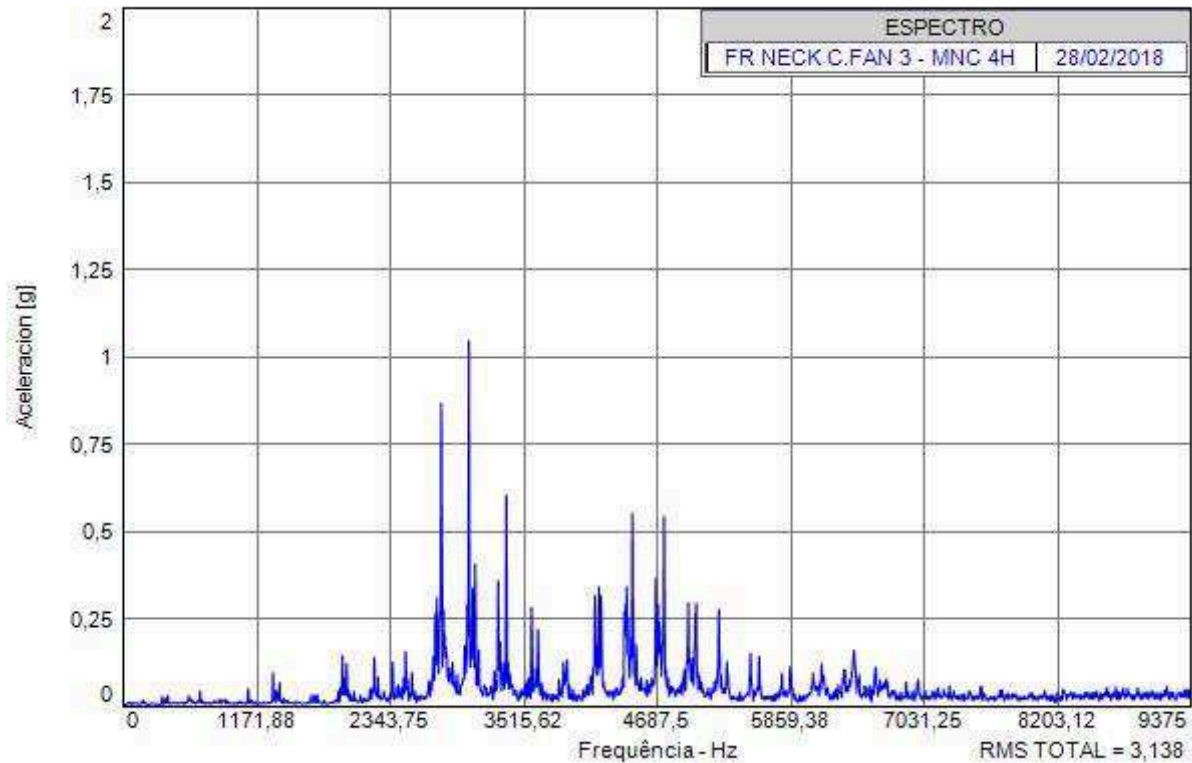
Figura 33 - Espectro da Velocidade Antes no Ventilador Radial



Fonte: Próprio autor (2018)

Após a ação tomada temos o espectro da Figura 34 a fim de mostrar como ficou a aceleração. Tendo como valor final de 3,138g.

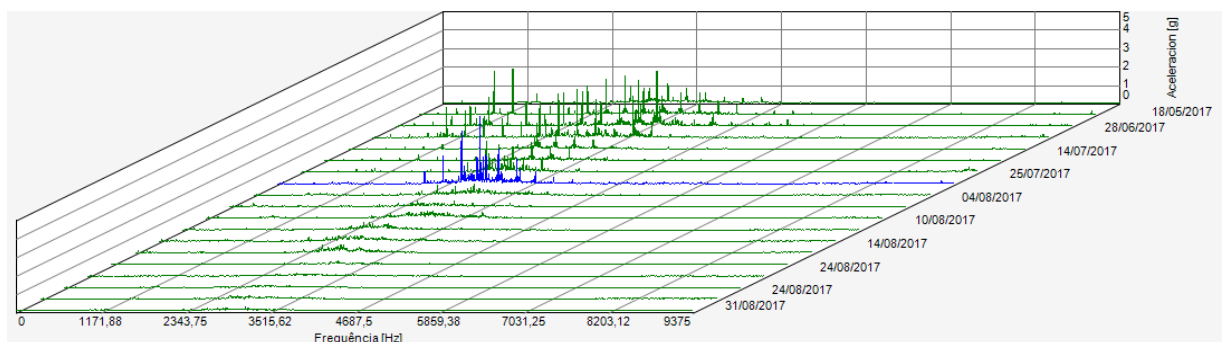
Figura 34 - Espectro da Aceleração Após no Ventilador Radial



Fonte: Próprio autor (2018)

A Figura 35 demonstra o histórico dos dados coletados no ventilador, apontando uma importante melhora nas condições de lubrificação do rolamento.

Figura 35 - Cascata de Espectro do Ventilador



Fonte: Próprio autor (2018)

5.4 PERDAS EVITADAS

Utilizando a técnica de análise de vibração de maneira eficiente, ficou evidenciado que nos casos apresentados foram evitados uma eminente parada dos equipamentos, o qual diminuiria o índice de disponibilidade dos mesmos, e também a substituição de rolamentos, mancais, lubrificante, motores e etc. A situação vibratória encontrada era muito prejudicial a vida útil dos mesmos.

No caso da bomba centrífuga da marca (KSB, modelo Meganorm 100-250) os custos de peças, mão de obra e indisponibilidade do equipamento foram evitados. Com essas ações aumentamos a confiabilidade do equipamento. Segue tabela 1 com os principais componentes que podem vir a ser danificados e com os custos aproximados caso uma intervenção corretiva emergencial fosse necessária. O custo com a mão de obra especializada para a substituição dos componentes e alinhamento laser se aproximam ao valor total das peças a serem trocadas, o que torna a manutenção corretiva emergencial inviável, devido aos custos e transtornos gerados conforme evidenciado na Tabela 1. Na tabela, os valores computados foram somente dos custos relacionados à peças e mão de obra, excluindo-se os custos gerados pela parada de produção causada pela falta do equipamento. Se os valores de produção perdida fossem computados, o custo final apresentado na Tabela 1 seria muito maior.

Tabela 1: Custos de Reparo para Bomba Centrífuga

Componente	Quantidade Utilizada	Preço (R\$)
Eixo	1 peça	150,00
Rotor	1 peça	250,00
Rolamento Radial de Esferas	2 peças	100,00
Suporte de Mancal	1 peça	300,00
Tampa de Mancal	2 peças	50,00
Selo Mecânico	1 peça	800,00
Mão de Obra	8 h/h	550,00
Alinhamento a Laser	1 unidade	600,00
TOTAL	-	2800,00

Fonte: Próprio autor (2018)

No caso do ventilador radial da marca (LWN modelo Tornado) os custos de peças, mão de obra e indisponibilidade do equipamento foram evitados. Com essas ações aumentamos a confiabilidade do equipamento. Segue Tabela 2 com os principais componentes que podem vir a ser danificados e com os custos aproximados caso uma intervenção corretiva emergencial fosse necessária. O custo com a mão de obra especializada para a substituição dos componentes é elevado, o que torna a manutenção corretiva emergencial inviável, devido aos custos e transtornos gerados conforme evidenciado.

Tabela 2 - Custos de Reparo para Ventilador Radial

Componente	Quantidade Utilizada	Preço (R\$)
Eixo	1 peça	450,00
Rotor	1 peça	550,00
Rolamento Auto Compensador de Rolos Cilíndricos 22210	2 peças	400,00
Mancal Bipartido	2 peças	200,00
Polia em V perfil B 4 canais	2 peças	300,00
Correias perfil B	4 peças	350,00
Mão de Obra	8 h/h	550,00
Alinhamento a Laser	1 unidade	600,00
TOTAL	-	3400,00

Fonte: Próprio autor (2018)

5.5 CUSTO DE MONITORAMENTO PREDITIVO

O custo aproximado que uma empresa consolidada e experiente no segmento de manutenção preditiva cobra para monitoramento de análise de vibração, gira em torno R\$ 50,00 mensais por equipamento. O que resulta em um custo anual de R\$ 600,00 por equipamento conforme demonstrado na Tabela 3, porém quando um contrato é firmado para monitoramento de um parque industrial este custo pode cair consideravelmente. A necessidade de uma intervenção emergencial nos equipamentos iria gerar um custo alto e desnecessário conforme a Tabela 4. Fica assim evidenciado que a aplicação do método preditivo e pequenas correções

programadas com base nos relatórios de análise gerados aumenta a disponibilidade dos equipamentos e diminui os custos de manutenção.

É importante ressaltar que com a utilização da técnica preditiva de análise de vibração a manutenção preventiva é extinta do processo, ou seja, nenhum componente deve ser substituído sem que seja detectada uma real necessidade na análise de vibração, assim fica garantido que a vida útil de cada componente será explorada ao máximo.

Tabela 3 - Custos de Monitoramento Preditivo

Monitoramento Preditivo	Quantidade	Valor Unitário Anual (em R\$)	Valor Total (em R\$)
Ventilador	1	600	600
Bomba	1	600	600
TOTAL			1200

Fonte: Próprio autor (2018)

Tabela 4 - Custos de Manutenção Emergencial

Manutenção Corretiva Emergencial	Quantidade	Valor Unitário Anual (em R\$)	Valor Total (em R\$)
Ventilador	1	3400	3400
Bomba	1	2800	2800
TOTAL			6200

Fonte: Próprio autor (2018)

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados neste estudo, pode-se afirmar que a manutenção preditiva somada a uma lubrificação eficiente e emprego de uma nova tecnologia de condicionador de metais, eleva o patamar do departamento de manutenção, trazendo resultados extraordinários sem a necessidade de aumentar os custos de manutenção e reduzindo o risco de quebras repentinas que impactaria diretamente na produção.

Consegue-se exemplificar durante a análise do caso, que equipamentos em estados inadequados de funcionamento, onde do ponto de vista técnico, a substituição de componentes era iminente, estes podem ser analisados e melhorados evitando futuros problemas, o qual acarretariam em custos elevados não programados. A não utilização da técnica empregada, resultaria na necessidade da troca dos rolamentos aproximadamente na metade de sua vida útil, não podendo explorar efetivamente os componentes conforme seus projetos originais, e isso iriam gerar um custo de aproximadamente de R\$ 6200,00 reais. Utilizando a técnica preditiva foi necessário investir apenas R\$ 1200,00 reais, onde a empresa obteve uma redução de R\$ 5000,00 em apenas dois equipamentos. Esse valor de redução de custo seria muito maior se a técnica fosse implementada em todos os equipamentos do parque fabril. Por sigilo a fábrica não divulga o valor perdido em cada hora não produtiva, sendo assim pudemos contabilizar estes valores, que seriam infinitamente mais expressivos. Também se demonstrou que o emprego de um condicionador de metais mostra uma importante redução de atrito interno e tratamento superficial que manterá o rolamento em excelentes condições por mais tempo.

Com a demonstração da técnica preditiva não queremos concluir efetivamente que esta deve ser a única utilizada, porém acreditamos que as técnicas preditivas trazem excelentes resultados na busca incessante do aumento da eficiência do parque industrial alinhado a uma redução de custos significativos. Com ela conseguimos resolver problemas atuais e futuros empregando simples ações, que se transformam em melhores resultados financeiros para a companhia.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR-5462: **Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro. 1994.

BRASIL, A. N. **Hidráulica Básica e Máquinas de Fluxo**. Minas Gerais. 2013.

CT Vibrações disponível em <<https://pt.slideshare.net/cmtasso/apresentao-ct-vibraes>> acessado em 08 de agosto de 2018.

FABIANO, J. C. **Foco técnico em Melhores Práticas em Manutenção Preditiva**. 2013.

FILHO, G. B. **Dicionário de Termos de Manutenção, Confiabilidade e Disponibilidade**. 4. ed. Rio de Janeiro. Ed. Ciência Moderna Ltda, 2006.

ISO 10816-1:1995/Amd 1:2009 - Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Genebra, 1995.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. 3ª ed. Rio de Janeiro. Qualitymark, 2009.

KARDEC, A.; NASCIF, J.; BARONI, T. **Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas**. Rio de Janeiro. Qualitymark, 2007.

Mobil Moovelub disponível em <http://mobil.moovelub.com/sites/default/files/produtos/mobilgrease_xhp_serie_220_pds_2017.pdf> acessado em 10 de agosto de 2018.

MONCHY, F. **A Função Manutenção**: Formação para a gerência da Manutenção Industrial. 1.ed. São Paulo: Ed. Durban, 1987. 424 p.

Offset 3 blog disponível em <<http://offset3blog.wordpress.com/category/rolamentos-e-mancais>> acessado em 10 de setembro de 2018.

Plant Performance Group (Divisão da *Technology for Energy Corporation*) disponível em <<http://www.tec-usa.com>> Acessado em 25 de abril de 2018.

PEREIRA, D. M. **Manutenção Industrial**. Fortaleza: Centro de Ensino Técnico e Profissionalizante Quintino, 2004.

Rodrigo Germano 100 disponível em <<https://www.slideshare.net/rodrigogermano100/tabela-de-defeitos-e-espectros>> acessado em 25 de agosto de 2018.

SÁ, M. **Curso de Vibrações**. Macaé: Petrobrás, 2000.

Saito Tecnologia e Engenharia de Lubrificação, Alfa-X Condicionador de Metais disponível em <<http://www.saitolub.com.br/alfax>> acessado em 25 de abril de 2018.

SIQUEIRA, I. Patriota de. **Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de implementação**. Rio de Janeiro. Qualitymark, 2009.

SKF Brasil disponível em <<http://www.skf.com/br/index.html>> acessado em 27 de agosto de 2018.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. **A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial**. *Revista Gestão Industrial*. Vol.4, n.2, 2008.