



FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO E NEGÓCIOS DE SERGIPE - FANESSE
CURSO ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LUIZ FERNANDO ALVES

**A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM UMA FÁBRICA DE
CIMENTOS DO ESTADO DE SERGIPE**

ARACAJU
2020

LUIZ FERNANDO ALVES

**A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM UMA FÁBRICA DE
CIMENTOS DO ESTADO DE SERGIPE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Fanese como requisito parcial e obrigatório para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Eudes de Oliveira Bomfim

**ARACAJU
2020**

A474i

ALVES, Luiz Fernando

A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM UMA FÁBRICA DE CIMENTOS DO ESTADO DE SERGIPE / Luiz Fernando Alves; Aracaju, 2020. 49p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Administração e Negócios de Sergipe. Coordenação de Engenharia de Produção.

Orientador(a) : Prof. Dr. Eudes de Oliveira Bomfim.

1. Falhas 2. Rolamentos 3. Produtividade 4. Vibrações.
658.112.3: 658.588(813.7)

LUIZ FERNANDO ALVES

**A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM UMA FÁBRICA DE
CIMENTOS DO ESTADO DE SERGIPE**

Monografia apresentada à Coordenação do curso de Engenharia de Produção da FANESE, como requisito parcial e elemento obrigatório para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Produção, no período de 2020.1.

Aprovado (a) com média: 9,5



Prof. Dr. Eudes de Oliveira Bomfim
1º Examinador (Orientador)

Profa. Dra. Heloísa Thais Rodrigues de Souza
2º Examinadora

Prof. Esp. Williams Alves Azevedo
3º Examinador

Aracaju (SE), 10 de junho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente por sempre me fortalecer nessa jornada e estar comigo em todos os momentos, agradeço minha esposa Andréa, por sempre me incentivar nos momentos mais difíceis e nunca ter desistido de mim, agradeço a minha filha que é meu maior combustível por buscar o melhor para nossa família, agradeço meus sogros por sempre acreditarem em mim, agradeço meus irmãos pelas palavras de apoio.

Aos meus amigos pelo apoio, e a todos os meus professores, pois me ensinaram e me deram uma visão diferente da vida.

Agradeço aos meus tios que me ensinaram desde pequeno a superar dificuldades e buscar o melhor para minha vida.

Por fim, agradeço a minha mãe que, apesar de não estar comigo neste momento tão especial na minha vida, eu sei que esta com muito orgulho e sempre estará olhando por mim em todos os momentos da minha vida.

RESUMO

Os sinais de vibrações de uma máquina rotativa transportam informações dinâmicas dos componentes da máquina e estas informações são de muita importância quando se diz respeito ao monitoramento de condição e diagnósticos de máquinas com uso da análise de vibrações. Vários métodos de análises são utilizados no sentido de diagnosticar falhas em componentes de máquinas tais como rolamentos, polias, acoplamentos, engrenagens dentre outros. O presente trabalho apresenta uma análise sobre detecção de falhas em rolamento com análise de vibrações. O objetivo geral deste trabalho foi apresentar uma técnica de identificação de falhas em equipamentos rotativos sem ter a necessidade de pará-lo para inspeção, aumentando os ganhos de produtividade e reduzindo os custos de uma empresa de cimentos, no município de Laranjeiras, estado de Sergipe. Os resultados evidenciaram a importância da manutenção baseada na condição que tem como objetivo diminuir custos, evitar mão de obra desnecessária e perda de lucro cessante. Por fim, conclui-se que a manutenção corretiva programada exerça papel de extrema importância na gestão da manutenção e que componha as reuniões de programação, pois refletirão resultados positivos como um dos indicadores mais importantes dentro do universo da manutenção industrial.

Palavras-chave: Falhas. Rolamentos. Produtividade e Vibrações.

ABSTRACT

The vibration signals of a rotating machine carry dynamic information from the machine components and this information is important when respecting the condition monitoring and diagnostics of machines using vibration analysis. Various methods of analysis are used in order to diagnose failures in machine components such as bearings, pulleys, couplings, gears, among others. The present work presents an analysis on bearing failure detection with vibration analysis. The general objective of this work was to present a technique for identifying failures in rotating equipment without the need to stop it for inspection, recover verification tests and the costs of a cement company, no municipality in Laranjeiras, state of Sergipe. Importance of maintenance used in the condition that aims to reduce cost, avoid unnecessary labor and loss of lost profit. Finally, conclude that scheduled corrective maintenance plays an extremely important role in maintenance management and that it makes up the programming meetings, as it reflects the positive results as one of the most important indicators within the universe of industrial maintenance.

Key words: Failures. Bearings. Productivity and Vibrations.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2.1 Estratégias de Manutenção.....	13
2.2 Manutenção Corretiva Programada	14
2.3 Manutenção Corretiva Não Programada	15
2.4 Manutenção Preventiva	15
2.5 Manutenção Preditiva.....	15
2.6 Técnica de Análise de Vibrações.....	17
2.7 Técnica de Termografia	18
2.7 Técnica de Avaliação de Trincas.....	18
2.8 Técnica de Análise de Óleo	21
2.9 Vibração.....	22
2.9.1 Curvas de tendência	26
3.1 Abordagem Metodológica	27
3.2 Caracterização da Pesquisa	27
3.2.1 Quanto aos objetivos ou fins	28
3.2.2 Quanto ao objeto ou meios	28
3.2.3 Quanto ao tratamento dos dados	29
3.3 Instrumentos de Pesquisa	29
3.4 Unidade, Universo e Amostra da Pesquisa	30
3.5 Definição das Variáveis e Indicadores da Pesquisa	30
3.6 Plano de Registro e Análise dos Dados	30
4.1 Aplicação de Técnicas Preditivas para Reduzir Custos (Análise de Vibração)	32
4.1.1 Moinho - Redutor de Velocidade.....	32
4.1.2 Ventilador (Manutenção Corretiva programada).....	37
4.1.3 Forno - Motor (Análise de Vibração)	40
4.2 Verificar rotinas de monitoramento para encontrar falhas (Manutenção Preditiva)	41
4.3 Correção da Causa Principal de Cada Falha em Rolamento (Manutenção Corretiva Programada).....	42
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A manutenção preditiva tem como objetivo realizar inspeções em máquinas sem ter que pará-las para realizar tal serviço, com isso o ganho em produção é inevitável e só por isso já se observa uma vantagem e também como fonte de ganho permite um aumento da vida útil dos componentes das máquinas. Esta monografia tem como objetivo principal mostrar uma técnica de detectar falhas em rolamentos e utilizar da manutenção baseada na condição para determinar quando interromper o funcionamento de uma máquina para realizar uma correção sem ter que parar a linha de produção anteriormente e conseguir eficiência na produtividade de uma fábrica de cimentos do estado de Sergipe.

Um dos principais pilares do bom desempenho de indústrias e fábricas é o setor de manutenção, responsável por manter boa fiabilidade no mercado. Nos complexos industriais há uma grande quantidade de equipamentos rotativos com grau de importância operacional elevado. Este trabalho estuda a manutenção preditiva que é uma das ferramentas de maior importância na gestão de produção da fábrica de cimentos pesquisada.

Reforça-se neste trabalho a importância da manutenção preditiva em qualquer área que se pretenda ter maior confiabilidade em suas máquinas e equipamentos. Na indústria de modo geral existem vários setores para operacionalizar qualquer linha de produção e o setor primário que realmente faz o negócio crescer é a linha de produção da empresa. Nela existem muitas máquinas que são responsáveis pela produção do produto final.

Na maioria das máquinas existem os rolamentos que são os responsáveis pelos apoios dos eixos e dos demais componentes dinâmicos dos motores, redutores, ventiladores, turbinas, etc. Em qualquer máquina os rolamentos são os componentes que mais são afetados pelas variações de processo. São os componentes mais exigidos pelas máquinas e pelos equipamentos, com isso eles são também os componentes que mais se deterioram e apresentam problemas vindo a deixar as linhas de produção com menor disponibilidade e com a perda da produção estipulada como meta. (ALMEIDA, 2004).

Para a maioria dos equipamentos que têm rolamentos em sua estrutura são necessárias paradas nas linhas de produção para que sejam feitas manutenções periódicas a fim de buscar alguma falha desses componentes. Nesse sentido, é necessário então, apresentar uma maneira confiável de realizar inspeções em equipamentos rotativos sem ter que pará-las para isso, evitando assim que sejam perdidas horas de produção aumentando os lucros das empresas e evitando trocas desnecessárias dos componentes. Por meio da análise de vibrações das máquinas é possível detectar possíveis falhas nos rolamentos sem a necessidade de

interromper o funcionamento do equipamento para tal inspeção.

Cerca de 90% dos problemas em máquinas é consequência de alguma falha no rolamento, com isso é importante manter uma rotina de monitoramento e acompanhar de perto como está a “saúde” dos componentes das máquinas. E isso faz com que os gestores das empresas fiquem cientes e consigam contornar as situações adversas com maior êxito e assertividade. (ALMEIDA, 2003).

Para que não ocorra uma quebra prematura faz-se necessária a utilização da manutenção preditiva, para detectar os sinais e frequências nas máquinas e determinar o momento ótimo para um reparo e uma parada planejada para manutenção e sem custos desnecessários em substituições de componentes ainda em condição de operar sem comprometer o bom funcionamento do equipamento.

Evidencia-se que uma situação que pode vir a ser um problema é possível ser remediada de uma maneira confiável e mais tranquila dando tempo para uma programação prévia caso precise de uma manutenção maior. Diante disso, esta pesquisa parte do seguinte questionamento: como detectar falhas em equipamentos rotativos sem parar a máquina e ou processo produtivo?

O objetivo geral deste trabalho foi apresentar uma técnica de identificação de falhas em equipamentos rotativos sem ter a necessidade de pará-lo para inspeção, aumentando os ganhos de produtividade e reduzindo os custos de uma empresa de cimentos no estado de Sergipe.

Para tanto, foram definidos como objetivos específicos: i) Aplicar as técnicas de manutenção preditiva para reduzir custos; ii) Determinar rotinas de monitoramento para encontrar falhas; e iii) Corrigir a causa principal de cada falha em rolamento.

Justifica-se a elaboração desta pesquisa o interesse profissional do autor que ao longo dos 15 anos desenvolve atividades de manutenção preditiva em várias unidades fabris. Ademais, a partir do movimento dinâmico de uma máquina rotativa podem-se coletar diversas frequências. Com isso as indústrias que utilizam a manutenção preditiva como meio de manutenção baseado na condição para obter uma maior confiabilidade e redução de custos saem na frente, por isso se faz relevante o tema escolhido, uma vez que utilizam a análise de vibrações para detectar falhas em componentes internos das máquinas rotativas.

O referente trabalho foi elaborado em uma empresa de fabricação de cimento, situada no estado de Sergipe (Votorantim Cimentos). A atuação do grupo no ramo de cimento iniciou-se na década de 1940 e no Nordeste, ano de 1982. A empresa tem capacidade de produção aproximadamente de 24 milhões de toneladas de cimento por ano, tendo como

público alvo casas de materiais de construção, grandes e pequenas construtoras e todos os revendedores de cimento no Brasil. Com grande concorrência dos outros grupos cimenteiros existentes no mercado nacional.

Este estudo está dividido em cinco partes incluindo esta introdução. A parte dois trata de manutenção e os fundamentos teóricos que sustentaram as discussões desta pesquisa. Discute-se a análise de vibração como uma das ferramentas da manutenção preditiva é capaz de alcançar uma diminuição acentuada dos custos de manutenção ou uma melhoria mensurável no desempenho geral da planta. Apresenta-se também o percurso metodológico deste estudo. A quinta parte traz a análise e a discussão de resultados. Por fim, são indicadas as condições finais e as referências utilizadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com a passar do tempo à manutenção passou por uma brusca evolução. O que outrora consistia em consertar equipamentos que paravam por falhas, hoje, se transformou em conceitos avançados de técnicas que buscam sempre a melhoria contínua dos processos, com esses avanços surgiram métodos cada vez mais complexos que exigem conhecimento técnico cada vez maior do profissional, o que os demanda uma atualização constante (MACHADO, 2019).

O reflexo da aplicação da análise de vibrações nos custos de manutenção pode-se ter uma previsão mais assertiva de quando será necessária uma manutenção, e quais os serviços devem ser realizados. Assim é possível prolongar a vida útil de componentes das máquinas e fazer a troca somente quando for realmente necessário; mais eficiência nas intervenções da manutenção – Isso ocorre, pois com a Análise de Vibração, é possível fazer a indicação antecipada dos elementos que estão apresentando falhas e também conseguimos fazer as avaliações dos resultados nas intervenções feitas; redução no custo de transação – maior produção na sua indústria e menores custos envolvidos na produção.

Com isso a área de manutenção das empresas passaram a ser consideradas estratégicas usando um meio de manutenção sistemática que tem a capacidade de antecipar as falhas e evitar paradas inesperadas e perda de produção das máquinas, por meio da manutenção sistemática é possível detectar uma situação que já se espera uma falha e fazer uma programação para intervir no equipamento, resolver as possíveis falhas e não perder os compromissos assumidos com a produtividade da empresa.

Nesse capítulo aborda-se um pouco das estratégias de manutenção, mostrar quais tipos de manutenção podem ser adotadas e abordar os conceitos existentes de cada um deles.

2.1 Estratégias de Manutenção

Para ter confiabilidade e boa performance em qualquer linha produtiva que tenham máquinas é preciso ter um bom plano de manutenção e para isso são adotados os três tipos básicos da manutenção em máquinas que são: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva. Dessa forma a manutenção é toda e qualquer ação que visa evitar a degradação e desgaste natural dos equipamentos.

A Confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar uma função, sob condições específicas, de forma adequada, como previsto no projeto, durante um período de tempo pré-determinado. Confiabilidade também está associada a garantia de execução de funcionalidades sistêmicas para atender requisitos não-funcionais (GIL, 2008).

Segundo Kardec e Nascif (2014), a manutenção pode ser definida como a garantia da disponibilidade da função dos equipamentos e instalações que visa a atender a um processo de produção e a preservação do meio ambiente tendo como requisitos básicos a confiabilidade, segurança e custos adequados.

A disponibilidade é uma métrica importante usada para avaliar o desempenho de equipamentos reparáveis, representando as propriedades de confiabilidade e manutenção de um componente ou sistema. No entanto, diferentes classificações de disponibilidade e diferentes maneiras de calculá-las. (TELLES, 2020).

A falta de um sistema de manutenção causa enormes prejuízos para a organização, desde a parada dos equipamentos em função de quebras inesperadas a custo, disponibilidade, perda de produção, perda de clientes, qualidade de produto, etc.

Segundo Branco Filho (2008), por meio de um planejamento de manutenção adequado, no qual, um sistema de manutenção programada proporciona inúmeros benefícios para as organizações, podem-se obter índices significativos de disponibilidade do equipamento e, portanto, um processo produtivo maior, no qual a disponibilidade operacional torna-se um indicador da excelência da manutenção e da produtividade.

2.2 Manutenção Corretiva Programada

Manutenção corretiva planejada: quando a manutenção é preparada. Ocorre, por exemplo, pela decisão gerencial de operar até a falha ou em função de um acompanhamento preditivo. Otani e Machado (2008, p. 4), apontam que “pelo seu próprio nome planejado, indica que tudo o que é planejado, tende a ficar mais barato, mais seguro e mais rápido”.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em seu documento NBR 5462 a norma diz que a manutenção corretiva é efetuada após a ocorrência de uma pane, destina recolocar um item em condições de executar uma função requerida.

A manutenção corretiva tem como objetivo substituir peças e componentes que vieram a falhar ou dar pane levando a uma parada do equipamento fazendo que seja perdida a continuidade da produção e gerando aumento dos custos de manutenção.

2.3 Manutenção Corretiva Não Programada

Segundo Otani e Machado (2008) correção da falha de maneira aleatória, ou seja, é a correção da falha ou desempenho menor que o esperado após a ocorrência do fato. Esse tipo de manutenção implica em altos custos, pois causa perdas de produção; a extensão dos danos aos equipamentos é maior. Quando só existe corretiva, a manutenção é comandada pelos equipamentos.

2.4 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva tem como objetivo garantir as condições normais de funcionamento dos equipamentos a fim de evitar que os mesmos falhem, mediante intervenções proativas e periódicas, por meio da execução do plano de manutenção preventiva, com a finalidade de manter os equipamentos ou instalações em condições de operação e prevenir ocorrências que possam acarretar a sua indisponibilidade (OTANI; MACHADO, 2008).

Corrigindo falhas nos componentes das máquinas antes que elas venham a parar por uma quebra aumentando a confiabilidade dos equipamentos, só que para isso são feitas paradas periódicas para abertura e análise, medição de folga, condição de lubrificação, desgaste e estado dos componentes internos e externos das máquinas, e para que seja feito esse tipo de manutenção é necessário uma pausa no funcionamento das linhas de produção para essa inspeção.

A manutenção preventiva acontece antes da quebra da máquina a fim de evitar uma parada não programada e é o processo no qual rotinas sistemáticas de manutenção são detalhadas em um plano composto por um conjunto de itens à serem verificados e executados periodicamente. Para Slack (2002), a manutenção preventiva visa eliminar ou reduzir as probabilidades de falhas por manutenção (limpeza, lubrificação e verificação) das instalações em intervalos pré-planejados.

2.5 Manutenção Preditiva

Na manutenção preditiva não é preciso parar as máquinas nem abri-las para fazer a inspeção, por meio de um monitoramento rotineiro utilizando coletores de dados vibracionais se é capaz de observar falhas e não conformidades nos componentes dinâmicos internos das

máquinas. São também observados os parâmetros de temperatura, análise de lubrificante, controle de desgaste, etc.

O objetivo da manutenção preditiva é mensurar determinadas condições dos equipamentos, que sejam capazes de fornecer dados suficientes para a detecção de anomalias e uma análise de tendência, possibilitando o acompanhamento da evolução, emissão de diagnóstico e tomada de decisão para minimizar as consequências ou determinar o momento ideal para intervenção e eliminação do desvio.

Segundo Rocha (2014), é possível monitorar a condição do equipamento continuamente durante seu funcionamento. As técnicas de manutenção preditiva utilizam dessas condições do equipamento para fornecer dados para análise de como o equipamento está operando, se está fora ou dentro das condições normais.

A manutenção preditiva é aquela que indica a necessidade de intervenção com base no estado do equipamento. A avaliação do estado dos equipamentos e por meio de medição, acompanhamento ou monitoramento de parâmetros. As técnicas de manutenção preditiva podem ser classificadas pela grandeza de medida (vibração, temperatura, corrente elétrica) ou ainda pelo defeito (estrutural, *pitting*, trinca, baixa isolação).

Uma técnica de manutenção preditiva deve atender, segundo Almeida (2003), aos seguintes requisitos:

- ✓ Permitir a coleta de dados para análise, de acordo com a técnica a ser aplicada (equipamento em funcionamento ou fora de operação).
- ✓ Permitir a tomada de decisão com relação às ações de manutenção a serem realizadas, em função do monitoramento de equipamentos e diagnósticos baseados em análises de tendências que permitam prever uma falha em tempo hábil para planejamento da intervenção.

Por que fazer manutenção preditiva:

- ✓ Manter o equipamento operando até um limite preestabelecido com base em parâmetros que podem ser acompanhados (vibração, temperatura), alinhando a necessidade de intervenção com a produção.
- ✓ Intervir no equipamento apenas quando for realmente necessário.
- ✓ Identificar equipamentos que está com problema em fase inicial e assim evitar que progridam causando danos maiores.
- ✓ Identificar equipamentos que estão na iminência de uma quebra.

- ✓ Aumentar a disponibilidade e a segurança operacional dos equipamentos.

Para Tandon (2006), a principal função da condição de monitoramento é fornecer conhecimento sobre a real condição de funcionamento da máquina em cada momento sem parar a linha de produção. Isso permite evitar perdas de produção e melhora a disponibilidade e a segurança.

A ferramenta da manutenção preditiva utilizada neste trabalho será a análise de vibração.

2.6 Técnica de Análise de Vibrações

Dimarogonas (1992) indica que todos os equipamentos rotativos que fazem parte do processo produtivo (motor, redutor, ventilador) independentemente da potência, precisam possuir monitoramento de vibrações, a avaliação das condições de vibração deve ser feita preferencialmente em dois níveis:

- ✓ Medição de nível global: determinar o estado geral do equipamento.
- ✓ Análise de espectros: detectar os problemas por meio da interpretação das frequências que compõem o espectro.

Nesse sentido, Todeschini (2002), afirma que os problemas típicos detectados com a análise de vibrações são:

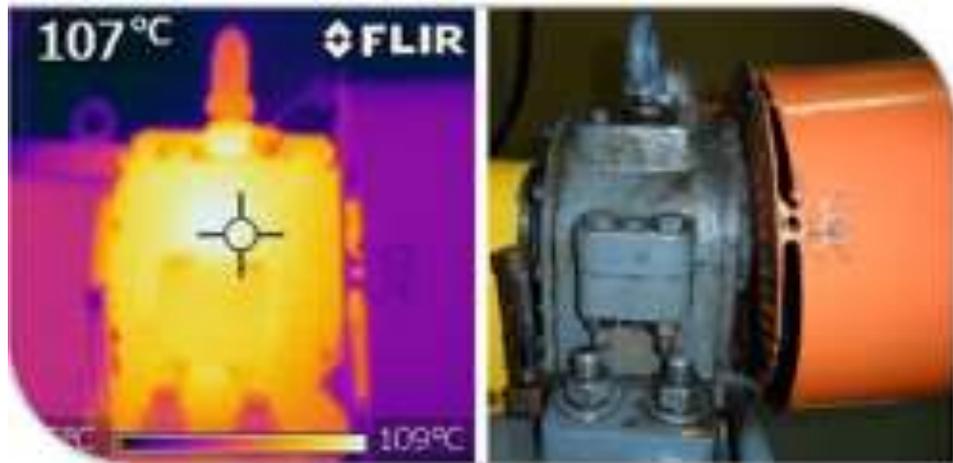
- ✓ Desbalanceamento.
- ✓ Desalinhamento (entre máquinas ou componentes internos).
- ✓ Empeno de eixos.
- ✓ Excentricidades (polias, mancais, rotores de motores ou geradores).
- ✓ Desgaste (aumento de folgas) em engrenagens e mancais.
- ✓ Falta de fixação de máquinas.
- ✓ Instabilidade de filme de óleo em mancais.
- ✓ Falhas de rolamentos.
- ✓ Problemas elétricos (quebra de barras de rotores, má fixação de bobinas, núcleos ou peças polares em motores, geradores, transformadores).

2.7 Técnica de Termografia

De acordo com Barreira (2004), a termografia é a técnica preditiva que permite o acompanhamento de temperaturas e a formação de imagens térmicas, conhecidas por termogramas. É mais utilizada na área elétrica, onde existe a necessidade de verificação de componentes defeituosos ou problema de mau contato, sem contato físico com os mesmos.

Isso inclui redes de transmissão e de distribuição, painéis, barramentos, dispositivos e acessórios, mais também é de grande ajuda nos monitoramentos mecânicos pela capacidade de mostrar quais são os pontos de maior temperatura na máquina. Os problemas típicos detectados por meio da análise dos termogramas são: mau contato em linhas de transmissão e o mau contato em barramento. (BARREIRA, 2004). Na técnica de termográfica se utiliza câmeras termográfica.

Figura 1 – Imagem termográfica



Fonte Telles 2020

2.7 Técnica de Avaliação de Trincas

A análise de trincas deve ser rigorosa, primeiro para verificar se existem e, em segundo lugar, para por meio dessa análise, avaliar-se a integridade do equipamento e sua confiabilidade para a operação.

A avaliação de trincas deve ser feita nos seguintes níveis:

- ✓ Inspeção visual.
- ✓ Inspeção por líquidos penetrantes (LP).
- ✓ Inspeção por partículas magnéticas (PM).
- ✓ Inspeção por ultrassom (US).

❖ Inspeção visual

Existem vários níveis e tipos de trincas, em toda máquina que for passar por manutenção é fundamental que seja realizado uma inspeção visual criteriosa em todos os componentes afim de garantir que nada saia errado quando for posto em funcionamento. (SAMPAIO, 2004)

Figura 2 - Inspeção visual



Fonte Sampaio 2004.

❖ Inspeção por líquido penetrante (LP)

De acordo com Andreucci (2008), o ensaio não destrutivo de líquido penetrante é utilizado para detectar discontinuidades superficiais abertas, como: trinca e poros. Podendo ser aplicado em todos os materiais sólidos e que não sejam porosas ou com a superfície muito rugosa. O método é realizado em cinco etapas, são elas:

- ✓ Preparação da superfície – a preparação da superfície consiste em remover água, óleo, graxa, tinta, ferrugem e todo material estranho que possa interferir ou mascarar o ensaio, a remoção deve ser feita com escova de aço (manual ou rotativa), solvente e desengraxante apropriado o processo deve ser realizado preferencialmente de forma manual.
- ✓ Aplicação do líquido penetrante – consiste na aplicação de um líquido chamado penetrante, geralmente da cor vermelha, de tal maneira que forme um filme sobre a superfície e por ação de um fenômeno chamado capilaridade penetre na

descontinuidade, o penetrante pode ser aplicado por spray, imersão ou com pincel por toda a superfície de interesse.

- ✓ Remoção do excesso de penetrante - consiste na remoção do excesso do penetrante da superfície em que foi aplicado, que deve ser por meio de produtos especificado pelo fabricante do líquido penetrante e de acordo com o penetrante utilizado e de forma cuidadosa.
- ✓ Aplicação do revelador – o revelador é usualmente um pó fino branco, o revelador age absorvendo o penetrante das descontinuidades e revelando-as, deve ser previsto um tempo determinado de revelação para sucesso do ensaio, a aplicação do revelador deve ser feita por meio de pulverização ou spray.
- ✓ Inspeção – é a etapa onde se procura as indicações de descontinuidades que podem variar de acordo com o tipo de penetrante utilizado e é muito importante que a luminosidade do local esteja adequada se não for possível pode ser realizada com ajuda de luz negra.

Figura 3 - Descontinuidades destacadas na peça.



Fonte: <http://soudap.com.br/wp-content/uploads/2012/11/e.jpg>

❖ **Inspeção por partículas magnéticas (PM)**

O processo consiste em submeter à peça ou parte dela a um campo magnético onde as descontinuidades irão causar um campo de fuga de fluxo magnético e com a aplicação de partículas ferromagnéticas ocorrerá a aglomeração destas nos campos de fuga devido o

surgimento de polos magnéticos que irão atraí-las, a aglomeração indicará o contorno do campo de fuga fornecendo a visualização do formato e da extensão da descontinuidade.

O ensaio é utilizado da indicação de descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos e podem ser aplicadas tanto em peças acabadas quanto em peças semiacabadas durante o processo de fabricação.

❖ **Inspeção por ultrassom (US)**

Os ensaios por ultrassom são realizados por meio de pulsos ultrassônicos emitidos por um transdutor equipado com um cristal piezelétrico, esse pulso atravessa o material e reflete nas interfaces originando um eco o eco retorna ao transdutor e gera um sinal elétrico correspondente. O ensaio por ultrassom possui uma alta sensibilidade e é capaz de detectar pequenas descontinuidades internas como trincas e fissuras. (HALLYDAY *et al.*,1994).

Figura 4 - Inspeção utilizando ultrassom



Fonte: Andreucci (2008).

2.8 Técnica de Análise de Óleo

A análise de óleos lubrificantes é a técnica preditiva que permite o acompanhamento das condições do lubrificante, determinando as propriedades físico-químicas e condições das máquinas pela análise de substâncias estranhas ao óleo (partículas de desgaste em suspensão

no lubrificante) e quando necessário, pela quantificação do número e tamanho das partículas sólidas presentes no óleo.

A análise físico-química deve ser executada em óleo lubrificante, a análise por contagem de partículas complementa a análise físico-química e deve ser realizada em unidades hidráulicas.

2.9 Vibração

A vibração é a descrição de um movimento oscilatório em torno de um ponto de referência que periodicamente se repete de forma regular ou irregular em um intervalo de tempo, é a resposta de uma excitação sofrida por algum corpo. A quantidade de vezes que um ciclo completo se repete denominamos como frequência que tem como unidade no sistema internacional (SI) hertz (Hz), também se pode utilizar como unidade de frequência rotações por minuto (rpm) que pode ser chamada também de ciclos por minuto (cpm). (RAO, 1996).

Vários defeitos podem ser detectados por meio da análise de vibrações, desbalanceamentos, desalinhamentos, folgas, problemas em engrenagens, etc.

Todo corpo possui suas próprias frequências naturais e com os rolamentos não é diferente, cada parte do rolamento possui uma frequência natural específica do componente do rolamento. Um rolamento é composto na maioria das vezes por quatro partes, pista externa, pista interna, elemento rolante e gaiola. (ALMEIDA, 2003).

Como se pode observar na Figura 1 o rolamento geralmente tem dois anéis que formam a pista interna e a pista externa, na maioria das aplicações a pista externa tende a ser a parte fixa e a pista interna tende a girar com o eixo, os elementos rolantes podem ser esferas, rolos (cilíndrico ou cônico) ou agulhas e tem a função de fazer a ligação entre as pistas para que aconteça o movimento, a quantidade e forma do elemento rolante vai depender muito da dimensão e aplicação do rolamento, a gaiola tem a função de fazer a correta separação do elemento rolante afim de um elemento não toque no outro.

Os materiais usados na fabricação de um rolamento devem ser de altíssima resistência ao desgaste, fadiga e corrosão, a depender da aplicação do rolamento pode ser alterada qualquer parte dele, material, projeto de construção, introduzidos ranhuras para fixação em mancais, etc.

Figura 5 – Partes de um rolamento



Fonte: Almeida (2004)

A vibração pode acontecer em um simples componente com uma única frequência ou em muitos componentes sendo esse com muitas outras frequências atuando de forma simultânea. Os movimentos de um redutor de velocidade é um exemplo de várias frequências agindo simultaneamente em um mesmo corpo, essas forças excitam todos os elementos das máquinas quando estão submetidas a ações dinâmicas. (ALMEIDA, 2004).

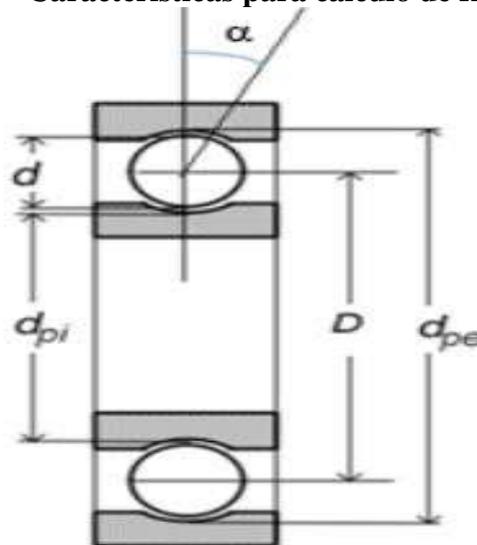
O autor supracitado continua e indica que quando se constata apenas uma frequência atuando no corpo fica fácil descrever em um gráfico Amplitude *versus* Tempo, a amplitude de vibração é o que descreve a severidade, o quanto de energia está contida no sinal de vibração. Ela é o valor escalar que oscila pelo lado positivo e pelo lado negativo da onda no gráfico podendo ser medido em três diferentes formas: P (pico), P-P (pico a pico) e RMS (Raiz Média Quadrada).

Para a detecção de falhas em rolamentos é preciso informar ao software as informações de referência e fabricante de cada rolamento existente na máquina para que seja feito o cálculo das frequências de cada parte de cada rolamento, as informações usadas nos cálculos são: Diâmetro primitivo do rolamento, Diâmetro da pista externa, Diâmetro da pista interna, Diâmetro do elemento rolante, Número de elementos rolantes e ângulo de contato. (ALMEIDA, 2004)

Para cada projeto um rolamento é dimensionado a fim de ser capaz de suportar os esforços neles aplicado, e como pode ser observado na Figura 2 para que sejam feitos os cálculos das frequências de defeito de rolamento e muito levado em consideração os vários diâmetros do rolamento e por isso cada alteração que for feita exigida pelo projeto vai

acarretar na mudança da frequência de cada parte do rolamento a mesma coisa acontece se for alterado o ângulo de contato, se para o cálculo é considerado o diâmetro primitivo para qualquer alteração do ângulo de contato vai haver também uma alteração no diâmetro primitivo do rolamento levando a uma mudança na frequência, por isso se faz importante conhecer a referência e o fabricante do rolamento para que sejam cadastrados os dados corretos no *software* e feito o cálculo de maneira assertiva da frequência de cada parte do rolamento. (BEZERRA, 2004).

Figura 6 - Características para cálculo de frequências



Fonte: Bezerra (2004)

Os dados ilustrados na Figura 2 são os principais dados dimensionais que compõe um rolamento.

onde:

D = Diâmetro primitivo do rolamento;

d_{pi} = Diâmetro da pista interna do rolamento;

d_{pe} = Diâmetro da pista externa do rolamento;

d = Diâmetro do elemento rolante do rolamento;

α = Ângulo de contato do rolamento;

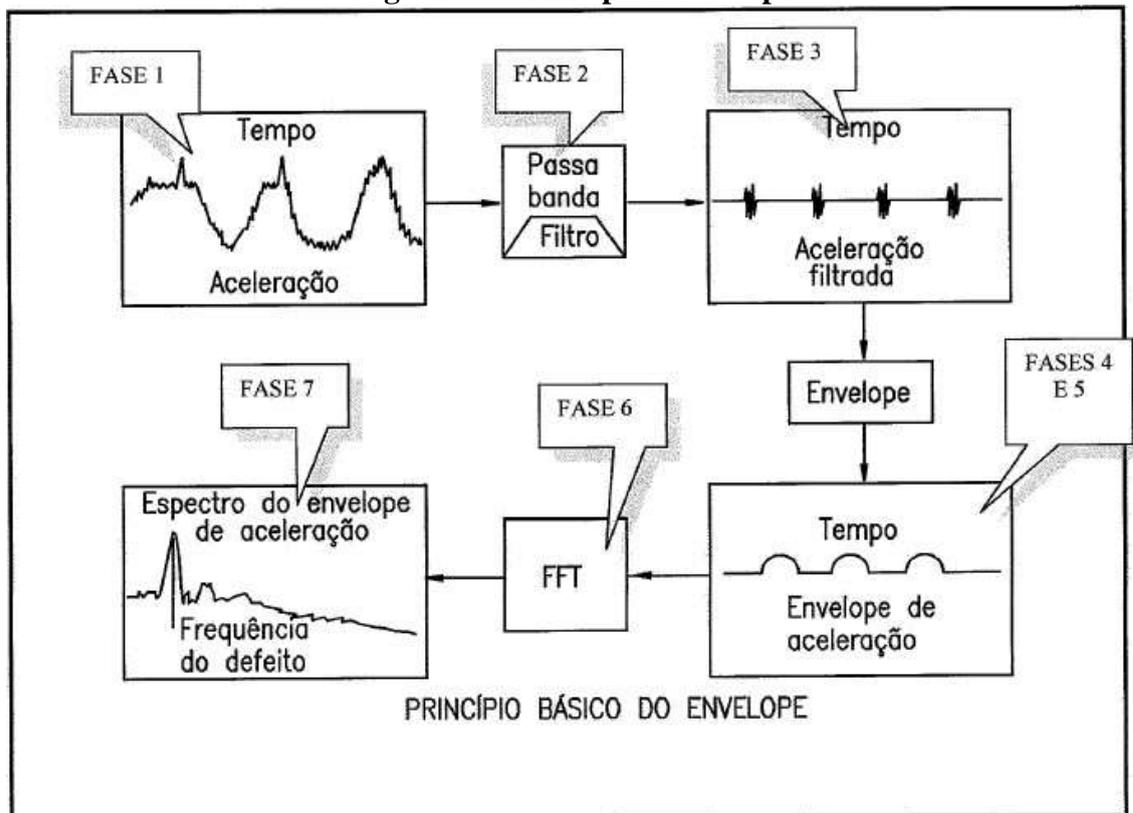
N = Número de elementos rolantes.

Uma técnica muito usada para auxiliar a detecção das falhas em rolamentos é a análise de envelope, que consiste em usar um filtro passa banda numa faixa de 1000 Hz a 5000 Hz que é a faixa de frequência natural dos rolamentos e de modular o sinal de aceleração

eliminando frequências aleatórias e deixando somente as frequências determinísticas de alta frequência onde são encontradas as frequências de falhas dos rolamentos (ALMEIDA, 2004).

Como se pode observar na Figura 3 o passo-a-passo para a técnica de envelope é um processo que consiste em 7 etapas.

Figura 7 – Passos para envelope



Fonte: FUPAI (2014)

1. É feito a coleta do sinal por meio de um acelerômetro, o sinal é coletado em forma de sinal no tempo;
2. O sinal coletado passa pelo filtro passa banda e é retido o sinal na faixa de frequência natural de excitação do rolamento;
3. O sinal filtrado no tempo contém os impactos induzidos pelo defeito do rolamento que são carregadas pela frequência portadora da falha, com isso é obtido um sinal de aceleração filtrado;
4. O sinal filtrado é retificado deixando apenas o lado positivo;
5. Nessa etapa obtém-se a envoltória do sinal retificado, o envelope de aceleração na forma de sinal no tempo;

6. Tem-se agora somente o sinal contendo os impactos induzidos pelos rolamentos, nessa etapa é necessário fazer uma transformada rápida de Fourier (FFT);
7. Em fim chegamos ao espectro do envelope de aceleração, nesse espectro temos com clareza as quatro frequências de falha do rolamento, BPFI, BPFO, BSF e FTF.

Segundo Santos (2017), A detecção por envelope ou técnica de ressonância de alta frequência é uma técnica importante no processamento de sinais, que tem o objetivo de detectar defeitos em rolamentos, por meio da extração de características das frequências de defeito do sinal de vibração do rolamento defeituoso.

Foi evidenciado acima na fundamentação teórica as definições de cada técnica preditiva e informações técnicas para que se consiga realizar uma excelente coleta de dados para que se possa realizar um monitoramento da condição com qualidade em equipamentos rotativos.

2.9.1 Curvas de tendência

Segundo Medeiros (2010) as curvas de tendência estão relacionadas ao histórico de medições coletadas em determinado período e são geradas através de valores globais dos parâmetros monitorados. Mediante os resultados obtidos da curva de tendência é possível prever uma data decorrência da falha programando-se assim as intervenções com antecedência. As curvas de tendências são de extrema importância para as tomadas de decisões mais assertivas.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta sessão tem como objetivo apresentar o percurso metodológico adotado, instrumentos, aplicação de técnicas, métodos e procedimentos fundamentados que foram utilizados como técnicas de pesquisa, e que foram cruciais para desenvolver o estudo. Ademais, foram aplicados métodos de acordo com os objetivos específicos, com base nas necessidades. Nesse estudo demonstra-se como detectar problemas em rolamentos por meio dos sinais emitidos pelas máquinas quando em funcionamento dos seus componentes internos, os rolamentos mais especificamente. (RAO, 1996).

3.1 Abordagem Metodológica

Na abordagem metodológica se define quais métodos serão utilizados para analisar os resultados das pesquisas efetuadas. Ou seja, os vários processos para verificação de algo, com objetivo de encontrar, determinar, solucionar um fato.

Segundo Medeiros (2010, p. 226), “Os métodos de procedimento englobam: histórico, comparativo, monográfico ou estudo de caso, estatístico, tipológico, funcionalista, estruturalista, etnográficos.”

Ubirajara (2014, p. 125), enfatiza que é usado método científico quando se faz estudo de caso, por ser feito um trabalho em local específico, sobre algum tipo de problema.

Nesse sentido a abordagem utilizada nesta pesquisa compreende um estudo de caso, já que foi realizado em local específico e possuir problemas a serem solucionados de alguma maneira.

3.2 Caracterização da Pesquisa

A classificação da pesquisa é importante, pois apresenta as diferenças e os vários tipos de modalidades, segundo Gil (2010, *apud* DANTAS, 2013, p. 25).

Segundo Ubirajara (2014, p. 126),

Pesquisar cientificamente é utilizar métodos que oriente o pesquisador a planejar, coordenar e analisar as informações acolhidas dos entrevistados para que o resultado final da pesquisa seja relevante, nada se perca ou se deixe de coletar e analisar. E uma pesquisa pode ser caracterizada: a) quanto aos objetivos ou fins; b) quanto aos meios ou objeto (modelo conceitual); c) quanto à abordagem (tratamento) dos dados coletados.

Dessa forma, o autor entende também que para solucionar os problemas encontrados, é de suma importância que se faça um planejamento e realize os procedimentos

(UBIRAJARA, 2014, p. 121).

3.2.1 Quanto aos objetivos ou fins

Segundo Gil (2010, p.27-28), as pesquisas se dividem em 3 grandes grupos:

- ✓ **Descritiva** – descrevem as informações sobre a população;
- ✓ **Exploratória** – quando existe uma familiaridade com o problema e é formado hipóteses sobre o problema;
- ✓ **Explicativa** – identificam os fatores que geram os fenômenos criados.

Vergara, (2009, p. 47, *apud* UBIRAJARA, 2014, p. 122), afirma que as pesquisas descritivas têm como objetivo a descrever as características de uma população ou fenômeno. É caracterizada por ter procedimentos estruturados com foco em resolução de problemas.

Quanto às pesquisas exploratórias, Lakatos e Marconi (2009, p. 109), ensinam que:

[...] são investigações de pesquisas empíricas cujo objetivo é a formulação de questões ou de um problema, com tripla finalidade: desenvolver hipóteses, aumentar a familiaridade do pesquisador com um ambiente, fato ou fenômeno, para realização de uma pesquisa futura mais precisa ou modificar e clarificar conceitos.

Segundo Ubirajara (2014, p.127), as pesquisas explicativas, tem foco em detectar os fatores que contribuem para que ocorra determinado fenômeno. Assim, este tipo de pesquisa está diretamente relacionado à realidade, relatando resultados analisados.

Diante desse contexto, esta pesquisa caracteriza-se como explicativa visto que surgiu de uma necessidade de identificar falhas em equipamentos rotativos para otimizar ganhos da empresa estudada.

3.2.2 Quanto ao objeto ou meios

No que tange aos objetivos ou meios a pesquisa, conforme Ubirajara (2013, p. 122), podem ser classificadas:

- ✓ **Documental**: quando são usadas fontes que não tiveram tratamento, este modelo auxilia o pesquisador a entender o estudo de caso;
- ✓ **Bibliográfica**: baseada em livros; artigos; publicações, ou seja, fontes que foram previamente elaboradas;
- ✓ **Pesquisa de Campo**: são os registros feitos a partir da análise realizada *in loco* e registradas em formulários, por exemplo;

- ✓ Observação do Participante: é feita uma interação com uma quantidade de pessoas por determinado período

Além desse enquadramento, vale citar à pesquisa experimental ou laboratorial, na qual se determina um objeto de estudo, selecionam as variáveis capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz (GIL, 2008, p. 51, *apud* UBIRAJARA, 2014, p. 49).

Desse modo é possível afirmar que o presente estudo caracteriza-se como pesquisa de campo, pois as informações, observações e coletas de dados foram feitas e extraídas na empresa estudada. E também se caracteriza como sendo bibliográfica, por utilizar-se de referências obtidas por meio de diversas fontes (livros e publicações científicas diversas).

3.2.3 Quanto ao tratamento dos dados

O tratamento ou abordagem de dados da pesquisa pode ser classificado em qualitativa, quantitativa ou ambos. Pelas Ubirajara (2014, p. 50), na pesquisa quantitativa “[...] estiverem presentes somente dados mensuráveis, perfis estatísticos, com ou sem cruzamentos de variáveis”. Ou seja, nesse caso requer recursos estatísticos. A pesquisa qualitativa compreende “[...] uma análise fenomenológica, de compreensão, de interpretação, do problema ou fenômeno, onde o sentimento, a paixão, o envolvimento afetivo é colocado nas entrevistas com os pesquisadores [...]”.

Entende-se, então, que a abordagem utilizada neste estudo de caso foi a **qualitativa** pois possui identificação numérica que expressam custos a partir dos resultados encontrados na pesquisa.

3.3 Instrumentos de Pesquisa

Para Lakatos e Marconi (1999, p. 100), é “[...] instrumento de coleta de dados constituído por uma série de perguntas, que devem ser respondidas por escrito.”

De acordo com Moresi (2003, p. 08) afirma que Pesquisa quantitativa “Considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las.”

As informações coletadas para elaboração deste trabalho foram produzidas por meio de um coletor analisador *Microlog* SKF GX 75, equipado com um acelerômetro de 100 mv/g e uma base magnética para fixação do acelerômetro nos pontos de coleta dos dados, além de informações do Sistema de Gestão de Manutenção da Unidade Votorantim Cimentos

(Laranjeiras/SE).

O coletor de dados e o *software* de análise foram essenciais para detecção de falhas em rolamentos de qualquer que fosse o fabricante sendo necessário apenas inserir as informações corretas para obter o cálculo das frequências.

3.4 Unidade, Universo e Amostra da Pesquisa

Esse relatório foi elaborado em uma empresa de fabricação de cimento, situada no estado de Sergipe (Votorantim Cimentos).

Na unidade pesquisada, são encontrados aproximadamente 1000 equipamentos rotativos, porém há aproximadamente 200 equipamentos com as mesmas características e que corresponde ao universo do estudo. A amostra da pesquisa se refere à análise realizada para apenas um (01) redutor.

3.5 Definição das Variáveis e Indicadores da Pesquisa

Entende-se por variável “[...] um valor ou uma propriedade (característica, por exemplo), que pode ser medida por meio de diferentes mecanismos operacionais que permitem verificar a relação/entre as características e fatores.” (GIL, 2009, p. 107 *apud* UBIRAJARA, 2014, p. 125).

No Quadro 2, estão descritas as variáveis e os indicadores abordados trabalho, as quais estão baseadas nos objetivos específicos.

Quadro 2 - Variáveis e indicadores da pesquisa

Variável	Indicadores
Realização de manutenção preditiva	Análise de Vibração
Determinar rotinas de monitoramento para encontrar falhas	Manutenção Preditiva
Corrigir a causa principal de cada falha em rolamento	Manutenção Corretiva Programada

Fonte: Autor da pesquisa (2019).

3.6 Plano de Registro e Análise dos Dados

Este trabalho foi desenvolvido a partir da técnica de análise de vibrações enfatizando o parâmetro de aceleração e a técnica de envelope, como mostra a Figura 4 o instrumento utilizado para a coleta foi o coletor analisador *Microlog SKFGX75* equipado com um acelerômetro de 100mv/g e uma base magnética para fixação do acelerômetro nos pontos de coleta dos dados. Embora o coletor de dados e o software de análise sejam do fabricante SKF

é possível detectar falhas em rolamentos de qualquer que seja o fabricante sendo necessário apenas inserir as informações corretas para que seja feito o cálculo das frequências independente de quem seja o fabricante do rolamento.

Para análise dos dados coletados foi utilizado o software *@ptitude Analyst* versão 9 da SKF, para transferência de dados do coletor para o software foi o *Thin Client Transfer* da SKF (Figura 8), foi utilizado também alguns equipamentos da linha de produção da fábrica como, redutores, ventiladores, motores, mancais.

Figura 8 – Coletor analisador *Microlog* SKF GX 75



Fonte: Pesquisa de campo (2019)

Por meio de revisão da literatura e a partir das técnicas apresentadas, foi possível obter as informações e então elaborar sugestões de melhorias para unidade estudada. Os dados coletados foram organizados no editor de texto *Microsoft Word*, de forma clara e organizada, além disso, também foram utilizadas planilhas eletrônicas no *Microsoft Excel*.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Essa seção apresentará as informações coletadas e resultados alcançados por meio de levantamentos de pesquisa, onde foi feita uma análise com base nos objetivos propostos para alcance do êxito deste relatório.

4.1 Aplicação de Técnicas Preditivas para Reduzir Custos (Análise de Vibração)

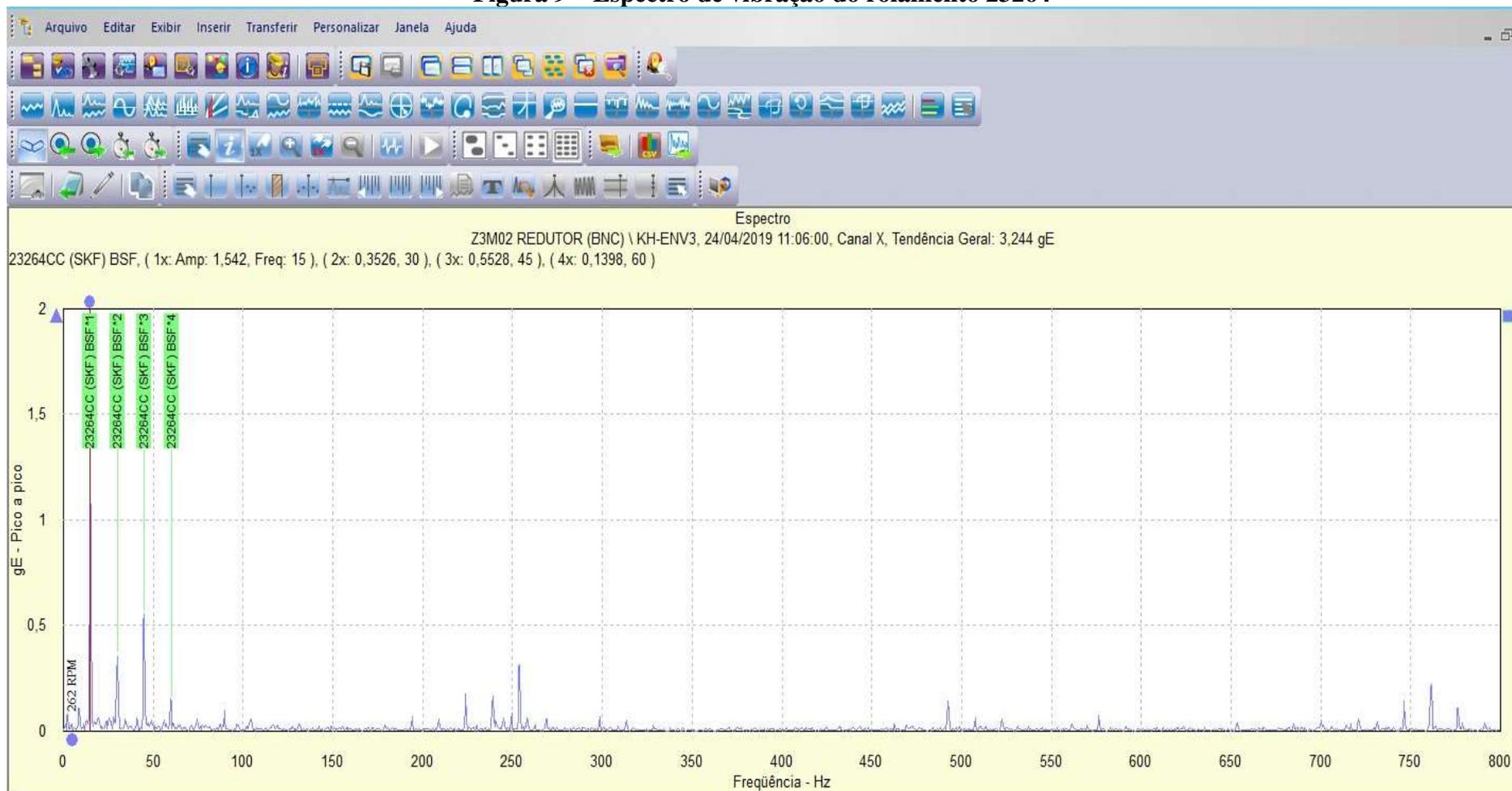
A busca de novas técnicas e tecnologias para ajudar a reduzir esses custos essa busca é constante. Uma das técnicas e alternativas é a manutenção por meio da análise de vibração. Atualmente, as empresas no segmento da indústria enfrentam muitos desafios quando o assunto é: redução de custos de manutenção, aumento do tempo de operação das máquinas, mão de obra enxuta com objetivo de reduzir custos de produção e de transação e tudo isso com objetivo de tornar estes produtos/serviços mais competitivos no mercado.

Baseado nas informações acima evidencia que a análise de vibração aplicada à gestão da manutenção trouxe excelentes resultados à empresa na qual sugerimos a técnica.

4.1.1 Moinho - Redutor de Velocidade

Um dos equipamentos rotativos que faz parte do processo produtivo em uma fábrica de cimento é o moinho e o mesmo contém um redutor de velocidade, foi detectado utilizando análise de vibração, frequência de passagem do elemento rolante do rolamento 23264 da SKF localizado no primeiro intermediário direito, conforme ilustrado na Figura 5 ilustra a frequência de 15 Hz e três harmônicas da frequência portadora oriunda da falha do elemento rolante, logo após abertura das tampas de inspeção foi evidenciado uma falha no contato entre o elemento rolante e as pistas do rolamento.

Figura 9 – Espectro de vibração do rolamento 23264



Fonte: Autor da pesquisa (2019)

A Figura 10 ilustra a falha produzida por um desnivelamento da base no lado direito do redutor forçava que a carga aplicada ao rolamento não ficasse perfeitamente distribuída nos rolos, deslocando-se para um dos lados e ocasionasse um desgaste não uniforme no elemento rolante do rolamento.

Figura 10 – Evidência da falha no elemento rolante



Fonte: Pesquisa de campo (2019).

A técnica utilizada para detectar essa falha foi à análise de vibração por meio do parâmetro de aceleração e da análise de envelope de aceleração. Sendo assim, evidenciou-se que a frequência encontrada na máquina é de alguma parte do rolamento ou de outros componentes, o eixo em que o rolamento é montado opera em com rotação constante de 262 RPM a rotação constante facilita da identificação da frequência e diagnóstico da falha.

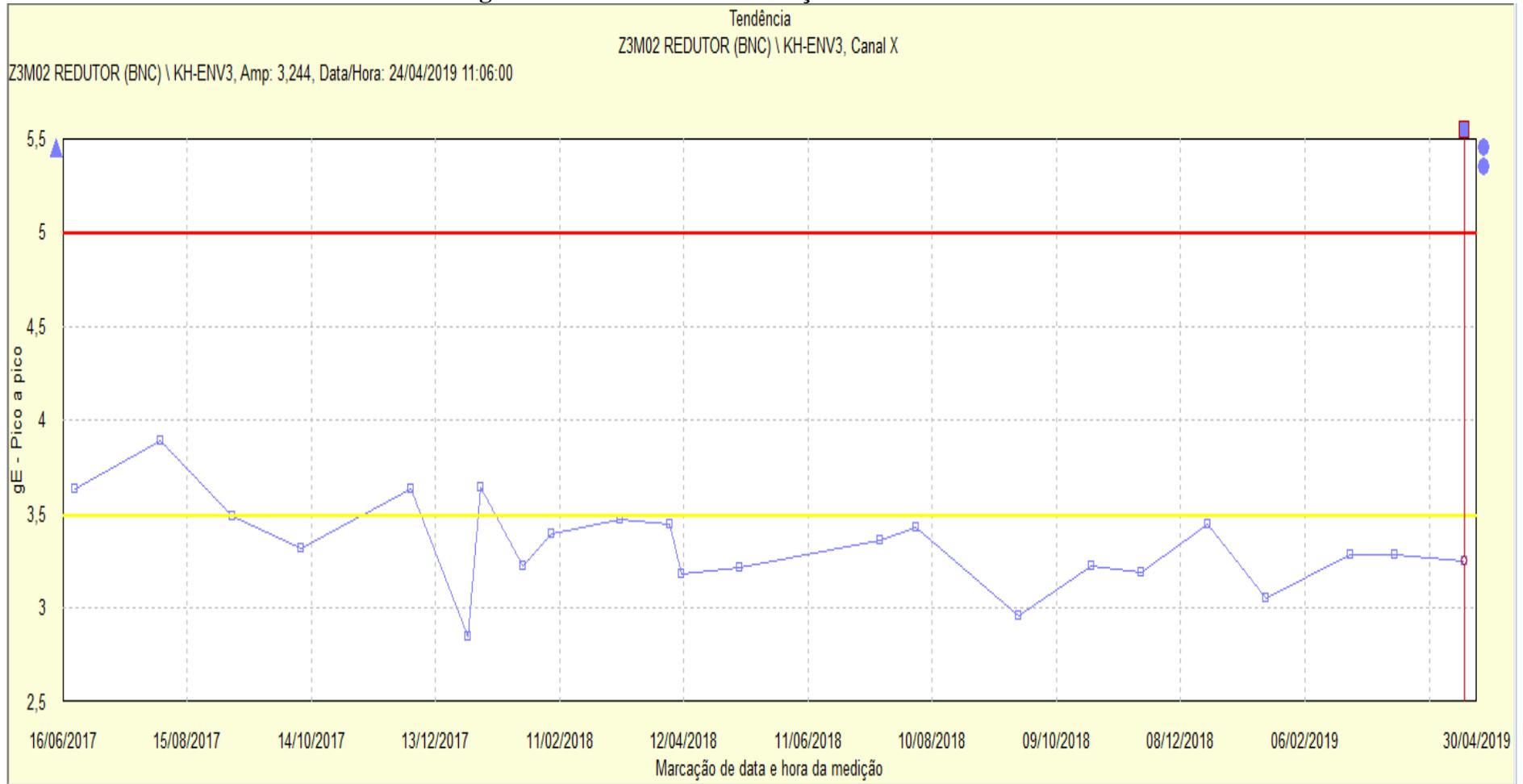
Pela imagem do gráfico de tendência mostrado na Figura 7 há evidencia que o problema existente não tem evolução durante o tempo oferecendo a oportunidade de não ser preciso fazer a substituição do rolamento e não comprometendo o funcionamento da máquina precisando apenas que seja realizado um acompanhamento com coletas de dados quinzenais aumentando o tempo de vida útil do componente.

De acordo com o Mesquita *et al.* (2004), os resultados numéricos obtidos satisfizeram

os objetivos do trabalho, uma vez que a condição de falha introduzida no rolamento foi identificada pelas três técnicas utilizadas. Nesse estudo, a análise de Envelope conseguiu identificar as componentes em frequência das falhas, tanto na condição de pista estacionária quanto na de pista girando, esta última provocando uma modulação em amplitude no sinal do defeito.

Ao comparar os resultados com o trabalho desenvolvido por Michalak (2004), os resultados deste estudo foram mais rentáveis.

Figura 11 – Tendência de vibração do rolamento 23264



Fonte: autor da pesquisa (2019)

4.1.2 Ventilador (Manutenção Corretiva programada)

Durante o *startup* do forno rotativo de produção de clínquer foi seguido o padrão em comissionamento de linhas de produção e realizados vários testes nos equipamentos que sofreram intervenções mecânicas e um dos ventiladores do resfriador de clínquer apresentou uma vibração acima do permitido para a integridade da máquina, a partir desse problema foi realizado várias inspeções, testes e auditorias nos parâmetros de ajustes que foram deixados após a intervenção no equipamento.

O ventilador possui a rotação variável com no máximo 1800 rpm cada vez que era solicitado o aumento da rotação do ventilador a amplitude de vibração no rolamento do mancal LA aumentava, com uma auditoria não foi possível encontrar a folga de ajuste deixada no rolamento, as condições de alinhamento estavam dentro do especificado para o equipamento e não foi escrito na ordem qual o torque usado para aperto das tampas dos mancais, fazendo o cadastro do rolamento utilizado na máquina no *software @plitude Analyst*, selecionado a rotação de 66,7%, equivalente a 1200 rpm, que era a rotação de trabalho do ventilado no momento em que foi feito a coleta de vibração foi diagnosticado uma falha na pista externa do rolamento 22222 EKC3 rolamento utilizado no mancal LA do ventilador.

Conforme ilustrado nas Figuras 8 e 9 a pista externa do rolamento 22222 EKC3 apresenta uma trinca de onde originava a vibração no mancal LA do ventilador impossibilitando seu perfeito funcionamento, após abertura do mancal foi evidenciado a falha na pista externa do rolamento, oriunda de um possível aperto exagerado da bucha cônica de ajuste de folga, fazendo com que na partida viesse a trincar a pista externa do rolamento.

Figura 12 – Pista externa do rolamento trincada.



Fonte: Autor da pesquisa (2019)

Figura 13 – Ampliação da figura 12



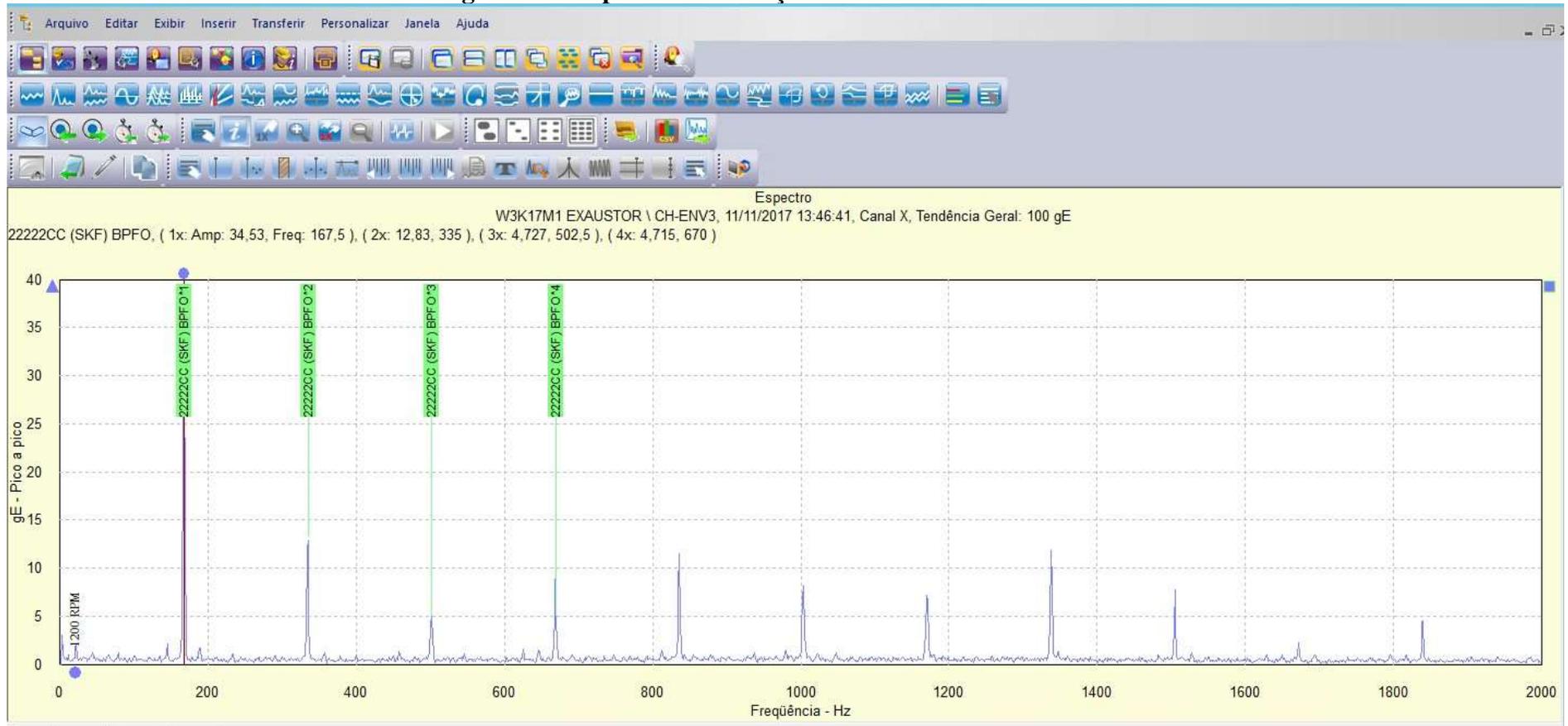
Fonte: Autor da pesquisa (2019).

O espectro mostrado na Figura 10 evidencia a frequência de 167,5 Hz com os demais harmônicos, oriunda da falha da pista externa do rolamento, mostrando mais uma vez a assertividade e importância da utilização da análise de vibração na estratégia de manutenção para obter confiabilidade nas linhas de produção.

Após o diagnóstico da falha foi realizada a substituição do rolamento danificado foi posto o ventilador pra rodar e constatado que a única fonte de vibração era mesmo o rolamento, com a manutenção realizada foi liberado o forno pra operar sem atraso do prazo estabelecido.

O relatório técnico elaborado pela Michalak (2004) identificou perda evitada no valor de R\$ 81.250,00 (oitenta e um mil, duzentos e cinquenta reais), o que infere que melhor resultados obtidos neste estudo, com perda evitada de R\$ 1.097.000,00 (um milhão e noventa e sete mil reais). Vale registrar que, de acordo com os dados comparativos há uma diferença de R\$ 1.015.500,00 (um milhão e quinze mil, quinhentos reais) considerando os resultados obtidos nesta pesquisa como mais rentáveis para uma fábrica de cimentos.

Figura 14 – Espectro de vibração do rolamento 22222 EKC3



Fonte: Autor da pesquisa (2019).

4.1.3 Forno - Motor (Análise de Vibração)

Por meio do monitoramento periódico de vibração no Motor de acionamento principal do forno rotativo de produção de clínquer foi encontrada frequência de pista externa (BPFO) no rolamento 6324, apresentado na Figura 8, rolamento dianteiro do motor, porém, com amplitude baixa dentro do tolerável para o equipamento.

O equipamento trabalha podendo variar a rotação de acordo com a produtividade que lhe seja exigida no momento, essa é uma condição que dificulta o diagnóstico pelo fato de que as frequências estejam relacionadas com a rotação da máquina. Após 9 meses operando com essa condição os níveis de vibração aumentaram abruptamente e em uma parada programada da máquina foi solicitado a substituição do rolamento do motor ao abrir foi evidenciado a falha encontrada por meio da análise de vibração.

Logo no início da falha foi solicitada a compra do rolamento e armazenado no almoxarifado aguardando a melhor data para a intervenção.

O defeito encontrado foi proveniente de uma fuga de corrente do motor elétrico devido a um mau aterramento do motor e deficiência das escovas que se encontravam contaminadas por sujeira agravando o problema.

Conforme ilustrado nas Figuras 16 e 17 as marcas da passagem do elemento rolante pela pista externa do rolamento, a característica da falha é passagem de corrente elétrica para o rolamento ocasionada por mal aterramento e falha nas escovas do mesmo. Durante a substituição do rolamento foi refeito todo o sistema de aterramento do motor e a limpeza das escovas que contribuíram para a mal isolamento elétrico.

Figura 16 – Rolamento 6324 retirado do motor



Fonte: Autor da pesquisa (2019).

Figura 17 – Ampliação da figura 11



Fonte: Autor da pesquisa (2019).

Evidencia-se, então que o defeito da pista externa de um rolamento do motor de acionamento principal do forno, proveniente a corrente parasita (fuga corrente) tal condição ocorre devido ao mau aterramento, o que se confirma com Teixeira (2017), em seu estudo referente à falha de rolamentos de uma bomba de polpa em uma fábrica de ouro, descreve com as mesmas características a condição trazida neste trabalho.

4.2 Verificar rotinas de monitoramento para encontrar falhas (Manutenção Preditiva)

A manutenção preditiva também é conhecida como manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento. É baseada na tentativa de definir o estado futuro de um equipamento ou sistema, por meio dos dados coletados ao longo do tempo por uma instrumentação específica, verificando e analisando a tendência de variáveis do equipamento.

Esses dados coletados, por meio de medições em campo como temperatura, vibração, análise físico-química de óleos, ultrassom e termografia, permitem um diagnóstico preciso.

Esse tipo de manutenção caracteriza-se pela previsibilidade da deterioração do equipamento, prevenindo falhas por meio do monitoramento dos parâmetros principais, com o equipamento em funcionamento.

Baseada na referida ferramenta de extrema importância evidenciamos que a

manutenção preditiva aplicada a gestão de manutenção do grupo Votorantim Cimentos, trouxe resultados em perdas evitadas.

4.3 Correção da Causa Principal de Cada Falha em Rolamento (Manutenção Corretiva Programada)

Entende-se então que a manutenção corretiva programada é uma ferramenta eficaz dentro da gestão da manutenção com o objetivo de eliminar a causa principal de cada falha em equipamentos rotativos.

O quadro abaixo retrata o quanto um bom monitoramento de análise de vibrações consegue reduzir os custos de manutenção e gerar lucro para as empresas. O quadro se refere a análise feita para o redutor caso não tivesse sido encontrado a falha no rolamento por meio da análise de vibrações e o equipamento viesse a parar para uma manutenção corretiva oriundo dessa falha no rolamento.

Não foi levado em consideração o recurso consumido de mecânicos (HH) nos três dias necessários para realizar essa manutenção e nem outros equipamentos que seriam usados para a manutenção no redutor.

Quadro 1 – Total médio gasto se houvesse uma corretiva.

Produção Nominal	Tempo de Operação	Preço do Cimento	Tempo de Intervenção	Valor do Rolamento	Total
105 tn/h	20 h/dia	170,00 R\$/tn	72 h	R\$26.000,00	R\$1.097.000,00

Fonte: Autor da pesquisa (2019).

Conforme os valores obtidos acima pode-se ver as vantagens de uma ótima intervenção no momento certo e conforme laudo preditivo. Os dados acima foram extraídos dos sistemas SAP (Sistema de Gesta Empresarial) de propriedade Votorantim Cimentos.

Com a correção da causa principal que originou o início na falha no rolamento foi gasto apenas o valor correspondente ao preço do rolamento, uma economia de **R\$ 1.097.000,00** (hum milhão e noventa e sete mil reais) para orçamento anual da empresa.

Diante desses resultados, pode-se reafirmar a importância da manutenção baseada na condição para diminuir custos, evitar mão de obras corretivas e paradas desnecessárias do processo. Um sistema de análise de vibrações pode minimizar o número de quebras de todos os equipamentos mecânicos de uma planta industrial e assegurar que os equipamentos

reparados estejam em condições mecânicas aceitáveis.

Pode-se então, identificar problemas mecânicos antes que se tornem mais sérios, já que a maioria dos problemas mecânicos pode ser minimizada se detectados com antecedência.

Como as empresas estão buscando cada vez mais meios para diminuir o custo de produção de seus produtos, a cada dia uma nova área é sacrificada a reduzir seus custos, a manutenção esta entre os maiores custos e esta interfere diretamente o processo. E a preditiva como uma das suas ferramentas para análise de vibração evidencia que, ao ser bem utilizada trará excelentes resultados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As saídas de um programa de manutenção preditiva são basicamente dadas, até que sejam tomadas medidas para resolver os desvios ou problemas revelados pelo programa, o desempenho da planta não pode ser melhorado.

Uma filosofia de gestão deve estar comprometida com a melhoria da planta antes de qualquer benefício significativo pode ser atingido.

Sem o compromisso absoluto e apoio da alta administração e além da plena cooperação de todos os integrantes da planta, um programa de manutenção preditiva não pode fornecer os meios para resolver o mau desempenho da planta, no entanto, quando utilizado corretamente, a manutenção preditiva pode identificar a maioria, fatores que limitam a eficiência da planta total.

Um dos grandes desafios da análise de vibração está em saber o que procurar, para que seja enviado um diagnóstico correto é preciso medir a capacidade de correlacionar os resultados encontrados com os mecanismos de falhas já conhecido. Neste estudo foram enfatizados padrões conhecidos de métodos e técnicas para encontrar falhas em rolamentos por meio da análise de vibrações.

As vibrações nos rolamentos foram observadas seguindo conceitos fundamentais, levando em conta as respostas dinâmicas que eram dadas pelos rolamentos aos esforços neles aplicados e aos danos neles encontrados, ruído externo, vibração, interação dos componentes dinâmicos existentes na máquina e outros. Com isso é percebido que estes fatores desempenham os papéis mais importantes na detecção, diagnóstico e prognóstico de danos em rolamentos.

As vibrações que resultam em falhas clássicas estão relativamente bem entendidas e as frequências características que podem ser encontradas em rolamentos foram discutidas em detalhes.

Também foram apresentados alguns parâmetros que devem ser observados na análise para o diagnóstico e quais são as principais informações que devem ser cadastradas nos softwares para ajuda nas análises.

Pode-se inferir, então, que as aplicações baseadas nas ferramentas acima foram alcançadas com êxito, a redução de custo em uma fábrica de cimento e a correção da causa principal das falhas esta demonstrada de forma clara por meio dos resultados obtidos, bem

como a apresentação de uma técnica de inspeção sem parar a máquina e a definição de rotinas de monitoramento de vibração por meio da manutenção preditiva e que as técnicas aplicadas podem ser difundidas para toda fábrica que não há um programa de gestão de manutenção consolidado nestes pilares sugeridos neste estudo.

Por fim, sugere-se que a manutenção corretiva programada exerça papel de extrema importância na gestão da manutenção e que componha as reuniões de programação, pois refletirão resultados positivos como um dos indicadores mais importantes dentro do universo da manutenção industrial.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. T.; ALMEIDA, F. V.R. **Relatório de consultoria em análise de vibrações**. Empresa Mahle/Cofap. Itajubá, Dezembro 2003.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por líquidos penetrantes**. ABENDE Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos. São Paulo, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5462: **Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- BRANCO FILHO, GIL, **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**, 1a.ed., Ed. Ciência Moderna, 2008.
- COMO calcular disponibilidade de equipamentos industriais? Disponível em: <https://engeteles.com.br/como-calcular-disponibilidade/>. Acesso em: 31 maio 2020.
- DIMAROGONAS, A. D.; HADDAD, S. **Vibration for engineers**. Prentice Hall, New Jersey, 1992, 749 p.
- KARDEC, A.; NASSIF, J. **Manutenção preditiva: fator de sucesso na gestão empresarial**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014.
- MESQUITA, A. L. A. *et al.* **Identificação de modos operacionais e naturais de vibração em máquinas rotativas utilizando coordenadas complexas**. Campinas, SP: [s.n.], 2004.
- MICHALAK, E. J. **Detecção de falha em compressor de parafuso através da análise de vibrações**. Cidade: Preditec Engenharia de Manutenção, 2004
- MONCHY, François. **A Função Manutenção**. São Paulo: Durban, 1987.
- NICHTERWITZ, M. P. **Estudo comparativo entre os métodos do valor de pico (Peakvue) e da demodulação de sinais de vibração (Envelope) na previsão de falhas em rolamentos**. Porto Alegre-RS: Universidade Federal do Rio grande do Sul, 2013.
- OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão de manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. Revista Gestão Industrial. v. 04, 2008.p.4 Disponível em: <http://www.pg.cefetpr.br>. Acesso em: 17 set. 2019
- RAO, B. K. N. **Handbook of Condition Monitoring**. Oxford: Elsevier, 1996
- SANTANDER, E. J. O. **Aplicação de curtose espectral na identificação de falhas em mancais de rolamento**. Rio de Janeiro-RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- SANTOS, RODOLFO DE SOUSA, **Detecção de falhas em rolamentos de maquinas rotativas utilizando processamento de sinais**. Unesp, Guaratinguetá-SP, 2017.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 2002.
- SMITH, W.A.; RANDALL, R.B. **Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: A benchmark study**. Mechanical Systems and Signal

Processing, v. 64, p. 100-131, 2015.

TANDON, N., CHOUDHURY, A., 1999, A review of vibration and acoustic measurement methods for detection of defects in rolling element bearings, **Tribology International**, n.32, pág 469-480.

ZEN, Milton Augusto Galvão. **Indicadores de manutenção**. Disponível <https://www.magzen.com.br/single-post/2016/08/25/Indicadores-de-Manuten%C3%A7%C3%A3o>: . Acesso em: 15 set. 2019.