

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE APLICADA A MANUTENÇÃO**

**GABRIEL MILANI JUNIOR**

**ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES EM EXAUSTORES DE FORNOS DE  
FÁBRICA DE CIMENTO PARA IDENTIFICAR SEUS MODOS DE  
FALHA**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2012**

**GABRIEL MILANI JUNIOR**

**ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES EM EXAUSTORES DE FORNOS DE  
FÁBRICA DE CIMENTO PARA IDENTIFICAR SEUS MODOS DE  
FALHA**

Trabalho de Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Marcelo Rodrigues

**CURITIBA**

**2012**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado toda inspiração necessária para realização do curso e execução desta monografia.

Agradeço o Professor Msc. Marcelo Rodrigues pela sua dedicação e pela orientação desta pesquisa e, por meio dele, eu me reporto a toda equipe do programa de pós-graduação do departamento acadêmico de eletrotécnica, especificamente do curso de engenharia de confiabilidade aplicada à manutenção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pelo apoio incondicional.

Agradeço a Professora Dra. Faimara do Rocio Strauhs pela orientação inicial desta pesquisa.

Agradeço aos pesquisadores e professores da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas a este estudo.

Gostaria de deixar registrado também, o meu sincero reconhecimento à minha esposa Simone Fernandes Milani, pois creio que sem o apoio, carinho e amor dela, seria difícil vencer esse desafio. Agradeço, também, à minha filha Aline Fernandes Milani, pelo apoio e compreensão.

## RESUMO

JUNIOR, Gabriel Milani. **Análise das Vibrações em Exaustores de Fornos de Fábrica de Cimento para Identificar seus Modos de Falha**. 2012. 52 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Confiabilidade Aplicada a Manutenção) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Por intermédio da análise dos espectros de vibrações, realizada em um exaustor de forno de fábrica de cimento, pretende-se identificar os modos de falha do mesmo. Após a identificação dos modos de falha do exaustor, pretende-se utilizá-los para implantação de etapas da metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, onde tem-se como objetivo geral desta monografia, elencar as causas raízes de cada modo de falha identificado. Em função disto, pretende-se também, tomar e propor ações preventivas e preditivas para mitigar as causas raízes dos principais modos de falha identificados. O objeto de estudo e técnicas de apreensão apresentados nesta monografia, são de uma pesquisa em campo. Dados reais são provenientes de históricos de uma empresa cimenteira, localizada na Região Metropolitana de Curitiba. A pesquisa é de natureza científica aplicada e seus propósitos são descritivos e explicativos. O resultado deste estudo poderá ser utilizado para reestruturação do plano de manutenção existente, ou seja, melhorar as tarefas de manutenção preventiva, a periodicidade com que estas devam ser realizadas, bem como, inserir novas técnicas de inspeção preditiva, além da análise de vibração.

**Palavras-chave:** Análise de vibração. Exaustor. Modos de falha. Manutenção Centrada em Confiabilidade. Causas raízes. Ações preventivas e preditivas. Plano de manutenção.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>5</b>
1.1 TEMA	5
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	6
1.3 PROBLEMA E PREMISSAS	6
1.4 OBJETIVOS	7
1.4.1 Objetivo Geral	7
1.4.2 Objetivos Específicos	7
1.5 JUSTIFICATIVA	8
1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	8
1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO	9
1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO	9
<b>2 FUNDAMENTOS DE VIBRAÇÃO</b>	<b>11</b>
2.1 VIBRAÇÕES MECÂNICAS	12
2.2 MOVIMENTO HARMÔNICO	13
2.3 ANÁLISE ESPECTRAL	17
2.4 FREQUÊNCIA DE ROTAÇÃO	18
2.5 FREQUÊNCIA DE ENGRENAMENTO	19
2.6 DESBALANCEAMENTO DE MASSA	21
2.7 DESALINHAMENTO ENTRE EIXOS	23
2.8 FOLGAS MECÂNICAS	25
2.9 DEFEITOS EM ROLAMENTOS	26
<b>3 ESTRUTURA DOS DADOS DA PESQUISA</b>	<b>28</b>
3.1 O EXAUSTOR E O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO	28
3.2 DADOS TÉCNICOS	31
3.3 COLETOR E ANALISADOR DE VIBRAÇÕES	32
3.4 GRANDEZAS DAS VIBRAÇÕES MECÂNICAS	33
3.5 PONTOS DE MEDIÇÕES OU DE COLETAS DE VIBRAÇÕES	35
3.6 CONFIGURAÇÃO DA ESTRUTURA DOS DADOS	37
3.7 NÍVEIS DE ALARMES GLOBAIS DE VIBRAÇÃO	37
<b>4 DESCRIÇÃO DA PESQUISA</b>	<b>39</b>
<b>5 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE</b>	<b>47</b>
5.1 METODOLOGIA MCC	47
5.2 METODOLOGIA FMEA	48
5.3 FUNÇÕES E PADRÕES DE DESEMPENHO	50
5.4 FALHAS FUNCIONAIS	51
5.5 MODOS DE FALHA	51
5.6 EFEITOS DA FALHA	52
5.7 CONSEQUÊNCIAS DA FALHA	52
5.8 SELEÇÃO DAS TAREFAS DE MANUTENÇÃO	54
<b>6 APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE</b>	<b>58</b>
6.1 ADEQUAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE	58
6.2 PREPARAÇÃO	58
6.3 SELEÇÃO DO SISTEMA E COLETA DE INFORMAÇÕES	59
6.4 CONSTRUÇÃO DO FMCA	61
6.5 SELEÇÃO DAS FUNÇÕES SIGNIFICANTES E CLASSIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA	61
6.6 SELEÇÃO DAS TAREFAS DE MANUTENÇÃO APLICÁVEIS	61

6.7 DEFINIÇÃO DOS INTERVALOS INICIAIS E AGRUPAMENTOS DE TAREFAS .....	61
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este primeiro capítulo apresenta a estrutura da monografia. Estrutura que contém o objetivo e os resultados pretendidos mediante sua aplicação, os problemas a serem levantados e tratados, os motivos pelos quais a pesquisa é realizada e os procedimentos que serão utilizados, bem como, o cronograma que apresenta como a monografia deve ser conduzida.

### 1.1 TEMA

O cimento é o principal material de construção, ou seja, é um insumo básico da indústria de construção. É usado como aglomerante e utilizado em larga escala na produção de habitações, infra-estrutura, estradas, pontes, saneamento, hidrelétricas, entre outras aplicações. (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2010).

A indústria cimenteira é conhecida pela grande utilização de capital, onde a produção exige grandes investimentos iniciais, bem como, tecnologias inovadoras e constantes. A viabilidade econômica do investimento está ligada a níveis de produção elevados, o que se faz necessário à produção de cimento, um grande mercado consumidor. Também, o cimento é um produto ainda sem um substituto direto (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2010).

Em relação aos dados de mercado de cimento, houve em 2010 um aumento de toda a cadeia produtiva da construção civil. Aumento este impulsionado, principalmente, pelo aumento do crédito imobiliário das obras de infra-estrutura e dos programas governamentais, como Minha Casa, Minha Vida e o Programa de Aceleração do Crescimento (CAUÊ CIMENTOS, 2011).

Outros indicadores de fortalecimento da indústria de cimento, no Brasil, é o crescimento da massa salarial e do produto interno bruto da construção civil, causando impacto direto na demanda do produto. A aceleração da demanda, por sua vez, elevou o nível de utilização da capacidade instalada das empresas do setor e com base nisso, serão realizados vários investimentos, tanto para ampliações como para construções de novas fábricas de cimento (CAUÊ CIMENTOS, 2011).

Para 2012, o cenário mantém-se promissor. O crescimento da renda média da população deve continuar aumentando, assim como a disponibilidade do crédito para pessoa física e a forte retomada dos investidores da área da construção civil. Logo, tudo isso leva ao acréscimo da demanda por cimento (CAUÊ CIMENTOS, 2011).

Em função do quadro exposto, da demanda do cimento, e indispensável que as indústrias cimenteiras, adotem um sistema de manutenção de máquinas e equipamentos da área produtiva, mais eficaz, que diminua a parada de produção por quebra e que aumente a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos para o processo produtivo. A manutenção de máquinas na indústria cimenteira será o cerne deste estudo.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

As indústrias cimenteiras necessitam de um plano de manutenção que contemple, não só as manutenções preventivas adequadas, mas principalmente as manutenções preditivas.

Neste estudo, será abordada a técnica preditiva da análise de vibração, aplicada em exaustores de fornos de fábricas de cimento. A aplicação desta possibilita identificar os modos de falha dos exaustores e com base nas suas condições reais de funcionamento, monitorá-los e no caso de uma intervenção, reparar ou trocar apenas o componente que apresenta falha. Também, utilizar os modos de falha identificados para implantação de etapas da metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade. O exaustor em estudo é proveniente de uma empresa cimenteira, localizada na Região Metropolitana de Curitiba.

## 1.3 PROBLEMA E PREMISSAS

A manutenção é uma área estratégica dentro das indústrias, responsável pela disponibilidade dos equipamentos e instalações. “Entender cada tipo de manutenção e aplicar a mais adequada, é o fator de otimização da atividade e lucro ou sobrevivência para a empresa” (TECÉM TECNOLOGIA EMPRESARIAL, 2009).



A falta ou a ineficácia de um planejamento de manutenção nas empresas continua sendo um problema visível. Parte dos departamentos de manutenção industrial não pratica funções como: o planejamento e a programação de serviços, programas de manutenção preventiva e preditiva, classificação e criticidade dos equipamentos para o processo fabril, pois priorizam as demandas urgentes do setor produtivo e tem boa parte de seus planos de orçamento cortados.

Para os exaustores de fornos de fábricas de cimento, o problema está na falta ou na escolha inadequada de uma técnica que identifique os seus reais modos de falha, bem como, uma metodologia adequada que permita levantar e tratar as causas raízes dos modos de falha identificados.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta monografia é identificar as causas raízes dos modos de falha de exaustores de fornos de fábricas de cimento, a partir da análise dos espectros de vibrações.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo geral proposto, são apresentados os seguintes objetivos específicos:

- a) descrever os fundamentos teóricos característicos para a análise de vibrações;
- b) utilizar programa e coletor para a análise de vibrações;
- c) configurar a estrutura dos dados necessários no programa de análise de vibrações;
- d) mapear os pontos de coleta de vibrações dos exaustores;
- e) identificar os modos de falha dos exaustores, mediante análises dos espectros de vibrações;
- f) utilizar os valores de vibrações coletados e armazenados, para futuras implementações de dados de confiabilidade dos exaustores;

- g) utilizar a metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, para levantar e tratar as causas raízes dos modos de falha identificados;
- h) propor ações para mitigar as causas raízes dos principais modos de falha identificados.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

O exaustor de forno em estudo é proveniente de uma empresa cimenteira, localizada na Região Metropolitana de Curitiba. A política de manutenção para o exaustor, adotada pela empresa, até meados do ano de 2002, consistia apenas na manutenção preventiva, realizada semestralmente, juntamente com a parada geral do forno. Os serviços realizados eram inspeções nos mancais de rolamento, para detectar defeitos e folgas nos rolamentos e caixas de mancal do exaustor. Também verificação do alinhamento dos eixos ou acoplamentos, bem como, inspeção no rotor do exaustor. Apesar das inspeções realizadas, houve casos de quebras de componentes do exaustor, principalmente do rolamento do mancal do lado do acionamento, provocando parada no processo. Em função do histórico de falhas do exaustor e conseqüente parada do sistema e alto custo de manutenção corretiva, decidiu-se implantar no ano de 2002, a manutenção preditiva, especificamente a análise das vibrações, com a finalidade de identificar e tratar os modos de falha do exaustor. Com isso eliminando as inspeções dos mancais de rolamento e verificação do alinhamento entre eixos. Serviços que possibilitava inserir um problema nos componentes, já que consistia na desmontagem e montagem dos componentes para inspecioná-los.

## 1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa deste estudo é de natureza científica aplicada, conforme classificação do Manual Frascati (apud AGUIAR, 1991, p.10).

Quanto aos seus propósitos são descritivos e explicativos, conforme Medeiros (2003, p.42). Isso ocorre em função da pesquisa conter dados reais e provenientes de históricos de uma empresa cimenteira, localizada na região

metropolitana de Curitiba, que serão estudados, analisados, registrados, interpretados e suas causas identificadas.

O objeto de estudo apresentado nesta monografia pode ser classificado como de campo, pois possibilita a observação de fatos ocorridos dentro de uma planta fabril, conforme Oliveira (1999, p.124).

## 1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

Por intermédio de pesquisa bibliográfica, esta monografia está fundamentada em algumas referências. Referências que tratam diretamente do objetivo geral proposto, que é identificar as causas raízes dos modos de falha de exaustores de fornos de fábricas de cimento, a partir da análise dos espectros de vibrações, que são dadas por Moubray (2000), Rigoni (2009), Siqueira (2005), Almeida (1990), Baroni (2002), Nascif (2002) e Kardec (2002).

Outra referência importante é a Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria (Fupai), que promove treinamentos direcionados para a análise de vibrações e é a entidade no Brasil, que qualifica profissionais na área de análise de vibrações.

## 1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos nesta monografia, serão trabalhados sete capítulos que são apresentados a seguir:

O capítulo 1 é o capítulo introdutório. Neste capítulo são mencionados os objetivos propostos da monografia, suas justificativas, seu objeto de estudo e técnicas de apreensão, bem como a metodologia a ser utilizada.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação bibliográfica, referente à análise de vibrações, onde detalha-se as técnicas utilizadas para a aplicação deste tipo de manutenção preditiva.

O capítulo 3 mostra como configurar a estrutura dos dados necessários para a análise de vibrações em exaustores de fornos de fábricas de cimento, em um programa específico. Apresenta o mapeamento de todos os pontos de coleta de vibrações, necessários para a análise de vibrações em exaustores de fornos de

fábricas de cimento, bem como os dados técnicos dos exaustores e também o tipo de coletor e analisador de vibrações utilizado.

O capítulo 4 tem como objetivo, apresentar a descrição da pesquisa, mostrando os valores de vibrações coletados em campo, bem como os modos de falha dos exaustores de fornos de fábricas de cimento, mediante análises dos espectros de vibrações.

O capítulo 5 apresenta a fundamentação bibliográfica, referente à metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, onde detalha-se as etapas de implantação.

O capítulo 6 mostra a aplicação da metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, para os exaustores de fornos de fábrica de cimento, onde serão utilizados os modos de falha, identificados por intermédio do monitoramento das vibrações e de suas respectivas análises.

O capítulo 7 mostra as conclusões deste estudo. Após este, constam os elementos pós-textuais, como as referências e os apêndices.

## 2 FUNDAMENTOS DE VIBRAÇÃO

Este segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica, referente à análise de vibrações, onde será aplicada para analisar vibrações em exaustores de fornos de fábrica de cimento, com a finalidade de identificar seus modos de falha.

Por meio da medição e análise das vibrações dos exaustores, podem-se obter os seguintes benefícios, segundo Almeida (1990):

- a) determinar antecipadamente, a necessidade de serviço de manutenção em um componente específico dos exaustores;
- b) eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção;
- c) aumentar o tempo de disponibilidade dos exaustores;
- d) aumentar a confiabilidade dos exaustores e da linha de produção;
- e) reduzir o trabalho de emergência ou a manutenção corretiva não planejada;
- f) impedir o aumento dos danos nos exaustores;
- g) aproveitar a vida útil total dos componentes dos exaustores;
- h) melhorar o planejamento e a programação das manutenções, em acordo com o processo produtivo;
- i) reduzir custos de manutenção;
- j) aumentar a produtividade e lucratividade;
- k) reduzir estoques de peças sobressalentes.

Com base nas condições reais de funcionamento dos exaustores, têm-se como resultados, a possibilidade de monitorar e aumentar a vida útil dos componentes dos mesmos, bem como, programar e planejar uma intervenção inteligente, isto é, intervir apenas no componente que apresenta falha.

O acompanhamento e a análise de vibração tornaram-se um dos mais importantes métodos de predição em vários tipos de indústrias. A maior ênfase de acompanhamento da vibração está concentrada nos equipamentos rotativos, para os quais tanto a metodologia de análise, quanto os aparelhos, além de programas de apoio e sistemas especialistas, se encontra num estágio bastante avançado (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002, p. 190).

A vibração está presente em qualquer sistema à medida que este responde a uma excitação. “Isso é válido para um eixo de compressor, asa de um avião em vôo, as molas de um vagão de trem, ou ainda uma estrutura sujeita à ação do vento” (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002, p. 190).

## 2.1 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

A vibração é uma oscilação em torno de uma posição de referência. Ela é um fenômeno cotidiano. Nós a encontramos em nossas casas, durante as viagens e no trabalho. A vibração é frequentemente um processo destrutivo, ocasionando falhas nos elementos de máquinas por fadiga (Fupai, 2000).

O movimento vibratório de uma máquina é o resultado das forças dinâmicas que a excitam. Essa vibração se propaga por todas as partes da máquina, bem como para as estruturas interligadas a ela. Geralmente uma máquina vibra em várias frequências e amplitudes correspondentes. Os efeitos de uma vibração severa são o desgaste e a fadiga, que certamente são responsáveis por quebras dos equipamentos (Fupai, 2000).

Toda máquina apresenta um determinado nível de ruído e vibração devido à operação e a fontes externas. Porém, uma parcela destas vibrações é causada por defeitos mecânicos ou excitações secundárias perturbadoras, que atuam na qualidade do desempenho da máquina. Qualquer acréscimo no nível de vibração de uma máquina é o primeiro sinal de agravamento de um defeito. O fato de que os sinais de vibração de uma máquina trazem informações relacionadas com o seu funcionamento, indica a saúde da máquina e a decisão sobre uma intervenção ou não nesta máquina (Fupai, 2000).

Cada máquina apresenta uma forma característica de vibração, em aspecto e nível. Porém, máquinas do mesmo tipo apresentam variações no comportamento dinâmico. Isso se deve às variações de ajustes, tolerâncias e, principalmente, defeitos (Fupai, 2000).

O comportamento dinâmico da máquina é uma composição das perturbações de todos os componentes, defeitos e excitações oriundas dos movimentos. Então, uma criteriosa medida das vibrações poderá indicar as principais causas, que estão excitando a máquina. Portanto, em uma máquina as

vibrações se dão em várias frequências devido às várias excitações. O movimento em um ponto qualquer será a superposição de várias harmônicas (Fupai, 2000).

Os diagnósticos para fins de manutenção das máquinas, com o objetivo de identificar as possíveis causas destes movimentos são obtidos separando as harmônicas do sinal global e associando-as com os elementos defeituosos ou desvios de montagem (Fupai, 2000).

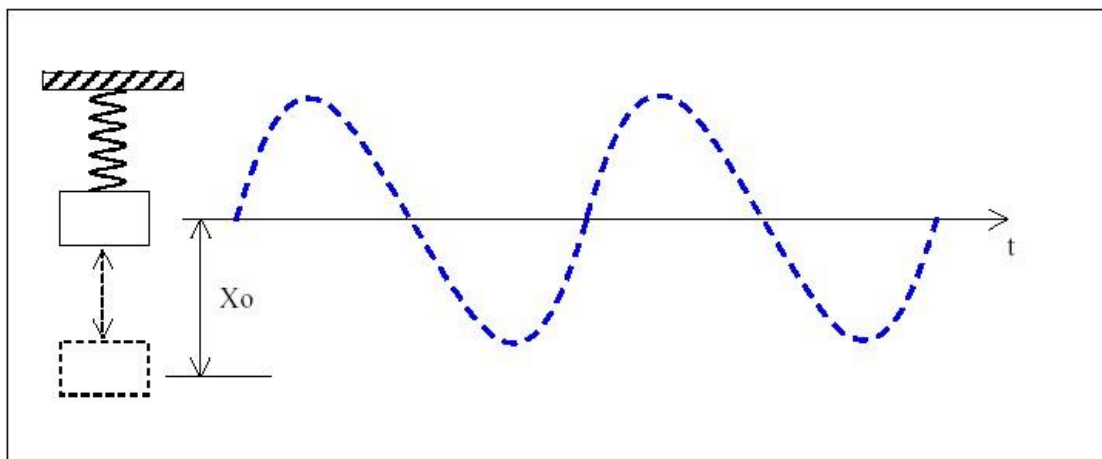
## 2.2 MOVIMENTO HARMÔNICO

O movimento oscilatório pode repetir-se regularmente, como no pêndulo de um relógio ou apresentar irregularidade considerável, como em terremotos. Quando o movimento se repete a intervalos iguais de tempo, ele é denominado período da oscilação, e sua recíproca  $f = 1/T$  é denominada frequência (Fupai, 2000).

O período (T) é o tempo de execução de um ciclo completo do sinal, dado em segundos (s), ou seja, é o inverso da frequência. A frequência (f) é o número de vezes que o ciclo se repete por unidade de tempo, expressa em Hertz (Hz). Tem-se a seguinte relação: um (1) Hertz é igual a um (1) ciclo por segundo ou rotação por segundo, então, um (1) Hertz é igual a sessenta (60) ciclos por minuto ou rotações por minuto (ALMEIDA, 1990).

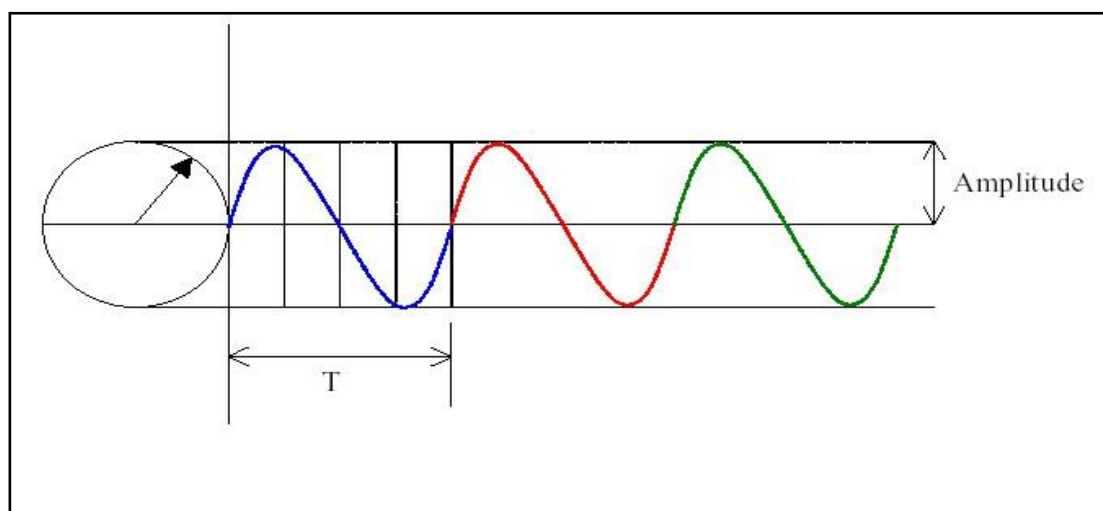
A forma mais simples de movimento periódico é o movimento harmônico, conforme o modelo da figura 1.

Uma massa suspensa por uma mola, e então deslocada de sua posição de equilíbrio, e irá oscilar em torno desse equilíbrio com um movimento harmônico simples. Se for construído um gráfico que relaciona a distância da massa à posição de equilíbrio e ao tempo, a curva obtida será uma senóide, que é a representação de um movimento harmônico por excelência (Fupai, 2000).



**Figura 1 – Representação do movimento harmônico**  
**Fonte: Fupai (2000).**

Estudos mais profundos no campo das variações ondulatórias causadas por vibrações mostram que qualquer forma de onda no tempo pode ser decomposta em uma série de senóides puras. Os sinais harmônicos representam perfeitamente a maioria dos sinais de uma máquina. Assim sendo uma componente de vibração é essencialmente um movimento harmônico, ou seja, uma senóide como mostrado na figura 2 (Fupai, 2000). Onde a amplitude é o valor medido do nível zero até o pico do sinal e a defasagem indica o avanço ou atraso de um sinal em relação a outro sinal qualquer e é geralmente expressa em graus (ALMEIDA, 1990).

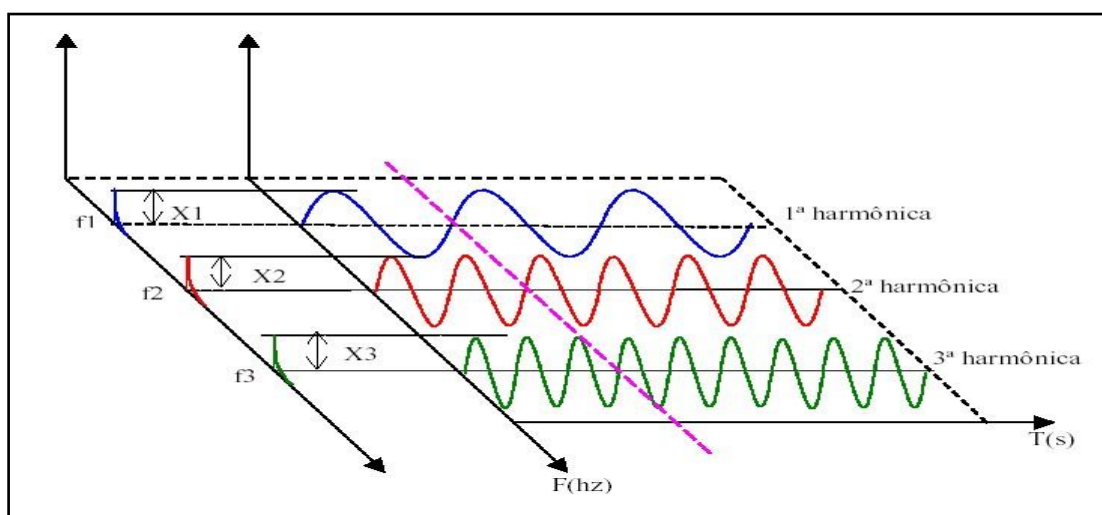


**Figura 2 – Senóide**  
**Fonte: Fupai (2000).**



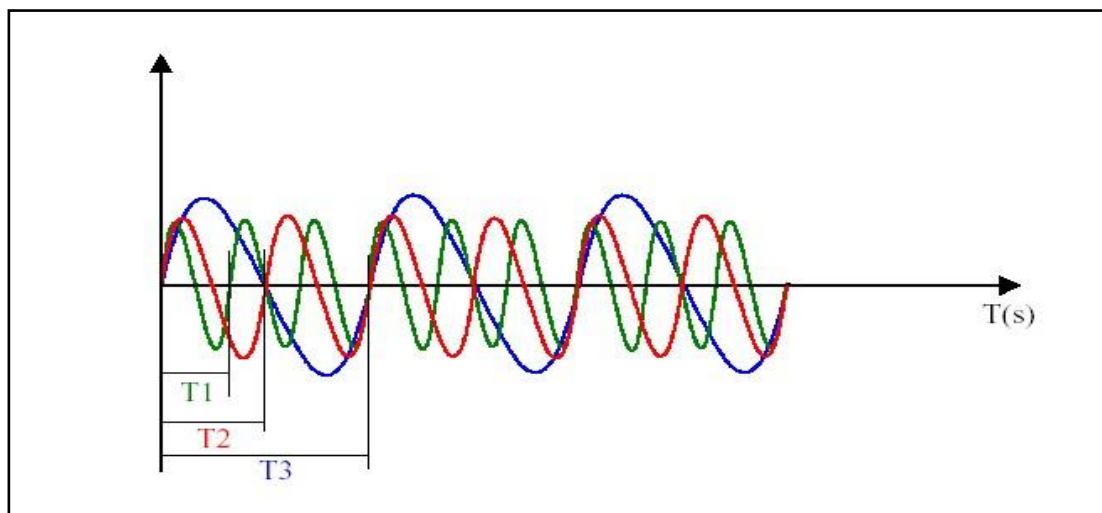
Normalmente, em regime de funcionamento, um equipamento está sujeito a vibrações que ocorrem nas mais diversas frequências, oriundas da própria rotação do equipamento, de seus elementos de máquina, ou mesmo de fontes externas. Como todos estes sinais ocorrem simultaneamente, torna-se muito difícil avaliá-los no tempo, pois teríamos diversas frequências e amplitudes sobrepostas. No entanto, avaliam-se estes sinais no domínio da frequência e tem-se a separação exata de cada sinal, podendo assim conhecer e avaliar separadamente a consequência de cada um no comportamento do equipamento. O sinal assim obtido é chamado espectro de frequência, e seu entendimento ficam mais claros estudando-se a figura 3 (Fupai, 2000).

Tem-se na figura 3, três sinais ocorrendo simultaneamente no tempo. Observa-se que no mesmo intervalo de tempo tomado, o primeiro sinal se repete 3 vezes, o segundo 6 vezes e o terceiro 9 vezes. Observa-se que a linha rocha que cruza o eixo de tempo assinala um período da forma de onda azul, que corresponde a dois períodos da forma de onda vermelha, que corresponde a três períodos da forma de onda verde. Conclui-se assim que estes três sinais são harmônicos entre si, sendo que dois ocorrem em frequências múltiplas do primeiro. Assim sendo, se a frequência do primeiro sinal fosse 20 Hz, o segundo estaria ocorrendo em 40 Hz e o terceiro em 60 Hz, simultaneamente. O sinal de 20 Hz seria a componente de primeira ordem ou fundamental, os sinais em 40 e 60 Hz corresponderiam às componentes de segunda e terceira ordem, ou seja, a segunda e terceira harmônicas (Fupai, 2000).



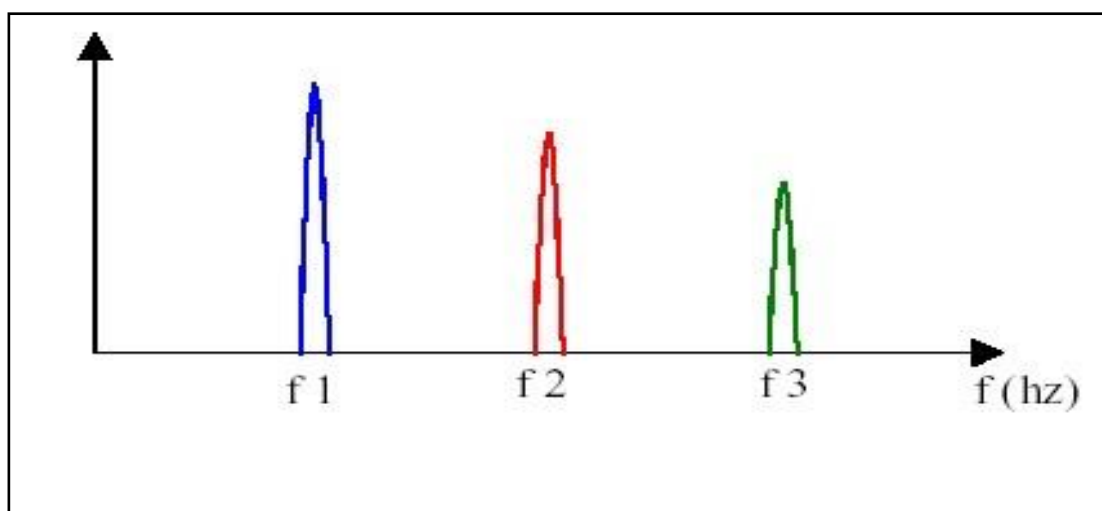
**Figura 3 – Sinais no domínio da frequência**  
**Fonte: Fupai (2000).**

Estes sinais vistos em um eixo cartesiano estariam sobrepostos como na figura 4, onde pode-se ver claramente como as três formas de onda têm períodos diferentes e conseqüentemente frequências diferentes. A de menor período é a de maior frequência, pois se repete mais vezes em um mesmo intervalo de tempo (Fupai, 2000).



**Figura 4 – Sinais no domínio da frequência sobrepostos**  
Fonte: Fupai (2000).

No domínio da frequência estas três formas de onda seriam representadas como no espectro da figura 5 (Fupai, 2000).



**Figura 5 – Espectro no domínio da frequência**  
Fonte: Fupai (2000).

É de extrema importância saber que foi através de um grande matemático, chamado Fourier, que foi descoberto que qualquer movimento periódico pode ser reproduzido através de uma somatória de senóides. Isto possibilitou que, um sinal complexo composto pôr várias senóides possa ser separado em frequências e suas respectivas amplitudes através da transformada rápida de Fourier (FFT) (ALMEIDA, 1990).

Sinais harmônicos entre si são muito comuns no campo das vibrações mecânicas, por isso é de extrema importância saber identificar os sinais presentes em uma máquina e estabelecer as relações entre os mesmos. Em outras palavras, é necessário saber se um determinado sinal acontece na frequência fundamental de um evento ou se é a consequência harmônica de outro sinal qualquer (Fupai, 2000).

### 2.3 ANÁLISE ESPECTRAL

Para analisar o espectro de vibrações obtido em um equipamento, é necessário que se conheça os sinais inerentes ao funcionamento do equipamento. É natural que todo equipamento apresente vibrações em determinadas frequências quando operando. Estas vibrações são decorrentes da própria vibração do equipamento e de seus elementos de máquina, sendo considerados normais desde que mantidos dentro de um limite aceitável de amplitude e sem aparecimento de componentes indesejáveis tais como famílias de harmônicas e bandas laterais (Fupai, 2000).

Dos sinais inerentes ao funcionamento dos equipamentos, pode-se destacar como os mais comuns e que devem ser conhecidos é a frequência de rotação da máquina, frequência de passagem de pás quando bombas e ventiladores e frequência de engrenamento quando redutores. Estes sinais estão todos relacionados com a rotação do equipamento e devem ser conhecidos, pois muitas vezes servem como referência para o ajuste e análise do espectro de vibração (Fupai, 2000).

## 2.4 FREQUÊNCIA DE ROTAÇÃO

Quando se analisa um sinal de vibração obtido em um mancal qualquer, é necessário que se conheça a rotação do eixo apoiado sobre este mancal, afim de identificar no espectro os sinais consequentes da rotação. Um sinal de vibração na frequência de rotação da máquina é o sinal mais certo de se obter, uma vez que o mesmo é causado pelo movimento de giro do eixo. Sendo assim, usa-se esse sinal como referência para orientação na análise do espectro, considerando todos os outros sinais em relação a ele (Fupai, 2000).

Em se tratando de motores elétricos, têm-se a velocidade de rotação padrão conforme o número de pólos. Essas rotações são:

- a) 8 pólos = 900 rpm;
- b) 6 pólos = 1200 rpm;
- c) 4 pólos = 1800 rpm;
- d) 2 pólos = 3600 rpm.

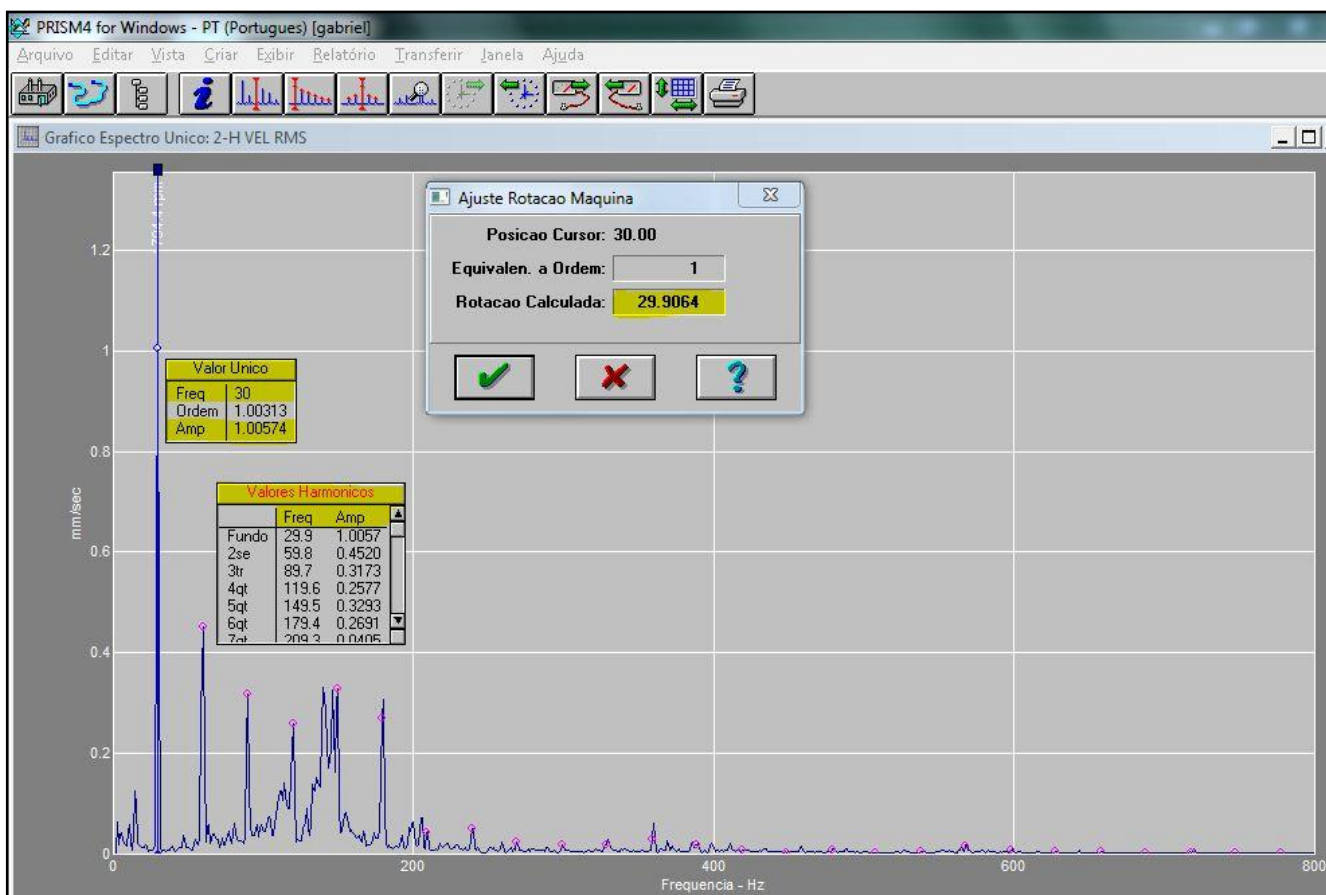
Como os espectros são analisados no domínio da frequência, é necessário que se faça a conversão da rotação de rpm para Hertz ou rps. Isso se faz dividindo a rotação em rpm por 60. Então, tem-se:

- a) 900 rpm = 15 Hz;
- b) 1200 rpm = 20 Hz;
- c) 1800 rpm = 30 Hz;
- d) 3600 rpm = 60 Hz.

Deve-se considerar que devido ao escorregamento causado pela inércia de massa dos rotores, a velocidade de rotação é sempre um pouco abaixo dos valores padrão, o que não impede, no entanto, de identificar facilmente a frequência fundamental de rotação da máquina em seu espectro (Fupai, 2000).

No exemplo mostrado na figura 6, tem-se o espectro de vibração coletado em um motor elétrico de quatro pólos, ou seja, com uma rotação nominal de 1800 rpm, que equivale a 30 Hz. O primeiro cursor, com um ponto azul, identifica a frequência fundamental ou a frequência de rotação de 30 Hz e a amplitude do pico de vibração. Os demais cursores, com pontos em rosa, identificam os picos

harmônicos da frequência fundamental, que são múltiplos de 30 Hz e suas respectivas amplitudes de vibração.



**Figura 6 – Espectro de vibração coletado em um motor elétrico**  
**Fonte: Autoria própria.**

## 2.5 FREQUÊNCIA DE ENGRENAMENTO

Uma caixa de engrenagens ou um redutor apresenta um grande número de variáveis a ser considerado na análise das vibrações em seus mancais. Isto se dá devido às diferentes rotações de seus eixos, assim como dos diferentes números de dentes de suas engrenagens (Fupai, 2001).

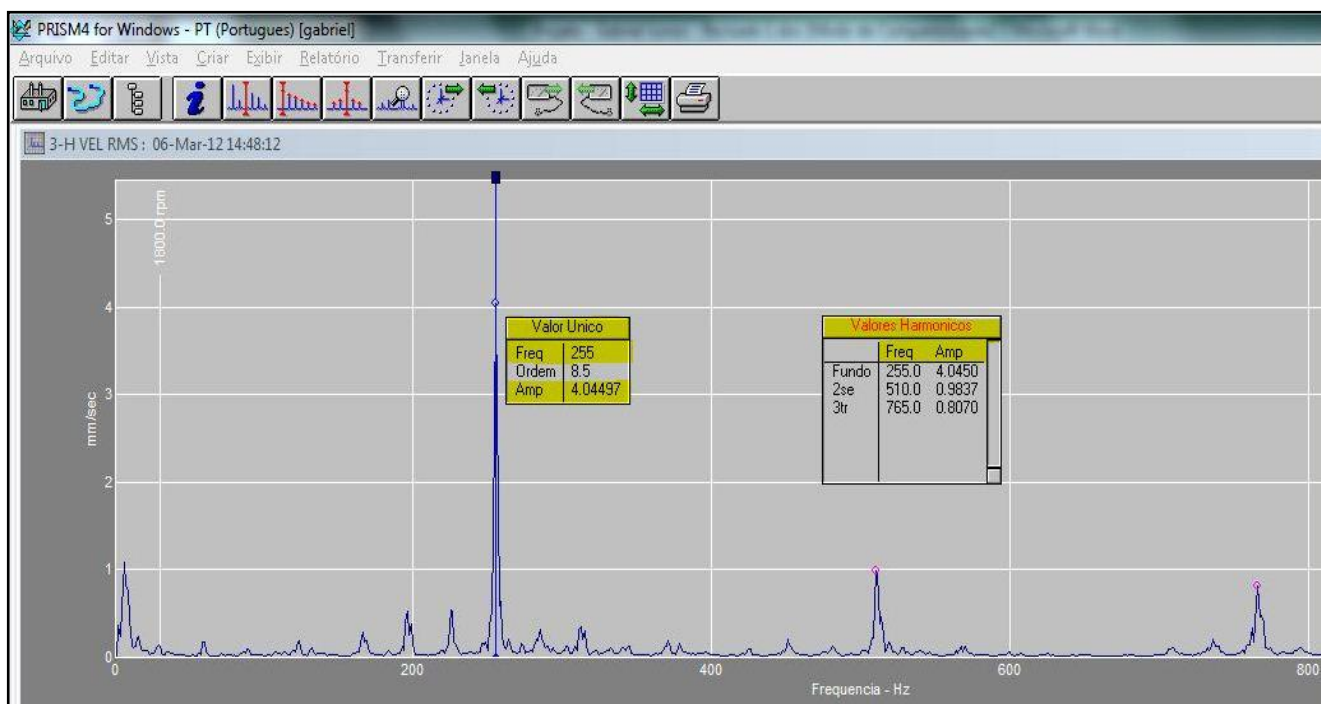
Considerando uma caixa de engrenagens de duas reduções, tem-se envolvidas as velocidades de três eixos e as vibrações causadas pelas forças envolvidas nos dois engrenamentos. Assim sendo, para que se possa proceder a uma análise correta das vibrações em um redutor, é necessário conhecer todas as variáveis oriundas de seu funcionamento (Fupai, 2001). Estas variáveis são:

- a) velocidade de rotação do eixo de entrada;
- b) velocidade de rotação do eixo intermediário;
- c) velocidade de rotação do eixo de saída;
- d) frequência de engrenamento do pinhão de entrada com a coroa do eixo intermediário;
- e) frequência de engrenamento do pinhão intermediário com a coroa do eixo de saída.

Conhecer as frequências das vibrações geradas pelos engrenamentos é fundamental para o diagnóstico em sistemas de engrenagens. A frequência típica dos sistemas com engrenamento é a frequência de engrenamento. Existirá uma frequência de engrenamento para cada par engrenado (Fupai, 2001).

Para obterem-se as frequências de engrenamento, é preciso conhecer o número de dentes de cada engrenagem. Multiplicando o número de dentes de uma engrenagem pela rotação do seu eixo, tem-se a sua frequência de engrenamento (Fupai, 2001).

Na análise de vibrações em redutores, é comum usar as frequências de engrenamento como referência para os demais sinais. Na figura 7, tem-se o espectro de vibração coletado em um redutor com uma rotação síncrona ou real de entrada de 1704 rpm ou 28,4 Hz. Este redutor possui um eixo pinhão de entrada, cujo pinhão possui 9 dentes. Multiplicando-se a frequência de 28,4 Hz pelo número de dentes do pinhão, têm-se a frequência de engrenamento da primeira redução de 255,6 Hz. O cursor com um ponto azul, identifica a frequência de engrenamento da primeira redução de 255,6 Hz e a amplitude do pico de vibração. Os demais cursores, com pontos em rosa, identificam os picos harmônicos da frequência de engrenamento, que são múltiplos de 255 Hz e suas respectivas amplitudes de vibração.



**Figura 7 – Espectro de vibração coletado em um redutor**  
**Fonte: Autoria própria.**

Se o engrenamento fosse perfeito, a vibração seria puramente senoidal e no espectro existiria apenas a frequência fundamental do engrenamento. Qualquer irregularidade, desgaste, deformação ou esforço externo fará desaparecer a condição de engrenamento perfeito. Todas as falhas associadas com as engrenagens afetam o engrenamento e, por consequência, afetam também a forma de onda da vibração (Fupai, 2001).

As formas de onda das vibrações dos engrenamentos com falhas continuam periódicas, mas não são mais senóides puras. Seus espectros apresentarão vários componentes harmônicos da frequência de engrenamento. O primeiro indício de anormalidade é a presença de harmônicos do engrenamento. Quanto maior o número de harmônicos e suas amplitudes, maiores serão as falhas (Fupai, 2001).

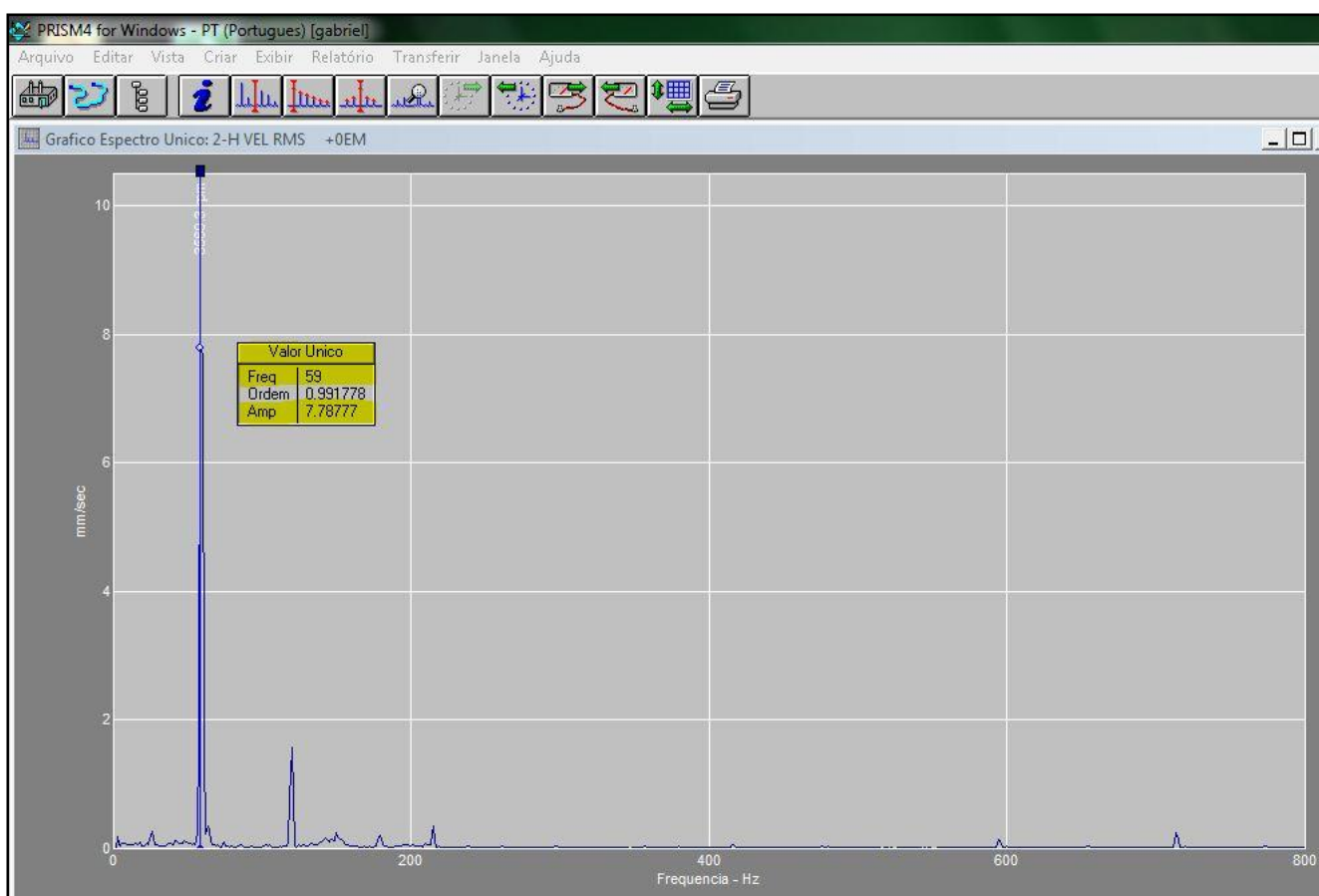
## 2.6 DESBALANCEAMENTO DE MASSA

O desbalanceamento de massa é uma fonte comum de vibração em máquinas, e sua consequência é um aumento de amplitude da frequência fundamental ou frequência de rotação da máquina, conhecida também em uma vez

a rotação da máquina. Essa amplitude será proporcional à quantidade de desbalanceamento presente (Fupai, 2000).

O desbalanceamento acontece devido a uma alteração no equilíbrio das forças radiais que atuam sobre o eixo da máquina. As causas mais comuns são o acúmulo de material sobre as pás de ventiladores, desgaste ou quebra das pás de ventiladores, pás quebradas de ventoinhas de motores, entre outros. Portanto, quando a resultante das forças radiais que atuam sobre o eixo for diferente de zero, esta resultante causará um aumento da vibração em uma vez a rotação da máquina, que será tanto maior quanto for a velocidade de rotação do eixo. A vibração no sentido axial será nula ou desprezível em relação à radial (Fupai, 2000).

Na figura 8, tem-se o espectro de vibração coletado em um motor elétrico que aciona diretamente um ventilador, cuja rotação síncrona ou real é de 3540 rpm ou 59 Hz. O primeiro cursor, com um ponto azul, identifica a frequência fundamental ou a frequência de rotação de 59 Hz, cuja amplitude do pico de vibração está elevada, em função do desbalanceamento do rotor do ventilador.



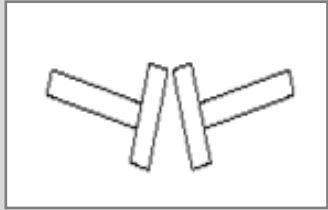
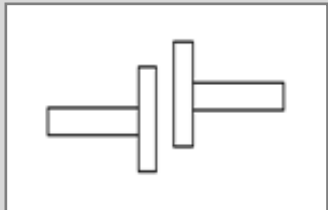
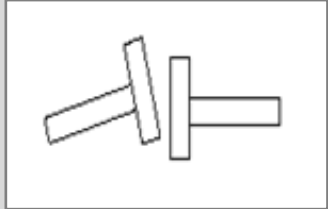
**Figura 8 – Espectro de vibração coletado em um moto-ventilador**  
Fonte: Autoria própria.



## 2.7 DESALINHAMENTO ENTRE EIXOS

O desalinhamento é uma falha mais frequente que o desbalanceamento, em função do número de variáveis que pode causar um desalinhamento entre eixos. Como exemplo pode-se citar uma falha de montagem, defeito na base de fixação do conjunto, parafusos de fixação frouxos ou folgados, entre outros (Fupai, 2000).

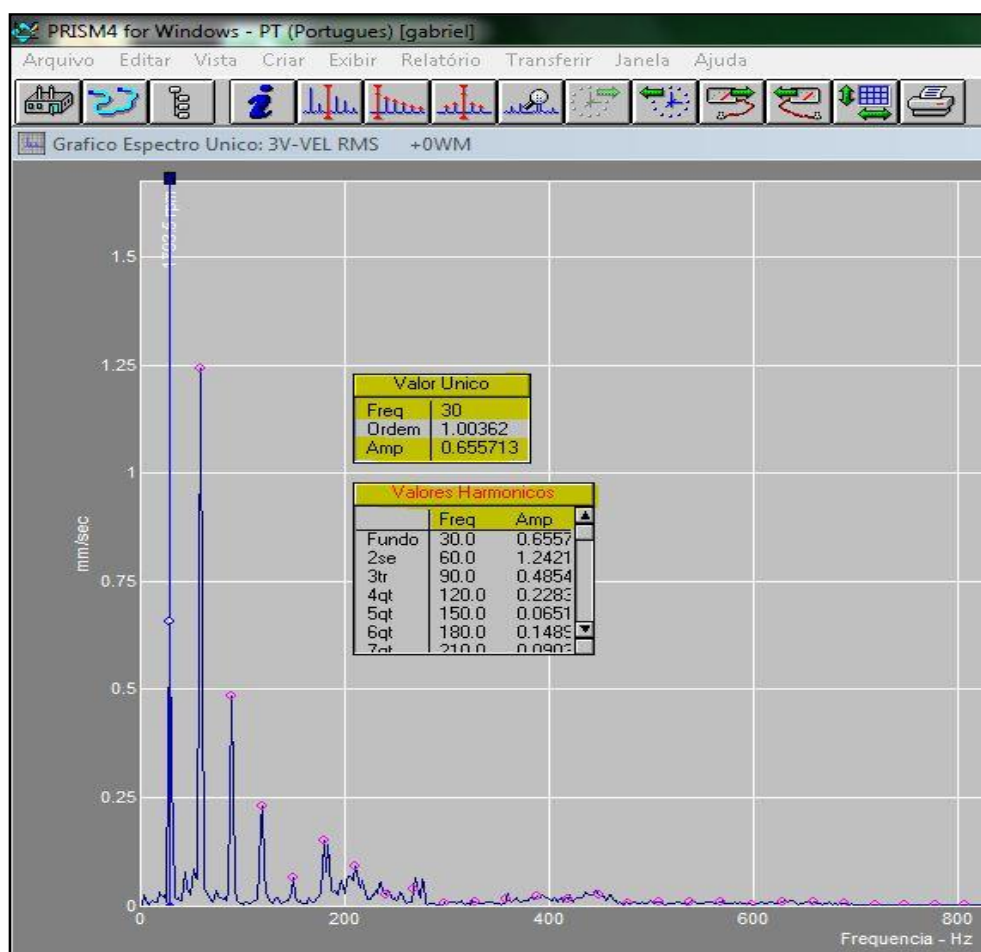
Têm-se três tipos possíveis de desalinhamento, conforme quadro 1.

<p><b>ANGULAR</b></p>	<p>É quando as linhas de centro dos dois eixos fazem um ângulo. Sinal mais forte na axial.</p>	
<p><b>PARALELO</b></p>	<p>É quando as linhas de centro são paralelas, porém deslocadas entre si. Sinal mais forte na radial.</p>	
<p><b>COMBINADO</b></p>	<p>É quando os desalinhamentos angular e paralelo, ocorrem ao mesmo tempo. Superposição dos dois sinais.</p>	

**Quadro 1 – Tipos de desalinhamento entre eixos**  
Fonte: Autoria própria.

O desalinhamento, mesmo com acoplamentos flexíveis, resulta em duas forças, a axial e radial. Isto acontece mesmo quando o desalinhamento estiver dentro dos limites de flexibilidade do acoplamento. A quantidade da vibração gerada aumentará com o aumento do desalinhamento. A característica significativa da vibração devido ao desalinhamento é que ela acontecerá nas duas direções, isto é, tanto na axial como na radial. Normalmente a frequência de vibração é uma vez a rotação da máquina, porém, quando o desalinhamento é severo, a frequência é duas vezes a rotação da máquina (Fupai, 2000).

Na figura 9, tem-se o espectro de vibração coletado em uma bomba centrífuga, cuja rotação nominal é de 1800 rpm ou 30 Hz. O primeiro cursor, com um ponto azul, identifica a frequência fundamental ou a frequência de rotação de 30 Hz, e a amplitude do pico de vibração. O segundo cursor, com um ponto rosa, identifica duas vezes a frequência de rotação de 60 Hz, cuja amplitude do pico de vibração está elevada, em função do desalinhamento entre eixos.



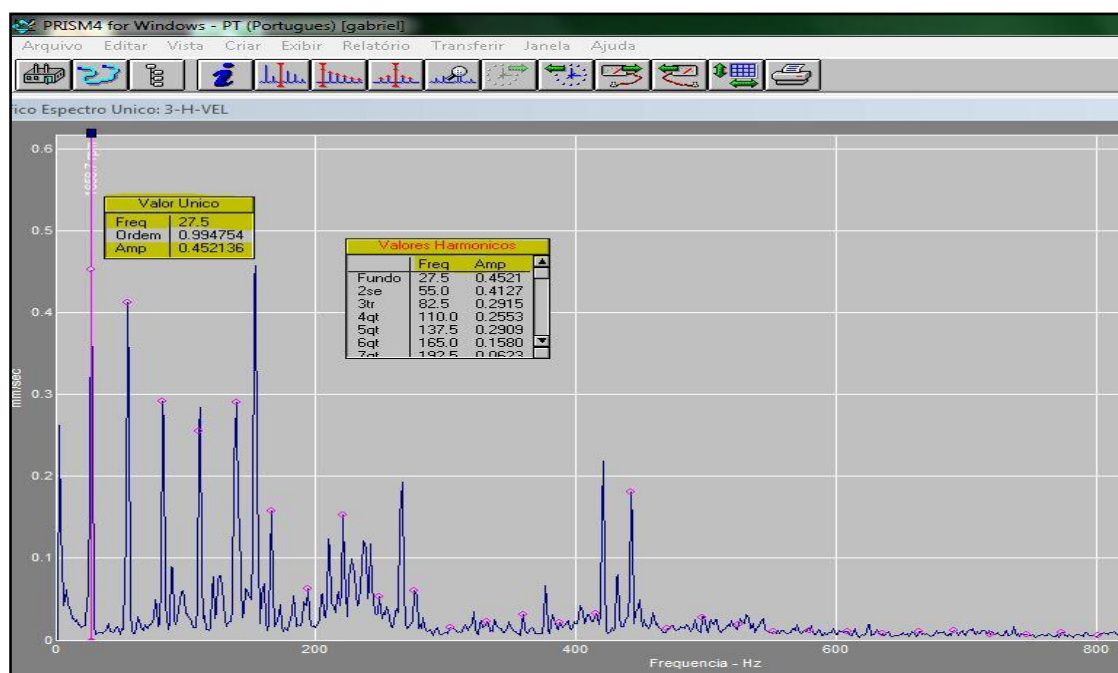
**Figura 9 – Espectro de vibração coletado em uma bomba centrífuga**  
**Fonte: Autoria própria.**

## 2.8 FOLGAS MECÂNICAS

As folgas mecânicas causam vibrações no sistema, geralmente na frequência de rotação da máquina, seguida de várias harmônicas, sendo mais evidente na direção radial. Estas vibrações são muitas vezes geradas por parafusos frouxos, trinca na base de fixação dos mancais ou estrutura e principalmente por folgas excessivas nos mancais (Fupai, 2000).

A vibração característica de folgas mecânicas não ocorre sem que haja outras forças excitando o sistema, tais como desalinhamentos e desbalanceamentos. Quando há folga excessiva, mesmo não havendo desalinhamentos ou desbalanceamentos, aparecem grandes níveis de vibração. Então, as folgas amplificam as vibrações. As folgas são uma fonte perigosa de vibrações, pois concentram grande energia cinética sobre o equipamento devido ao grande número de harmônicos gerados (Fupai, 2000).

No exemplo mostrado na figura 10, tem-se o espectro de vibração coletado em um ventilador apoiado em mancais de rolamento, cuja rotação síncrona ou real é de 1650 rpm ou 27,5 Hz. O espectro apresenta a frequência fundamental ou a frequência de rotação de 27,5 e seus respectivos picos harmônicos, caracterizando uma folga no mancal de rolamento do ventilador.



**Figura 10 – Espectro de vibração coletado em um ventilador**  
**Fonte: Autoria própria.**

## 2.9 DEFEITOS EM ROLAMENTOS

Os rolamentos são os elementos de máquinas mais comuns na indústria. Muitas vezes eles são os componentes de maior precisão do equipamento. São poucos os rolamentos que atingem a sua vida de projeto, em função de uma variedade de fatores, principalmente, segundo Almeida (1990):

- a) lubrificação inadequada;
- b) contaminação por partículas estranhas;
- c) armazenagem imprópria;
- d) umidade;
- e) vibração externa;
- f) erro de aplicação;
- g) montagem imprópria.

Os mancais de rolamento são os elementos de máquinas mais estudados e pesquisados em relação à vibração, pois dificilmente encontram-se equipamentos em que estes elementos não estejam presentes (Almeida, 1990).

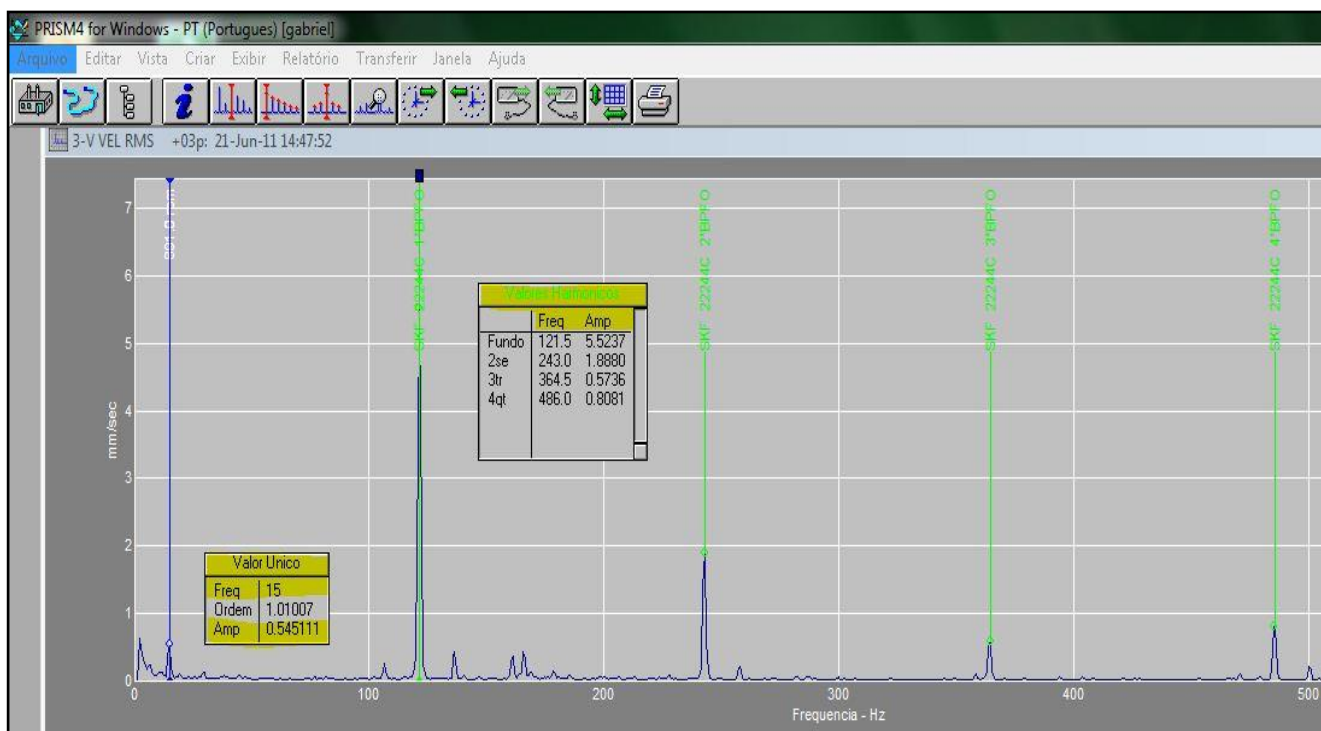
As quatro frequências características dos rolamentos, são, segundo Almeida (1990):

- a) frequência de defeito da pista externa;
- b) frequência de defeito da pista interna;
- c) frequência de defeito da gaiola;
- d) frequência de defeito dos elementos rolantes.

Os desgastes em rolamentos progridem em quatro estágios. Primeiramente os defeitos aparecem em frequências altas, isto é, entre 20 e 60 KHz. No segundo estágio, os defeitos excitam frequências naturais dos componentes do rolamento, entre 500 Hz a 2 KHz, em função dos impactos gerados pela passagem dos elementos rolantes. Com o aumento do desgaste, surgem harmônicas das frequências discretas e bandas laterais com espaçamento de uma vez a rotação da máquina. No último estágio, quando os defeitos são severos, fortes impactos excitam frequências naturais, em função da passagem dos elementos rolantes pela pista, principalmente pela zona de carga (Fupai, 2001).

Rolamentos com defeitos em suas pistas e elementos rolantes, normalmente causam vibrações em altas frequências, que não são múltiplos da rotação do eixo. Isto ocorre em função das forças dinâmicas excitando o rolamento defeituoso proporcionando vibrações. Por exemplo, uma esfera defeituosa passará pelas pistas interna e externa em uma sucessão de impactos, com o dobro da frequência de rotação da esfera, onde sua frequência de vibração será maior que a do eixo. A amplitude da vibração dependerá da gravidade do defeito no rolamento. No caso dos defeitos na gaiola do rolamento, estes geram vibrações com frequências mais baixas que a frequência de rotação do eixo (Fupai, 2001).

Na figura 11, tem-se o espectro de vibração coletado em um ventilador apoiado em mancais de rolamento, cuja rotação síncrona ou real é de 900 rpm ou 15 Hz. O espectro apresenta a frequência fundamental ou a frequência de rotação do eixo de 15 Hz, identificada pelo primeiro cursor, com um ponto azul. Este exemplo mostra vários picos de vibração cujas frequências não são harmônicos da rotação do eixo, identificadas pelos cursores com pontos em verde. Mas estes picos são harmônicos entre si, onde a fundamental ocorre em 121,5 Hz, que é a frequência de defeito da pista externa do rolamento número 22244 C.



**Figura 11 – Espectro de vibração coletado em um ventilador**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 3 ESTRUTURA DOS DADOS DA PESQUISA

Este terceiro capítulo apresenta a estrutura dos dados da pesquisa, referente à análise de vibrações, onde será aplicada para analisar vibrações em exaustores de fornos de fábrica de cimento. Os dados apresentados são provenientes do departamento de manutenção mecânica, especificamente do setor de planejamento e controle de manutenção de uma empresa cimenteira, localizada na Região Metropolitana de Curitiba.

Serão apresentados tópicos referentes a configuração da estrutura dos dados necessários para análise de vibrações, utilizando o programa da empresa SKF, denominado Prism 4, bem como, o coletor e analisador de vibrações da mesma empresa, denominado Microlog CMVA 60. Também o mapeamento de todos os pontos de coleta de vibrações, necessários para a análise de vibrações dos exaustores e seus dados técnicos.

#### 3.1 O EXAUSTOR E O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO

O processo de fabricação do cimento, resumidamente, consiste na extração e britagem das matérias primas, onde são armazenadas separadamente. Após, os minerais naturais, isto é, o calcário, argila, quartzito e minério de ferro são misturados de acordo com a dosagem do processo e moídos no moinho de crú. O produto resultante desta moagem é denominado de farinha. A farinha é homogeneizada e armazenada em silos, onde é transportada até o forno, passando primeiramente pela torre de ciclone, para um pré-aquecimento. A farinha é queimada a uma temperatura aproximada de 1450°C, onde é transformada em uma mistura de minerais hidraulicamente ativos, os quais constituem o clínquer de cimento Portland. O clínquer é o produto intermediário na produção do cimento e pode ser considerado como sendo uma rocha sinteticamente produzida. O tratamento térmico de aquecimento e resfriamento responsável por esta transformação é chamado de clinquerização e com exceções de um pequeno número de fornos verticais, ocorre em fornos rotativos. Depois de resfriado, o clínquer é transportado e estocado no silo. Após o clínquer, juntamente com um percentual de gesso, é transportado para o moinho de cimento para moagem. Dependendo do tipo de cimento, são

acrescentados para moagem, alguns aditivos como a cinza pozolana e calcário. Após o cimento é armazenado em silos e pronto para expedição a granel ou ensacado. O fluxo básico do processo de fabricação do cimento é mostrado na figura 12.

Para o processo de fabricação do cimento, o exaustor tem a função de tirar os gases quentes do forno e da torre de ciclone, aproveitando-os para secagem do calcário moído dentro do moinho de crú, conforme mostrado na figura 12.

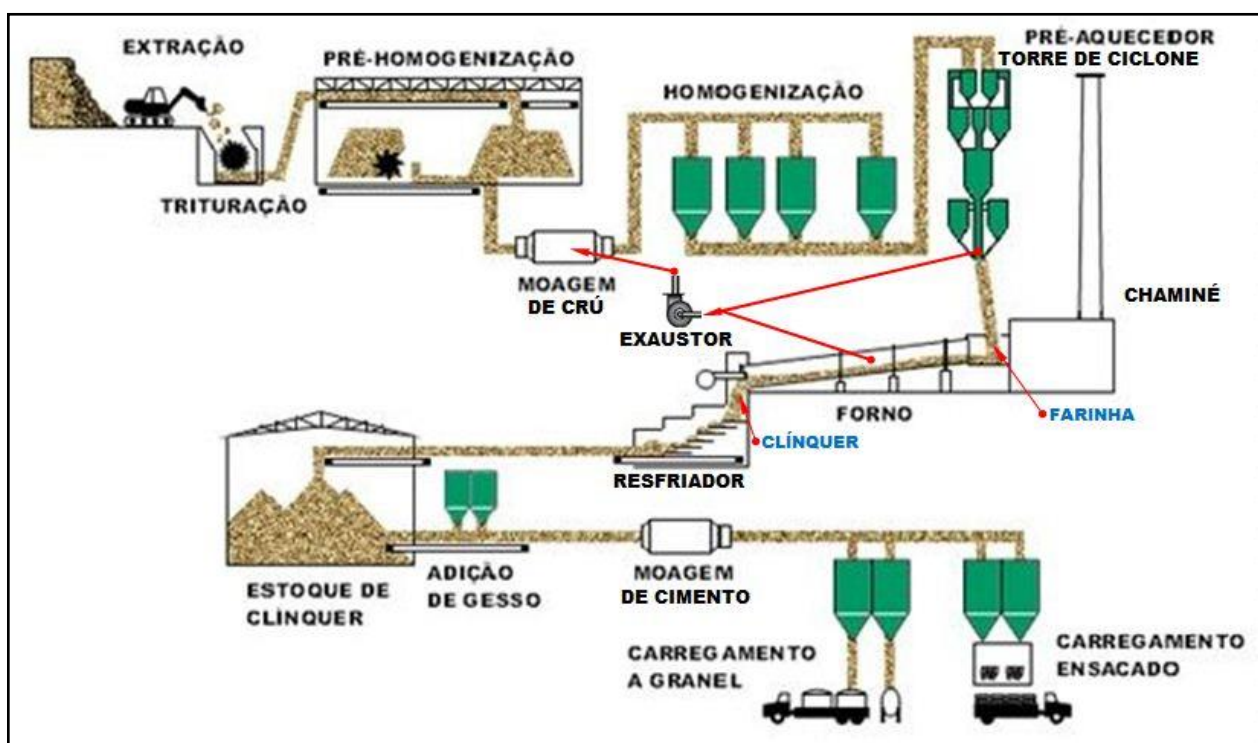


Figura 12 – Fluxograma do processo de fabricação do cimento  
Fonte: Itambé (2010).

Na foto 1, tem-se um exaustor de forno de fábrica de cimento, que é o equipamento alvo desta pesquisa.





Foto 1 – Exaustor de forno de fábrica de cimento  
Fonte: Autoria própria.

Na figura 13, tem-se uma vista em corte parcial, do exaustor de forno de fábrica de cimento, mostrando seus principais componentes.

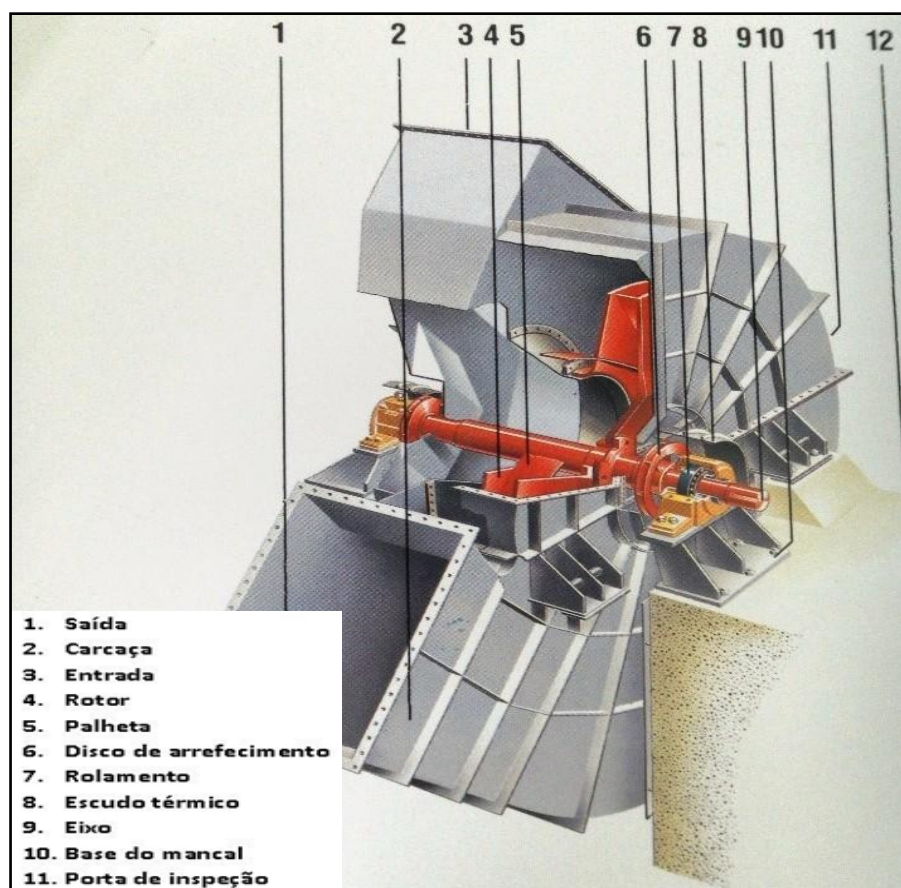


Figura 13 – Vista em corte parcial do exaustor de forno de fábrica de cimento  
Fonte: FL Smidth (2009).



### 3.2 DADOS TÉCNICOS

Os dados técnicos referentes aos exaustores são extremamente importantes para análise de vibrações. Por exemplo, os dados dos mancais de rolamento são necessários para os cálculos das frequências de defeito da pista externa, pista interna, gaiola e dos elementos rolantes. Com o programa utilizado, basta entrar com o número específico do rolamento, que as frequências serão calculadas pelo sistema.

Os principais dados do motor elétrico são:

- a) fabricante: Weg;
- b) tipo: motor de corrente contínua;
- c) modelo: GC 7110 WK;
- d) número de série: 17759-0393;
- e) rotação nominal: 1000 rpm;
- f) isolamento: F;
- g) grau de proteção: IP 54;
- h) potência: 1400 kW;
- i) rolamento lado oposto ao acionamento: NU 234 C3;
- j) rolamento lado acionamento: NU 234 C3 / 6234 C3;
- k) peso: 8000 kg.

Os principais dados do acoplamento são:

- a) fabricante: Falk;
- b) tipo: grade elástica;
- c) modelo: 210 F.

Os principais dados do exaustor são:

- a) fabricante: FL Smidth;
- b) número de série: 5.500.936;
- c) vazão: 446.400 m<sup>3</sup>/h;
- d) rotação nominal: 1000 rpm;
- e) rolamento do mancal lado acionamento: 22244 C3;
- f) rolamento do mancal lado oposto ao acionamento: 22230 C3;
- g) número de aletas do rotor: 12;

- h) diâmetro do rotor: 3410 mm;
- i) largura total do rotor: 672 mm;
- j) largura das aletas: 245 mm;
- k) ângulo entre as aletas: 30°;
- l) diâmetro do eixo no alojamento com o rotor: 315 mm;
- m) distância entre os centros dos mancais de rolamento: 2765 mm.

### 3.3 COLETOR E ANALISADOR DE VIBRAÇÕES

O coletor e analisador de vibrações utilizado, é o da empresa SKF, denominado Microlog CMVA 60, conforme mostrado na foto 2.



**Foto 2 – Coletor e analisador de vibrações da SKF Microlog CMVA 60**  
**Fonte: Autoria própria.**

O coletor e analisador de vibrações, mede a amplitude das vibrações, o valor global de vibração e suas frequências, permitindo fazer uma análise rápida em campo, ou a transferência dos dados coletados para o programa da SKF Prism 4, para a análise definitiva.

Este tipo de coletor e analisador de vibrações, associado ao programa de análise, permite efetuar os seguintes serviços, segundo a Fupai (2000):

- a) medição global de vibração;
- b) comparação de espectros no domínio do tempo;
- c) comparação de espectros no domínio da frequência;
- d) comparação de espectros com correção da velocidade de rotação;
- e) diferenciação e integração de dados;
- f) ampliação de bandas de frequência;
- g) testes de campo, para detectar frequências naturais;
- h) testes e análises de correntes elétricas;
- i) balanceamentos dinâmicos.

O sensor de vibração utilizado é um acelerômetro piezoelétrico, com base magnética.

A medição de vibrações consiste na transformação de um sinal mecânico oriundo das vibrações em um sinal mensurável (NSK, 2004).

Os acelerômetros piezoelétricos, são os sensores de vibração mais utilizados para converter a aceleração do movimento vibratório em um sinal elétrico proporcional, com a finalidade de medição, monitoramento e controle. Em função de sua larga faixa de frequência, podem ser utilizados para medir vibração senoidal, randômica ou transitória (NSK, 2004).

Os acelerômetros piezoelétricos, são formados por uma massa sísmica alojada sobre um cristal de quartzo ou de material piezoelétrico cerâmico, fixados à base magnética dos acelerômetros (NSK, 2004).

### 3.4 GRANDEZAS DAS VIBRAÇÕES MECÂNICAS

As grandezas das vibrações mecânicas, consideradas para análises de vibrações, são: deslocamento, velocidade, aceleração e envelope de aceleração. Através destes parâmetros, avalia-se o grau de severidade de um equipamento.

O deslocamento é a medida linear física entre um ponto de referência e a posição física do eixo, ou seja, indica o quanto um corpo desvia de sua posição de

equilíbrio, destacando a amplitude máxima de deslocamento. Esta distância da vibração é medida em micrometro ou microns (NSK, 2004).

A velocidade indica a rapidez com que o corpo se move, ou seja, é a razão de mudança do deslocamento. A velocidade é a primeira derivada do deslocamento, com a introdução do vetor velocidade (SKF, 2000).

Para uma medição de velocidade na faixa de baixas frequências, tem-se um grande indicador de picos de vibração, que diminui com o aumento da frequência. Então a velocidade é um parâmetro excelente para detecção de frequências de ordem mais baixas como: desbalanceamento, desalinhamento e folgas mecânicas (SKF, 2000).

A velocidade é medida em milímetros por segundo.

A aceleração é a segunda derivada do deslocamento. A aceleração resulta da mudança da velocidade linear ou direção, em função disto, ela é muito utilizada para análise de equipamentos dinâmicos, cujos elementos estão constantemente mudando de direção. É importante destacar que um corpo com velocidade linear constante e sem alteração de direção, tem aceleração nula (SKF, 2000).

A aceleração é uma grandeza que através dos acelerômetros, produz um resultado linear dentro de um grande intervalo de frequências e torna seus dados e sinais, mais observados com o aumento da frequência. Esta ferramenta é um parâmetro excelente para detecção de frequências mais altas como: rolamentos e engrenamentos (SKF, 2000).

É importante destacar que o sinal de vibração coletado, é um sinal de aceleração, onde o coletor e analisador de vibração, faz a integração da aceleração para a velocidade, de acordo com a sua configuração (SKF, 2000).

A aceleração é medida em G's.

O envelope de aceleração é um modelo de estratificação da aceleração, constituindo uma técnica usada para analisar eventos de alta frequência, principalmente associados com a condição do rolamento. De uma forma geral, é aplicados filtros de banda larga pra examinar o espectro de aceleração de alta frequência. Após processa-se o sinal resultante, fazendo com que as frequências mais notáveis do espectro apresentado, sejam as frequências moduladas do rolamento, ou seja, através da transformada rápida de Fourier, tem-se o espectro do envelope de aceleração e suas frequências de defeito (SKF, 2000).

A unidade de medida do envelope de aceleração é denominado gE.

### 3.5 PONTOS DE MEDIÇÕES OU DE COLETAS DE VIBRAÇÕES

Para a coleta ou medição de vibração em máquinas, é importante uma boa definição dos pontos e um registro através de um mapeamento. A função do mapeamento dos pontos corretos é fazer com que sejam coletados os dados sempre no mesmo ponto, garantindo que o sinal possa ser sempre referenciado ao sinal tido como assinatura de vibração naquele determinado ponto (Fupai, 2000).

A escolha dos pontos é sempre a dos mais próximos aos rolamentos, para obter-se o melhor sinal e resposta dos mesmos (Fupai, 2000).

A coleta do sinal é feita nas direções radiais, ou seja, direção vertical e horizontal, e também na direção axial, em função do mancal de rolamento estar sujeito à ação de forças dinâmicas, cujas resultantes podem ser mais evidentes em direções radiais e/ou axiais (Fupai, 2000).

Na figura 14, tem-se o mapeamento dos pontos de medição ou de coletas de vibrações, dos exaustores de fornos de fábrica de cimento, considerando sempre o sentido do fluxo da potência. Neste caso, têm-se quatro pontos de coletas de dados, iniciando no primeiro mancal de rolamento do motor elétrico de corrente contínua, localizado no lado oposto ao acionamento, bem como, suas respectivas direções de captura de sinal. No mapeamento tem-se:

- a) 1V = primeiro ponto medido na vertical, no motor do lado oposto ao acionamento;
- b) 1H = primeiro ponto medido na horizontal, no motor do lado oposto ao acionamento;
- c) 1A = primeiro ponto medido na axial, no motor do lado oposto ao acionamento;
- d) 2V = segundo ponto medido na vertical, no motor do lado do acionamento;
- e) 2H = segundo ponto medido na horizontal, no motor do lado do acionamento;
- f) 2A = segundo ponto medido na axial, no motor do lado do acionamento;
- g) 3V = terceiro ponto medido na vertical, no mancal de rolamento do lado do acionamento;
- h) 3H = terceiro ponto medido na horizontal, no mancal de rolamento do lado do acionamento;

- i) 3A = terceiro ponto medido na axial, no mancal de rolamento do lado do acionamento;
- j) 3T = medição de temperatura, no mancal de rolamento do lado do acionamento;
- k) 4V = quarto ponto medido na vertical, no mancal de rolamento do lado oposto ao acionamento;
- l) 4H = quarto ponto medido na horizontal, no mancal de rolamento do lado oposto ao acionamento;
- m) 4A = quarto ponto medido na axial, no mancal de rolamento do lado oposto ao acionamento;
- n) 4T = medição de temperatura, no mancal de rolamento do lado oposto ao acionamento.

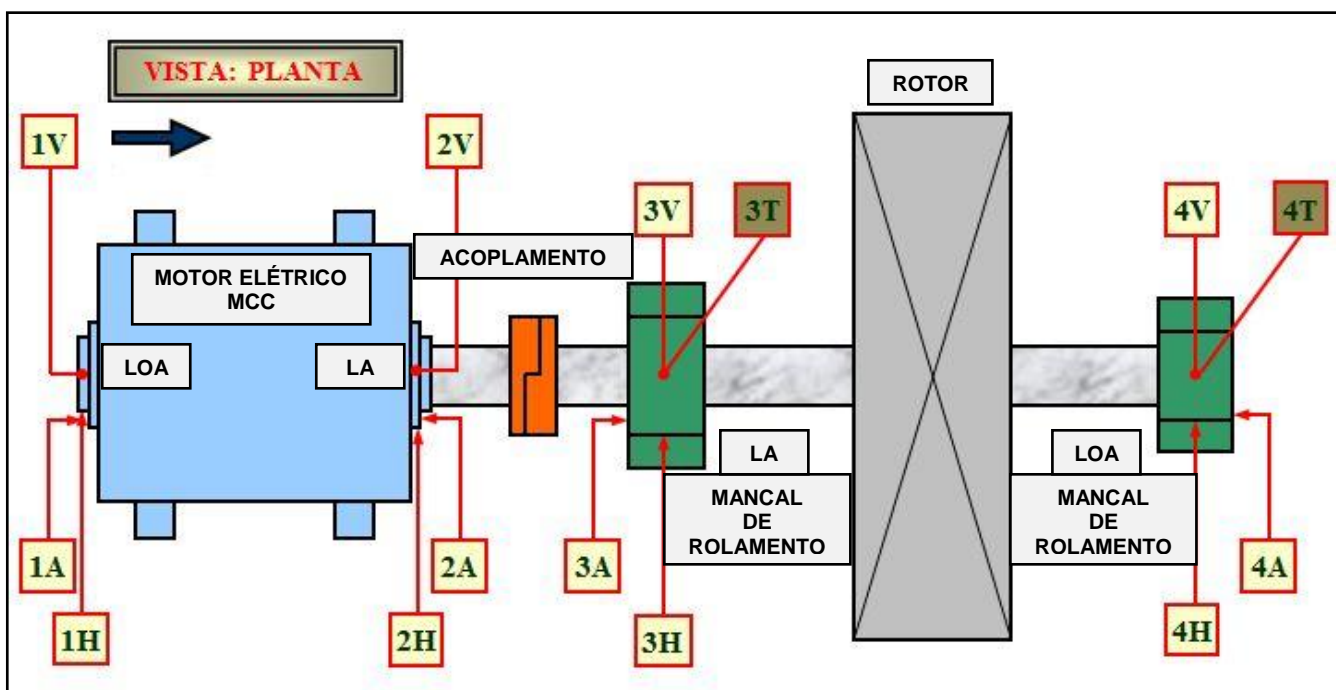


Figura 14 – Mapeamento do sentido, direções e pontos de medições  
 Fonte: Autoria própria.

### 3.6 CONFIGURAÇÃO DA ESTRUTURA DOS DADOS

Para a coleta ou medição de vibração em máquinas, é importante uma boa configuração dos dados necessários para a análise de vibrações.

Utilizando o programa da empresa SKF, denominado Prism 4, e com base na definição do mapeamento dos pontos de medições ou de coletas de vibrações, dos exaustores de fornos de fábrica de cimento, tem-se segundo a Fupai (2000) e a SKF (2000), as configurações mostradas no apêndice A.

### 3.7 NÍVEIS DE ALARMES GLOBAIS DE VIBRAÇÃO

As vibrações podem ser normais no equipamento, ou seja, o equipamento pode estar recebendo vibrações inerentes ao seu funcionamento, não representando nenhum motivo de alarme. Para isso, é necessário que as vibrações mantenham-se dentro de limites aceitáveis. Quando se tem um histórico de medições em um equipamento e observa-se a estabilidade dos sinais em seu espectro, tem-se uma condição operacional normal do equipamento e seu espectro é a sua assinatura espectral (Fupai, 2000).

O aumento dos níveis normais de vibração em um equipamento é o primeiro sinal de alguma falha. Em função disto, é necessário um monitoramento constante para detectar qualquer alteração no comportamento do equipamento (Fupai, 2000).

Para definição dos níveis de alarmes globais de vibração, dos exaustores de fornos de fábrica de cimento e segundo a configuração definida, tem-se como referência a norma ISO 10816-1. Segundo a norma, os exaustores pertencem ao grupo de equipamentos da classe 3, cuja potência é maior que 75 kW e a base estrutural de fixação do conjunto é rígida, isto é, sem a utilização de sistemas flexíveis ou de molas. O quadro 2 mostra os níveis de alarmes globais de vibração definidos.

Velocidade (mm/s)	< 5	Bom Adequado	Níveis normais e aceitáveis de vibração.
Aceleração (G's)	< 3		
Envelope de Aceleração (gE)	< 2		
Velocidade (mm/s)	= > 5 e < 12	Admissível	Níveis de vibração de alarme ou aviso. Não necessitam de intervenção imediata, porém, requerem cuidados especiais. São classificados também, como equipamentos em alarme 1 (A1).
Aceleração (G's)	= > 3 e < 5		
Envelope de Aceleração (gE)	= > 2 e < 4		
Velocidade (mm/s)	= > 12	Inadmissível	Níveis de vibração que necessitam de uma intervenção imediata. São classificados também, como equipamentos em alarme 2 (A2).
Aceleração (G's)	= > 5		
Envelope de Aceleração (gE)	= > 4		

**Quadro 2 – Níveis de alarmes globais de vibração**

Fonte: Autoria própria.

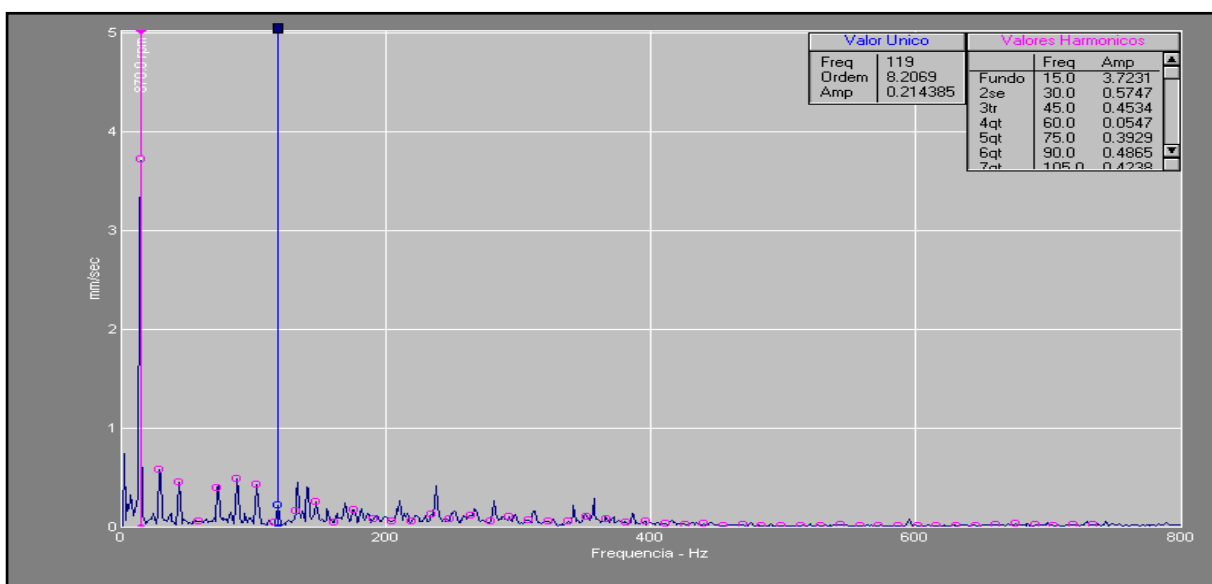


## 4 DESCRIÇÃO DA PESQUISA

Este capítulo apresenta a descrição da pesquisa, referente à análise de vibrações, onde será aplicada para analisar vibrações em exaustores de fornos de fábrica de cimento, com o propósito de identificar seus reais modos de falha. Os dados apresentados são provenientes do departamento de manutenção mecânica, especificamente do setor de planejamento e controle de manutenção de uma empresa cimenteira, localizada na Região Metropolitana de Curitiba.

As análises de vibrações realizadas em um exaustor de forno de fábrica de cimento, utilizado como piloto, serão estendidas para os demais exaustores de fornos. Por intermédio do monitoramento das vibrações e de suas respectivas análises, foi possível identificar quatro modos de falha.

O primeiro modo de falha apresentado é o desbalanceamento do rotor do exaustor. Na figura 15, tem-se o espectro de vibração coletado no mancal de rolamento do lado oposto ao acionamento, que corresponde ao ponto número 4 do mapeamento e cuja identificação é 4HV conforme a configuração apresentada. A rotação síncrona ou real é de 900 rpm ou 15 Hz. O primeiro cursor, com um ponto rosa, identifica a frequência fundamental ou a frequência de rotação de 15 Hz, cuja amplitude do pico de vibração é de 3,72 mm/s de velocidade. Portanto observa-se um domínio da frequência fundamental, em função do desbalanceamento do rotor do exaustor.



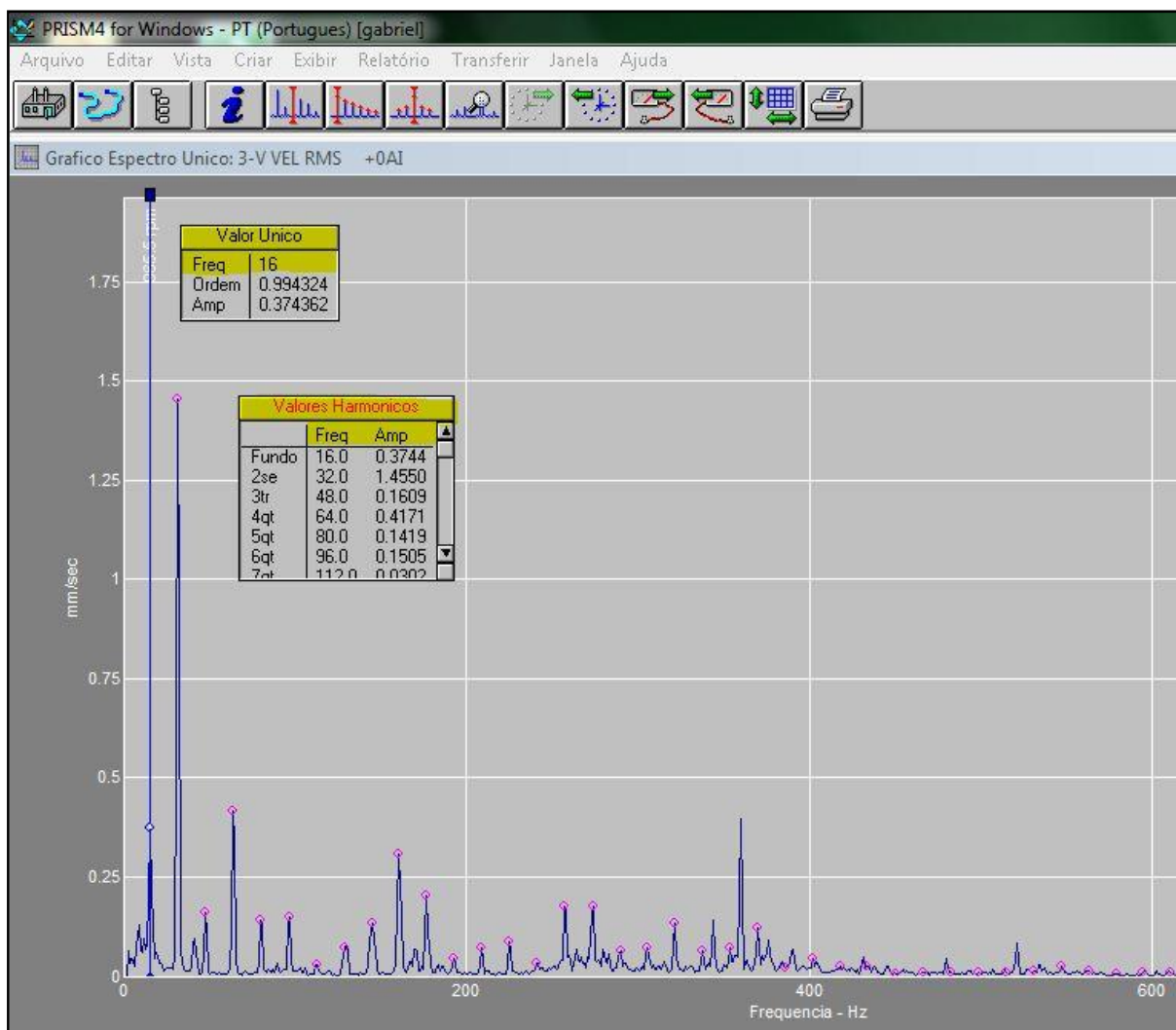
**Figura 15 – Espectro de vibração identificando o desbalanceamento do rotor do exaustor**  
 Fonte: Autoria própria.

Conforme mostrado na foto 3, por intermédio de uma inspeção realizada no rotor do exaustor, observa-se a presença de material acumulado nas aletas do rotor, confirmando o diagnóstico de desbalanceamento.



**Foto 3 – Material acumulado nas aletas do rotor do exaustor**  
Fonte: Autoria própria.

O segundo modo de falha apresentado é o desalinhamento entre eixos ou acoplamentos, ou seja, desalinhamento entre o eixo do motor e o eixo do exaustor. Na figura 16, tem-se o espectro de vibração coletado no mancal de rolamento do lado do acionamento, que corresponde ao ponto número 3 do mapeamento e cuja identificação é 3VV conforme a configuração apresentada. A rotação síncrona ou real é de 960 rpm ou 16 Hz. O primeiro cursor, com um ponto azul, identifica a frequência fundamental ou a frequência de rotação de 16 Hz. Os demais cursores, com pontos em rosa, identificam os picos harmônicos da frequência fundamental, que são múltiplos de 16 Hz e suas respectivas amplitudes de vibração, sendo que o segundo pico é o mais severo, cuja amplitude de vibração é de 1,45 mm/s de velocidade. Portanto tem-se um espectro típico de desalinhamento entre eixos ou acoplamentos.



**Figura 16 – Espectro de vibração identificando o desalinhamento entre eixos**  
**Fonte: Autoria própria.**

Conforme mostrado na foto 4, por intermédio de uma verificação do alinhamento entre eixos ou acoplamentos, observa-se que o acoplamento do lado do exaustor, está aproximadamente 1,5 mm acima do acoplamento do lado do motor, confirmando o diagnóstico de desalinhamento, que no caso é um desalinhamento paralelo.

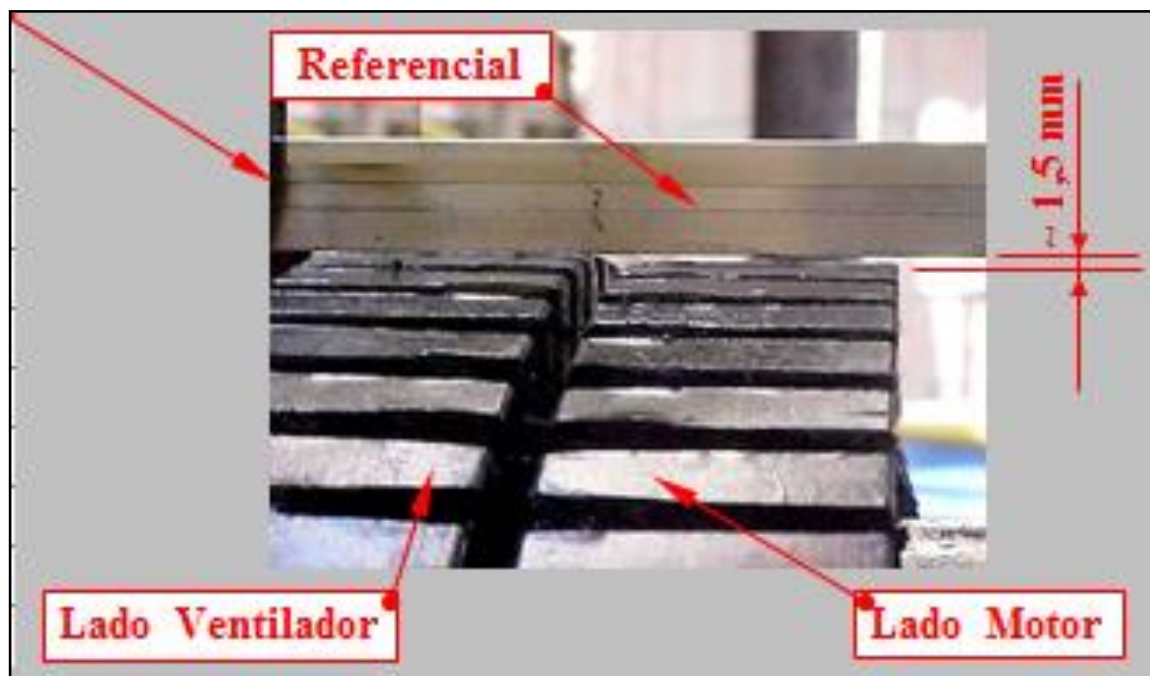
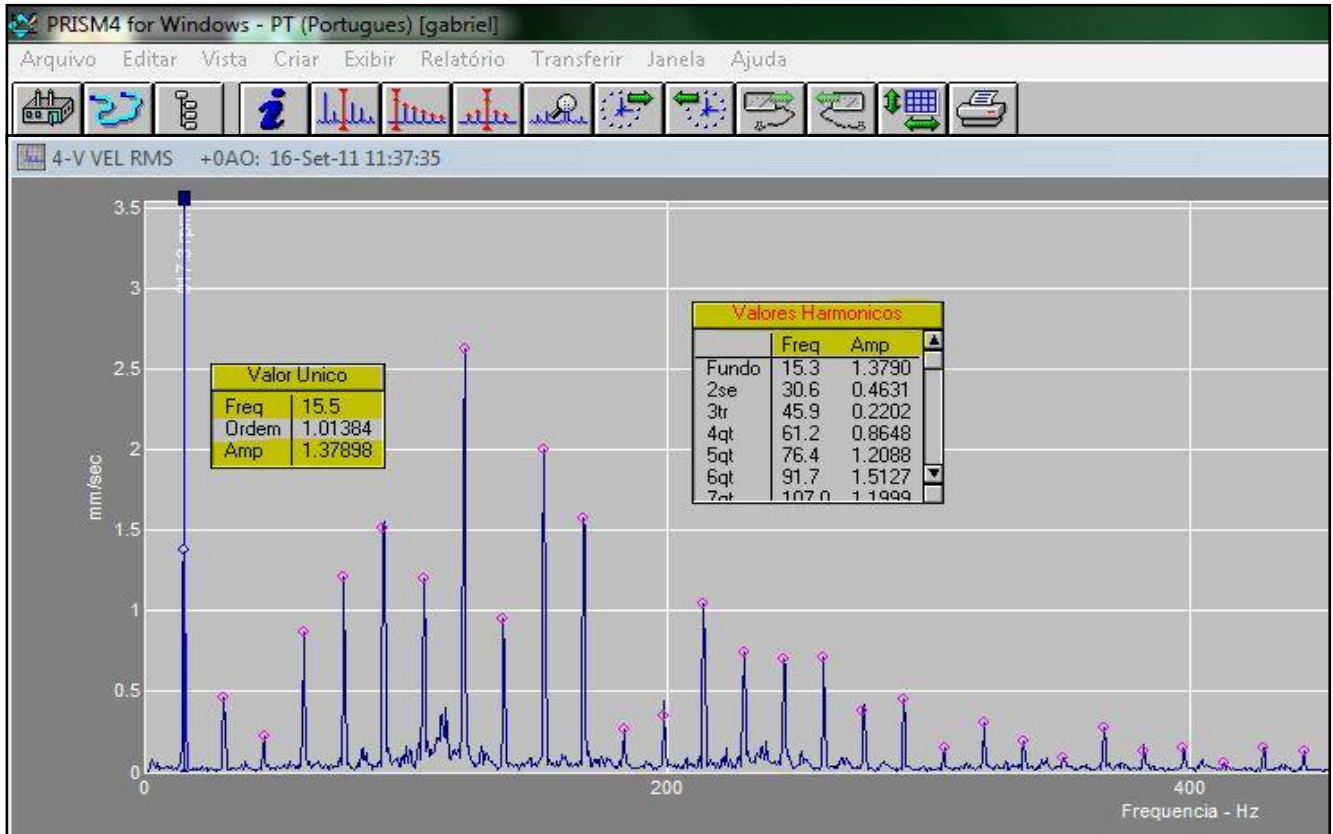


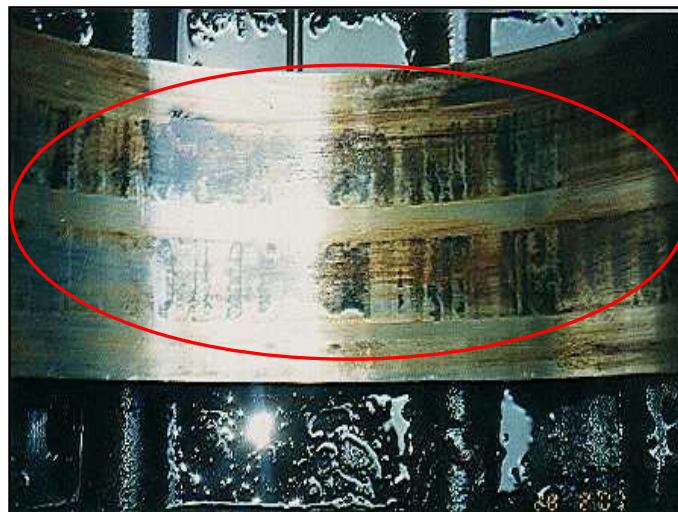
Foto 4 – Desalinhamento paralelo entre acoplamentos  
Fonte: Autoria própria.

O terceiro modo de falha apresentado é as folgas nos mancais de rolamento. Na figura 17, tem-se o espectro de vibração coletado no mancal de rolamento do lado oposto ao acionamento, que corresponde ao ponto número 4 do mapeamento e cuja identificação é 4VV conforme a configuração apresentada. A rotação síncrona ou real é de 930 rpm ou 15,5 Hz. O primeiro cursor, com um ponto azul, identifica a frequência fundamental ou a frequência de rotação de 15,5 Hz. Os demais cursores, com pontos em rosa, identificam os picos harmônicos da frequência fundamental, que são múltiplos de 15,5 Hz e suas respectivas amplitudes de vibração. Observa-se neste espectro, uma série de harmônicos da frequência fundamental com grandes variações de amplitudes de vibração, caracterizando folgas no mancal do exaustor.



**Figura 17 – Espectro de vibração identificando folgas no mancal do exaustor**  
**Fonte: Aatoria própria.**

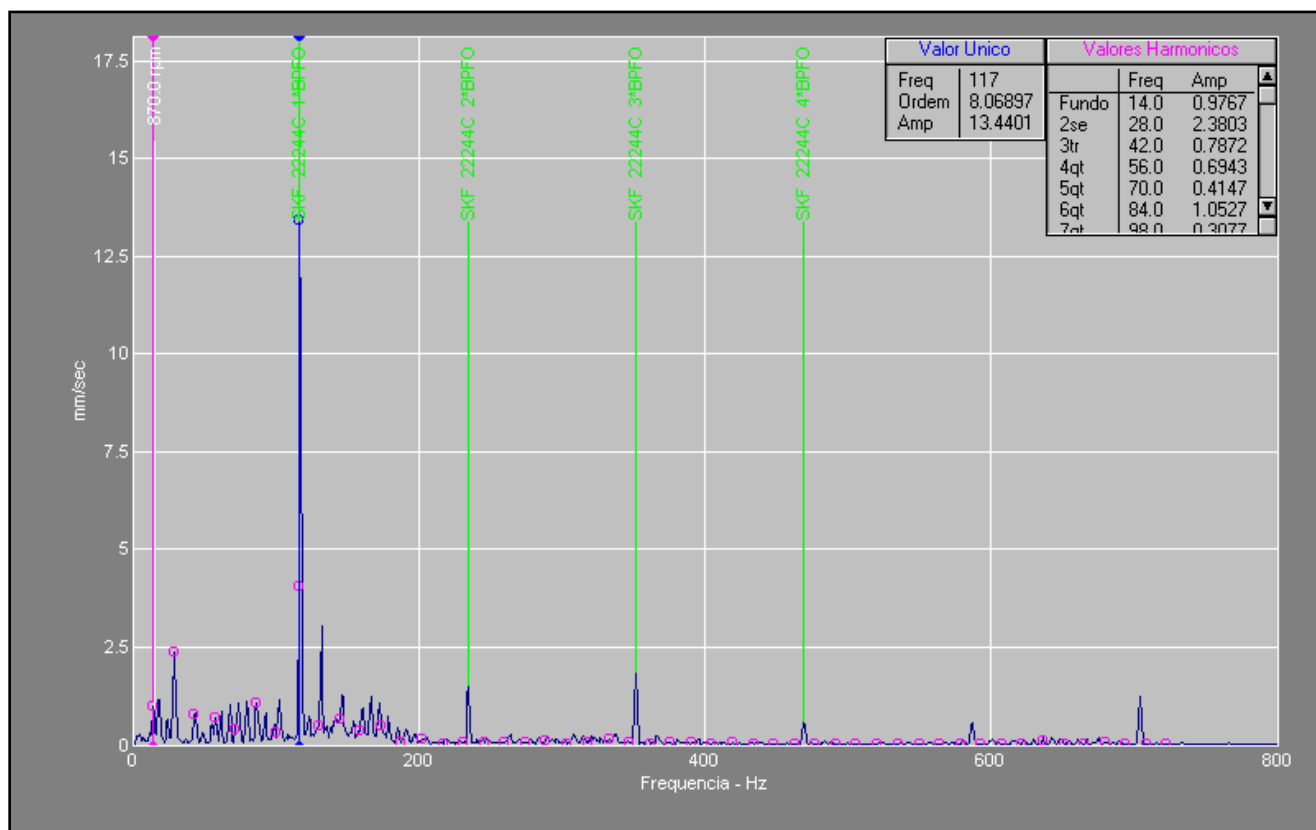
Conforme mostrado na foto 5, por intermédio de uma inspeção realizada no mancal do exaustor, observa-se o desgaste da região do alojamento do rolamento com a base inferior do mancal, confirmando o diagnóstico de folgas mecânicas.



**Foto 5 – Marcas de desgaste no mancal do exaustor**  
**Fonte: Aatoria própria.**



O quarto modo de falha apresentado é o defeito nos rolamentos. Na figura 18, tem-se o espectro de vibração coletado no mancal de rolamento do lado do acionamento, que corresponde ao ponto número 3 do mapeamento e cuja identificação é 3AV conforme a configuração apresentada. A rotação síncrona ou real é de 840 rpm ou 14 Hz. O primeiro cursor, com um ponto rosa, identifica a frequência fundamental ou a frequência de rotação de 14 Hz. O cursor com um ponto azul, identifica a frequência de defeito da pista externa do rolamento de 117 Hz, cuja amplitude de vibração é de 13,44 mm/s de velocidade. Os demais cursores, com pontos em verde, identificam os picos harmônicos da frequência fundamental de defeito da pista externa do rolamento, que são múltiplos de 117 Hz. Tais frequências aparecem no espectro de velocidade, indicando a gravidade do rolamento.



**Figura 18 – Espectro de vibração identificando a frequência de defeito da pista externa**  
**Fonte: Autoria própria.**

Conforme mostrado na foto 6, por intermédio de uma análise realizada no anel externo do rolamento número 22244 C do mancal do lado do acionamento do exaustor, observa-se na pista de rolagem, uma região de escamações, ou seja, destacamento de material, confirmando o diagnóstico de defeito no rolamento, principalmente na pista externa.



**Foto 6 – Destacamento de material na pista**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na foto 7, também observa-se na pista de rolagem, endentações distribuídas sobre toda a pista. Endentações são vazios na superfície da pista, produzidos por partículas sólidas ou limalhas destacadas do próprio anel externo do rolamento.



**Foto 7 – Endentações na pista externa**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na foto 8, tem-se dois dos elementos rolantes do rolamento analisado, mostrando o destacamento de material.



**Foto 8 – Deformações nos elementos rolantes do rolamento**  
Fonte: Autoria própria.

O quadro 3 mostra os valores de vibração global do exaustor, coletados em março de 2012, cuja rotação síncrona ou real é de 900 rpm ou 15 Hz. Os níveis de vibração estão normais e aceitáveis.

Ponto	Velocidade (mm/s)	Aceleração (G)	Envelope de Aceleração (gE)
<b>1 – Vertical</b>	1,42	--	--
<b>1 – Axial</b>	1,73	--	--
<b>1 – Horizontal</b>	1,74	0,55	0,37
<b>2 – Vertical</b>	1,81	--	--
<b>2 – Axial</b>	1,93	--	--
<b>2 – Horizontal</b>	2,46	0,32	0,17
Motor de Acionamento (MCC)			
<b>3 – Vertical</b>	1,09	--	--
<b>3 – Axial</b>	1,56	--	--
<b>3 – Horizontal</b>	2,01	0,34	0,20
<b>4 – Vertical</b>	2,69	--	--
<b>4 – Axial</b>	3,03	--	--
<b>4 – Horizontal</b>	3,20	0,27	0,17
Mancais de Rolamento			

**Quadro 3 – Valores de vibração global do exaustor**  
Fonte: Autoria própria.



## 5 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) pode ser definida como “um processo usado para determinar o que deve ser feito, para assegurar que qualquer ativo físico, continue a fazer o que seus usuários querem que ele faça no seu contexto operacional” (MOUBRAY, 2000, p. 7). Pode-se dizer que a Manutenção Centrada em Confiabilidade, é uma metodologia utilizada para definição das tarefas de manutenção mais adequadas para um equipamento, onde seu objetivo principal é assegurar que o equipamento continue desempenhando suas funções desejadas.

### 5.1 METODOLOGIA MCC

A metodologia de implantação da MCC tem a aplicação fundamental de sete questionamentos realizados em uma ordem sequencial, cujas respostas corretas, irão fornecer dados como: planos de manutenção eficazes e oportunidades de melhorias. As setes questões clássicas da MCC, são, segundo Moubray (2000), Nascif (2001) e Kardec (2001):

- a) quais as funções e os padrões de desempenho associados ao equipamento em seu contexto operacional ?
- b) de que forma o equipamento falha ao cumprir suas funções ?
- c) o que causa cada falha funcional ?
- d) o que acontece quando ocorre cada falha ?
- e) de que forma cada falha importa ou quais são as consequências da falha?
- f) o que pode ser feito para prevenir cada falha ?
- g) o que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa para prevenir a falha ?

O processo de implantação da MCC deve garantir que todas as perguntas sejam respondidas satisfatoriamente e na sequência apresentada.

De um modo geral, a aplicação da MCC é realizada por intermédio do desenvolvimento das etapas, que inclui a delimitação do sistema, definições das funções e padrões de desempenho, identificação das falhas funcionais, aplicação da

Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA), classificação das consequências das falhas e seleção das tarefas de manutenção.

## 5.2 METODOLOGIA FMEA

A Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) é uma das principais ferramentas utilizadas no desenvolvimento de uma análise da MCC. Segundo a norma SAE J1739 (2002), FMEA é um conjunto de atividades sistemáticas que objetiva:

- a) identificar e avaliar as falhas potenciais de um processo e os efeitos das falhas;
- b) definir as ações que possam eliminar ou reduzir a probabilidade de uma falha ocorrer;
- c) documentar o processo.

Segundo a norma ABNT (1994), FMEA é um método qualitativo de análise de confiabilidade, que envolve o estudo dos modos de falha que podem existir para cada item e a determinação dos efeitos de cada modo de falha. No entanto, pode-se ter na análise de um determinado item, a necessidade da avaliação da importância do modo de falha na questão operacional. Nestes casos uma variação da metodologia FMEA pode ser utilizada por intermédio da Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos e sua Criticidade (FMECA). Esta metodologia se diferencia da primeira pelo motivo de apropriar a cada modo de falha, um índice de criticidade que servirá de orientação para priorização das ações a serem tomadas para prevenção ou mitigação das falhas (RIGONI, 2009). O índice de prioridade da FMECA chama-se: Número de Prioridade de Risco (NPR) e é obtido pelo produto dos fatores de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D), logo:

$$\text{NPR} = \text{Severidade} \times \text{Ocorrência} \times \text{Detecção}$$

Quanto maior for o valor do NPR, maior será a criticidade do modo de falha em relação ao processo de manutenção. Os fatores que fazem parte do NPR resultam da classificação comparativa dos modos de falha e segundo Rigoni (2009), Kardec (2001) e Nascif (2001) levam em consideração os seguintes conceitos:

- a) severidade: reflete o grau de gravidade dos efeitos da falha. A faixa de valores varia de 1 a 10, onde 10 representa a maior gravidade;
- b) ocorrência: reflete a probabilidade de ocorrência do modo de falha. A faixa de valores varia de 1 a 10, onde 10 representa a maior probabilidade de ocorrência;
- c) detecção: reflete a dificuldade em se identificar as causas do modo de falha a tempo de prevenir uma falha funcional. A faixa de valores varia de 1 a 10, onde 10 representa a maior dificuldade de detectar as causas do modo de falha.

Tem-se no quadro 4, parâmetros utilizados para classificação dos fatores do NPR, ou seja, dados para estimar os índices de severidade, ocorrência e detecção, bem como o índice de risco.

Componente do NPR	Classificação	Peso
Severidade (S)	Apenas perceptível	1
	Pouca Importância	2 a 3
	Moderadamente grave	4 a 6
	Grave	7 a 8
	Extremamente Grave	9 a 10
Componente do NPR	Classificação	Peso
Ocorrência (O)	Improvável	1
	Muito Pequena	2 a 3
	Pequena	4 a 6
	Média	7 a 8
	Alta	9 a 10
Componente do NPR	Classificação	Peso
Detecção (D)	Alta	1
	Moderada	2 a 5
	Pequena	6 a 8
	Muito pequena	9
	Improvável	10
NPR	Classificação	Peso
Índice de Risco (NPR)	Baixo	1 a 50
	Médio	50 a 100
	Alto	100 a 200
	Muito alto	200 a 1000

**Quadro 4 – Parâmetros para classificação dos fatores do NPR**  
**Fonte: Kardec e Nascif (2001).**

### 5.3 FUNÇÕES E PADRÕES DE DESEMPENHO

A primeira etapa do processo da MCC é a definição da função e dos parâmetros de desempenho do equipamento. O equipamento quando adquirido e colocado em operação, espera-se que o mesmo execute uma determinada função ou conjunto de funções desejadas. Deste modo, ao se implantar um processo de MCC em um equipamento, o objetivo deve ser a conservação da capacidade do equipamento em realizar suas funções esperadas. Em boa parte dos casos, o equipamento apresentará mais de uma função, sendo necessário a classificação em primárias e secundárias (MOUBRAY, 2000).

Dentro do conceito de função, é importante a especificação dos parâmetros de desempenho, que farão parte da função, pois indicam o nível de aceitabilidade da função exercida pelo equipamento. Tem-se na figura 19, a indicação de um valor padrão de desempenho e uma faixa de operação, onde a falha é caracterizada quando o desempenho ultrapassa os limites estabelecidos.

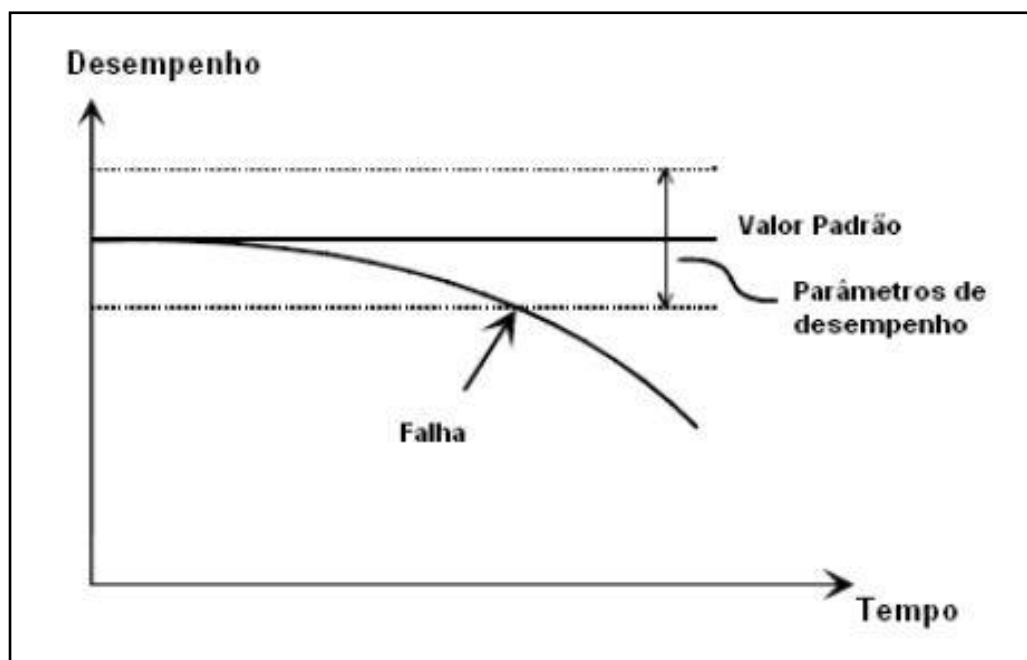


Figura 19 – Falha em relação aos parâmetros de desempenho  
Fonte: Moubray (2000).

A participação efetiva dos usuários nas atividades de definição das funções e dos parâmetros de desempenho é de extrema importância, pois representam excelentes fontes de informação nesta questão. “A definição de uma função deve consistir de um verbo, um objeto e um padrão de desempenho” (MOUBRAY, 2000).

#### 5.4 FALHAS FUNCIONAIS

A metodologia da MCC orienta que sejam relacionadas as falhas funcionais possíveis para cada função. Segundo a norma ABNT (1994), falha é definida como sendo o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. Segundo Moubray (2000), falha funcional é a incapacidade de qualquer equipamento cumprir uma função para um padrão de desempenho aceitável pelo usuário. Em função disto, torna-se correto definir falha em termos da perda de uma determinada função.

#### 5.5 MODOS DE FALHA

Modo de falha pode ser um evento que causa uma falha funcional ou um possível estado de falha de um item, para dada função requerida. O modo de falha retrata um evento que provoca a transição do estado normal para o estado de falha em um equipamento, estando normalmente ligado a um componente do equipamento em questão. O modo de falha é a forma de registro do mecanismo de falha, isto é, descrevem como as falhas funcionais acontecem. Desta forma, o modo de falha deve ser observado como um fator mais importante dentro do processo de manutenção, onde mostra parâmetros sobre a forma mais adequada de prevenção da falha funcional (SIQUEIRA, 2005).

É importante separar os conceitos referentes a modo de falha e causa da falha. O primeiro descreve o que está errado na funcionalidade do item e a causa tem um papel explicativo do por que da falha ter acontecido. A manutenção deve focar na atuação das causas das falhas, com o objetivo de evitar reincidência do modo de falha (SIQUEIRA, 2005).

Para uma adequada política de gerenciamento de falha, é importante que os modos de falha, sejam definidos de forma detalhada (MOUBRAY, 2000).

## 5.6 EFEITOS DA FALHA

Efeito de uma falha pode ser compreendido como a descrição do que acontece quando ocorre um modo de falha. O efeito da falha indica o que poderia acontecer em consequência a um evento de modo de falha, em relação a parada de produção, risco a segurança, danos ao meio ambiente e impactos financeiros. A clara definição deste conceito mostra o objetivo desta etapa da análise da MCC, em avaliar os impactos dos modos de falha nas funções do equipamento e no desempenho para o processo produtivo (MOUBRAY, 2000).

Segundo Moubray (2000), a descrição dos efeitos de uma falha, deve conter informações suficientes para avaliar os seguintes aspectos:

- a) evidência da falha, isto é, como é percebido o efeito;
- b) impacto na segurança e no meio ambiente, isto é, como a falha pode afetar a segurança das pessoas ou causar danos ao meio ambiente;
- c) impacto operacional, isto é, como a falha afeta a produção;
- d) impacto econômico, isto é, perdas financeiras em decorrência da falha;
- e) forma de reparo, isto é, ações necessárias para restaurar a função do sistema após a falha.

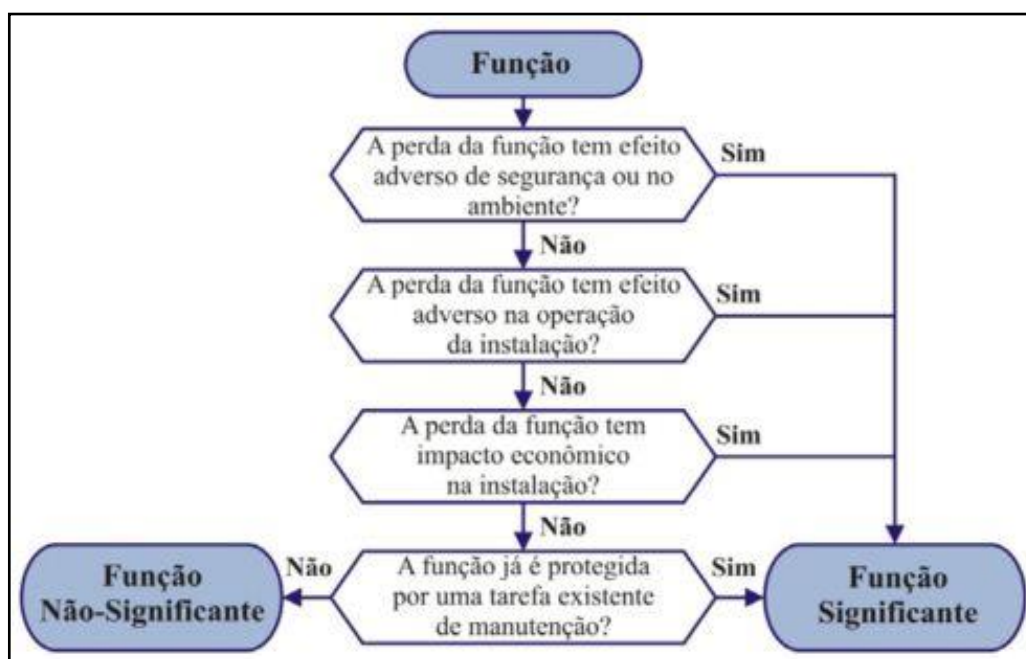
A classificação dos modos de falha em grau de prioridade encerra a parte de avaliação dos efeitos da falha. Tem-se para cada modo de falha, o índice conhecido por Número de Prioridade de Risco (NPR).

## 5.7 CONSEQUÊNCIAS DA FALHA

Nesta fase tem-se a classificação dos efeitos da falha, onde o objetivo é priorizar o tratamento das falhas funcionais, com atenção para o processo de manutenção na prevenção dos modos de falha.

As consequências da falha são mais importantes do que as suas características técnicas, onde o processo de manutenção tende a evitar ou reduzir as consequências da falha, ao invés de prevenir as próprias falhas (MOUBRAY, 2000).

A classificação dos modos de falha é por intermédio de duas ações: a primeira em determinar se a falha funcional tem efeito significativo para o processo e a segunda classificar seus modos de falha, levando em consideração os impactos nos aspectos de segurança, meio ambiente, operação e economia do processo produtivo. As ações são realizadas por intermédio da utilização de uma lógica estruturada, em que se aplica um grupo de questões objetivas. As respostas determinam a direção do fluxo da análise e conseqüentemente a classificação da função e das conseqüências dos modos de falha (RIGONI, 2009). Tem-se na figura 20, a lógica de seleção de funções significantes.



**Figura 20 – Lógica de seleção de funções significantes**  
 Fonte: Rigoni (2009).

Segundo Moubray (2000), as funções significantes, deverão ter seus respectivos modos de falha classificados em função das conseqüências das falhas, são elas:

- a) falha evidente ou oculta, isto é, modos de falha evidentes que são perceptíveis em condições normais de operação e modos de falha ocultos que não são perceptíveis;
- b) conseqüências de segurança e meio ambiente, isto é, falhas que podem causar ferimentos ou morte a alguma pessoa e danos ao meio ambiente;

- c) consequências econômicas e operacionais, isto é, falhas que afetam a produção ou o processo produtivo, provocando redução da produção, restrições da capacidade operacional e significativos custos operacionais.

Tem-se na figura 21, a lógica de classificação das consequências da falha.

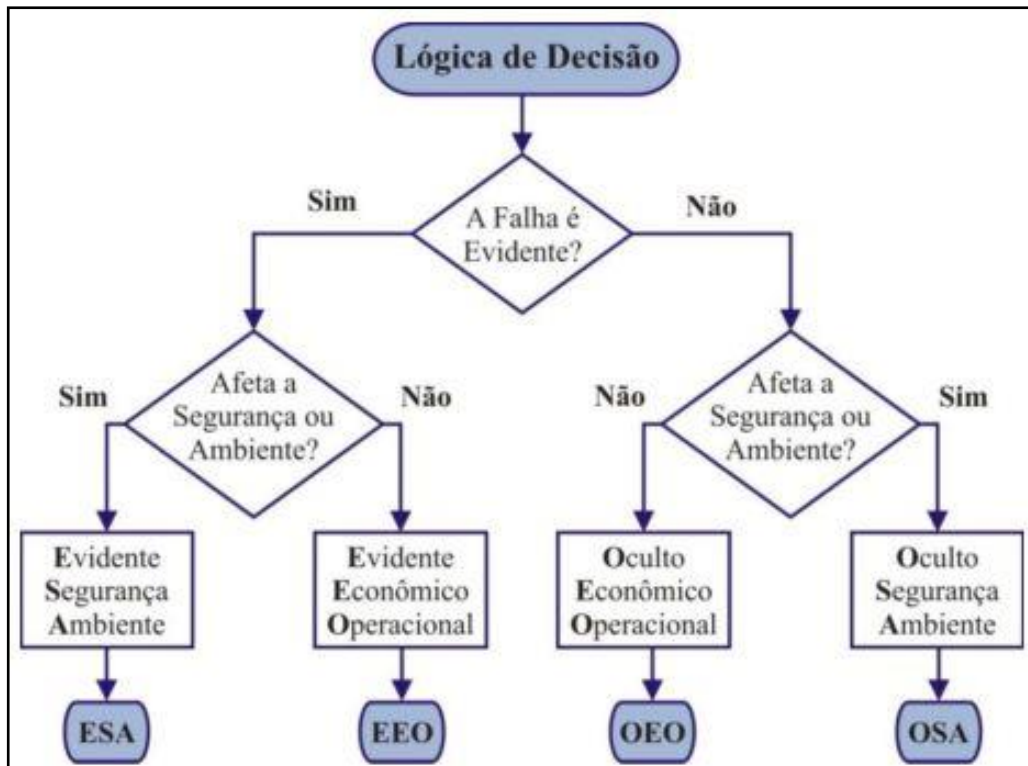


Figura 21 – Lógica de classificação das consequências da falha  
Fonte: Rigoni (2009).

## 5.8 SELEÇÃO DAS TAREFAS DE MANUTENÇÃO

O objetivo desta etapa é determinar as tarefas de manutenção mais apropriadas para um equipamento, visando evitar a ocorrência de falhas funcionais ou reduzir suas consequências. A metodologia da MCC estabelece uma lógica de decisão estruturada, considerando a aplicabilidade técnica e efetividade de cada tarefa. O processo busca definir a melhor escolha, focando a redução de custos e operação do processo, tendo como alvo o atendimento pleno das questões de segurança pessoal e meio ambiente (SIQUEIRA, 2005).



A Manutenção Centrada em Confiabilidade estabelece quatro diagramas lógicos para seleção das tarefas de manutenção. Cada um destes diagramas está associado a uma classificação de consequência do modo de falha. Tem-se nas figuras 22 e 23, os diagramas lógicos para seleção das tarefas de manutenção, conforme a classificação das consequências da falha.

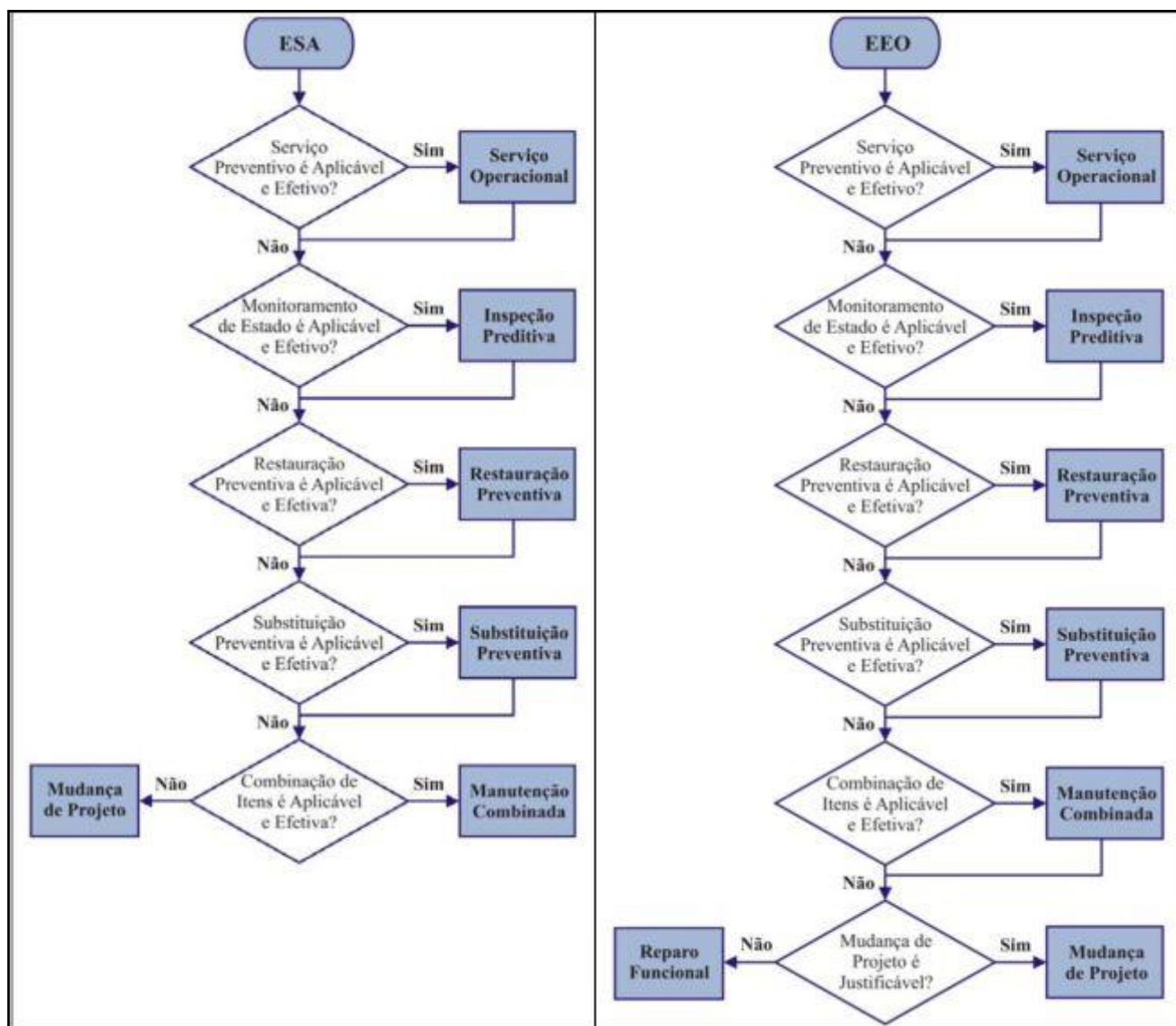


Figura 22 – Diagramas lógicos para seleção das tarefas de manutenção das classes ESA e EEO  
Fonte: Rigoni (2009).

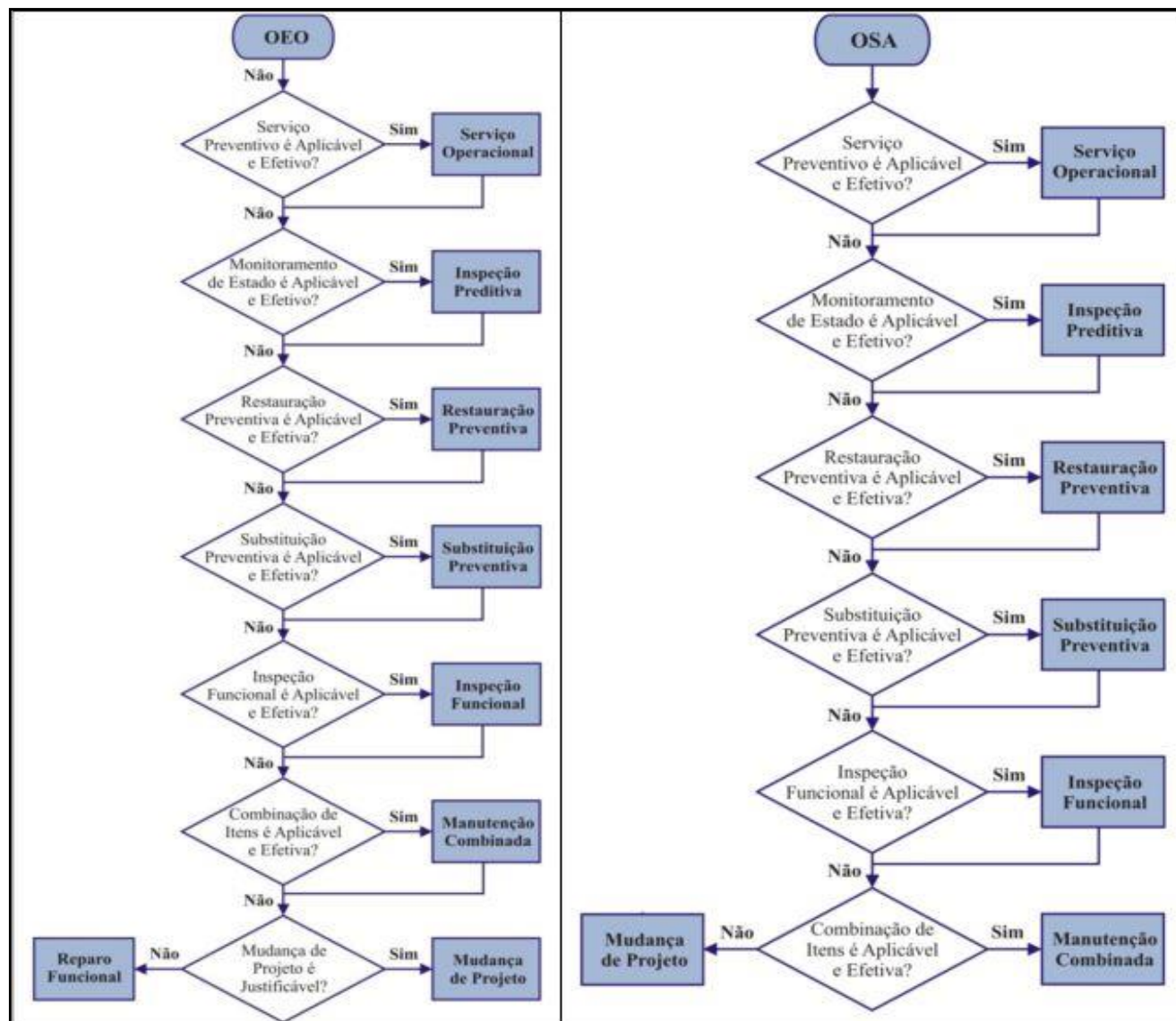


Figura 23 – Diagramas lógicos para seleção das tarefas de manutenção das classes OEO e OSA  
Fonte: Rigoni (2009).

A Manutenção Centrada em Confiabilidade orienta que a seleção das tarefas de manutenção, inicie pela análise da aplicabilidade técnica e efetividade de quatro tipos de atividades definidas de tarefas pró-ativas. São elas: serviço operacional, inspeção preditiva, restauração preventiva e substituição preventiva. Para os modos de falha classificados como ocultos, é adicionado a avaliação da tarefa de inspeção funcional, ou seja, detectiva. Preferencialmente deve-se selecionar uma única tarefa, capaz de prevenir o estado de falha funcional ou reduzir suas consequências. Caso necessite aplicar uma combinação de tarefas, atentar para o menor custo efetivo (SIQUEIRA, 2005).

Caso nenhuma tarefa pró-ativa seja possível, a lógica de decisão da MCC permite a aplicação de duas tarefas *default*, que são: mudança de projeto e reparo funcional. Situações em que o modo de falha tem consequências com impactos significativos na segurança ou no meio ambiente, não é permitido a tarefa de reparo funcional, ou seja, correção após a falha. Para estes casos é realizada uma mudança de projeto que elimine os riscos a segurança ou ao meio ambiente (SIQUEIRA, 2005).

Para os casos em que o modo de falha tem consequências com impactos significativos apenas na operação ou economia do processo produtivo, a MCC orienta que seja feita uma avaliação viável economicamente, entre as opções de mudança de projeto e reparo funcional. A decisão da escolha entre as duas dependerá do menor custo efetivo dentro de um intervalo de tempo avaliado (SIQUEIRA, 2005).

## **6 APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE**

Este capítulo apresenta a aplicação da metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, utilizando o referencial teórico apresentado no capítulo 5 deste trabalho, para os exaustores de fornos de fábrica de cimento. Foram utilizados os quatro modos de falha, identificados por intermédio do monitoramento das vibrações e de suas respectivas análises.

### **6.1 ADEQUAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE**

Os critérios e os quesitos a serem ponderados para adequação da MCC aplicada aos exaustores são mostrados nos apêndices B, C, D, E e F.

### **6.2 PREPARAÇÃO**

A etapa de preparação tem como objetivo a formação da equipe de trabalho e a elaboração do planejamento estratégico para implantação da MCC. Destacam-se nesta etapa a seleção do corpo técnico e as designações do facilitador e do patrocinador. O facilitador deve possuir bons conhecimentos da metodologia MCC e capacidade em coordenar equipes de trabalho. Quanto ao patrocinador, deve ser preferencialmente o gerente de manutenção, onde sua principal função é mobilizar recursos humanos e financeiros necessários para implementação da MCC. O corpo técnico deve ser selecionado com base na qualidade do conhecimento sobre o equipamento e uma boa experiência profissional. Tal equipe deve contemplar profissionais dos processos de manutenção e operação do equipamento analisado.

Para este trabalho, foram abordadas algumas etapas da MCC, onde o projeto piloto é o sistema de clinquerização e cujo subsistema analisado é o exaustor de forno de fábrica de cimento.

### 6.3 SELEÇÃO DO SISTEMA E COLETA DE INFORMAÇÕES

O objetivo desta etapa é identificar e documentar o sistema e o subsistema submetido a análise e implantação da MCC, bem como coletar e armazenar todas as informações técnicas do equipamento selecionado.

Os critérios que foram levados em consideração, para escolha do exaustor de forno como plano piloto deste estudo foram, principalmente, a criticidade que este equipamento representa para produção de clínquer. A parada do exaustor de forno, em função de falhas dos componentes, provoca a interrupção da produção de clínquer, ou seja, interrupção de todo o sistema de clinquerização e consequentemente um redução da produção de cimento, bem como um alto custo de manutenção corretiva.

No caso de uma parada do exaustor por falha do rolamento do mancal do lado do acionamento, tem-se os seguintes custos para realizar a troca do mesmo, utilizando 6 mecânicos próprios e 17 horas aproximadas de trabalho:

- custo com materiais: R\$ 25.110,00;
- custo da diária do guindaste: R\$ 1.200,00;
- perda de produção de clínquer: 1564 toneladas;
- perda de receita: R\$ 952.000,00.

Os resultados esperados e obtidos para a seleção do sistema de clinquerização e do subsistema exaustor de forno, são:

- a) eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção. Com a implantação das técnicas apresentadas neste estudo, eliminaram-se as inspeções dos mancais de rolamento e verificação do alinhamento entre eixos. Para conferência do alinhamento, eram necessários 2 mecânicos e 3 horas para execução. Para inspeção dos mancais de rolamento, eram necessários 2 mecânicos e 6 horas de execução. No caso da inspeção dos mancais, era necessário esgotar o óleo lubrificante dos mancais. Houve uma economia, em relação ao óleo lubrificante utilizado, de R\$ 1.400,00 por ano;
- b) reduzir o trabalho de emergência ou a manutenção corretiva não planejada. O número de paradas do processo, em função de falhas dos

componentes do exaustor, foi em 2000 de 2 paradas, em 2001 de 1 parada e em 2002 de 1 parada. Após a implantação da análise das vibrações em 2002, foi diagnosticado em 2003, por intermédio das análises, defeito do rolamento do mancal do lado do acionamento e folgas nos mancais do exaustor, bem como desbalanceamento do rotor. Para este caso, foi realizada uma parada corretiva planejada. Em 2006 foi diagnosticado, por intermédio das análises, defeito do rolamento do mancal do lado oposto ao acionamento. Para este caso, foram monitorados os níveis de vibração e a tendência do avanço da falha e trocado o mancal e rolamento, em uma parada de forno semestral. Após este caso, não houve nenhuma ocorrência de falha dos mancais de rolamento do exaustor. Houve casos de desbalanceamento do rotor, diagnosticado por intermédio das análises, provocados por desgaste ou pequeno acúmulo de pó nas aletas. Para estes casos, foram monitorados os níveis de vibração e a tendência do avanço da falha e realizado limpeza e recuperação do rotor, nas paradas de forno semestrais;

- c) reduzir custos de manutenção corretiva. Com a implantação das técnicas apresentadas neste estudo, espera-se obter uma redução significativa de manutenção corretiva do exaustor. Com uma média de parada de 1,3 ao ano, espera-se obter para o mesmo período, um aumento de receita na ordem de R\$ 1.271.803,00.

Para a coleta de informações deste trabalho, foram utilizados os seguintes documentos:

- manual de operação e manutenção;
- projetos de instalação;
- planos de manutenção;
- histórico de paradas operacionais.

#### 6.4 CONSTRUÇÃO DO FMECA

O objetivo desta etapa é identificar e documentar a função do sistema selecionado, a falha funcional, seus respectivos modos de falha, os efeitos, as causas dos modos de falha e o Número de Prioridade de Risco (NPR) para cada modo de falha. Na construção do FMECA, foram utilizados os quatro modos de falha, identificados por intermédio do monitoramento das vibrações e de suas respectivas análises, conforme mostrado no apêndice G.

#### 6.5 SELEÇÃO DAS FUNÇÕES SIGNIFICANTES E CLASSIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA

Nesta etapa é determinado se a falha funcional tem efeito significativo, bem como a classificação de seus modos de falha, onde são levados em consideração os impactos nos aspectos pilares da MCC.

Para o sistema de clínquerização, onde o exaustor de forno tem a função de transportar os gases quentes do forno, a falha funcional deste equipamento, tem efeito significativo para o processo produtivo. O produto desta etapa é mostrado no apêndice H.

#### 6.6 SELEÇÃO DAS TAREFAS DE MANUTENÇÃO APLICÁVEIS

Na etapa de seleção das tarefas de manutenção, o objetivo é determinar quais as tarefas de manutenção são aplicáveis e efetivas. A seleção destas tarefas é mostrada no apêndice I.

#### 6.7 DEFINIÇÃO DOS INTERVALOS INICIAIS E AGRUPAMENTOS DE TAREFAS

O objetivo desta etapa é definir a periodicidade inicial das atividades de manutenção selecionadas na etapa anterior e agrupar estas atividades de um modo estratégico, para otimizar os serviços de manutenção. O produto desta etapa é mostrado no apêndice J.

## 7 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões da monografia, referente a análise de vibrações, onde foi aplicada para analisar vibrações em um exaustor de forno de fábrica de cimento, com a finalidade de identificar seus modos de falha e utilizá-las para implantação de algumas etapas da metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade.

No caso do exaustor de forno de fábrica de cimento desta pesquisa, foram identificados os seguintes modos de falha:

- a) desbalanceamento do rotor do exaustor;
- b) desalinhamento entre eixos ou acoplamentos;
- c) folgas nos mancais de rolamento;
- d) defeito nos rolamentos.

Em função desta identificação, foi possível: levantar as causas raízes de seus modos de falha, que é o objetivo geral desta monografia, tomar e propor ações preventivas e preditivas para mitigar as causas raízes dos principais modos de falha identificados.

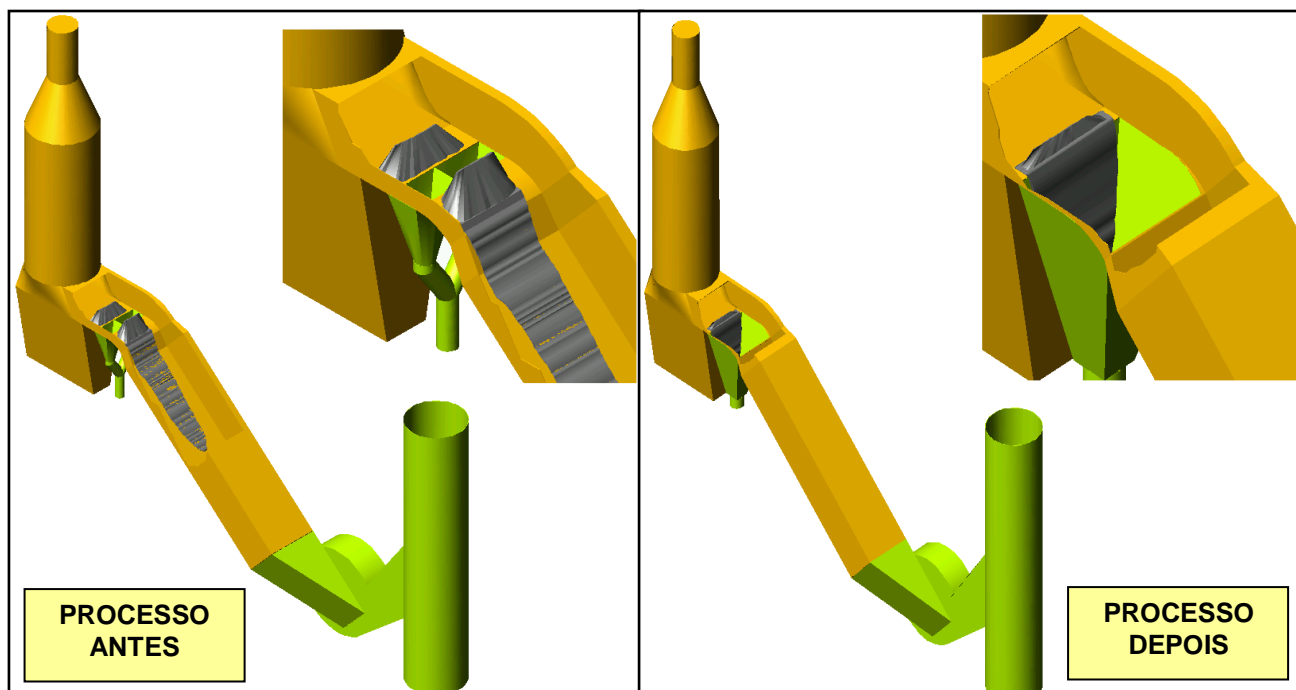
Com base na análise dos modos de falha, seus efeitos e sua criticidade, conforme mostrado no apêndice G, foi possível propor tarefas de manutenção, bem como a periodicidade com que estas devam ser realizadas, para mitigar as causas raízes dos principais modos de falha identificados, conforme mostrado no apêndice J.

O plano de manutenção proposto pela MCC, mostrado no apêndice J, contempla uma boa parte das tarefas de manutenção relacionadas no plano existente, porém com uma grande oportunidade de melhoria. Para o plano de manutenção preventiva, melhorar a inspeção do sistema de lubrificação e inserir a inspeção da base de fixação do conjunto. Para o plano de manutenção preditiva, além da análise de vibração, inserir a análise de óleo e/ou ferrografia e termografia.

Para a passagem excessiva de material oriundo do processo pelo rotor do exaustor, provocando colagem de material nas aletas e conseqüentemente desbalanceamento do rotor e sobrecarga nos mancais de rolamento, foi modificado o duto de entrada do exaustor, eliminando o fenômeno chamado de avalanche de material, que caía direto no rotor do exaustor, conforme mostrado na figura 24. Tal



melhoria contribuiu para o aumento da vida útil dos mancais e rolamentos do exaustor, bem como, para a diminuição da frequência de desbalanceamento do rotor.



**Figura 24 – Duto de entrada do exaustor – processo antes e depois da modificação**  
Fonte: Autoria própria.

Quanto aos objetivos específicos, conclui-se:

- a) todos os fundamentos teóricos característicos para a análise de vibrações descritos, foram indispensáveis para as análises ou diagnósticos desta pesquisa;
- b) o programa Prism4 e o coletor e analisador de vibrações Microlog CMVA 60, ambos da empresa SKF, utilizados, atenderam as necessidades deste trabalho;
- c) a configuração da estrutura dos dados necessários no programa de análise de vibrações, bem como o mapeamento dos pontos de coleta de vibrações dos exaustores definidos, atenderam necessidades desta pesquisa;
- d) mediante as análises dos espectros de vibrações, foram identificados 4 modos de falha do exaustor. Estes já mencionados;

- e) por intermédio dos dados coletados e armazenados, pode-se implementar a confiabilidade quantitativa dos exaustores, utilizando programas específicos de confiabilidade;
- f) por intermédio da aplicação da metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, foi possível levantar as causas raízes dos modos de falha identificados, bem como, propor ações para mitigar as causas raízes dos principais modos de falha identificados.

Como propostas para trabalhos futuros, citam-se:

- a) utilizar os modos de falha identificados para o exaustor desta pesquisa, em outros exaustores que possuam a mesma modelagem construtiva;
- b) identificar os modos de falha mediante as análises dos espectros de vibrações, aplicar a metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, para levantar as causas raízes dos modos de falha identificados e propor ações para mitigar as causas raízes dos principais modos de falha identificados de outros equipamentos críticos para o processo produtivo, com base nesta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Marcio Tadeu. **Vibrações Mecânicas Para Engenheiros**. São Paulo: Edgard Blucher, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma NBR 5462**. Rio de Janeiro, 1994.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2010. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/files/textos/032.pdf>>. Acesso em: 07 fev. 2012.

CAUÊ CIMENTOS, 2011. Disponível em: <<http://www.caue.com.br/investidores/Paginas/dados-do-mercado.aspx>>. Acesso em: 07 fev. 2012.

FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO À INDÚSTRIA. **Análise de Vibrações**. Itajubá, 2000.

FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO À INDÚSTRIA. **Análise de Vibrações em Rolamentos e Engrenagens**. Itajubá, 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Norma ISO 10816-1**. 1995.

ITAMBÉ. **Departamento de Produção**. Balsa Nova, 2010.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: Função Estratégica**. Rio de Janeiro: Quality Mark, 2001.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio; BARONI, Tarcísio. **Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas**. Rio de Janeiro: Quality Mark, 2002.

MOUBRAY, John. **Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Lutterworth, Inglaterra: Aladon, 2000.

NSK. **Vibrações Mecânicas Aplicadas à Manutenção**. São Paulo, 2004.

RIGONI, Emerson. **Metodologia para Implantação da Manutenção Centrada em Confiabilidade: uma Abordagem Fundamentada em Sistemas Baseados em Conhecimento e Lógica Fuzzy**. Florianópolis, 2009.

SIQUEIRA, Iony Patriota de. **Manutenção Centrada em Confiabilidade – Manual de Implementação**. Rio de Janeiro: Quality Mark, 2005.

SKF. **Análise de Máquinas Através de Monitoramento de Vibrações**. São Paulo, 2000.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **Norma SAE J1739**. Warrendale, Estados Unidos, 2002.

TECÉM TECNOLOGIA EMPRESARIAL , 2009. Disponível em:  
<<http://www.tecem.com.br/site/downloads/artigos/tendencia.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de Bibliotecas. **Normas para Elaboração de Trabalhos Acadêmicos**. Curitiba: UTFPR, 2008.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Configuração da Estrutura dos Dados dos Pontos do Exaustor.

<b>CONFIGURAÇÃO DA ESTRUTURA DOS DADOS DOS PONTOS DO EXAUSTOR</b>							
<b>DADOS PARA TODOS OS PONTOS DO EXAUSTOR (MOTOR E EXAUSTOR):</b>							
Entrada da Sensibilidade do Acelerômetro: 100 mv/EU / Detecção: RMS / Rotação: 1000 rpm							
Captura: FFT – Transformada Rápida de Fourier / Auto Captura: Sempre							
Tempo de Armazenamento dos Dados: 60 meses							
Obs 1 - Captura Para Aceleração e Envelope de Aceleração: FFT – Transformada Rápida de Fourier e Tempo							
Obs 2 - Faixa da Entrada do Filtro Para Envelope de Aceleração: Filtro 3 – 500 Hz a 10 KHz							
Ponto Identificação	Descrição	Limite de Frequência Inferior (Hz)	Frequência Inicial (Hz)	Frequência Final (Hz)	Número de Linhas Espectrais	Resolução Espectral (Hz)	Número de Média
1VV	Motor LOA Vertical Velocidade	2	0	1000	800	1,25	4
1HV	Motor LOA Horizontal Velocidade	2	0	1000	800	1,25	4
1HA	Motor LOA Horizontal Aceleração	1000	1000	5000	800	5	2
1HEA	Motor LOA Horizontal Envelope de Aceleração	0	0	1000	1600	0,625	2
1AV	Motor LOA Axial Velocidade	2	0	1000	800	1,25	4
2VV	Motor LA Vertical Velocidade	2	0	1000	800	1,25	4
2HV	Motor LA Horizontal Velocidade	2	0	1000	800	1,25	4
2HV Zoom	Motor LA Horizontal Velocidade Zoom	2	0	200	3200	0,062	4
2HA	Motor LA Horizontal Aceleração	1000	1000	5000	800	5	2
2HEA	Motor LA Horizontal Envelope de Aceleração	0	0	1000	1600	0,625	2
2AV	Motor LA Axial Velocidade	2	0	1000	800	1,25	4
3VV	Mancal de Rolamento LA Vertical Velocidade	2	0	1000	800	1,25	4
3HV	Mancal de Rolamento LA Horizontal Velocidade	2	0	1000	800	1,25	4
3HA	Mancal de Rolamento LA Horizontal Aceleração	1000	1000	5000	800	5	2
3HEA	Mancal de Rolamento LA Horizontal Envelope de Aceleração	0	0	1000	1600	0,625	2
3AV	Mancal de Rolamento LA Axial Velocidade	2	0	1000	800	1,25	4
4VV	Mancal de Rolamento LOA Vertical Velocidade	2	0	1000	800	1,25	4
4HV	Mancal de Rolamento LOA Horizontal Velocidade	2	0	1000	800	1,25	4
4HA	Mancal de Rolamento LOA Horizontal Aceleração	1000	1000	5000	800	5	2
4HEA	Mancal de Rolamento LOA Horizontal Envelope de Aceleração	0	0	1000	1600	0,625	2
4AV	Mancal de Rolamento LOA Axial Velocidade	2	0	1000	800	1,25	4

## APÊNDICE B – Preparação – Quesitos a Serem Ponderados – Critérios 1.

Manutenção Centrada em Confiabilidade - MCC - Etapa 0							
Preparação							
Critérios		Quesitos a Serem Ponderados		Aderência (0 a 10)	Ideal	Justificativa (Aderência < Ideal)	Plano de Ação
C1	Disponibilidade da Informação / Recursos	Q1	Todas as entradas, controles e mecanismos da Etapa 0, do procedimento de referência para implantação da MCC, estão disponíveis.	7	8	Equipe sem conhecimento em MCC e dificuldade na disponibilidade da equipe.	Realizar treinamento da equipe e obter o envolvimento da gerência.
		Q2	Existe uma documentação consistente das ações de manutenção.	7	8	Retorno falho da informação das ações de manutenção.	Realizar treinamento da equipe.
		Q3	Os sistemas candidatos a implantação da MCC possuem uma documentação técnica adequada.	9	8		
		Q4	O planejamento estratégico da empresa, com relação a manutenção, está documentado de forma auditável e contempla a manutenção e a implantação da MCC.	6	8	Não contempla a implantação da MCC.	Revisar o planejamento estratégico.

APÊNDICE C – Preparação – Quesitos a Serem Ponderados – Critérios 2.

Manutenção Centrada em Confiabilidade - MCC - Etapa 0							
Preparação							
Critérios		Quesitos a Serem Ponderados		Aderência (0 a 10)	Ideal	Justificativa (Aderência < Ideal)	Plano de Ação
C2	Condição e Desempenho Atual da Manutenção	Q1	O percentual de Manutenção Preditiva (baseada na condição) é maior do que o de Manutenção Preventiva (baseada no tempo) ou Corretiva.	8	8		
		Q2	O desempenho atual da manutenção é satisfatório e homogêneo em todo o sistema fabril, contando com uma equipe adequadamente preparada para o desempenho de sua função.	6	8	Heterogênea em função da disparidade de experiência dos mantenedores.	Realizar treinamento da equipe.
		Q3	Historicamente o número de operadores, no chão de fábrica, é pequeno quando comparado a sistemas similares.	9	8		
		Q4	Os custos diretos e indiretos devidos a manutenção são altos com o sistema atual de gestão da manutenção quando comparados a outros sistemas similares.	8	8		

## APÊNDICE D – Preparação – Quesitos a Serem Ponderados – Critérios 3.

Manutenção Centrada em Confiabilidade - MCC - Etapa 0							
Preparação							
Critérios	Quesitos a Serem Ponderados	Aderência (0 a 10)	Ideal	Justificativa (Aderência < Ideal)	Plano de Ação		
C3	Sistema Computacional de Suporte	Q1	Para auxiliar a implantação do programa de MCC, um sistema computacional de automação de escritório estará disponível com as seguintes funcionalidades: desenho técnico, processamento de texto, banco de dados e planilhas eletrônicas.	8	8		
		Q2	Existe um sistema de gestão da informação integrado, implantado na empresa, que atende de forma satisfatória às necessidades do setor/equipe de manutenção.	8	8		
		Q3	A gestão da manutenção conta com um sistema computacional adequadamente dimensionado para o tamanho da empresa e do sistema que se quer implantar a MCC.	9	8		
		Q4	O sistema computacional de gestão da manutenção é de uso amigável, toda a equipe possui treinamento adequado para utilizá-lo e sua utilização faz parte da rotina de trabalho da equipe de manutenção.	6	8	Acesso apenas ao corpo técnico.	Implantar sistemática de treinamento das equipes.
		Q5	O sistema computacional de gestão da manutenção permite integração com softwares específicos de implantação e gestão da MCC. Caso contrário, conta com no mínimo as seguintes funcionalidades: inclusão de novas tarefas com períodos customizados, controle estatístico da manutenção e agrupamento de tarefas de manutenção de forma otimizada.	8	8		



APÊNDICE E – Preparação – Quesitos a Serem Ponderados – Critérios 4.

Manutenção Centrada em Confiabilidade - MCC - Etapa 0							
Preparação							
Critérios		Quesitos a Serem Ponderados		Aderência (0 a 10)	Ideal	Justificativa (Aderência < Ideal)	Plano de Ação
C4	Cultura da Manutenção / Empresa	Q1	O setor e/ou equipe de manutenção atual registra suas ações de forma suficientemente detalhada para suportar uma análise estatística de tais ações.	6	8	Registro falho da informação das ações de manutenção.	Realizar treinamento da equipe.
		Q2	A manutenção tem função estratégica dentro da empresa e ocupa um lugar de destaque na estrutura organizacional.	9	8		
		Q3	A equipe e/ou setor de manutenção, em suas diferentes categorias profissionais, são motivados, cooperativos e conscientes de seu papel estratégico dentro de empresa.	8	8		
		Q4	Outras metodologias de gestão da manutenção foram previamente adotadas e/ou estudadas e culminaram com a adoção da MCC, por ser de custo/benefício mais vantajosa.	5	8	Planos de manutenção estabelecidos com base histórica e de forma intuitiva.	Revisar planos de manutenção com base no MCC.
		Q5	O atual programa de manutenção é continuamente atualizado e auditado por pessoal interno ou externo à empresa ou setor de manutenção.	6	8	Não é continuamente atualizado e auditado.	Estabelecer programa de atualização e auditoria.

## APÊNDICE F – Preparação – Quesitos a Serem Ponderados – Critérios 5.

Manutenção Centrada em Confiabilidade - MCC - Etapa 0							
Preparação							
Critérios	Quesitos a Serem Ponderados	Aderência (0 a 10)	Ideal	Justificativa (Aderência < Ideal)	Plano de Ação		
C5	Gerenciamento Estratégico da Manutenção	Q1	Existe um orçamento para viabilizar a implantação da MCC e que supra as seguintes necessidades: treinamento de pessoal dentro da filosofia da MCC, disponibilidade de recursos humanos, implantação de ações preditivas e implementação de sistemas computacionais de suporte a MCC, caso necessário.	5	8	Não há orçamento previsto específico para implantação da MCC.	Realizar um levantamento das necessidades e adequar junto ao orçamento anual de manutenção.
		Q2	As decisões referentes às estratégias de gestão da manutenção estão em conformidade e tem suporte por outros setores da empresa, o que caracteriza o bom relacionamento institucional.	8	8		
		Q3	Os níveis gerenciais vêem a manutenção como investimento e não como um custo.	8	8		
		Q4	A MCC é visualizada como parte de um processo geral/global de gerenciamento da manutenção, com métodos e técnicas, podendo coexistir outras metodologias de gestão da manutenção em paralelo ou integradas a MCC.	8	8		
		Q5	Grande parte da manutenção é terceirizada, entretanto, seus controles, registros e demais itens de gestão estão a cargo da empresa ou seu representante.	10	8		

## APÊNDICE G – Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e sua Criticidade-FMECA.

Manutenção Centrada em Confiabilidade - MCC - Etapa 3														
Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e sua Criticidade - FMECA														
Responsável pela Análise			Auditado por			Data		Página / De						
Gabriel Milani Junior			Gerente de Manutenção			2012		1 / 1						
Sistema						Id_Sistema								
Clinquerização						1								
Subsistema Analisado						Id_Subsistema								
Exaustor de Forno						1.1								
Id_Função	Função	Id_Falha Funcional	Falha Funcional	Id_Modo de Falha	Modo de Falha	Efeito			Severidade (S)	Causas do Modo de Falha	Ocorrência (O)	Controles Atuais	Detecção (D)	NPR (S.O.D)
						Local	Sistema	Planta						
1	Transportar os gases quentes do forno	1	Não transporta	1	Desbalanceamento do rotor	O exaustor interrompe a produção	Interrupção da produção - Manutenção realiza o balanceamento em 5 h	Redução da produção	7	> Desgaste do rotor > Impregnação de pó ou farinha no rotor > Queda de massa de balanceamento ou aleta do rotor	4	> Inspeção Preditiva > Inspeção Preventiva	2	56 (Médio)
				2	Desalinhamento entre eixos	O exaustor interrompe a produção	Interrupção da produção - Manutenção realiza o alinhamento em 3 h	Redução da produção	7	> Alinhamento incorreto > Rompimento/Trinca da base de fixação do conjunto	2	> Inspeção Preditiva	2	28 (Baixo)
				3	Folgas nos mancais de rolamento	O exaustor interrompe a produção	Interrupção da produção - Manutenção substitui os mancais em 17 h	Redução da produção	7	> Desbalanceamento do rotor > Desalinhamento entre eixos > Óleo lubrificante deteriorado/contaminado > Montagem incorreta > Falha de lubrificação	5	> Inspeção Preditiva > Plano de Lubrificação	3	105 (Alto)
				4	Defeito nos rolamentos	O exaustor interrompe a produção	Interrupção da produção - Manutenção substitui os rolamentos em 17 h	Redução da produção	7	> Desbalanceamento do rotor > Desalinhamento entre eixos > Óleo lubrificante deteriorado/contaminado > Montagem incorreta > Falha de lubrificação	6	> Inspeção Preditiva > Plano de Lubrificação	3	126 (Alto)

APÊNDICE H – Funções Significantes e Classificação de seus Modos de Falha.

<p align="center"><b>Manutenção Centrada em Confiabilidade - MCC - Etapa 4</b></p> <p align="center"><b>Seleção das Funções Significantes e Classificação de seus Modos de Falha</b></p>							
Responsável pela Análise		Auditado por		Data	Página / De		
Gabriel Milani Junior		Gerente de Manutenção		2012	1 / 1		
Sistema				Id_Sistema			
Clinquerização				1			
Subsistema Analisado				Id_Subsistema			
Exaustor de Forno				1.1			
Id_Função	Id_Falha Funcional	Id_Modo de Falha	Modo de Falha	A Falha Funcional ou o Efeito do Modo de Falha é Evidente ?	A Falha Funcional ou o Efeito do Modo de Falha Afeta a Segurança e/ou o Meio Ambiente ?	A Falha Funcional ou o Efeito do Modo de Falha tem Consequências Econômicas e/ou Operacionais ?	<p align="center">Categoria</p> ESA – Evidente Segurança Ambiente EEO – Evidente Econômico Operacional OSA – Oculto Segurança Ambiente OEO – Oculto Econômico Operacional
1	1	1	Desbalanceamento do rotor	<b>SIM</b>	<b>NÃO</b>	<b>SIM</b>	<b>EEO</b>
		2	Desalinhamento entre eixos	<b>SIM</b>	<b>NÃO</b>	<b>SIM</b>	<b>EEO</b>
		3	Folgas nos mancais de rolamento	<b>SIM</b>	<b>NÃO</b>	<b>SIM</b>	<b>EEO</b>
		4	Defeito nos rolamentos	<b>SIM</b>	<b>NÃO</b>	<b>SIM</b>	<b>EEO</b>



## APÊNDICE I – Seleção das Tarefas de Manutenção Aplicáveis e Efetivas.

Manutenção Centrada em Confiabilidade - MCC - Etapa 5													
Seleção das Tarefas de Manutenção Aplicáveis e Efetivas													
Responsável pela Análise				Auditado por				Data					
Gabriel Milani Junior				Gerente de Manutenção				2012					
Sistema								Id_Sistema					
Clinquerização								1					
Subsistema Analisado								Id_Subsistema					
Exaustor de Forno								1.1					
Id_Função	Id_Falha Funcional	Id_Modo de Falha	Categoria ESA – Evidente Segurança Ambiente EEO – Evidente Econômico Operacional OSA – Oculto Segurança Ambiente OEO – Oculto Econômico Operacional	Tarefas Possíveis								Tarefa Proposta	Id_Tarefa
				Serviço Operacional	Inspeção Preditiva	Restauração Preventiva	Substituição Preventiva	Inspeção Funcional	Manutenção Combinada	Mudança de Projeto	Reparo Funcional		
1	1	1	EEO	SIM	SIM	SIM		SIM	SIM	SIM		Manutenção Combinada	1.1
		2	EEO		SIM	SIM		SIM	SIM			Manutenção Combinada	1.2
		3	EEO		SIM	SIM		SIM	SIM			Manutenção Combinada	1.3
		4	EEO		SIM	SIM		SIM	SIM			Manutenção Combinada	1.4

## APÊNDICE J – Intervalos Iniciais e Agrupamentos das Tarefas de Manutenção.

Manutenção Centrada em Confiabilidade - MCC - Etapa 6							
Definição dos Intervalos Iniciais e Agrupamento das Tarefas de Manutenção							
Responsável pela Análise		Auditado por		Data	Página / De		
Gabriel Milani Junior		Gerente de Manutenção		2012	1 / 1		
Sistema				Id_Sistema			
Clinquerização				1			
Subsistema Analisado				Id_Subsistema			
Exaustor de Forno				1.1			
Id_Função	Id_Falha Funcional	Id_Modo de Falha	Id_Tarefa	Descrição da Tarefa Proposta	Intervalo Inicial	Agrupamento da Tarefa	Equipe Responsável
1	1	1	1.1.1	Manutenção Preventiva: inspeção e limpeza do rotor.	Semestral	A	Manutenção Mecânica
			1.1.2	Inspeção Preditiva: análise de vibração.	Mensal	C	Manutenção Mecânica
		2	1.2.1	Manutenção Preventiva: inspeção da base de fixação do conjunto.	Mensal	B	Manutenção Mecânica
			1.2.2	Inspeção Preditiva: análise de vibração.	Mensal	C	Manutenção Mecânica
			1.2.3	Inspeção Preditiva: termografia.	Mensal	C	Manutenção Mecânica
		3	1.3.1	Manutenção Preventiva: inspeção do sistema de lubrificação.	Mensal	B	Manutenção Mecânica
			1.3.2	Inspeção Preditiva: análise de vibração.	Mensal	C	Manutenção Mecânica
			1.3.3	Inspeção Preditiva: termografia.	Mensal	C	Manutenção Mecânica
			1.3.4	Inspeção Preditiva: análise de óleo e/ou ferrografia.	Trimestral	D	Manutenção Mecânica
		4	1.4.1	Manutenção Preventiva: inspeção do sistema de lubrificação.	Mensal	B	Manutenção Mecânica
			1.4.2	Inspeção Preditiva: análise de vibração.	Mensal	C	Manutenção Mecânica
			1.4.3	Inspeção Preditiva: termografia.	Mensal	C	Manutenção Mecânica
			1.4.4	Inspeção Preditiva: análise de óleo e/ou ferrografia.	Trimestral	D	Manutenção Mecânica