



**FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO E NEGÓCIOS  
DE SERGIPE – FANESÉ  
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ROBSON DE JESUS SOUZA**

**MELHORIA DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE  
VIBRAÇÃO DOS COMPRESSORES: estudo de caso na Vale  
Fertilizantes - unidade CTV, Rosário do Catete (SE)**

**Aracaju - SE  
2014.1**

**ROBSON DE JESUS SOUZA**

**MELHORIA DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE  
VIBRAÇÃO DOS COMPRESSORES: estudo de caso na Vale  
Fertilizantes - unidade CTV, Rosário do Catete (SE)**

**Monografia apresentada à Coordenação  
do Curso de Engenharia de Produção da  
FANESE, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia de Produção.**

**Orientador: Prof. Esp. Josevaldo dos  
Santos Feitoza**

**Coordenador: Prof. MSc. Alcides  
Anastácio de Araújo Filho**

**Aracaju - SE  
2014.1**

**ROBSON DE JESUS SOUZA**

**MELHORIA DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE  
VIBRAÇÃO DOS COMPRESSORES: estudo de caso na Vale  
Fertilizantes - unidade CTV, Rosário do Catete (SE)**

**Monografia apresentada à Banca examinadora da Faculdade de Administração  
e Negócio de Sergipe - FANESE, como requisito parcial e elemento obrigatório  
para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Produção no período de  
2014.1.**

---

**Professor(a) Orientador(a)**

---

**1º Professor(a) Examinador(a)**

---

**2º Professor(a) Examinador(a)**

---

**Aluno(a)**

**Aracaju (SE) \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2014.**

## **DEDICATÓRIA**

**Ao DEUS onipotente, pelo dom da vida a mim concedida.**

**Aos meus familiares que me ensinaram e ensinam os valores da fraternidade, humildade, dignidade, respeito, honradez e honestidade.**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, criador de todos e de tudo.

Aos familiares, esteio dos momentos bons e difíceis.

Aos amigos e colegas de profissão, pelos caminhos destrinchados e os que virão a seguir.

**"Muitas das falhas da vida acontecem quando as pessoas não percebem o quão perto estão quando desistem."**

**Thomas Edison**

## **RESUMO**

Este estudo trata da análise das falhas ocorridas no sistema de refrigeração da mina subterrânea na unidade operacional Taquari Vassouras localizada na cidade de Rosário do Catete em Sergipe, e tem como objetivo avaliar a necessidade de implantação de um monitoramento contínuo de vibração nos compressores do sistema de refrigeração, com a finalidade de reduzir o índice de quebras dos mesmos. O Sistema é monitorado off-line o que não impede de ocorrer falhas. Foi então realizado estudo das causas das falhas. Inicialmente, destacamos uma falha ocorrida no rotor de um dos compressores centrifugos para dar uma visão do processo e auxiliar na compreensão da complexidade, posteriormente, no segundo caso, realizamos um estudo do histórico de falhas para buscar entender os motivos da baixa disponibilidade, em sequência realizamos a apresentação e especificação do sistema de monitoramento on-line que foi instalado, e por fim apresentamos um caso de sucesso onde a falha foi detectada em tempo hábil para a intervenção da manutenção, resultando em ganhos significativos para o processo.

Palavras-chave: Análise de Vibração, Sistema on-line, Disponibilidade.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Localização da Unidade Operacional Taquari Vassouras.....	15
Figura 02 – Organograma da gerência de manutenção do subsolo.....	16
Figura 03 – Ilustração de compressores do tipo parafuso e centrífugo.....	17
Figura 04 – Sinais de vibração de uma máquina em tempo e frequência.....	23
Figura 05 – Diagrama de Ishikawa.....	24
Figura 06 – Diagrama de análise dos cinco por quês. ....	25
Figura 07 – Gráfico de Pareto. ....	25
Figura 08 – Processo ilustrado do sistema de refrigeração da mina.....	30
Figura 09 – Foto da instalação da torre de resfriamento na superfície.....	31
Figura 10 – Foto da unidade de refrigeração tipo compressor parafuso.....	32
Figura 11 – Foto da unidade de refrigeração tipo compressor centrífugo.....	33
Figura 12 – Foto do ambiente interno das câmaras de spray. ....	34
Figura 13 – Foto do compressor centrífugo parcialmente desmontado. ....	35
Figura 14 – Diagrama de Ishikawa da quebra do rotor compressor.....	36
Figura 15 – Diagrama de cinco porquês da quebra do rotor compressor.....	36
Figura 16 – Foto dos componentes do compressor centrífugo danificado.....	37
Figura 17 – Volume de trabalho em manutenções por compressor.....	38
Figura 18 – Frequência de falhas no TV-17UR03 por componentes. ....	39
Figura 19 – Natureza das falhas no compressor da TV-17UR03.....	40
Figura 20 – Capa de apresentação do sistema ON LINE de vibração.....	41
Figura 21 – Processo de funcionamento do sistema ON LINE .....	43
Figura 22 – Tela do software de análise dos dados de vibração coletados. ....	44
Figura 23 – Aparelho coletor e sensor de vibração OFF LINE modelo CSI 2130 .....	45
Figura 24 – Espectro de vibração comprovando aparecimento de picos de defeito. ....	47

## SUMÁRIO

### RESUMO

### LISTA DE FIGURAS

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 Situação Problema.....	12
1.2 Objetivos.....	12
1.2.1 Objetivo geral.....	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Justificativa.....	13
<b>2 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA</b> .....	<b>14</b>
2.1 Apresentação da Unidade Operacional Taquari-Vassouras.....	14
2.1.1 Os compressores de refrigeração.....	17
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
3.1 Conceito de Manutenção.....	18
3.2 Histórico e Evolução da Manutenção.....	19
3.3 Tipos de Manutenção.....	20
3.3.1 Manutenção corretiva.....	20
3.3.2 Manutenção preventiva.....	21
3.3.4 Manutenção preditiva.....	21
3.3.4.1 Análise de vibração.....	22
3.4 Ferramentas da Qualidade.....	23
3.4.1 Diagrama de Ishikawa.....	24
3.4.2 Análise dos 5 por quês.....	24
3.4.3 Gráfico de pareto.....	25
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>26</b>
4.1 Abordagem Metodológica.....	26
4.2 Caracterização da Pesquisa.....	26
4.2.1 Objetivos ou fins.....	27
4.2.2 Objeto ou meios.....	27
4.3 Instrumentos da Pesquisa.....	27
4.4 Variáveis, Indicadores, Definições.....	28
4.5 Unidade, Universo, Amostra.....	28
4.6 Plano de Coleta, de Registro e da Análise dos Dados.....	29
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>30</b>
5.1 Apresentação do Sistema de Refrigeração.....	30
5.1.1 Torre de resfriamento.....	31
5.1.2 Os compressores.....	32
5.1.3 Câmaras de spray.....	34
5.2 Casos de Falhas antes da Implantação do Sistema On Line.....	35
5.2.1 Falha no compressor em maio de 2013.....	35
5.2.2 Pareto das falhas entre 2012 e 2013 antes do sistema on line.....	37

<b>5.3 Seleção do tipo de Sistema ON LINE a ser implantado.....</b>	<b>40</b>
<b>5.3.1 Característica do sistema instalado.....</b>	<b>41</b>
<b>5.3.2 Ações realizadas para a implantação do sistema on line .....</b>	<b>43</b>
<b>5.4 Caso de Sucesso Após Implantação do Sistema .....</b>	<b>45</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente no mundo existem mais de 7 bilhões de pessoas segundo afirma a Organização das Nações Unidas. Encontram-se assim, diversas culturas, etnias e valores. Mesmo em diferentes localizações, temos as mesmas necessidades básicas para viver e se alimentar melhor.

A demanda de fertilizantes e a sua utilização no agronegócio impõem a indústria uma necessidade de investir em constantes melhorias no nível de atendimento para suprir as necessidades do mercado. Os fertilizantes são compostos por três nutrientes básicos: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Esses elementos, misturados conforme as necessidades de cada solo e cultura, garantem o crescimento das plantas e a qualidade dos produtos agrícolas (VALE FERTILIZANTES, 2014).

O Brasil está entre os sete países produtores de potássio no mundo. A Vale Fertilizantes, empresa do grupo Vale S/A, é a única planta produtora de cloreto de potássio na América Latina. O seu processo de produção opera com uma unidade de extração em mina subterrânea e beneficiamento na usina. Para atender as expectativas do mercado, a Vale Fertilizantes investe em melhorias em seus equipamentos e em busca de maior disponibilidade dos mesmos.

Estudar os desvios e falhas, aperfeiçoar o desempenho em um processo industrial de produção, pode gerar um aumento da oferta do produto no mercado.

Perante esse desafio de melhoria no processo produtivo, encontramos a evolução dos materiais e componentes dos equipamentos. Buscar novas técnicas de manutenção é um desafio constante para garantir um adequado monitoramento dos equipamentos, através de ferramentas que permitam um diagnóstico precoce e uma aplicação de práticas preventivas. Nesse âmbito, a técnica de análise de vibrações mecânicas tem apresentado um papel importante auxiliando com os diagnósticos de falhas eletromecânicas dos equipamentos industriais.

Pode-se assim compreender, que a manutenção é uma função que tem como estratégia, garantir o prolongamento da vida útil dos equipamentos industriais, alinhado com a gestão de produção, buscando o alcance de metas específicas e

trabalhando para manter a sustentabilidade do processo resultando assim no cumprimento das metas de produção estabelecidas pela diretoria do negócio.

## **1.1 Situação Problema**

Diante de um mercado globalizado com tendência de maior competitividade, uma das grandes questões enfrentadas pelas empresas, está na qualidade da manutenção dos equipamentos do processo produtivo, suas características funcionais e o seu sistema de proteção da integridade das máquinas.

A empresa Vale Fertilizantes S.A. produz KCl e utiliza compressores para refrigerar a água do sistema operacional. Uma possível falha no processo do mesmo ocasiona uma interrupção da produção. Apesar de o processo possuir um monitoramento de vibração Off-Line<sup>1</sup>, ainda possui um histórico de quebras com determinada frequência. Diante desse cenário, o autor deste projeto questiona: **Como minimizar as falhas ou quebras nos compressores de refrigeração?**

## **1.2 Objetivos**

Nestes subcapítulos apresentam-se os objetivos e as justificativas da elaboração desse trabalho de conclusão de curso.

### **1.2.1 Objetivo geral**

Avaliar o principal impacto que é a perda de produtividade ocorrida por falhas mecânicas nos rolamentos dos compressores do sistema de refrigeração da mina subterrânea da Vale Fertilizantes S.A. localizada no município de Rosário do Catete em Sergipe, e os ganhos adquiridos na implantação de um monitoramento On-Line<sup>2</sup> de vibração nos mesmos.

---

<sup>1</sup> OFF-LINE é um termo técnico utilizado para o sistema de monitoramento de análise de vibração, cuja forma de obtenção dos dados é sistemática (intermitente), ou seja, o técnico analista desloca-se ao equipamento e realiza as coletas com um coletor de dados, segundo Kardec e Nascif (2013, p. 295).

<sup>2</sup> ON-LINE é um termo técnico utilizado para o sistema de monitoramento de análise de vibração, cuja forma de obtenção dos dados é permanente (contínuo), sem a necessidade de intervenção esporádica do técnico analista, permanecendo o coletor de dados conectado ao sistema, conforme Kardec e Nascif (2013, p. 295).

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Levantar a natureza das falhas ocorridas nos compressores e suas possíveis causas.
- Avaliar os impactos causados por falhas da manutenção na produtividade e *Disponibilidade*<sup>3</sup> dos compressores de refrigeração.

### 1.3 Justificativa

Considera-se que os sistemas de manutenção nos equipamentos industriais possuem certa complexidade em sua organização, assemelhando-se a processos de produção e gestão de serviços.

O cenário atual propõe novas abordagens para a gestão das atividades de manutenção. Os avanços da tecnologia propõem novas formas de gestão e controle das rotinas operacionais, proporcionando formas mais produtivas de trabalho. A engenharia de manutenção tem seu enfoque predominante de prolongar a vida útil das máquinas e componentes, buscando minimizar ou eliminar as falhas dos equipamentos.

Este trabalho foi desenvolvido com a finalidade de estudar a redução do índice de quebras dos rolamentos dos compressores do sistema de refrigeração da mina subterrânea da Vale Fertilizantes S.A. localizada no município de Rosário do Catete em Sergipe.

Considerando que mesmo existindo uma rotina sistemática mensal de coleta de dados vibracionais em modo off-line, ainda assim ocorriam falhas aleatórias de difíceis diagnósticos instantâneos. O uso de um sistema de monitoramento On-Line nesses equipamentos servirá de ferramenta de análise para redução de falhas de natureza de vibração, auxiliando no diagnóstico precoce e embasamento técnico para um planejamento mais eficaz da manutenção.

---

<sup>3</sup> DISPONIBILIDADE é a probabilidade de que um item possa estar disponível para a utilização em um determinado momento ou durante um determinado período de tempo. (BRANCO FILHO, 2006, p. 37).

## **2 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA**

A Vale é uma mineradora diversificada que tem como missão transformar recursos minerais em produto e desenvolvimento sustentável. Nascida em 1942 e privatizada em 1997 dando lugar a Companhia Vale do Rio Doce e posteriormente adotando o nome de VALE S.A.

Hoje é uma empresa global, com sedes no Brasil e atuando nos cinco continentes, sendo que está presente em 35 países. Ela é atualmente a segunda maior mineradora do mundo e uma das maiores da América, assim tornou-se uma das maiores produtoras de minério de ferro e níquel.

A empresa investe sistematicamente em pesquisas, produção e comercialização de cobre, carvão térmico e metalúrgico, fosfatos, potássio, cobalto e metais do grupo da platina, sem deixar de pontuar a atuação nos segmentos de logística, energia, siderurgia e fertilizantes. Com a estratégia de se tornar um dos principais produtores mundiais no setor de fertilizantes, em 2010 criou a Vale Fertilizantes S.A, fundada a partir da aquisição da Fosfértil e das operações de nutrientes da Bunge do Brasil.

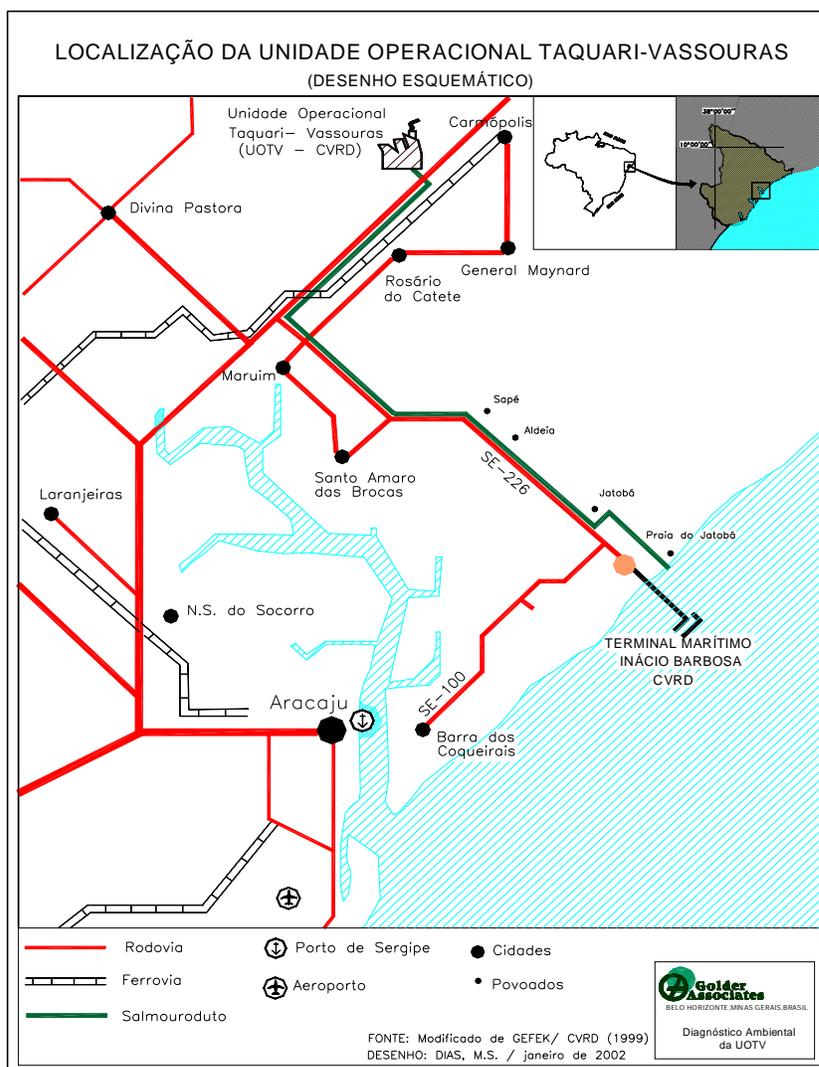
No ano de 2013 iniciou o processo de adequação da Unidade Operacional Taquari Vassouras (UOTV) para a Vale Fertilizantes. Consolidando-se no mercado sendo a produtora dos três nutrientes dos fertilizantes que são: potássio, fosfato e nitrogenados. O fosfato é fundamental para o crescimento das raízes, permitindo que as plantas explorem uma maior área do solo, retirando assim, mais nutrientes. O potássio por sua vez, favorece a circulação interna dos líquidos da planta, permitindo assim uma melhor qualidade dos frutos. O nitrogênio é indispensável na fotossíntese por auxiliar no desenvolvimento das folhagens (VALE FERTILIZANTES, 2014).

### **2.1 Apresentação da Unidade Operacional Taquari-Vassouras.**

No Estado de Sergipe, existe a jazida de KCl com área aproximada de 185 km<sup>2</sup> e está localizado na região nordeste do estado de Sergipe, no município de Rosário do Catete. A região é cortada pela Rodovia Federal BR-101, pelas Rodovias

Estaduais SE-206 e SE-208, conforme pode-se observar no detalhamento do mapa da figura 01 a seguir.

**Figura 01 – Localização da Unidade Operacional Taquari Vassouras**



Fonte: Vale Fertilizantes, Relatório técnico.

Essa jazida foi descoberta entre os anos de 1963 e 1966 entre as fazendas que ali eram chamadas de Taquari e Vassouras. Essa descoberta ocorreu por ocasião dos trabalhos desenvolvidos pela PETROBRÁS – Petróleo Brasileiro S.A, durante as pesquisas de petróleo. O Projeto Potássio foi implantado em 1979 pela Petromisa.

Em 1990, a Petromisa foi extinta, e em janeiro de 1992, por meio de contrato de arrendamento assinado com a Petrobrás, a VALE assumiu o gerenciamento da

mina de potássio Taquari Vassouras, tornando-se a única produtora de cloreto de potássio no Brasil, através de Gerência Geral de Fertilizantes (GEFEW). Em 2003, já sob a responsabilidade da mineradora Vale, surge a planta de refrigeração, sua importância no processo de exploração da mina subterrânea trouxe a melhor viabilidade do desmonte da rocha, a mesma foi projetada em função da necessidade do aumento da produtividade e um melhor aproveitamento do desmonte da jazida.

Atualmente a Unidade Taquari Vassouras está dividida em diversas gerências, entre elas, destaca-se a gerência de manutenção (GAMAW), responsável em manter a integridade dos equipamentos da mina subterrânea, sua estrutura está composta por supervisões conforme a ilustração da figura 02 abaixo:

**Figura 02 – Organograma da gerência de manutenção do subsolo.**



Fonte: Dados da Pesquisa.

A Mina subterrânea possui um sistema de refrigeração que é composto por equipamentos lotados na superfície como, por exemplo, os compressores, torres de resfriamento, bombas e ventiladores, assim também possuem equipamentos localizados no subsolo, como, bombas de recirculação, tanques d'água e ventiladores. O sistema dispõe de dois blocos de evaporadores de plantas de refrigeração, denominada Spray Chamber, onde a função é refrigerar as galerias da mina. Pode-se descrever o sistema como um ar condicionado de grande porte, utilizado para refrigerar os mais de 300 km de galerias escavadas.

Dentro do processo de refrigeração, têm-se os compressores como os principais equipamentos do sistema, os quais são responsáveis por cerca de 60% de todo investimento da planta instalada.

Na seção a seguir, destaca-se o equipamento em estudo, no caso, os compressores, onde será apresentada uma abordagem conceitual sobre o princípio de funcionamento para embasamento do estudo.

### 2.1.1 Os compressores de refrigeração

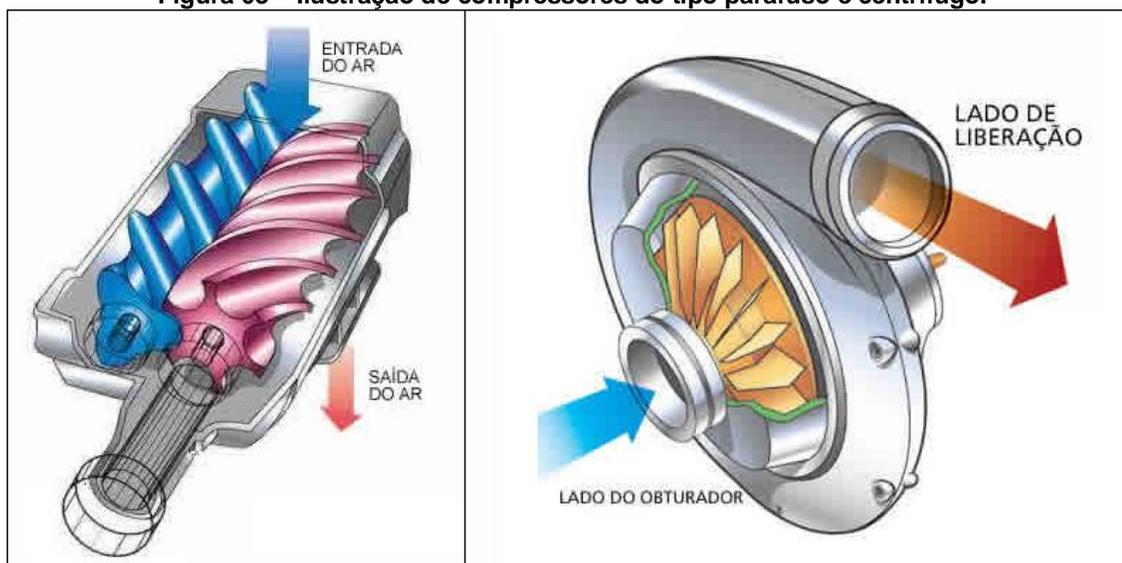
Um sistema básico de refrigeração é composto por compressor, condensador, evaporador e válvula de expansão. Desse sistema, será destacado o compressor.

Conforme YORK (2001, p. 6), a função básica do compressor é comprimir o fluido refrigerante do sistema fechado, elevando a pressão do mesmo. Atualmente na indústria, os compressores mais utilizados são do tipo parafuso e centrífugo.

Segundo a HSW (2013) Compressores parafuso têm seu princípio de funcionamento através da ação de dois rotores, denominado de principal e secundário, ou popularmente chamado rotor macho e fêmea. Seu aspecto construtivo é semelhante ao de um parafuso. Em movimento de rotação, o fluido fica preso entre os fios dos rotores e a carcaça que por sua vez desloca o gás refrigerante para a parte inferior e superior do compressor.

Compressores centrífugos também trabalham em movimentos rotativos, porem a compressão ocorre em função da velocidade. Seu funcionamento assemelha-se a uma turbina onde o componente impulsor gira uma série de pás num mesmo eixo, empurrando o fluido refrigerante para fora, através da força centrífuga, onde a pressão na descarga aumenta proporcionalmente a velocidade de rotação. Na figura 03 abaixo, visualiza-se uma ilustração do princípio de funcionamento dos compressores do tipo parafuso e centrífugo respectivamente.

Figura 03 – Ilustração de compressores do tipo parafuso e centrífugo.



Fonte: HSW, 2013.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo, consta uma abordagem teórica sobre a manutenção, seus conceitos e um breve histórico da sua evolução nos últimos anos.

#### **3.1 Conceito de Manutenção**

A origem do termo manutenção vem do vocabulário militar e significava manter, nas unidades de combate, o efetivo e o material num nível constante. O surgimento da palavra manutenção na indústria ocorreu em 1950 nos Estados Unidos da América. Na França, por exemplo, esse termo está mais associado à palavra conservação (MONCHY, 1989, p. 89).

Segundo Branco Filho (1996, p. 75), trata a manutenção como um conjunto de ações que permitem restabelecer um bem para o seu estado específico, ou medidas para garantir um serviço determinado. É também a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida, podendo incluir uma modificação de um item.

Conforme trata o autor Xenos, a definição de manutenção está diretamente ligada ao ato de “Fazer tudo que for preciso para assegurar que um equipamento continue a desempenhar as funções para as quais foi projetado, em um nível de desempenho exigido” (XENOS, 1998, p. 18).

Definida pela norma NBR 5462 como: “Combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida” (ABNT, 2012, p. 7).

Seguindo essa linha de raciocínio, pode-se compreender que a manutenção é considerada como um conjunto de técnicas e de organizações capazes de conservar as máquinas, instalações e ou edificações durante o maior tempo possível.

### 3.2 Histórico e Evolução da Manutenção

O aparecimento do termo manutenção na indústria ocorreu por volta do ano 1950 nos Estados Unidos da América. Na França, esse termo se sobrepõe progressivamente à palavra conservação. Nas últimas décadas, as atividades de manutenção tem evoluído de forma ímpar, pode-se observar que diversos fatores influenciaram para mudança de estado como, por exemplo, “Aumento, bastante rápido, do número e diversidade dos itens físicos (instalações, equipamentos e edificações) que têm que ser mantidos, [...] projetos muito mais complexos e novas técnicas de manutenção”, segundo Kardec e Nascif (2013, p. 1).

Ainda segundo Kardec e Nascif (2013, p. 2), a manutenção divide-se em quatro gerações:

Conforme Kardec e Nascif (2013, p. 2), a primeira geração abrange o período antes da Segunda Guerra Mundial, quando a indústria era pouco mecanizada, os equipamentos eram simples e, na sua grande maioria superdimensionada. Devido à conjuntura econômica da época, a questão da produtividade não é a prioritária. A manutenção era resumida em apenas serviços e limpeza, lubrificação e reparo após a quebra, ou seja, a manutenção era, fundamentalmente, corretiva não planejada.

A segunda geração ocorre entre os anos 50 e 70, Kardec e Nascif relatam:

[...] as pressões do período da guerra aumentaram [...] ao mesmo tempo em que o contingente de mão de obra industrial diminuiu [...] naquele tempo houve forte aumento da mecanização das instalações industriais. Surge o conceito de manutenção preventiva e as intervenções nos equipamentos feitas a intervalos fixos. (KARDEC e NASCIF, 2013, p. 2).

A terceira geração, a partir da década de 70 acelerou-se o processo de mudança nas indústrias.

[...] A paralisação da produção diminuía, o volume produzido aumentava os custos e afetava a qualidade dos produtos [...], era uma preocupação generalizada [...] O crescimento da automação e da mecanização passou a indicar que confiabilidade e disponibilidade se tornaram pontos-chave [...], assim reforçaram-se o conceito e a utilização de manutenção preditiva (KARDEC e NASCIF, 2013, p. 3).

Na quarta geração o autor Kardec e Nascif (2013, p.4), relata que algumas expectativas existentes na terceira geração, continuam a existir. A disponibilidade é uma das medidas de desempenho mais importantes da manutenção, senão a mais importante. As atividades de Engenharia da Manutenção, dentro da estrutura

organizacional, têm foco na garantia da Disponibilidade, da Confiabilidade e da Manutenibilidade, sendo essas três maiores justificativas de sua existência.

### **3.3 Tipos de Manutenção**

Nesse subcapítulo, apresentam-se os tipos de manutenção e suas naturezas de aplicação de acordo com a estratégia que pode ser aplicada a cada tipo de equipamento.

#### **3.3.1 Manutenção corretiva**

Para o professor Almeida (2009, p. 2), trata a lógica da gerência em manutenção corretiva é simples e direta: quando uma máquina quebra, conserte-a. Este método (Se não está quebrada, não conserte) de manutenção de maquinaria fabril tem representado uma grande parte das operações de manutenção da planta industrial, desde que a primeira fábrica foi construída e, por cima, parece razoável. Uma planta industrial usando gerência por manutenção corretiva não gasta qualquer dinheiro com manutenção, até que uma máquina ou sistema falhe em operar.

Para Lafraia (2001, p. 173), a manutenção corretiva inclui todas as ações para retornar um sistema do estado falho para o estado operacional ou disponível. A ação corretiva normalmente ocorre em momento não desejado, quando se requer do equipamento sua plena produtividade.

Conforme Almeida (2009, p. 2) na prática, poucas indústrias usam uma filosofia de gestão apenas por corretiva. Esse tipo de manutenção resulta em alguns fatores como, por exemplo, os maiores custos associados, altos estoques de peças sobressalentes, trabalho extra, queda de produção e imprevisibilidade.

Ainda, os autores acima citados, separam esse tipo de manutenção em duas modalidades que são: Corretiva planejada e Corretiva não planejada.

Assim pode-se concluir que um trabalho planejado é sempre mais barato, mais rápido e mais seguro do que um trabalho não planejado.

A característica principal da manutenção corretiva planejada está na qualidade da informação fornecida pelo acompanhamento do equipamento e pode ser baseado na política de monitoramento de condições, ou seja, a inspeção.

### 3.3.2 Manutenção preventiva

Para Branco Filho, (2006, p. 78), a manutenção preventiva é todo o serviço realizado em máquinas que não estejam em falhas, ou seja, em condições operacionais, ou no máximo, em estado de defeito.

Conforme Kardec e Nascif (2013, p. 59), a manutenção preventiva, como o próprio nome exemplifica, é a atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo. Em determinados setores, como na aviação, a adoção de manutenção preventiva é imperativa para determinados sistemas ou componentes, pois o fator segurança se sobrepõe aos demais.

Um dos pontos negativos com relação à manutenção preventiva é a introdução de defeitos não existentes no equipamento devido à falha humana, falha de sobressalentes, contaminação introduzida no sistema de óleo, danos durante partida, parada do equipamento e falha dos procedimentos de manutenção (KARDEC e NASCIF, 2013, p. 61).

### 3.3.4 Manutenção preditiva

Segundo a norma NBR 5462, a manutenção preditiva permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva. (ABNT; 2012, p. 7).

Trata-se de um procedimento para melhorar a produtividade, a qualidade do produto, o lucro, e a efetividade global das plantas industriais de manufatura e de produção. “Um programa abrangente de preditiva utiliza uma combinação das ferramentas mais efetivas para obter a condição operativa real de sistemas críticos da planta industrial e, baseando-se nestes dados reais, todas as atividades de manutenção são programadas numa certa base” (ALMEIDA, 2009, p. 4).

A manutenção preditiva é um programa [...] baseado em condições, [...] para programar atividades de manutenção, a manutenção preditiva usa monitoramento direto das condições mecânicas, rendimento do sistema, e outros indicadores para determinar o tempo médio para falha real ou perda de rendimento para cada máquina e sistema na planta industrial. (ALMEIDA, 2009, p. 4).

Seu objetivo é prevenir falhas nos equipamentos ou sistemas através de acompanhamento de parâmetros diversos, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível (KARDEC e NASCIF, 2013, p. 62).

Normalmente esse tipo de acompanhamento permite a preparação prévia do serviço, além de outras decisões e alternativas relacionadas com a produção. De forma mais direta, pode-se dizer que a manutenção preditiva prediz as condições dos equipamentos, e quando a intervenção é decidida, o que se faz na realidade, é uma manutenção corretiva planejada. (KARDEC e NASCIF, 2013, p. 62).

Dentre as técnicas e ferramentas da manutenção preditiva, encontra-se a termografia, análise de óleo (ferrografia), ensaios por ultrassom, ODS (Análise de elementos finitos) videoscopia, análise de motores, análise de vibração.

Conforme Kardec e Nascif (2013, p. 276), a técnica de análise de vibração está entre os mais importantes métodos de predição em vários tipos de indústrias, o qual está sendo tratada no subcapítulo a seguir.

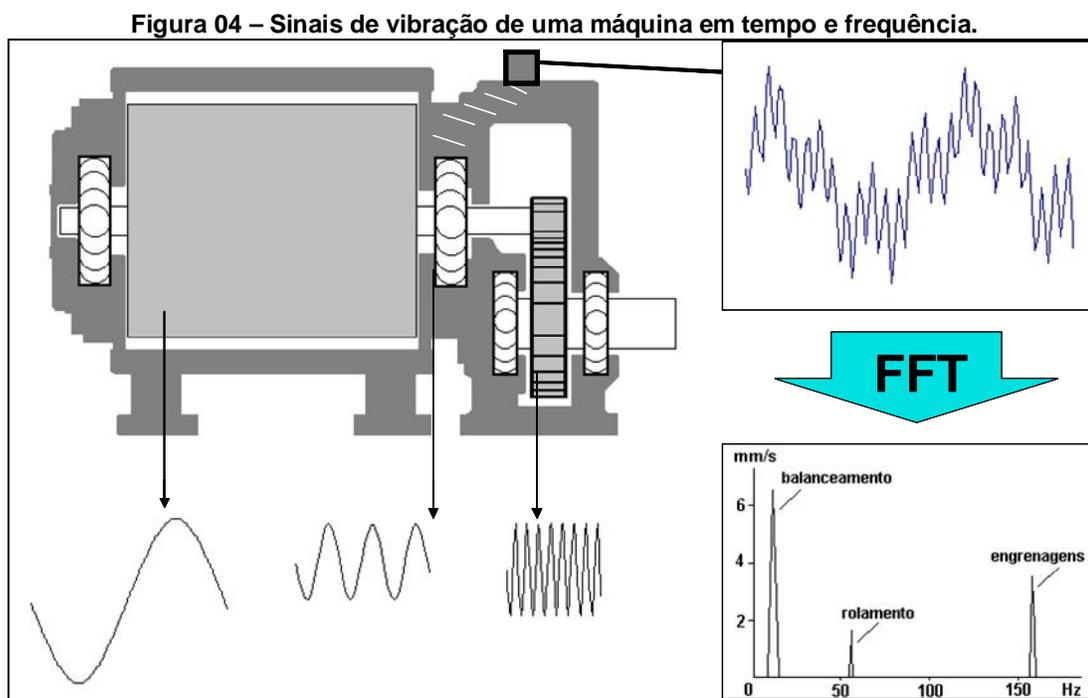
#### **3.3.4.1 Análise de vibração**

Vibração está presente em qualquer corpo à medida que este responde a uma excitação. Para Almeida (2009, p. 2) a vibração é uma oscilação de um corpo em torno de uma posição de referência. A vibração é frequentemente um processo destrutivo, ocasionando falhas nos elementos por fadiga (trincas, ruptura, etc.).

Segundo Almeida (2009, p. 3), os sistemas mecânicos possuem três componentes básicos que interagem entre si e são responsáveis pelo comportamento dinâmico, são eles: mola (rigidez ou flexibilidade), amortecedor (dissipação de energia) e massa (inércia). Essas variáveis quando submetidas às forças, reagem como deslocamento, velocidade e aceleração.

Para Kardec e Nascif (2013, p. 280), a maioria das medidas de vibração atualmente é feita através da aceleração. Para se obter a velocidade ou deslocamento basta integrar uma ou duas vezes, respectivamente. O tipo de sensor mais encontrado é o acelerômetro piezelétrico, constituído por um ou mais cristais, pré-tensionados por uma massa e montados em uma carcaça. Quando em funcionamento, a vibração da máquina à qual o sensor está fixado, provoca uma excitação onde a massa exerce uma força variável nos cristais, onde o pulso elétrico gerado é proporcional a aceleração.

Ainda segundo Almeida (2009, p. 9), os pulsos elétricos doravante chamados de sinais são codificados em função do tempo, basicamente são sinais senoidais transmitidos através de cabos condutores até o coletor (analisador). Um software especialista interpreta esse sinal e apresenta na forma de sinal em função do tempo ou espectro de frequência, tornando assim a análise mais simplificada, conforme podemos ver na figura 04 abaixo.



Fonte: Arquivo particular.

### 3.4 Ferramentas da Qualidade

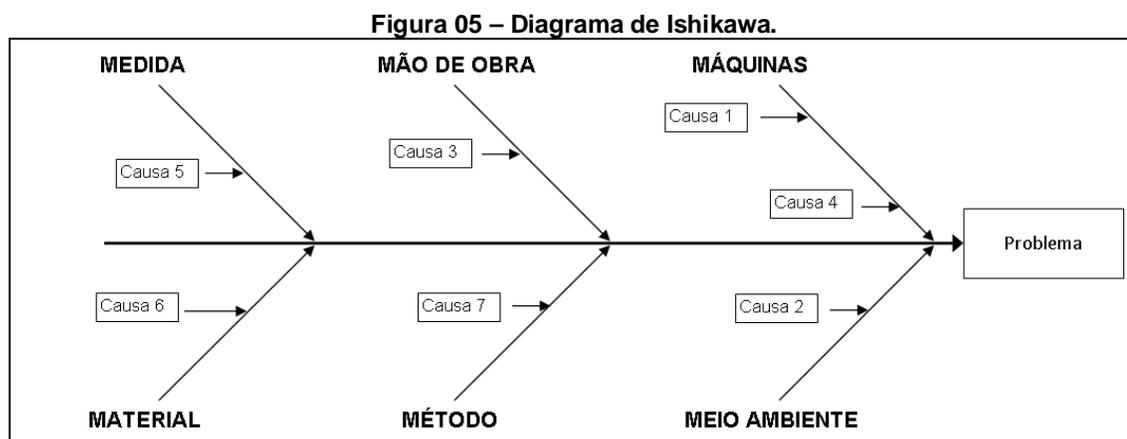
Neste subcapítulo far-se-á menção de forma sucinta de apenas duas ferramentas da qualidade: Diagrama de Ishikawa (Espinha de peixe) e o Gráfico de Pareto.

Essas duas ferramentas de análise foram importantes para o estudo do tratamento das falhas relatadas nesse trabalho devido a necessidade de obter uma linha de raciocínio mais objetiva e eficaz, permitindo que as causas mais impactantes fossem evidenciadas, levando a um tratamento mais direcionado para a solução dos problemas.

### 3.4.1 Diagrama de Ishikawa

O Diagrama de Ishikawa, também, conhecido como espinha de peixe, trata-se de uma forma gráfica usada como metodologia de análise para representar fatores de influência (causas) sobre um determinado efeito. Para Miguel (2006, p. 141) o resultado do diagrama é fruto de um *brainstorming*<sup>4</sup>, sendo o diagrama o elemento de registro e representação de dados e informações.

Pode-se ter uma melhor ilustração na figura 05 abaixo onde apresenta a estrutura do diagrama espinha de peixe.



Fonte: Arquivo pessoal, 2013.

### 3.4.2 Análise dos 5 por quês

A ferramenta de análise dos Cinco Por Quês é um método que busca, de forma bastante simples, identificar as causas raízes de um problema em estudo apresentando respostas lógicas.

Desenvolvida por Sakichi Toyoda, fundador da Toyota. Baseia-se em realizar cinco iterações perguntando o porquê daquele problema, sempre questionando a causa anterior até atingir o nível raiz, no qual não é mais possível determinar o desdobramento das causas, segundo Scartezini (2009, p. 28)

<sup>4</sup> *Brainstorming* [...] é um livre debate onde as pessoas participantes dão idéias e sugestões, [...] sobre um determinado tema, ou seja, um procedimento utilizado para que seja obtido, normalmente em uma sala com pessoas reunidas, um máximo de idéias e sugestões sobre um determinado assunto. [...] para que no final seja feito um estudo[...]. (BRANCO FILHO, 2006, p. 13-14).

Na figura 06 pode-se ter um exemplo da estrutura a ser utilizada pela técnica, onde podem ser aplicadas as respostas a ser utilizadas pelo analista.

**Figura 06 – Diagrama de análise dos cinco por quês.**



Fonte: Arquivo pessoal, 2013.

### 3.4.3 Gráfico de pareto

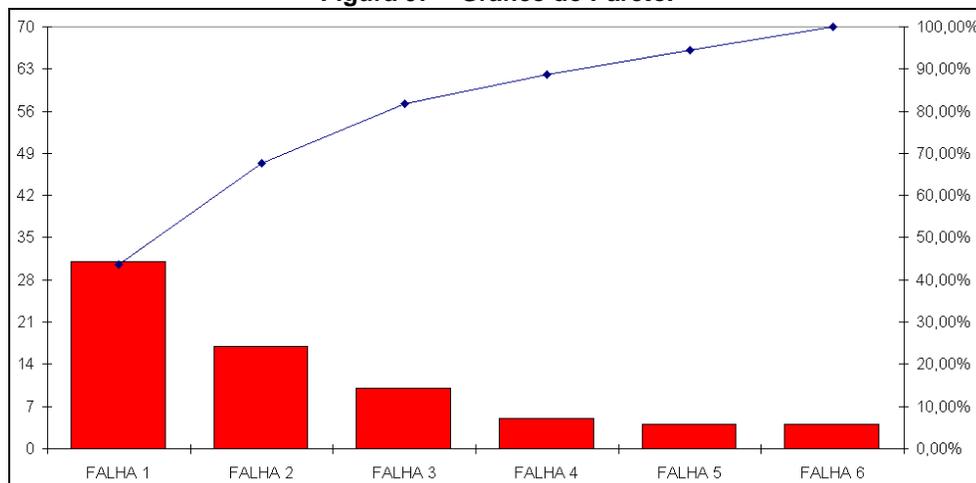
O Gráfico de Pareto consiste em organizar dados por ordem de importância, de modo a determinar as prioridades para resolução de problemas. Esse método ajuda a classificar e priorizar os seus problemas.

Segundo Miguel (2006, p. 144), a sequência para análise de um Gráfico de Pareto pode ser sistematizada através dos seguintes passos:

- Listar os elementos que influenciam no problema (podem ser utilizadas as causas levantadas através de um gráfico).
- Medir a influência de cada elemento, como por exemplo, a frequência de ocorrência de cada elemento.
- Construir a distribuição acumulada.
- Interpretar o gráfico e priorizar a ação sobre os problemas. (MIGUEL, 2006, p. 144).

Na figura 07 a seguir, mostra um exemplo do Gráfico de Pareto, onde as falha são ordenadas dando ênfase ao de maior importância.

**Figura 07 – Gráfico de Pareto.**



Fonte: Arquivo pessoal, 2013.

## **4 METODOLOGIA**

Neste capítulo, será feita uma abordagem sobre a metodologia utilizada nesta pesquisa. Onde, segundo Lakatos e Marconi (2009, p. 223) tratam a especificação da metodologia da pesquisa como [...] a que abrange maior número de itens, pois responde, a um só tempo, às questões como? Com quê? Onde? Quanto? [...]

Metodologia científica também é caracterizada como um conjunto de técnicas, estratégias, abordagens e métodos, aplicados pela ciência para enveredar caminhos e propôr soluções sistemáticas. Um método científico é caracterizado através da escolha dos procedimentos de forma sistemática para descrição e explicação de uma determinada situação.

Assim [...] um método é um conjunto de processos pelos quais se torna possível conhecer uma determinada realidade, produzir determinado objeto ou desenvolver certos procedimentos [...], segundo Oliveira (1999, p. 52).

### **4.1 Abordagem Metodológica**

Tratando de uma pesquisa específica e não usual, com busca de detalhes em uma área técnica, esse trabalho está sendo tratado como um estudo de caso.

Pode-se afirmar com base no relato do autor Ubirajara (2013, p. 43,44), “[...] ao caracterizar-se como um estudo particular, uma análise de um fato ou fenômeno, ou problema unitário, um caso específico de uma empresa ou de um setor dela, o trabalho final, misto de relatório e de monografia, recebe a denominação de estudo de caso.”

### **4.2 Caracterização da Pesquisa**

As principais características da metodologia de pesquisa utilizada nesse trabalho foram a liberdade, relevância de anomalias, tratando as ideias criativas, não desconsiderando as anotações particulares, utilizando o aprendizado prático, testes

e simulações didáticas, aplicando menor concentração na coleta e no processamento dos dados e trabalhando com maior ênfase na interpretação e reflexão em relação ao objetivo de estudo.

#### **4.2.1 Objetivos ou fins**

Em relação aos objetivos ou fins da pesquisa abordada nesse trabalho pode ser considerado como: exploratório, descritivo e explicativo.

Conforme Ubirajara (2013, p. 46), “Descritiva: descreve as características de uma população ou de um fenômeno ou ainda estabelece relações entre fenômenos.”

#### **4.2.2 Objeto ou meios**

Segundo relatado por Ubirajara (2013, p. 46), “Quanto ao modelo conceitual (objeto ou meios), a pesquisa pode ser: bibliográfica, documental, de campo, experimental ou laboratorial [...]”

As técnicas utilizadas para a coleta de dados tiveram como ponto de partida, o agrupamento de informações pertinentes ao assunto através da pesquisa em livros, apostilas, revista científica, sites de entidades, manuais de equipamentos, normas técnicas e sistemas internos da Vale Fertilizantes.

Neste estudo de caso, evidencia-se uma análise de um caso que gerou uma parada não programada de grande relevância no sistema de refrigeração da mina, onde serão utilizadas algumas das ferramentas de qualidade para auxiliar no tratamento da falha. Permanecendo com o estudo, faz-se um levantamento de dados no sistema informatizado de manutenção utilizado pela empresa Vale Fertilizantes S.A. a fim de levantar os dados em forma de gráfico de pareto. Assim, a aplicação das ferramentas é de suma importância para entender de forma organizada as necessidades de melhoria do sistema nesse estudo de caso.

#### **4.3 Instrumentos da Pesquisa**

Segundo relatado por Ubirajara (2013, p. 124), “Existem vários meios ou instrumentos de coleta de dados que pode ser apresentado como: entrevistas, questionários, observação pessoal, formulários, entre outros”

Para o trabalho em estudo, foi realizada uma consulta no banco de dados do sistema informatizado de manutenção utilizado pela empresa em questão, para o levantamento do histórico de falhas.

Também foi de fundamental importância a entrevistas realizada com alguns colaboradores que atuaram na manutenção do equipamento, ajudando a esclarecer as informações aqui relatadas.

#### **4.4 Variáveis, Indicadores, Definições**

Conforme definido por Lakatos e Marconi (2009, p. 243) “Uma variável pode ser considerada uma classificação ou medida; uma quantidade que varia; um conceito, que [...] apresenta valores; aspecto, propriedade ou fator, discernível em um objeto de estudo e passível de mensuração”.

Neste trabalho as principais variáveis e indicadores estão relacionados às falhas e quebras ocorridas nos compressores de refrigeração de forma que impacta diretamente no processo produtivo da unidade. Aos quais estão descritos, abordados e detalhados no capítulo 5 de análise de resultados.

#### **4.5 Unidade, Universo, Amostra.**

A unidade de pesquisa refere-se ao local onde a investigação do estudo de caso foi realizada, conforme relatado por Ubirajara (2013, p. 125), assim para esse estudo, a unidade corresponde a Unidade Taquari Vassouras, gerenciada pela Vale Fertilizantes, localizada no município de Rosário do Catete em Sergipe.

Quanto ao universo, de acordo com Vergara (2009, p. 50), apud Ubirajara (2013, p.125), “[...] universo ou população é um conjunto de elementos (empresas, produtos, pessoas, por exemplo) que possuem as características que serão objeto de estudo.” Seguindo esta orientação, o universo de estudo está focado em seis compressores que são aplicados no sistema de refrigeração da mina da unidade.

Quanto aos clientes internos, foram abordados os mantenedores do sistema de refrigeração da mina subterrânea a fim de extrair detalhes dos relatos das falhas. A seleção dos indivíduos para realização deste estudo de caso foi a da amostragem probabilística de acordo com a consulta aos dados de histórico no sistema

informatizado de manutenção e também foi utilizada a técnica não probabilística em consultas aos manuais e recomendações técnicas do fabricante.

#### **4.6 Plano de Coleta, de Registro e da Análise dos Dados**

A base de dados foi coletada do sistema informatizado de manutenção através de pesquisa direta ao mesmo, exibindo-se, com isso, as informações necessárias para o tratamento.

Nos dados quantitativos coletados, foram relacionados através de planilhas do Excel e mensurados para elaboração dos gráficos de falhas que estão apresentados em Pareto no capítulo 5.2.2 deste trabalho, assim os seus percentuais estão sendo indicados nos mesmos gráficos. Em seguida, foi realizada a análise interpretativa dos resultados ilustrados.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo inicialmente será apresentado o sistema de refrigeração sendo destacado por blocos, e em seguida será apresentado casos de falhas levantados no ano anterior, a partir desses dados obteve uma análise apresentado em Pareto.

Na sequência mostra-se o sistema de monitoramento escolhido e suas características como possível solução da maior parte dos casos levantados.

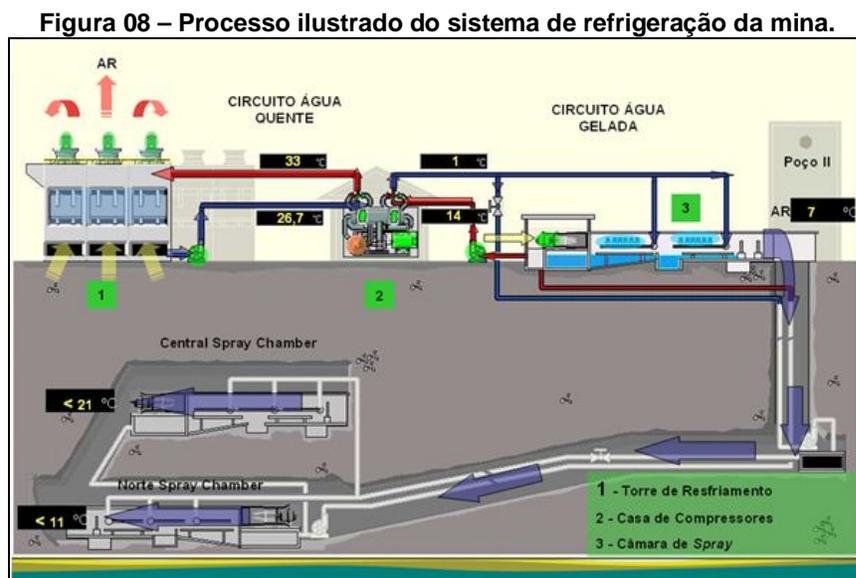
Finaliza-se o capítulo com a apresentação de um caso de sucesso ocorrido pós a implementação do novo sistema de monitoramento on-line que atingiu a finalidade de evitar uma quebra com diagnóstico precoce da falha.

### 5.1 Apresentação do Sistema de Refrigeração

O sistema de refrigeração pode ser dividido seguintes blocos:

- 1 – Torre de Resfriamento
- 2 – Compressores
- 3 – Câmaras de Spray

Na figura 08 abaixo, pode-se ter uma melhor ilustração desses componentes.



Fonte: Vale Fertilizantes, 2013.

A seguir, faz-se uma breve explanação do princípio de funcionamento de cada bloco componente do sistema:

### 5.1.1 Torre de resfriamento

As torres de resfriamento são equipamentos utilizados para o resfriamento de água industrial proveniente de condensadores de instalações de refrigeração. A água aquecida é gotejada na parte superior da torre e desce lentamente através de *enchimentos*<sup>5</sup> de diferentes tipos, em contracorrente com uma corrente de ar frio (normalmente à temperatura ambiente). No contato direto das correntes de água e ar ocorre a evaporação da água, principal fenômeno que produz seu resfriamento.

Em resumo, no processo do sistema de refrigeração em estudo, a torre de resfriamento tem por função primária, resfriar os gases expandidos no compressor, fazendo com que o mesmo volte ao estado líquido. Na figura 09 a seguir, mostra a foto da instalação da torre de resfriamento da Mina.

**Figura 09 – Foto da instalação da torre de resfriamento na superfície.**



Fonte: Vale Fertilizantes, 2013.

<sup>5</sup> Enchimento é um tipo de grade metálica que possui a função de acelerar a dissipação de calor na torre, aumentando o tempo de contato entre a água e o ar. Isso é possível devido à exposição contínua da superfície da água ao ar e à formação de gotas e filmes na torre.

### 5.1.2 Os compressores

São equipamentos utilizados no sistema de refrigeração, tendo várias configurações quanto à capacidade de compressão e características construtivas. Na unidade Operacional Taquari Vassouras - UOTV são utilizados basicamente dois tipos, sendo que, na primeira fase do projeto de refrigeração da mina foram utilizados três compressores tipo parafuso, e posteriormente, na implantação da segunda fase do projeto, foram adquiridos mais três compressores do tipo Centrífugo devido ser considerado com maior rendimento e tecnologia avançada:

**Compressor Parafuso** – 03 unidades compressoras de 1000 kW cada, cujo refrigerante utilizado é a amônia, com capacidade de compressão equivalente a 1463 compressores de 10.000 BTUs cada, para efeito de comparação, conforme pode-se ver abaixo na figura 10 uma foto do seu compressor.

Figura 10 – Foto da unidade de refrigeração tipo compressor parafuso.



Fonte: Vale Fertilizantes, 2013.

**Compressor Centrífugo** – 03 unidades compressoras de 1350 kW cada, cujo refrigerante utilizado é o R134a, com capacidade de compressão equivalente a 2303

compressores de 10000 BTUs cada, para efeito comparativo. Sua instalação está em paralelo entre si, porém em série no sistema. Na figura 11 abaixo, pode se constatar uma das unidades desse compressor centrífugo.

**Figura 11 – Foto da unidade de refrigeração tipo compressor centrífugo.**



Fonte: Vale Fertilizantes, 2013.

No processo de refrigeração, os compressores têm a função de comprimir o gás saturado, ou seja, (gás em mudança de estado, gasoso – líquido) proveniente do condensador. Uma vez esse gás comprimido, o mesmo é enviado para o evaporador, passando anteriormente por uma válvula de expansão, fazendo com que o gás se expanda, baixando a pressão e temperatura nas paredes internas do trocador de calor.

Posteriormente esse gás com temperaturas baixas irá trocar calor com um circuito de água à temperatura ambiente, onde após processo de troca, a água retornará aos tanques dos sprays com temperaturas em torno de 6° C.

### 5.1.3 Câmaras de spray

Para tornar fácil o entendimento, as câmaras de sprays são comparadas a evaporadores no processo de refrigeração.

Nesse sistema, são utilizados três câmaras de sprays, sendo que uma delas está localizada na superfície (Superfície Spray Chamber ou SSC), e as demais são localizadas em posições estratégicas no subsolo, uma para refrigerar a área nordeste da mina (Central Spray Chamber ou CSC) e outra para refrigerar a área norte da mina (Norte Spray Chamber ou NSC).

Na figura 12 abaixo exibe o processo de vaporização no spray através dos bicos de expansão de água gelada.

**Figura 12 – Foto do ambiente interno das câmaras de spray.**



Fonte: Vale Fertilizantes, 2013.

Cada spray possui um tanque com água gelada, onde uma bomba irá coletar a água existente neste tanque e pressurizá-la até os bicos de expansão do spray, fazendo com que gere dentro da câmara uma atmosfera com elevado índice de umidade, posteriormente esse ar úmido será empurrado para as galerias através de um ventilador centrífugo de alta eficiência, vindo assim a completar o ciclo da refrigeração do ar na mina subterrânea.

## 5.2 Casos de Falhas antes da Implantação do Sistema On-Line

Inicialmente, destaca-se uma falha ocorrida no rotor de um dos compressores centrífugos do processo de refrigeração para compreensão das falhas e posteriormente, no segundo caso, foi realizado um estudo do histórico de falhas para entender os motivos da baixa disponibilidade compreendidos do segundo semestre de 2012 ao primeiro semestre de 2013, utiliza-se a análise de Pareto para compreender a natureza das falhas.

### 5.2.1 Falha no compressor em maio de 2013

A planta de refrigeração contempla seis compressores, sendo três deles em modelo centrífugo. Um dos compressores centrífugos foi parcialmente desmontado em processo de manutenção corretiva de emergência, devido à quebra não diagnosticada e inesperada. O mesmo passou um período de cinco meses indisponível para operar devido à necessidade de aquisição de peças que são fabricadas nos dos EUA, conforme verifica-se na figura 13 a seguir:

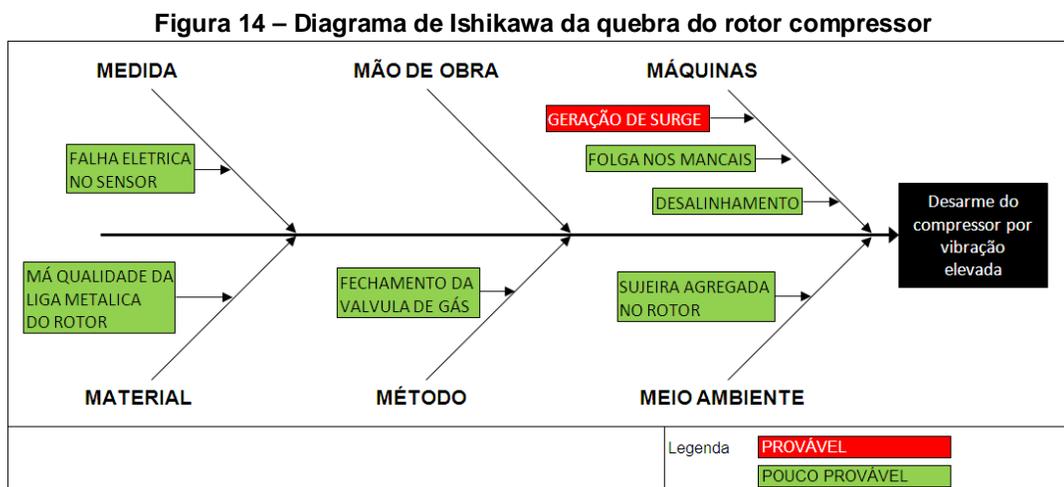
Figura 13 – Foto do compressor centrífugo parcialmente desmontado.



Fonte: Vale Fertilizantes, 2013.

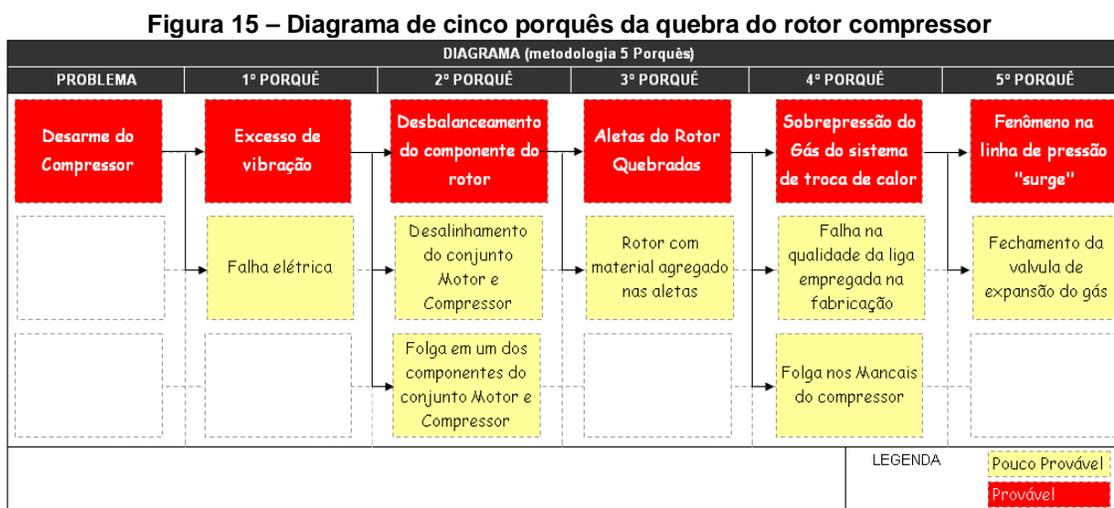
Realizando uma investigação, foi verificado que um dos compressores centrífugos que opera a 8250 RPM havia parado por vibração, uma vez que o sistema de proteção da máquina atuou por nível elevado, assim foram levantadas as

possíveis causas desse defeito, conforme pode-se ver a ilustração no formato de diagrama de Ishikawa na figura 14 a seguir.



Fonte: Relatório de falhas da Vale Fertilizantes, 2013.

Em reunião com os mantenedores envolvidos, ficou destacado as causas mais prováveis conforme análise dos dados coletados na área, evidenciado o efeito *surge*<sup>6</sup> como o causador da quebra, e inconformado com necessidade de ir mais afundo na causa raiz da falha, foi realizado uma análise de 5 porquês para cruzar as informações conforme verifica-se na figura 15 a seguir:



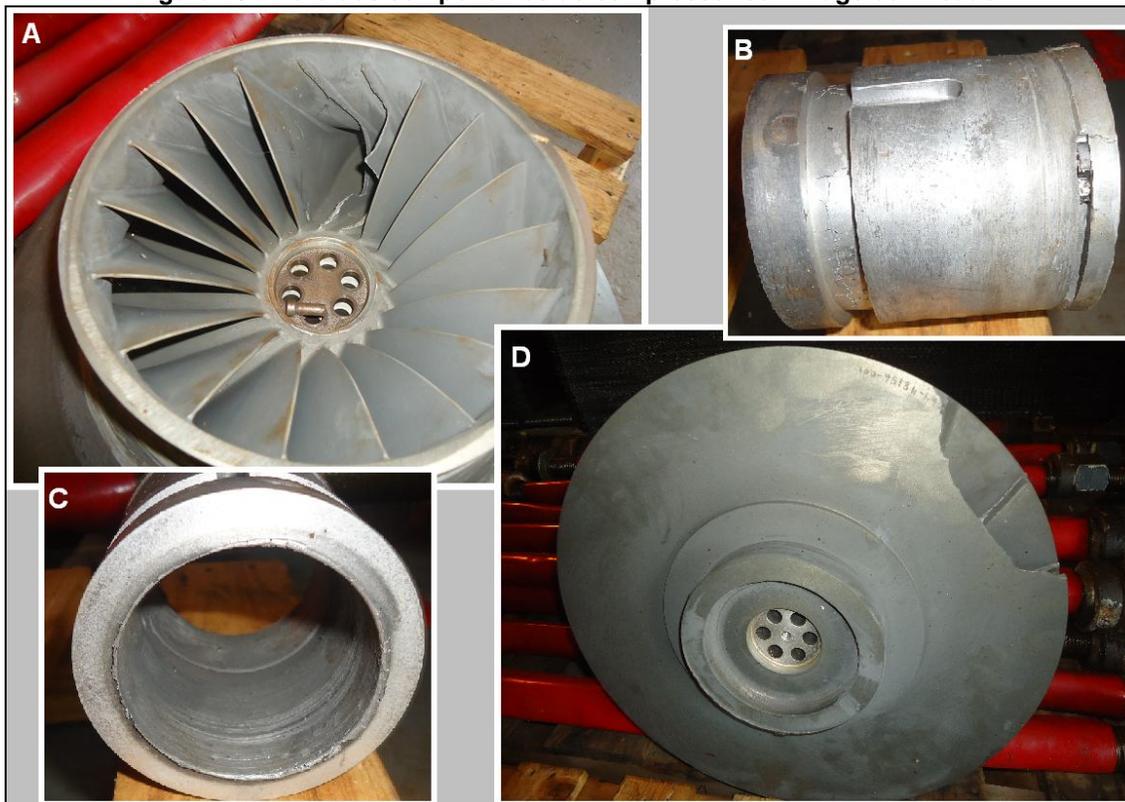
Fonte: Dados da Pesquisa, baseado em dados coletados por colaboradores da CTV.

<sup>6</sup> SURGE é um fenômeno de instabilidade que ocorrem nos compressores quando os mesmos operam abaixo da carga mínima em relação a rotação, esse fenômeno ocasiona altas vibrações no conjunto mecânico, em caso de permanência pode até causar quebras ou rupturas de componentes (YORK, 2002)

Conforme visualiza-se na figura 16, onde são apresentadas algumas peças componentes do interior do compressor centrífugo, após a desmontagem, ficou constatada a causa raiz da quebra, pode-se ver detalhadamente as anomalias nos seguintes componentes:

- a) Visão frontal do rotor com aletas quebradas
- b) Mancal de deslizamento apresentando trincas
- c) Mancal de deslizamento com severo desgaste na região de contato com o eixo
- d) Visão traseira do rotor com quebra no corpo

**Figura 16 – Foto dos componentes do compressor centrífugo danificado.**

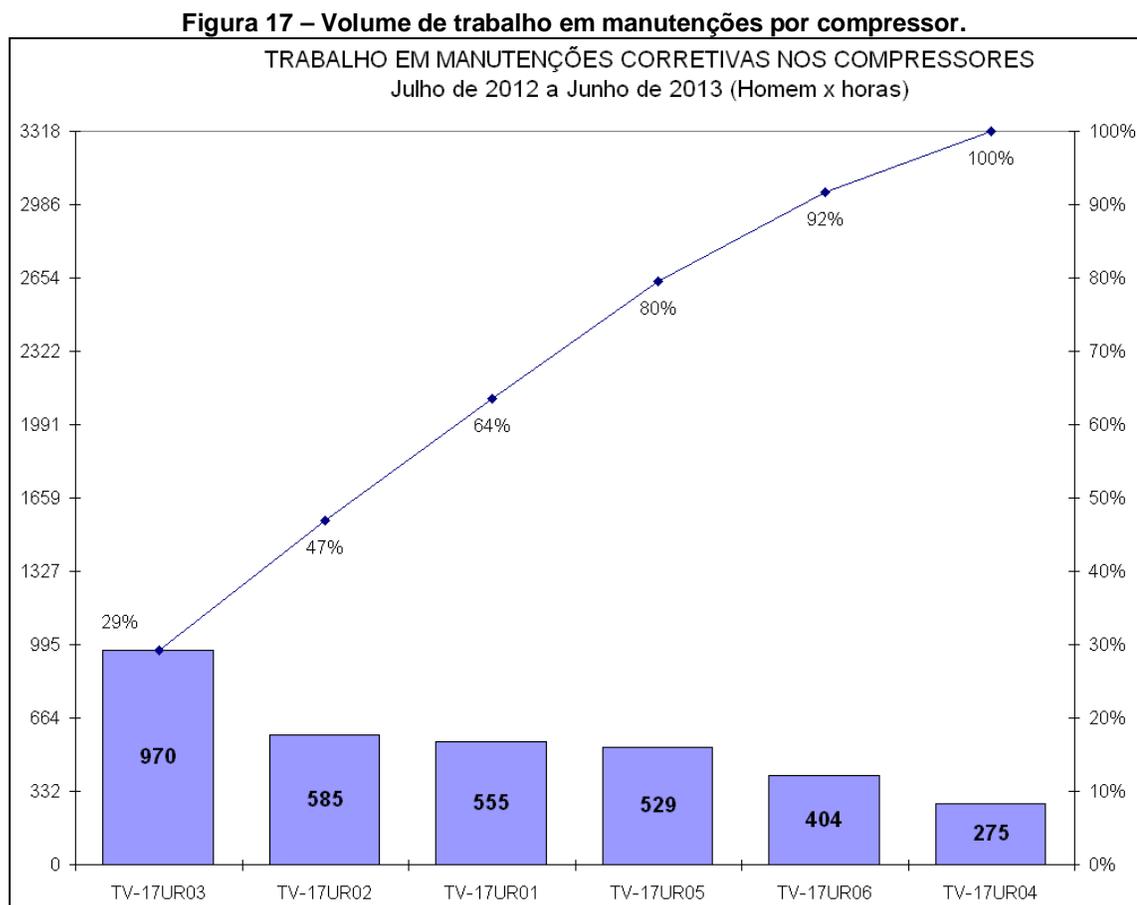


Fonte: Vale Fertilizantes, 2013.

### **5.2.2 Pareto das falhas entre 2012 e 2013 antes do sistema on-line.**

Realizando uma pesquisa no Sistema Informatizado de Manutenção em busca das falhas ocorrida em manutenção corretiva de emergência envolvendo o período do segundo semestre de 2012 ao primeiro semestre de 2013. O objetivo

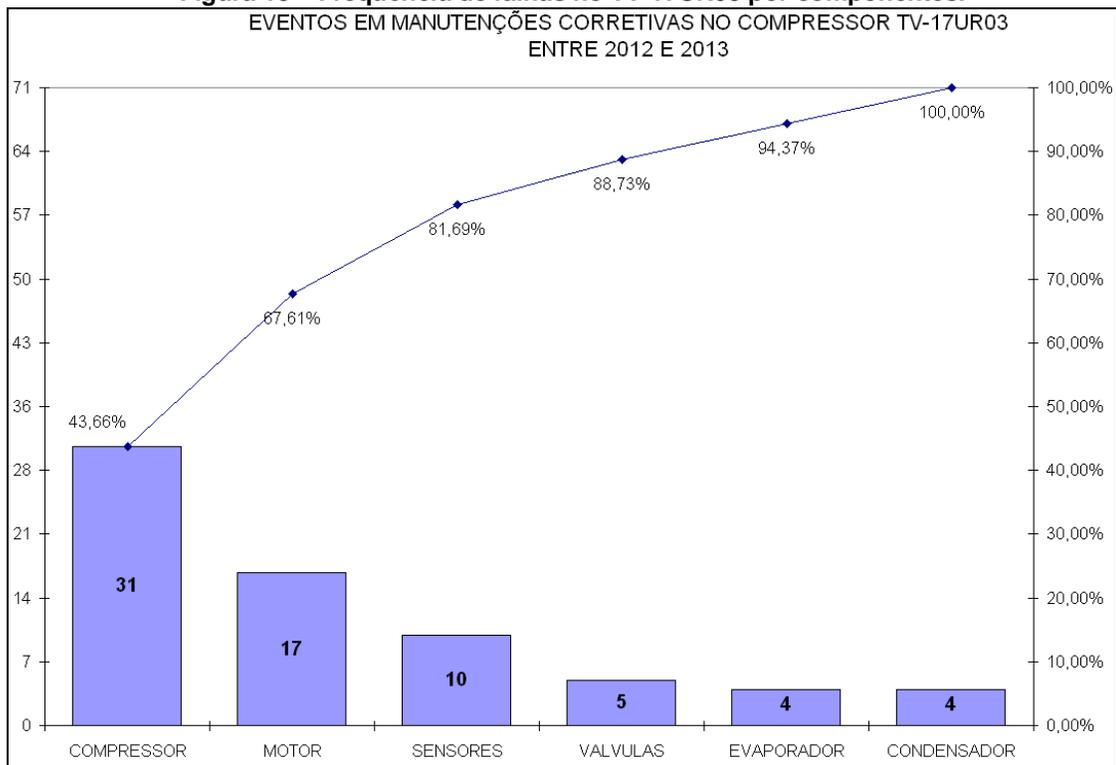
principal era buscar as falhas e relacionar às suas naturezas, como resultado, obteve-se uma lista com as ordens de serviço voltadas em manutenção corretiva de emergência (MC). Assim, pode-se ver na figura 17 abaixo a representação da somatória do trabalho consumido nas atividades, ou seja, o somatório de Homem x hora na realização da correção da falha, e usando a técnica de estratificação de dados por Pareto, pode-se constatar que o equipamento TV-17UR03 foi responsável por aproximadamente 29% do trabalho realizado:



Fonte: Vale Fertilizantes, 2013.

No passo seguinte, considerando que o equipamento TV-17UR03 era representado como o maior responsável pelas falhas, foi realizada mais uma estratificação dos dados desse equipamento, com o intuito de encontrar o componente que mais apresentava as falhas, ficou evidente que o compressor e o motor eram os componentes do conjunto que teve uma maior frequência de falhas, sendo o compressor responsável por cerca de 44% e o motor sendo responsável por cerca 24% conforme exibição na figura 18 a seguir:

**Figura 18 – Frequência de falhas no TV-17UR03 por componentes.**



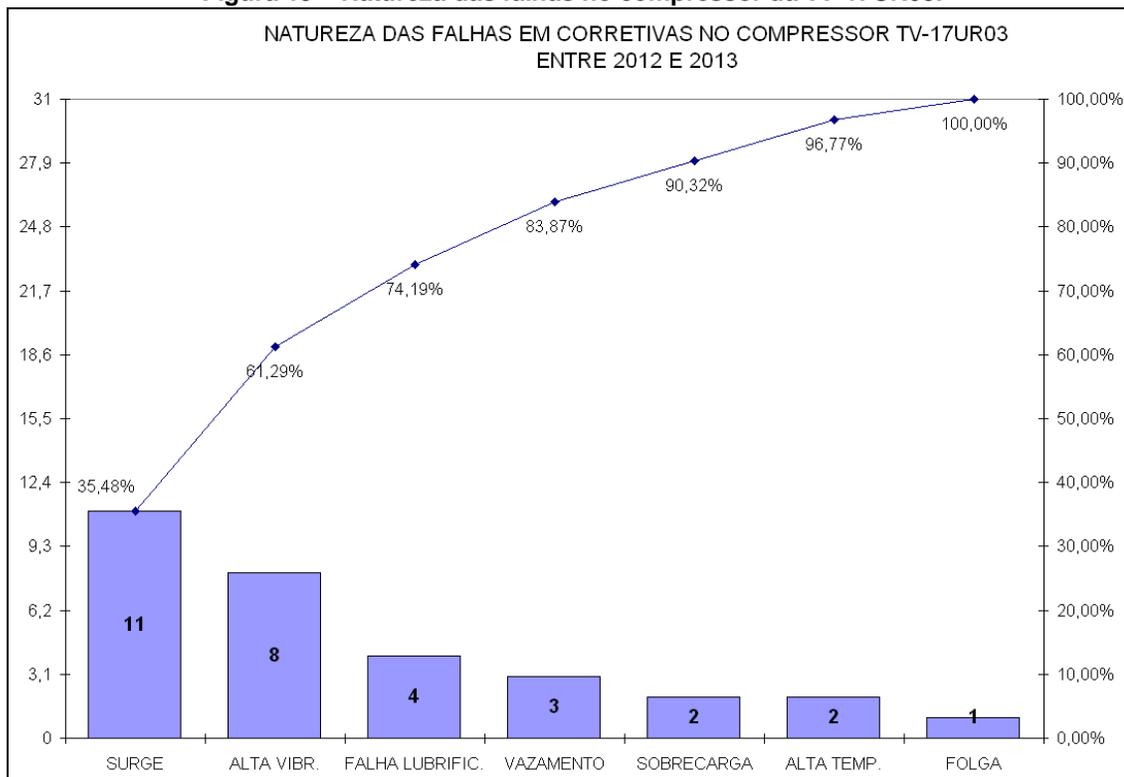
Fonte: Vale Fertilizantes, 2013.

Para continuar com o terceiro nível do Pareto, foi necessário tratar os dados das falhas apresentadas na figura anterior onde foi realizada uma correlação das falhas relatadas no levantamento do histórico e as suas naturezas, ou seja, foram destacadas as possíveis causas das falhas, conforme a figura 14 a seguir:

Assim na figura 19 fica evidenciado que o fenômeno de Surge representa cerca de 35% das falhas apresentadas nesse período, e que falhas aleatórias de Alta Vibração representam cerca de 25%, assim como as Falhas de Má Lubrificação representam cerca de 13%, depois de realizado a somatória das três principais causas, nota-se um valor aproximado de 74% das possíveis causas de falhas para esse equipamento.

Considerando que o sistema on-line estaria cobrindo as falhas mais impactantes relacionadas nos gráficos, pode-se compreender que segundo os dados apresentados, o sistema estaria monitorando e alertando quanto a cerca de 74% das possíveis falhas apresentadas no compressor nesse período. E utilizando essa ferramenta de Gráfico de Pareto, torna-se mais fácil mapear quais as principais variáveis que impactam no processo.

**Figura 19 – Natureza das falhas no compressor da TV-17UR03.**



Fonte: Vale Fertilizantes, 2013.

### 5.3 Seleção do Tipo de Sistema On-Line a Ser Implantado

Nesse subcapítulo abordam-se sobre as características do sistema de monitoramento de análise de vibração, seus componentes que precisam estar em perfeita sintonia de funcionamento.

De acordo com a National Instruments, 2013, o monitoramento das condições de máquina é o processo com o intuito de prever falhas ou desgastes mecânicos.

Medições de vibração, ruído e temperatura são constantemente usadas como principais indicadores do estado da máquina em ambientes industriais. Espectros de vibração e gráficos de tendência dos dados fornecem informações sobre a saúde da máquina e ajuda a detectar as falhas antecipadamente, o que promove a redução de falhas inesperadas e reparos caros.

Após a análise realizada com base em aplicabilidade, desempenho e custos, foi escolhido o sistema da SKF na família do IMx, esse sistema trabalha coletando dados em campo com o módulo IMx-S16 e os espectros dos dados são tratados no

software Aptitude Analyst, na figura 20 abaixo mostra o apresentação do software do sistema utilizado.

**Figura 20 – Capa de apresentação do sistema on-line de vibração.**



Fonte: SKF, 2013.

### 5.3.1 Característica do sistema instalado

O Módulo IMx-S16 possui as seguintes características:

- 16 entradas dinâmicas para qualquer tipo de sensores.
- 04 saídas de alarme.
- Medições simultâneas em todos os seus 16 canais até frequências de 40 kHz.
- Range dinâmico de 120 dB.
- Resolução espectral de 400 a 6400 linhas.
- Memória interna de 8 Mbytes para armazenamento de leituras. Esta memória é utilizada para armazenar os dados de monitoramento e enviá-los ao computador de operação do sistema. Basicamente destina-se a armazenar os dados em caso de interrupção da comunicação com o servidor
- Saídas em 4 relês.
- Controle da integridade do sensor – detectando integridade do cabo.
- Comunicação TCP/IP comunicação, utilizando sistema existente ou rede específica, através de cabo ou sistemas de rádio transmissão (wireless).

- Caso um problema qualquer na máquina ocorra os relês podem atuar para desligar o respectivo equipamento.
- Memória interna de 8 Mbytes.
- Grau de proteção IP65.

A memória para armazenamento de leituras é utilizada para armazenar os dados de monitoramento e enviá-los ao computador de operação do sistema. Basicamente destina-se a armazenar os dados em caso de interrupção da comunicação com o servidor.

Foram instalados 5 Acelerômetros Piezelétricos (sensores de vibração) tipo CMSS 2200-M8 em cada unidade de refrigeração UR's, totalizando assim 30 sensores.

Foram instalados cabos blindados de 1 par tipo CMSS 932-2681-S-Y-20M de baixo ruído e alta resistência, sendo 1 por sensor, totalizando assim 30 cabos.

Foram instalados os cabos múltiplos de sinal tipo blindado com 8 pares x 0,50mm<sup>2</sup> para a conexão entre as caixas de terminais e o sistema IMx-S16. sendo aplicado 1 lance de cabo por Unidade de refrigeração UR's, totalizando 6 lances.

Foi aplicado uma unidade de monitoramento IMx-S16 a cada 3 Unidade de Refrigeração UR's, totalizando assim 2 unidades aplicadas.

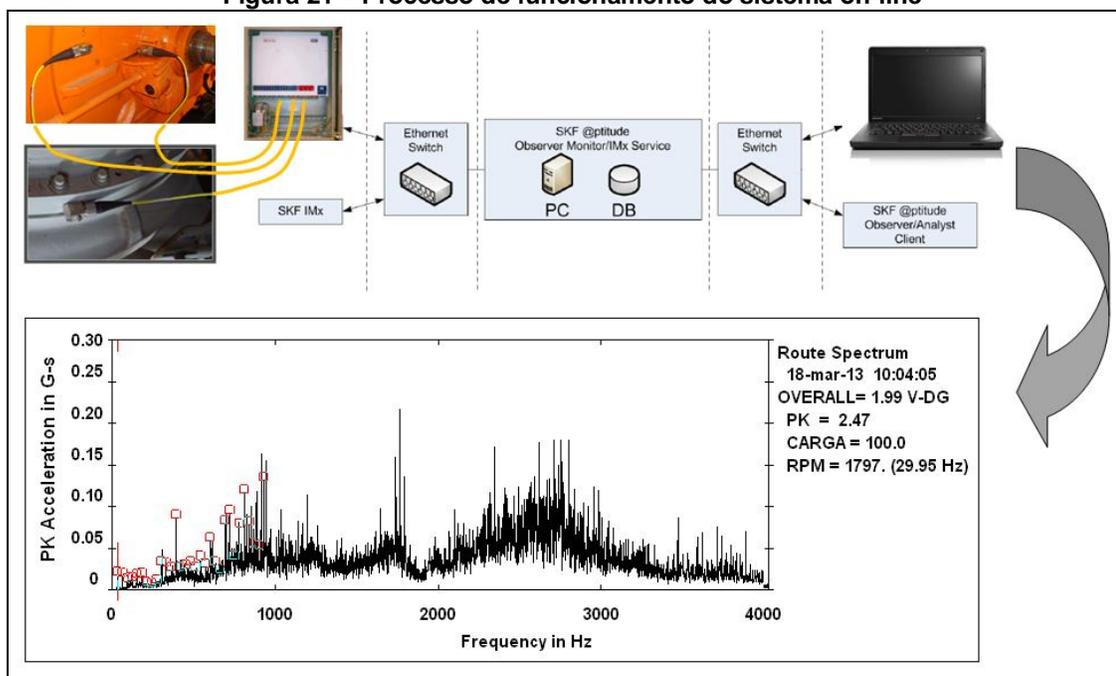
O princípio de funcionamento inicia desde o ponto da coleta de dados no equipamento, onde o sinal é coletado pelos sensores piezelétricos que transformam vibração mecânica em pulsos elétricos.

Esses impulsos são enviados via cabo coaxial para o módulo processador do IMX onde é feito o filtro e o tratamento do sinal de vibração, nesse módulo após processado as informações, o sinal é enviado por um Switch Ethernet e que está conectado a uma rede T.A. (automação) e disponibilizado em um banco de dados do servidor.

Uma vez que essa informação encontra-se na rede T.A., pode-se utilizar um computador habilitado para se conectar e realizar as leituras e tratamento de dados armazenados, esses dados serão visualizados pelo analista do sistema através de gráficos ilustrativos apresentando finalmente os níveis de vibração do equipamento em questão.

Na figura 21 a seguir, ilustra-se uma visão do princípio de funcionamento do sistema on-line, verificando todo o processo de comunicação.

**Figura 21 – Processo de funcionamento do sistema on-line**



Fonte: Dados da Pesquisa. Elaborado com apoio do Relatório técnico da Vale Fertilizantes e o manual do fabricante SKF.

### 5.3.2 Ações realizadas para a implantação do sistema on-line

Para a instalação do sistema foi necessário realizar um planejamento prévio de ações necessárias para o bom andamento das atividades, que foram:

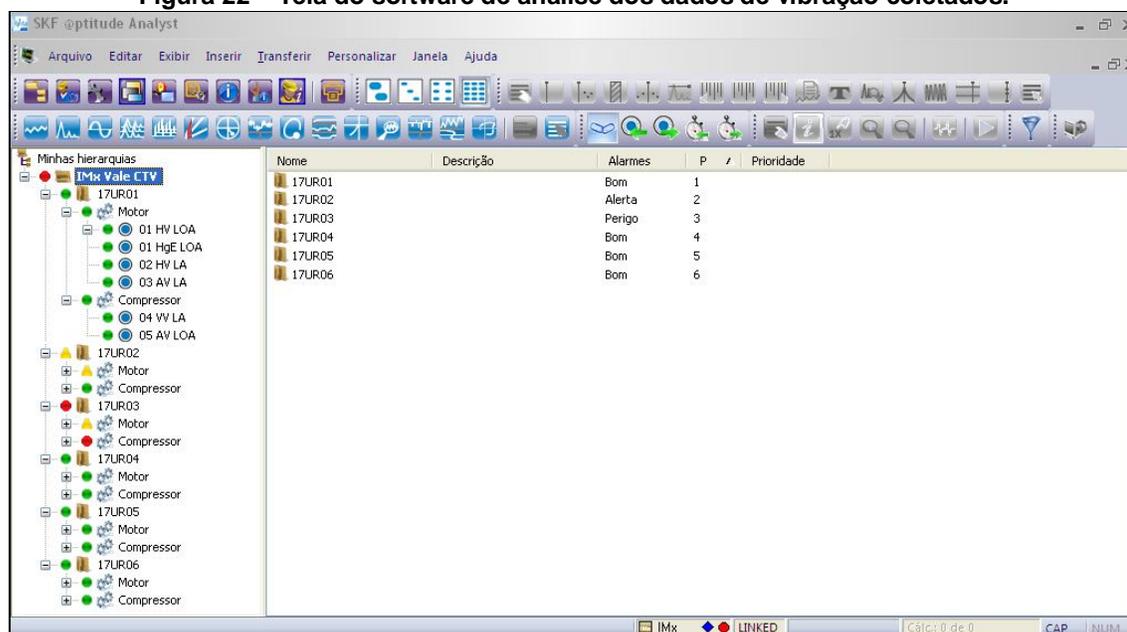
- Realizado estudo do manual técnico dos compressores de refrigeração onde constam suas características técnicas e informações funcionais.
- Acompanhamento de manutenções preventivas nos motores elétricos, sistema de arrefecimento e instrumentos de medição.
- Acompanhamento de manutenção corretiva após ocorrências de defeito nos mancais de deslizamento e rolamentos dos compressores.
- Realizado acompanhamento com o técnico de manutenção preditiva da área, onde foi possível verificar as dificuldades encontradas pelo mesmo, durante a execução das coletas off-line realizadas mensalmente.
- Realizado acompanhamento da inspeção sensitiva no sistema de refrigeração onde puderam ser verificados itens como: temperatura dos mancais, vazão da água do sistema de troca de calor no condensador, possíveis vazamentos do sistema de lubrificação, limpeza geral do equipamento, condição das estruturas de fixação quanto à corrosão e

desgaste e verificação de itens direcionados a segurança como proteções de acoplamentos.

- Realizado a revisão dos planos de manutenção preditiva, preventiva e as manutenções corretivas nos compressores.
- Realizado pesquisa no mercado, analisando os sistemas disponíveis para o monitoramento on-line.
- Levantamento dos fatores e planejamento da implantação do projeto.
- Acompanhamento da instalação física do aparato técnico do sistema de monitoramento on-line nos compressores de refrigeração.
- Acompanhamento da instalação lógica dos softwares e suas devidas configurações de funcionamento (Start up).

Para a configuração lógica, o sistema permite uma visualização dos pontos monitorados de forma ilustrativa e organizada, assim nesta aplicação, os pontos estão separados por equipamento e posteriormente por componente (motor, compressor), essa configuração pode ver na figura 22 onde mostra a tela do software instalado, nesta tela pode-se verificar na janela esquerda uma hierarquia da instalação, em cada componente (motor ou compressor) é possível expandir clicando sobre o mesmo e visualizando os pontos de coleta instalados.

**Figura 22 – Tela do software de análise dos dados de vibração coletados.**



Fonte: SKF, 2012.

#### 5.4 Caso de Sucesso Após Implantação do Sistema

Após instalação do sistema de monitoramento on-line, criou-se uma rotina diária de verificação dos alarmes no sistema, atividade esta realizada pelo técnico de manutenção preditiva responsável pelo monitoramento da planta em questão.

Na ocasião o responsável acessa o sistema de monitoramento, abre a tela de hierarquias, verifica se ocorreu algum alarme no período selecionado, nesse período é importante incluir o tempo de interstício de trabalho do analista, caso haja algum alarme registrado, cabe ao mesmo realizar uma investigação mais detalhada, identificando a fonte (equipamento e posição), nível do alarme e conseqüentemente a realização da análise espectral, no intuito de identificar quais picos de frequências foram os causadores e em que amplitude encontram-se estes picos.

Após análise realizada no sistema, cabe ainda ao técnico, realizar visita in loco e efetuar coleta off-line a fim de comprovar-se a existência de defeito e guardar um histórico do equipamento no sistema off-line.

Para a atividade de coleta off-line o técnico utiliza-se de uma aparelho coletor de vibrações de modelo 2130 do fabricante CSI, conforme pode ser visualizado na figura 23 abaixo:

Figura 23 – Aparelho coletor e sensor de vibração off-line modelo CSI 2130



Fonte: Arquivo pessoal, 2013.

Esse sistema da CSI aplicado na unidade industrial desde o ano de 2009 e ainda é utilizado, pois possui um histórico de todas as coletas realizadas nos equipamentos considerados vitais do complexo industrial, o histórico armazenado proporciona uma melhor gestão e auxilia o técnico analista a elaborar relatórios mais detalhados quanto à condição do equipamento.

Os parâmetros dos pontos coletados são ajustados em detalhe de acordo com o comportamento de cada máquina, ou seja, mesmo com modelo e fabricante semelhantes, as máquinas podem ter comportamentos específicos de acordo com o regime de serviço, isso permite ao técnico analista responsável pela preditiva, atualizar os parâmetros de coleta, bem como ajustar seus níveis de alarme.

Os ajustes tem essencial importância no processo para que os espectros sejam adquiridos da melhor forma possível e demonstre uma condição mais real, isso é o que popularmente chama-se de melhoria contínua do sistema.

Em cumprimento a rotina de verificação de alarmes, em 06 de fevereiro de 2014, foi identificado um alarme em nível crítico no ponto do mancal lado acoplado (LA) do compressor da unidade 17UR03, assim essa vibração do compressor gerou também vibração nos mancais do motor elétrico com menor intensidade.

Após verificação espectral no sistema on-line, foi observado que haviam picos de frequência característicos de defeito nos rolamentos, o que foi comprovado logo em seguida após coleta realizada em modo off-line, esses picos podem ser visto na figura 19 a seguir.

Nota-se que a figura está dividida em duas partes. Na parte superior tem um gráfico de tendência (Trend Display) do nível de vibração global (Overall Value) que mostra a aceleração em G's em função do tempo com a sua unidade em dias.

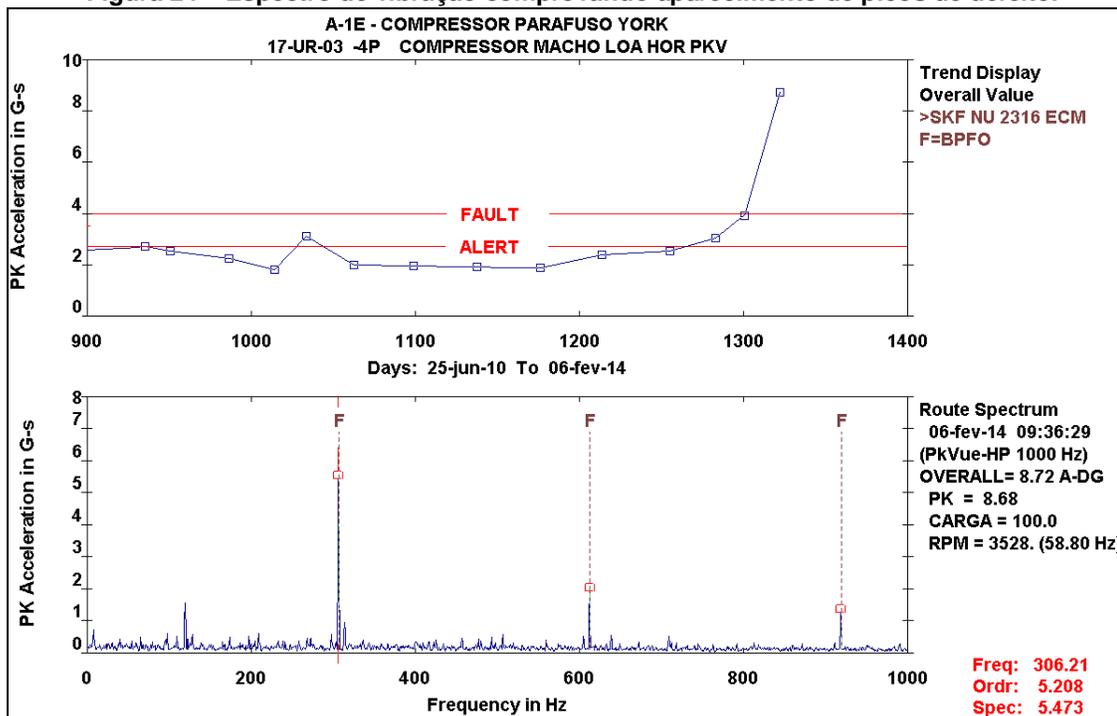
Nesse gráfico de tendência exibe-se uma inclinação repentina do nível de vibração referente às frequências de falhas de pista externa (BPFO - Ball pass frequency of the outer race), isso significa frequência de passagem dos elementos rolantes por um defeito na pista externa do rolamento SKF NU 2316 ECM.

Na parte inferior da figura 24 está apresentando o espectro de vibração em envelope de Peakvue™<sup>7</sup> com sua amplitude em aceleração (G's) em função da faixa de frequência que foi parametrizada para essa coleta.

---

<sup>7</sup> PeakVue é uma tecnologia de análise de vibração patenteada pela Emerson Process Management para diagnósticos em rolamentos e engrenagens.

Figura 24 – Espectro de vibração comprovando aparecimento de picos de defeito.



Fonte: Vale Fertilizantes, 2014.

O sistema cria seus parâmetros tomando como referência as frequências naturais de cada componente dos rolamentos, uma vez que, estas são conhecidas e informadas pelos fabricantes, ou seja, para cada modelo de rolamento, o sistema possui suas características cadastradas facilitando a análise de vibração.

Para a frequência em destaque, pode-se entender que de acordo com a passagem dos elementos rolantes (rolos) sobre uma possível imperfeição na pista externa, assim é gerado uma excitação na frequência natural dessa pista e rolos.

O instrumento por sua vez, detecta essa excitação que é considerado uma frequência determinística, uma vez que se conhece a quantidade de elementos girantes e que os mesmos irão atacar o ponto afetado de forma múltipla a frequência de giro de revolução do eixo.

Sendo assim, a técnica de análise através de filtros realiza o cálculo matemático e mostra na escala de frequência esse defeito característico, a amplitude é calculada de acordo com o nível de excitação (energia) captado através do sensor tipo acelerômetro.

Assim ficou notável que nas coletas anteriores existia uma pequena elevação na curva de tendência conforme a figura 24, ou seja, o defeito estava se manifestando de forma inicial e bastante atenuada, e que já estava sendo tratada pelo técnico da preditiva, sendo necessário realizar coletas mais frequentes com o intuito de ajustar possíveis variações dos valores apresentados.

Ainda no gráfico de tendência pode ser observado que a curva se comportou de forma exponencial, dificultando assim a previsibilidade da falha, esse tipo de comportamento da curva é comum em falhas características de rolamentos.

Assim pode-se comprovar que o monitoramento on-line do equipamento proporcionou um ganho em detectar de maneira praticamente imediata dessa variação repentina do defeito em questão.

O principal ganho está em detectar a elevação repentina dos níveis vibratórios em função de um acidente ou uma falha intermitente que não esteja sendo monitorada, como por exemplo:

- a) Elevação na vibração devido a variações de processo (surge).
- b) Desprendimento de massa do rotor do compressor, o que causaria um desbalanceamento severo.
- c) Vazamento no mancal do compressor o que causaria elevação na amplitude de aceleração caracterizada por um defeito aleatório (falha de lubrificação).

Para essa falha relatada nesse subcapítulo, perante o diagnóstico precoce da elevação demasiada nos níveis de vibração referente a defeito na pista do rolamento, de imediato foi solicitado a parada do equipamento para execução da correção e com isso consegue-se obter ganhos consideráveis como, por exemplo:

- a) Redução do tempo de reparo da manutenção corretiva.
- b) Perdas evitadas de produtividade da extração do minério mina.
- c) Redução do custo de manutenção, haja vista que, as paradas serão realizadas de forma preventiva e programada.
- d) Redução da demanda de manutenção corretiva.
- e) Ganho em previsibilidade e garantia da funcionalidade do equipamento.

Por motivos de política de comunicação da empresa não foi possível mostrar os ganhos de forma mensurada, contudo, sabe-se que os mesmos são bastante significativos, isso pode-se perceber na literatura técnica, que explana de forma clara sobre a importância da boa prática de manutenção.

## 6 CONCLUSÕES

Perante um cenário de mercado cada vez mais competitivo com os preços de produtos mais concorrentes, resulta assim em uma margem de lucratividade cada vez mais arrojada para as empresas.

Considerando que cada empresa possui suas particularidades, padronização e afinidade às determinadas tecnologias, neste trabalho de conclusão de curso, evidenciou-se a importância da aplicação de um sistema de monitoramento eficaz que permita detectar anomalias em tempo hábil e permita acessibilidade para ajustes de parâmetros operacionais do sistema.

Isso possibilita que o processo volte a condições normais de trabalho, permitindo a funcionalidade, confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, garantindo que o equipamento opere em condições de plena carga em todo tempo que for solicitado. Uma vez que, para análise de vibração, o equipamento passará a ser monitorado em tempo real.

Com o sistema implantado, o técnico analista acompanhará todas as variações da máquina relativa ao processo, podendo diagnosticar pontos críticos do desempenho e assim realizar modificações que por ventura venha a ajudar na parametrização dos alarmes e do diagnóstico. Com a coleta de dados em tempo real através do sistema instalado, houve um ganho intangível, ou seja, não mensurável, no quesito de saúde e segurança, visto que reduz a exposição do analista ao campo, eliminando possíveis condições inseguras para a realização de atividades de coleta de dados.

Ressaltar sobre a influência da engenharia de produção para melhorar as condições físicas dos equipamentos, utilizando-se de ferramentas da qualidade da melhor forma possível.

O ensino ministrado pelos professores foi de fundamental importância para o desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso. Com esse estudo de caso, pode-se concluir que as atividades agregaram na prática o conhecimento antes adquiridos em salas de aula dos princípios teóricos das disciplinas do Curso de Engenharia de Produção.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Márcio Tadeu de. **Manutenção Preditiva : Confiabilidade e Qualidade**. Itajubá: 2009. 5 p. Disponível em: <<http://www.mtaev.com.br>>. Acesso em: 08 Abr. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade** - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. Confirmada em 2012.
- BRANCO, Gil Filho. (1996). **Dicionário de Termos de Manutenção, Confiabilidade e Qualidade**. 4º Ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, 2006.
- EMERSON PROCESS MANAGEMENT. Disponível em:< [www.emersonprocess.com/](http://www.emersonprocess.com/)>. Acessado em 13 abr 2014.
- HSW: How Stuff Works, Disponível em:<[www.hsw.uol.com.br](http://www.hsw.uol.com.br)>. Acessado em 18 jun 2014.
- KARDEC, Allan; NASCIF, Julio. (1998). **Manutenção: Função estratégica**. 4º Ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.
- LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2001, 388 p.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Mariana de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 11 ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick, (2001). **Qualidade: Enfoque e Ferramentas**. 2º Ed. São Paulo: Artliber, 2006.
- MONCHY, François. **A função manutenção: formação para a gerência da manutenção industrial**. São Paulo: Durban, 1989.
- NATIONAL INSTRUMENTS, Disponível em:<[www.ni.com](http://www.ni.com)>. Acessado em 13 set 2013.
- OLIVEIRA, Silvio Luiz de. **Tratado de metodologia científica**. São Paulo: Pioneira. 1997.
- ROCKWELL AUTOMATION, Disponível em:< <http://ab.rockwellautomation.com/Condition-Monitoring/Accelerometers>>. Acessado em 13 abr 2014.
- SCARTEZINI, Luís M. B. **Análise e Melhoria de Processos**. Goiânia, 2009. 54 p. (Caderno).
- SKF. **User Manual: SKF Multilog On-line System IMx-S**, Disponível em:<[www.skf.com](http://www.skf.com)>. Acessado em 10 set 2013.

\_\_\_\_\_. @ptitude Analyst™ .2012 Edition. Versão 7.0.152.0: SKF Group, 2012.

UBIRAJARA, Eduardo. **Guia de Orientação para trabalhos de conclusão de curso:** Relatórios, artigos e monografias. Aracaju: FANESE, 2013. 126 p. (caderno).

VALE FERTILIZANTES. Disponível em:<[www.valefertilizantes.com/](http://www.valefertilizantes.com/)>. Acessado em 14 mar 2014.

XENOS, H. G. **Gerenciando a Manutenção Preventiva:** o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade. Belo Horizonte. Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998.

YORK REFRIGERATION, **Manual de Instalação, Operação e Manutenção:** Modulo de Refrigeração PAC 1480 WB, Pensilvânia USA, 2002. (Manual do fabricante).