

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**VITOR DE MELO MOREIRA**

**Manutenção Industrial atuando de maneira estratégica**

**Orientador: Prof. Dr.**

**Waldek Wladimir Bose Filho**

**São Carlos – SP**

**2015**



**VITOR DE MELO MOREIRA**

**Manutenção Industrial atuando de maneira estratégica**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentada ao Departamento de  
Engenharia de Materiais da Universidade  
de São Paulo para conclusão do curso de  
graduação em Engenharia de Materiais e  
Manufatura**

**Área de Concentração:**

**Engenharia de Manutenção**

**Orientador: Prof. Dr.**

**Waldek Wladimir Bose Filho**

**São Carlos – SP**

**2015**



AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Moreira, Vitor de Melo  
M835m Manutenção industrial atuando de maneira  
estratégica / Vitor de Melo Moreira; orientador Waldek  
Wladimir Bose Filho. São Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia De Materiais e  
Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo, 2015.

1. Manutenção industrial. 2. Engenharia de  
Manutenção. 3. Manutenção estratégica. 4. Preditivas.  
I. Título.



Nome: Vitor de Melo Moreira

Título: Manutenção Industrial atuando de maneira estratégica

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentada ao Departamento de  
Engenharia de Materiais da Universidade de  
São Paulo para conclusão do curso de  
graduação em Engenharia de Materiais e  
Manufatura

Aprovado em: 24 de novembro de 2015

Banca Examinadora:

Prof. Dr.: \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr.: \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr.: \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_





## RESUMO

MOREIRA, V. **Manutenção Industrial atuando de maneira estratégica**. 83f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Departamento de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

O objetivo principal deste trabalho é a aplicação e conceituação de uma manutenção industrial atuante de maneira estratégica perante o cenário competitivo atual, de modo a mudar a concepção e visão de um departamento de Manutenção como executante perante as falhas ocorridas em um setor industrial. Inicialmente a tese trata de explicações de termos e conceitos utilizados no setor de Manutenção Industrial e um breve histórico da evolução deste setor no Brasil e no mundo. Além disso, constam abordagens estratégicas de setores e breves explicações de técnicas de manutenção comumente utilizadas, sendo elas: classificação de criticidade de equipamentos, análises de lubrificantes, análise de falhas, termografias, análise de vibração. Apesar do alcance da análise, não foram abordados detalhamentos técnicos completos das técnicas de manutenção, apenas breves explicações e citações. Diante das estratégias, constam exemplificações de aplicações estratégicas em um setor de uma indústria alimentícia de grande porte e com grandes quantidades de equipamentos e alto poder de produção de processamento de frutas cítricas. A aplicação destas técnicas e conceitos de manutenção permitiu ações de antecipação a ocorrência de falhas e aumentos de confiabilidade, maiores disponibilidades e melhoras de manutenibilidade dos ativos físicos industriais.

**Palavras-chave:** Manutenção industrial. Engenharia de Manutenção. Manutenção estratégica. Preditivas.

## **ABSTRACT**

MOREIRA, V. **Industrial Maintenance acting strategically**. 83f. Monograph (Coursework final) - Department of Materials Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2015.

This thesis has the main objective the application and conceptualization of an active industrial maintenance strategically to the current competitive environment so as to change the design and vision of a maintenance department as a performer in view of the failure occurred in an industrial sector. Initially the thesis comes to explanations of terms and concepts used in the historic Industrial Maintenance sector and a short evolution of this sector in Brazil and worldwide. Also, included strategic approaches of industries and short explanations of commonly used maintenance techniques, namely: criticality classification equipment, lube analysis, failure analysis, thermography, vibration analysis. Although the range of the analysis were not discussed complete technical details of maintenance techniques, only brief explanations and quotes. Faced with the strategies contained exemplification of strategic applications in a sector of a large food industry and with large amounts of equipment and high power of citrus processing production. The application of these techniques and maintenance concepts allows anticipation of actions the occurrence of failures and reliability increases, higher availability and improved maintainability of industrial physical assets.

**Key-words:** Industrial maintenance. Maintenance Engineering. Strategic maintenance. Predictive.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de equipamento com manutenção corretiva não planejada. Fonte: (Kardec & Nascif, 2012) .....	3
Figura 2 – Esquemática de Manutenção Preventiva. Fonte: (Kardec & Nascif, 2012).....	5
Figura 3 - Esquema de equipamento com manutenção preditiva. Fonte: (Kardec & Nascif, 2012).....	7
Figura 4 - Esquemática de tempos de funcionamento e de reparo de equipamento. ....	11
Figura 5 - Relação entre os "Resultados da Manutenção", Tipos e estratégias de manutenção e Custos. Fonte: (Kardec & Nascif, 2012) .....	13
Figura 6 - Fases da vida de componentes, "Curva da Banheira". (Pereira, 2011) .....	18
Figura 7 - Distribuição de falhas diagnosticadas por análise de óleo lubrificante (LubeAnalyst).....	23
Figura 8 - Algoritmo de Classificação de Criticidade de equipamentos. ....	33
Figura 9 - Matriz de Classificação de Criticidade em software Excel. ....	34
Figura 10 - Equipamento coletor de vibração (OneProd ACOEM, 2015). ....	37
Figura 11 - Câmera termográfica FLIR E50 (FLIR Instruments, 2015). ....	37
Figura 12 - Distribuição dos níveis de cada parâmetro para subáreas Prensagem e Peletização.....	42
Figura 13 - Distribuição dos níveis de cada parâmetro para subáreas Secagem e Silo Pelets. ....	43
Figura 14 - Distribuição de classificação de criticidade em cada subárea da Polpa cítrica peletizada. ....	44
Figura 16 - Viscosidade óleo da caixa de redução de centrífuga de óleo.....	47
Figura 17 - Concentração de metais de desgaste em óleo da caixa de redução da centrífuga de óleo.....	47
Figura 18 - Concentração de metais de contaminação em óleo da caixa de redução da centrífuga de óleo.....	48
Figura 19- Viscosidade óleo da caixa de redução de centrífuga.....	49
Figura 20 - Concentração de metais de desgaste em óleo da caixa de redução da centrífuga. ....	49
Figura 21 - Concentração de metais de contaminação em óleo da caixa de redução da centrífuga.....	50
Figura 22 - Viscosidade óleo da caixa de redução do redutor.....	51
Figura 23 - Concentração de metais de desgaste em óleo da caixa de redução do redutor. ....	51
Figura 24 - Concentração de metais de contaminação em óleo da caixa de redução no redutor. ....	52
Figura 25 - Espectro de vibração do compressor de amônia.....	54
Figura 26 - Termograma com altas temperaturas no rolamento. ....	55
Figura 27 - Trincas reveladas por técnica de líquidos penetrantes na base da centrífuga. ....	56
Figura 28 - Quantidade de ocorrências nas bombas de alimentação dos evaporadores em um ano. ....	58
Figura 29 - Quantidade e tipo de componente afetados nas ocorrências das bombas de alimentação dos evaporadores. ....	58
Figura 30 - Árvore de Falha das bombas de alimentação dos evaporadores.....	60

Figura 31 - Quantidade de ocorrência pelo elemento do equipamento centrífuga de fermento. ....	62
Figura 32 - Erosão no corpo do rotor da centrífuga. ....	63
Figura 33 - Componentes no novo equipamento. 1) Sensor de temperatura de óleo. 2) Sensor de vibração e 3) Sistema de amortecimento da base. ....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de criticidades .....	15
Tabela 2 - Benefícios de aplicação de Manutenção Preditiva (Operations & Maintenance - Best Practices, 2010). ....	20
Tabela 3 - Tecnologias preditivas aplicadas em tipos de equipamentos. ....	20
Tabela 4 - Tipos de análises físico-químicas de óleos lubrificantes (Kardec & Nascif, 2012). ....	22
Tabela 5 - Níveis e simbologias de parâmetro do algoritmo de Classificação de Criticidade. ....	25
Tabela 6 - Parâmetros de avaliação e exemplificação do nivelamento. ....	26
Tabela 7 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Segurança, Saúde e Meio Ambiente. ....	27
Tabela 8 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Qualidade. ....	28
Tabela 9 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Produção. ....	29
Tabela 10 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Regime de Trabalho. ....	30
Tabela 11 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Custos. ....	30
Tabela 12 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Frequência de Falhas. ....	31
Tabela 13 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Manutenibilidade. ....	32
Tabela 14 - Componentes em ensaio de óleo lubrificante de análise de metais .....	35
Tabela 15 - Estado de rolamento através de análise de temperaturas por tipos de lubrificantes e rolamentos (Vibration, 1988). ....	38
Tabela 16 - Quantidade de equipamentos das subáreas da Polpa Cítrica Peletizada. ....	40
Tabela 17 - Distribuição proporcional de equipamentos classificados em A, B e C em cada subárea. ....	45
Tabela 18 - Ações para solução das causas raízes das falhas nas bombas de alimentação dos evaporadores. ....	61

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Ensaaios e Materiais)
BEP	Best Efficiency Point
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
MTBF	Mean Time Between Failure (Tempo Médio Entre Falhas)
MTTR	Mean Time To Repair (Tempo Médio para Reparar)
NBR	Norma Brasileira
SSMA	Segurança, Saúde e Meio Ambiente
TAN	Total Acid Number (Índice de Acidez)
TBN	Total Basic Number (Índice de Basicidade)

## **LISTA DE SÍMBOLOS**

° C	graus Celsius
cts	centistokes
ppm	Partes por milhão

## Sumário

1. Tema e sua importância .....	1
2. Objetivo .....	1
3. Introdução .....	2
3.1 Conceito .....	2
3.1.1 Tipos de Manutenção .....	2
3.1.1.1 Manutenção Corretiva.....	3
3.1.1.2 Manutenção Preventiva .....	5
3.1.1.3 Manutenção Preditiva .....	6
3.1.1.4 Manutenção Detectiva .....	7
3.2 Evolução histórica da manutenção.....	8
3.2.1 Primeira Geração (1930 a 1950).....	8
3.2.2 Segunda Geração (1950 a 1970).....	9
3.2.3 Terceira Geração (1970 a 1990).....	9
3.2.4 Quarta Geração (1990 a 2005) .....	9
3.2.5 Quinta Geração (2005 ao presente).....	10
3.3 Engenharia de Manutenção.....	10
3.4 Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade.....	11
3.5 Manutenção Estratégica.....	13
3.5.1 Planejamento e Controle da Manutenção .....	14
3.5.2 Classificação Criticidade de equipamentos.....	15
3.5.3 Lubrificação .....	16
3.5.4 Análises de Falhas .....	17
3.5.5 Técnicas Preditivas .....	19
3.5.5.1 Análise de Vibração .....	21
3.5.5.2 Termografia .....	21
3.5.5.3 Análise de óleo lubrificante .....	22
3.5.5.4 Líquido penetrantes.....	24
3.5.6 Inspeções Sensitivas .....	24
4. Métodos e Técnicas.....	25
4.1 Algoritmo de Classificação de Criticidade de equipamentos.....	25
4.2 Análise de Lubrificante .....	34
4.3 Análise de Vibração.....	36

4.4	Termografia Mecânica .....	37
4.5	Inspeção Líquido penetrante.....	38
4.6	Análise de falha.....	38
5	Resultados e Discussões .....	40
5.1	Classificação de criticidade de equipamentos .....	40
5.2	Técnicas Preditivas .....	45
5.2.1	Análise de óleo lubrificante .....	45
5.2.2	Análise de vibração .....	53
5.2.3	Termografia Mecânica .....	54
5.2.4	Líquidos penetrantes.....	56
5.3	Estudos de Engenharia de Manutenção.....	57
5.3.1	Análise de falha .....	57
5.3.2	Melhorias.....	62
6	Conclusão .....	65
6.1	Sugestão trabalhos futuros .....	66
	Bibliografia .....	67

## **1. Tema e sua importância**

Perante o cenário cada vez mais competitivo no mercado globalizado, a busca por uma eficiência máxima dos meios de produção e uma excelência dos mentores envolvidos se tornou um requisito de sobrevivência das companhias neste atual cenário. A manutenção trata-se de um segmento que contribui para uma maximização da rentabilidade de uma corporação.

Para o cenário industrial, a principal busca está pela máxima eficiência dos ativos e menores perdas com custo indesejáveis e não planejados, perdas de produção nos quais acarretam em perda de competitividade perante seus concorrentes. Outro fator a ser considerado, é a necessidade de acompanhamento com as mais modernas tecnologias que o mercado oferece, devido ao crescimento cada vez mais rápido das quantidades e diversidades dos itens físicos, instrumentações, automação e monitoramentos.

A atividade de manutenção industrial é um dos setores fundamentais para um processo produtivo e precisa agir de maneira proativa e estratégica de modo que minimizem as perdas indesejáveis e otimização dos custos. Com toda esta concorrência e cenário citado acima, não há permissão para espaços com ações de improvisos e arranjos.

Uma visão necessária atualmente é o quanto uma manutenção bem realizada é imprescindível atentar-se a diferentes parâmetros além da manutenção em si do ativo físico ou da quantidade de produção, é preciso levar em consideração a segurança e saúde dos envolvidos, danos ambientais, qualidade de produção e entre outros fatores que as organizações globalizadas estão exigindo com mais rigores.

## **2. Objetivo**

Busca por uma manutenção industrial de excelência de maneira estratégica com utilização de estudos e implementação de modernas ferramentas e instrumentações



com envolvimento de diferentes setores e exemplificação prática destas estratégias em uma unidade industrial de processamento de laranja.

### **3. Introdução**

#### **3.1 Conceito**

O termo manutenção deriva-se de duas palavras latinas, MANUS TENERE, com significado traduzido por “ter à mão”, ou seja, manter o que se tem disponível. Levando ao sentido restrito, leva ao significado de preservação das condições originais de equipamentos de modo a manter as funcionalidades requeridas.

A manutenção, consiste em uma combinação entre todas ações técnicas e administrativas, inclusive ações da supervisão, com intuito de a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar sua função requerida ou especificada (NBR 5462 ABNT, 1994).

Toda e qualquer fábrica ou meio industrial no qual possui atividade de fabricar algo precisa de vários meios que permitam a produção. Entre estes meios essenciais encontra-se o departamento denominado Manutenção (Nepomuceno, 1989).

##### **3.1.1 Tipos de Manutenção**

Diversas são as denominações em relação a atuação e execução da manutenção, onde tal variedade pode ocasionar em confusões no entendimento da maneira correta de execução e atuação da manutenção. O mais importante destas denominações está no conceito no qual elas são aplicadas. Para tal entendimento das denominações que serão relatadas neste trabalho, a seguir uma explicação da conceituação e divisão de cada tipo de manutenção mais comumente encontrados pelas literaturas e utilizadas nos setores industriais.

- Manutenção Corretiva;
- Manutenção Preventiva;
- Manutenção Preditiva e
- Manutenção Detectiva.

A seguir, uma breve explicação e entendimento dos respectivos termos citados.

### 3.1.1.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é a manutenção executada após a ocorrência e percepção de uma falha ou pane (NBR 5462 ABNT, 1994). A manutenção do tipo corretiva tem seu termo conhecido desde meados do início do século XIX e é até hoje o tipo de manutenção mais executado e mais conhecido popularmente, pois se trata da manutenção executada popularmente do termo de “consertar o que está quebrado ou em mau uso”.

Podemos dividi-los em dois diferentes tipos em relação a sua caracterização:

#### 3.1.1.1.1 Manutenção Corretiva não planejada ou emergencial

Este tipo de manutenção também se caracteriza pela falta de planejamento e o mais prejudicial em relação aos custos industriais, perdas de produção, qualidade do produto, segurança e meio ambiente (Kardec & Nascif, 2012).

A seguir, na Figura 1 uma esquematização representativa básica de um ativo em funcionamento com manutenção corretiva não planejada.

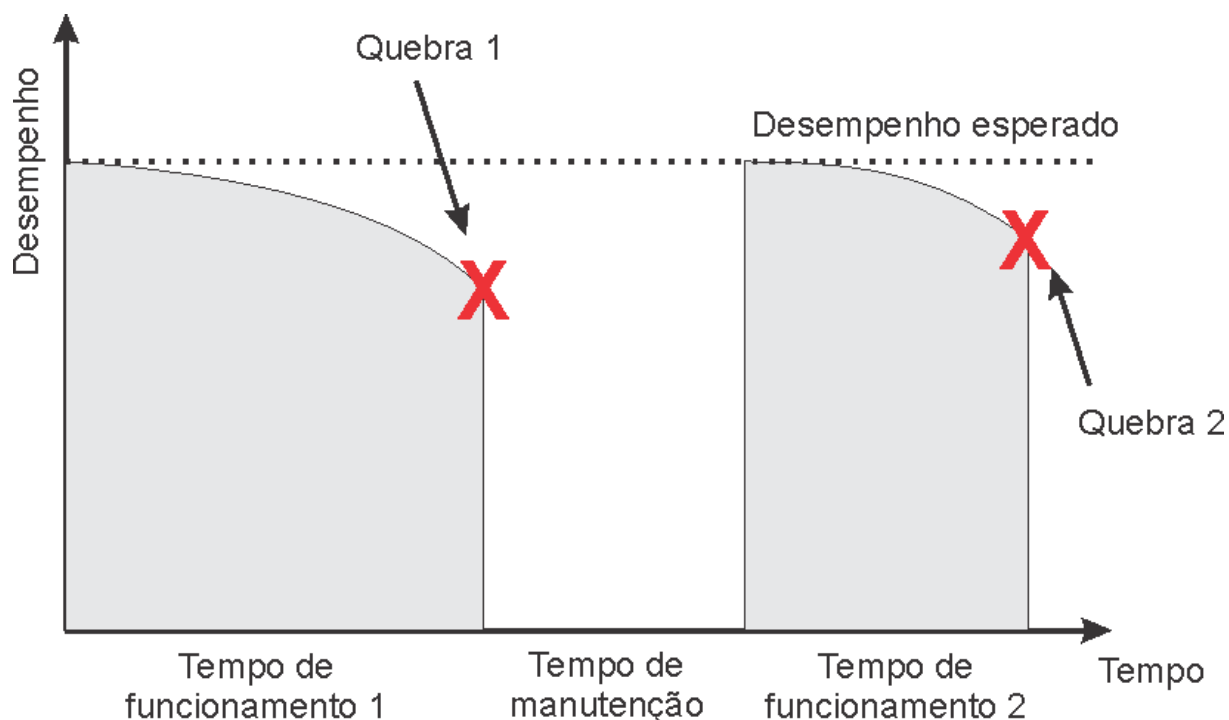


Figura 1 - Esquema de equipamento com manutenção corretiva não planejada. Fonte: (Kardec & Nascif, 2012)

A Figura 1 ilustra que equipamentos possuem tempos diferentes de operação até a falha e que o equipamento perde totalmente seu funcionamento em uma quebra.

Muitos autores defendem que quando o índice de manutenção corretiva não planejada é alto ou até acima das outras execuções de manutenção, significa que o seu departamento de manutenção não está sendo eficiente em relação as atitudes proativas e cada vez mais os índices de disponibilidade cairão e a manutenção atuará apenas para execução de reparos em falhas e panes em círculo infinito.

#### 3.1.1.1.2 Manutenção Corretiva planejada ou programada.

Ação de correção de um desempenho não desejado baseado no acompanhamento e diagnósticos de parâmetros levantados por uma Preditiva, Detectiva ou Inspeção (NBR 5462 ABNT, 1994).

Toda ação planejada em geral possui uma maior facilidade, rapidez, segurança, qualidade e na maioria dos casos com um custo menor em relação a uma ação não esperada (Kardec & Nascif, 2012).

A Manutenção corretiva planejada está diretamente associada às ações de acompanhamento da Manutenção Preditiva, portanto a real qualidade e eficácia da execução da Manutenção Corretiva Planejada estão diretamente ligadas.

Adotar a manutenção corretiva mesmo que não planejada ou emergencial pode ser uma atitude não descartada para os seguintes casos (Pereira, 2011):

- Ativos com baixos custos operacionais,
- Ativos não considerados críticos para o processo,
- Ativos com fácil e rápida manutenção,
- Dentre muitos outros casos.

Para escolha ou não de adoção de planejada ou emergencial, cabe ao departamento estratégico da manutenção (Planejamento e Engenharia de Manutenção) definirem perante estudos de criticidade dos ativos em que a planta industrial possuir, assunto que será melhor documentado e relatado posteriormente.

### 3.1.1.2 Manutenção Preventiva

Manutenção efetuada em intervalos de tempos predeterminados ou em relação a critérios prescritos, com finalidade de redução de falhas ou degradação de ativos (NBR 5462 ABNT, 1994).

Originada por volta da década de 30, surgiu através da indústria aeronáutica onde havia necessidade de manter os ativos em funcionamento e altíssimas preocupações com segurança a qualquer custo para se manter competitivo (Pereira, 2011).

A seguir na Figura 2, uma esquematização de uma manutenção preventiva, utilizando uma representação de equipamento semelhante ao exemplificado na Figura 1.

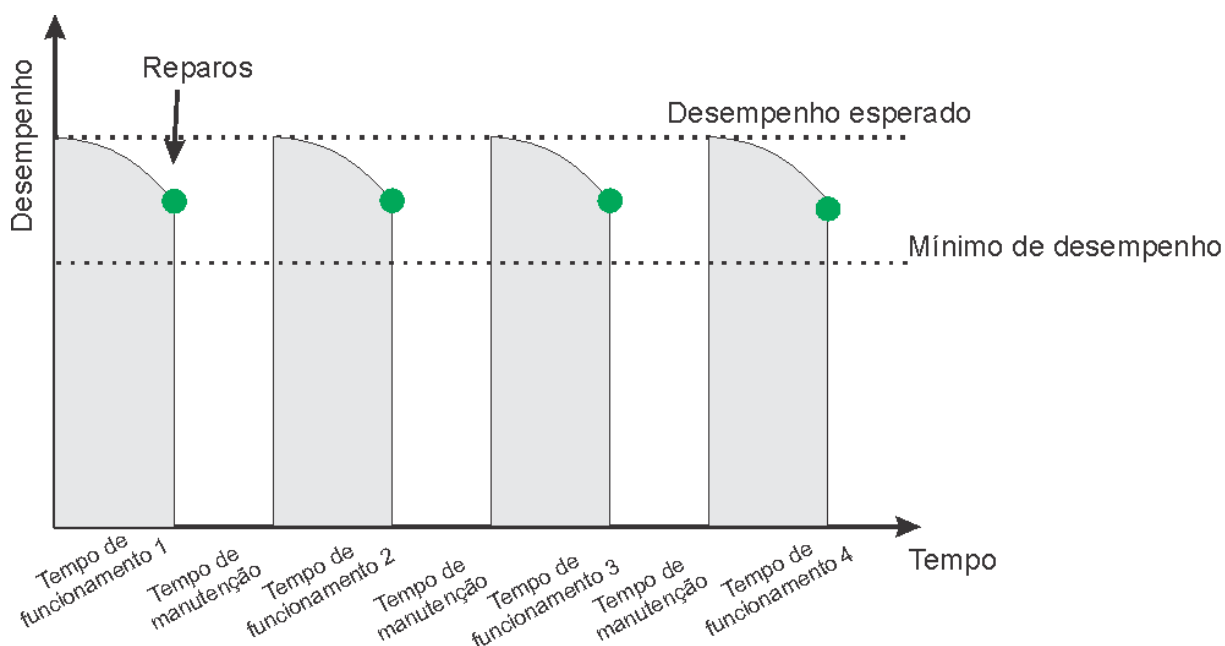


Figura 2 – Esquematização de Manutenção Preventiva. Fonte: (Kardec & Nascif, 2012)

É possível notar que equipamentos sujeitos a manutenções preventivas não possui uma otimização e aproveitamento máximo do desempenho de seu equipamento. A quantidade de reparos em um mesmo período de tempo também é maior, portanto o custo será maior.

Caracterizado com alto custo industrial, porém de maneira planejada, a manutenção preventiva é indicada nas seguintes situações: (Kardec & Nascif, 2012)

- Quando é impossibilitado a prática de preditivas;
- Quando é relacionado aspectos de segurança pessoal que tornam imprescindível a intervenção do ativo;
- Em riscos de agressão ao meio ambiente;
- Facilidade de reposição de itens.

Além do elevado custo, outro problema relacionado a constante prática de uma manutenção preventiva está relacionado aos erros de execução humana, podendo promover o surgimento de outros problemas que agravem o funcionamento do equipamento, sendo eles contaminações introduzidas, problemas de partidas do equipamento, dentre outros.

### 3.1.1.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva é responsável por prever as condições em que o equipamento se encontra.

Baseada na condição ou estado que o equipamento se encontra, onde o acompanhamento segue uma sistemática através de técnicas e análises (Kardec & Nascif, 2012). Uma aplicação de manutenção preditiva visa a diminuição das manutenções preventivas e corretivas emergenciais em primeiro caso. Uma análise correta de preditiva permite o acompanhamento da “saúde” do equipamento, onde o diagnóstico dado, sugere uma aplicação correta e ao melhor custo de uma correção planejada de um equipamento, permitindo assim melhores preparações de execução dos serviços e com um maior tempo de funcionalidade.

Levando em consideração ao mesmo esquema de exemplificação de funcionamento de um equipamento citado anteriormente na Figura 1, a seguir uma esquematização de uma manutenção preditiva ilustrado na Figura 3.

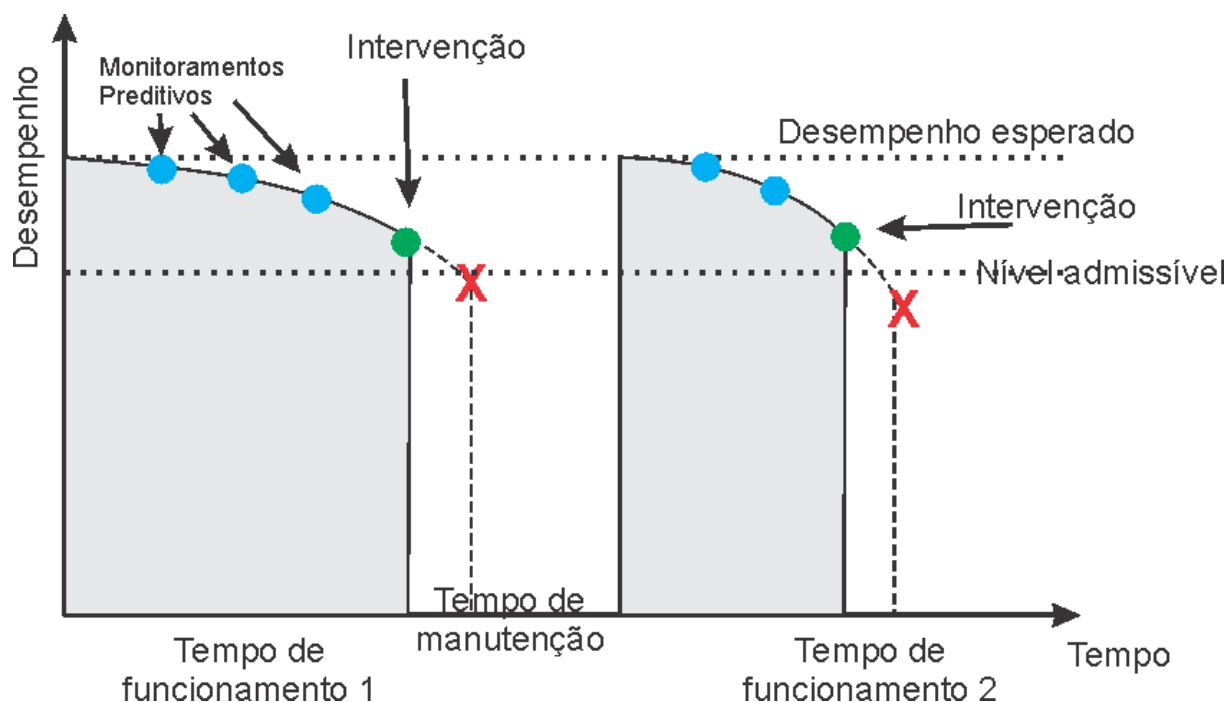


Figura 3 - Esquema de equipamento com manutenção preditiva. Fonte: (Kardec & Nascif, 2012)

Os acompanhamentos preditivos fornecem o estado em que o equipamento se encontra, onde é permitida uma avaliação de intervenção anteriormente a uma falha catastrófica. O tempo de manutenção pode ser mais curto ou com o mesmo tempo de execução em comparativo com a situação exemplificada na manutenção corretiva, porém será feito de maneira planejada no qual diminuirá os gastos indesejáveis.

A preditiva cresceu e acompanha as evoluções tecnológicas de equipamentos de monitoramentos, onde as principais técnicas de análises preditiva são a termografia e análise de vibração, nos quais serão melhores explicados posteriormente neste trabalho.

#### 3.1.1.4 Manutenção Detectiva

Muitos autores não citam a manutenção detectiva por considerar ser um tipo de manutenção preditiva, por também se tratar de um acompanhamento e monitoramento do equipamento. Apesar de não ser muito utilizado para elaboração desta tese, vale tratá-la como um tipo de manutenção diferente devido as particularidades.

A manutenção detectiva, atua detectando uma falha que é oculta a inspeção do pessoal de operação ou manutenção. (NBR 5462 ABNT, 1994)

Este tipo de manutenção é exemplificado por sistemas de atuação de proteção, um exemplo simples e objetivo são os painéis de sinalizações e alarmes, onde a detecção de uma avaria no equipamento alarma para atuação, seja ela automática pelo próprio sistema ou corretiva pela execução de manutenção.

Apesar da importância de sistemas cada vez mais automatizados, nesta tese as tecnologias de detecção não serão mencionadas, por se tratar de um estudo de automação. Porém a utilização estará ligada a sistemática de criticidade de equipamentos e ações da Engenharia de Manutenção nos quais serão esclarecidos posteriormente.

### 3.2 Evolução histórica da manutenção

O setor e a atividade de manutenção é considerado como o setor que mais sofreu modificações em relação as outras atividades industriais. Toda essa grande mudança acompanhou simultaneamente as grandes mudanças ocorridas no setor industrial como: aumento significativos da quantidade, diversidade e tecnologia de itens físicos e complexidade dos projetos, aumento das instrumentações, automações e monitoramentos, surgimento de tecnologias e técnicas de manutenção, entre outros.

Segundo (Kardec & Nascif, 2012), a evolução da manutenção pode ser dividida em cinco gerações a partir da década de 30 até o atual momento.

#### 3.2.1 Primeira Geração (1930 a 1950)

Se tratava de um período anterior a Segunda Guerra Mundial, onde o setor industrial era pouco mecanizado, com equipamentos relativamente simples e com projetos superdimensionados. A visão em relação as falhas de equipamentos era a de que todos os equipamentos falham com o passar dos anos. A manutenção de equipamentos era realizada exclusivamente em equipamentos que falharam, ou seja, de maneira puramente corretiva e não planejada.

### 3.2.2 Segunda Geração (1950 a 1970)

O primeiro período após a Segunda Guerra Mundial, a mão de obra industrial decresceu sensivelmente, aumentando a demanda por produção e a mecanização industrial, portanto a demanda por uma disponibilidade dos equipamentos era mais exigida e o conceito de um bom funcionamento e não ocorrência de falhas começaram a surgir com implementações de uma manutenção preventiva com intervalos fixos para execuções. Estas novas execuções fizeram com que o custo em relação de manutenção aumentasse significativamente, surgindo assim o sistema de planejamento e controle da manutenção, uma visão mais estratégica das execuções e otimizações destas.

### 3.2.3 Terceira Geração (1970 a 1990)

Foi um período de altíssima aceleração e alterações na indústria, com crescimento significativo de automação e mecanização. Conceitos relacionados a qualidade do produto, segurança, estoques reduzidos para produção e ideologia *just-in-time* eram tendências mundiais e as paralisações de fábrica se tornou uma preocupação global.

Dentre as significativas mudanças e novos conceitos, encontram-se a utilização de manutenção preditiva, utilização de computadores e desenvolvimento de softwares que auxiliaram nos planejamentos dos serviços de manutenção, o conceito de Confiabilidade (item 3.4), oriundo da indústria aeronáutica começou a ser mais aplicado e estudado por um setor mais estratégico no setor de Manutenção, a Engenharia de Manutenção. A contratação por serviços ao invés de contratação de mão de obra também foi um conceito a ser mais utilizado.

### 3.2.4 Quarta Geração (1990 a 2005)

Caracterizou-se por uma maior consolidação dos conceitos surgidos na Terceira, porém com foco forte no conceito de Disponibilidade, se tornando o índice mais importante de uma fábrica. Em consequência e juntamente com a Disponibilidade de fábrica, a Confiabilidade e Manutenibilidade se tornaram a justificativa da existência



do setor estratégico da Manutenção. A condição de monitoramento dos equipamentos se tornaram cada vez mais frequentes e numerosos, resultando em uma diminuição da prática de uma manutenção preventiva ou programada.

#### 3.2.5 Quinta Geração (2005 ao presente)

A competitividade entre as companhias aumentou significativamente, portanto os resultados empresariais se tornaram uma questão de sobrevivência destas. Conceitos de administração foram introduzidos ao setor de manutenção, como Retorno sobre os Investimentos, onde busca-se uma otimização dos ativos da indústria com capacidade máxima e sem a ocorrência de falhas não previstas, aumentos significativos da Manutenção Preditiva e acompanhamentos e monitoramentos de equipamentos on-line, participação da manutenção desde o projeto e em toda cadeia dos ativos, de modo a obter maiores conhecimentos e propor melhorias.

### 3.3 Engenharia de Manutenção

O termo Engenharia de Manutenção surgiu-se em meados das décadas de 50 e 60, porém com denominações diferentes e executados por outros profissionais da área de manutenção, também eram chamados de analistas ou técnicos de manutenção. A descrição de cargo de um Engenheiro de Manutenção surgiu apenas a partir dos anos 90 (Pereira, 2011).

Segundo mencionado por (Kardec & Nascif, 2012), trata-se do suporte técnico e estratégico da Manutenção, responsável principalmente por dois aspectos no setor de Manutenção:

- Consolidar a rotina e
- Implementar melhorias.

Dentro destes aspectos citados anteriormente, segue as principais atribuições de um profissional engenheiro de manutenção:

- Aumentar a confiabilidade de equipamentos (explicado posteriormente);
- Aumentar a disponibilidade de equipamentos (explicado posteriormente);
- Alcançar a melhor Manutenibilidade de ativos (explicado posteriormente);
- Solucionar os problemas crônicos;

- Dar suporte para a execução de manutenção;
- Participar dos projetos novos implementados, interface com Engenharia Industrial;
- Elaboração de planos e inspeções de manutenção;
- Acompanhamento dos indicadores de acompanhamento de desempenhos;
- Ter conhecimento e participações nas documentações técnicas;
- Fazer análises de falhas e estudos de melhorias;
- Busca e acompanhamento de novas tecnologias,

### 3.4 Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade

A importância destes termos para manutenção está evidente por serem considerados como os resultados ou produtos da manutenção. Para exemplificação de alguns indicadores de medição dos termos a seguir, segue uma esquematização na Figura 4 do funcionamento de algum ativo em relação ao tempo, com medidas de tempo de funcionamento e o tempo de reparo do equipamento.

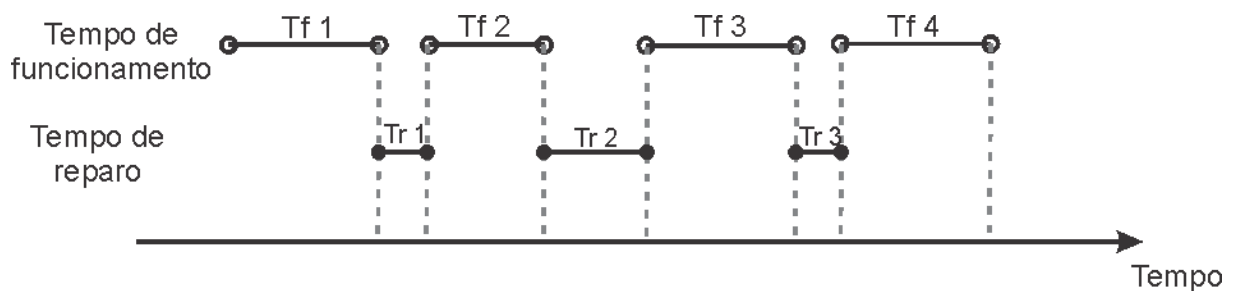


Figura 4 - Esquematização de tempos de funcionamento e de reparo de equipamento.

Confiabilidade significa a probabilidade de um ativo de trabalhar sem a ocorrência de falha em um tempo preestabelecido (NBR 5462 ABNT, 1994), ou seja, como o próprio nome sugere, o grau de confiança que o ativo transmite e trabalha sem a ocorrência de alguma avaria. A avaliação de confiabilidade pode ser mensurada pelo denominado MTBF (Mean Time Between Failure – Tempo Médio Entre Falhas), seguindo a formulação a seguir:

$$MTBF = \frac{\sum Tf}{n^{\circ} \text{ de falhas}} \quad (1)$$

Manutenibilidade sugere a capacidade de um ativo ser recolocado em condições de execução de suas funcionalidades (NBR 5462 ABNT, 1994), em outras palavras, a dificuldade de reparo de um ativo. Podendo ser mensurado em relação ao tempo com o MTTR (Mean Time To Repair – Tempo Médio para Reparo)

$$MTTR = \frac{\sum Tr}{n^{\circ} \text{ de falhas}} \quad (2)$$

Além da medida quantitativa da Manutenibilidade, há a possibilidade de medições de qualitativas de Manutenibilidade, onde é necessário levar em consideração aspectos como:

- Dificuldades de acesso de reparo;
- Necessidade de mão-de-obra especializada;
- Necessidade de paradas de produção;
- Dentre outros aspectos que necessitam ser avaliados por profissionais com conhecimentos técnicos de reparos.

A Disponibilidade, leva em consideração o quanto o item permanece disponível para exercer suas funcionalidades, portanto pode ser calculado das seguintes maneira:

$$Disponibilidade = \sum Tf \quad (3)$$

$$\% Disponibilidade = \frac{\sum Tf}{\sum Tf + \sum Tr} \quad (4)$$

A seguir, na Figura 5, segue um gráfico extraído e adaptado de (Kardec & Nascif, 2012), onde correlaciona e determina proporcionalmente através de escalas dimensionais os denominados “Resultados da manutenção” em relação aos tipos e estratégias de manutenção aplicados sendo inversamente proporcional aos custos diretos (custos de reparos e correções) e indiretos (perdas de produção, seguranças, dentre outros).

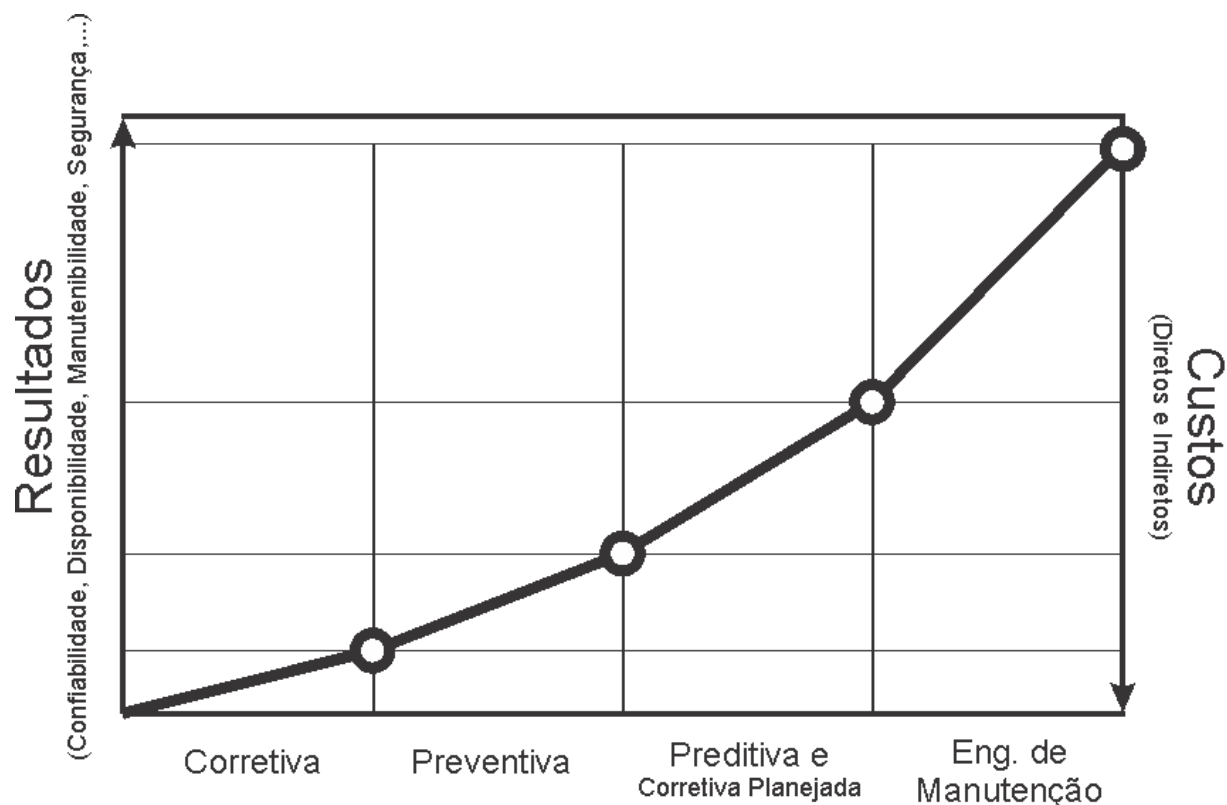


Figura 5 - Relação entre os "Resultados da Manutenção", Tipos e estratégias de manutenção e Custos. Fonte: (Kardec & Nascif, 2012)

Vale ressaltar que nenhum dos tipos de manutenção deve ser abandonado, o importante é encontrar a maneira e quantidade correta de aplicação para cada tipo.

### 3.5 Manutenção Estratégica

Durante décadas nas indústrias, a Manutenção atuava apenas com a manutenção corretiva, ocasionando diversos desperdícios, retrabalhos, perdas de tempo e mão-de-obra e gastos exagerados (Pereira, 2011).

Atualmente, uma mentalidade da manutenção precisa ser melhor implementada nas principais indústrias. "A existência da Manutenção para que não haja manutenção." A princípio a expressão parece um paradoxo, porém trata-se de uma visão em que se aplica o Departamento ou Setor de Manutenção precisa atuar de maneira que ocorra a execução de manutenção, no significado de manutenção corretiva não planejada (Kardec & Nascif, 2012).

O sucesso de uma manutenção não está mais em uma execução de correção de falha e sim em evitar as ocorrências de falhas. As falhas de maneira não planejada, precisa ser considerado o grande fracasso da atividade da manutenção. Este é uma

grande quebra de paradigma que precisa iniciar não somente internamente a manutenção, mas também em todas as áreas da indústria.

No passado, era comum a alta gestão da Manutenção sempre dizer que a quantidade de pessoal era insuficiente, no entanto, o problema era justamente o excesso de demanda de serviços por parte da manutenção, principalmente falando da execução. Na verdade, o que ocorria era uma inadequada aplicação da manutenção fazendo com que as falhas aparecessem (Kardec & Nascif, 2012).

Para atuar de maneira estratégica, a Manutenção precisa voltar os objetivos para os resultados da organização, onde não basta apenas reparar um equipamento o mais rápido possível, é preciso focar em manter o funcionamento do equipamento, deixando-o disponível para operações, reduzindo a probabilidade de uma parada não planejada (Kardec & Nascif, 2012). Em outras palavras, é preciso buscar a maior Rentabilidade e Lucratividade da companhia, promovendo Disponibilidade através da Confiabilidade (Engfaz, 2014).

Até mesmo a estereotipagem da caracterização de um profissional de manutenção está sofrendo alterações. No passado, o profissional da manutenção era estereotipado com um porte físico forte e com marcas de trabalhos executados. Atualmente, o profissional da manutenção cada vez mais está passando para uma imagem de uma pessoa analítica e estratégica. Dentre estes profissionais, além encontram-se os pertencentes da Engenharia de Manutenção, explicado anteriormente e também do Planejamento e Controle da Manutenção.

### 3.5.1 Planejamento e Controle da Manutenção

Assim como a Engenharia de Manutenção, o Planejamento e Controle da Manutenção também atua de maneira estratégica dentro de um departamento de Manutenção Industrial. O Planejamento e Controle da Manutenção é o principal responsável pelo gerenciamento dos acontecimentos na Manutenção, nos quais servirão como elementos de apoio para as tomadas de decisões. Dentro dos principais objetivos e responsabilidade do Planejamento e Controle da Manutenção encontram-se (Engfaz, 2014):

- Busca por uma uniformização das metodologias de trabalho e itens de uma fábrica;

- Estabelecer ou reavaliar os procedimentos, métodos e periodicidades de manutenção;
- Planejar, programar e controlar as decisões e execuções da Manutenção;
- Acompanhamento de desempenhos de equipamentos e serviços realizados;
- Otimização dos custos na manutenção;
- Fornece o suporte para atuações estratégicas de acordo com informações retidas

Em apoio ao Planejamento e Controle de Manutenção é necessário um Sistema de Controle de Manutenção no qual facilite o armazenamento, controle e atualizações de dados. Até meados da década de 70, os controles na Manutenção eram realizados manualmente, entretanto até o início da década de 80 apenas grandes empresas possuíam o sistema em softwares (Kardec & Nascif, 2012). Atualmente, há uma variedade de softwares que permitem gerenciar e controlar os sistemas de manutenção e com os mais variados objetivos de atuações.

### 3.5.2 Classificação Criticidade de equipamentos

Inicialmente, é pressuposto que todos itens de uma unidade fabril possuam cadastro em um sistema de modo a ser possível identificá-los por um código ou TAG. Preferencialmente essa codificação deve possuir uma sequência lógica de modo a facilitar a localização e tipo de equipamento.

A classificação dos ativos é considerada primordial para as decisões estratégicas, para implementações ou não de sistemas preventivos, conhecimento técnico e importância do ativo para o sistema produtivo (Pereira, 2011).

Diversas são as maneiras de classificação dos equipamentos, a mais utilizada no setor industrial é a classificação em três níveis, como na Tabela 1 a seguir:

*Tabela 1 - Níveis de criticidades*

<b>Criticidade</b>	<b>Classificação</b>
<b>A</b>	Nível mais crítico
<b>B</b>	Intermediária criticidade
<b>C</b>	Nível menos crítico

Os equipamentos classificados como “A”, possuirão planos de técnicas preditivas mais sistemáticos, peças de reposições em estoques, maiores quantidades de informações técnicas de funcionamento e melhores práticas fornecidas pelo fabricante, dentre outros cuidados necessários para evitar de qualquer maneira a ocorrência de falhas catastróficas nestes tipos de equipamentos. Sucessivamente assim, será a sequência de ações estratégicas para as demais classificações “B” e “C”, onde equipamentos classificados como “B”, possuirão maior volume de ações e técnicas preventivas (Engefaz, 2014).

Porém vale ressaltar que equipamentos classificados com “C”, não sejam esquecidos nos planos de prevenções de falhas, pois apesar de causarem danos menores de maneira geral, normalmente são a maioria dos equipamentos de uma indústria, sendo assim, caso ocorra falhas em muitos equipamentos em um curto período de tempo, ocasionará em uma queda de desempenho da fábrica e também uma grande elevação dos gastos. Colocando assim, um dos objetivos da Manutenção em risco.

### 3.5.3 Lubrificação

Os lubrificantes têm como funcionalidade básica, a formação de uma película que impeça o contato direto entre duas superfícies que movem entre si, levando ao atrito mínimo e exigindo um menor esforço evitando desgastes prematuro dos componentes envolvidos. Ao passar dos anos, outras funcionalidades foram atribuídas aos lubrificantes, como: anticorrosivos, vedações, retiradas de produtos indesejáveis para o sistema e muitas outras. (Pereira, 2011).

Os lubrificantes são classificados quanto sua origem, podendo ser de quatro tipos:

- Óleos minerais: obtidos a partir da destilação do petróleo;
- Óleos graxos: origem vegetal ou animal;
- Óleos compostos: mistura de minerais e graxos e
- Óleos sintéticos: sintetizados em laboratórios de modo a obter aplicações específicas exigidas.

Dos tipos de lubrificantes citados acima, os óleos minerais e sintéticos são os mais comumente encontrados nas indústrias atualmente, com maior preço para os óleos sintéticos devido suas propriedades.

Ao estudar as características de um lubrificante, é necessário atentar-se para as seguintes características (Pereira, 2011):

- Odor;
- Cor ou aparência;
- Densidade;
- Viscosidade;
- Ponto de fulgor;
- Ponto de fluidez;
- Resistência à pressão;
- Resistência à ferrugem e
- Resistência à oxidação.

A viscosidade é a propriedade mais importante dos óleos lubrificantes para escolha de aplicações de um lubrificante em equipamentos. Em muitos casos são adicionados aditivos que alteram as características citadas acima para um melhor funcionamento para a exigência requerida.

A lubrificação industrial é caracterizada como uma atividade preventiva na manutenção, portanto necessita de um plano periódico de execução nos equipamentos.

#### 3.5.4 Análises de Falhas

A falha significa o término da capacidade de um item ou equipamento de se realizar sua função na qual foi projetada e especificada (NBR 5462 ABNT, 1994).

Tradicionalmente, um componente pode ser dividido em três fases de ocorrências de falhas, esquematizados pela denominada “Curva da Banheira” na Figura 6.



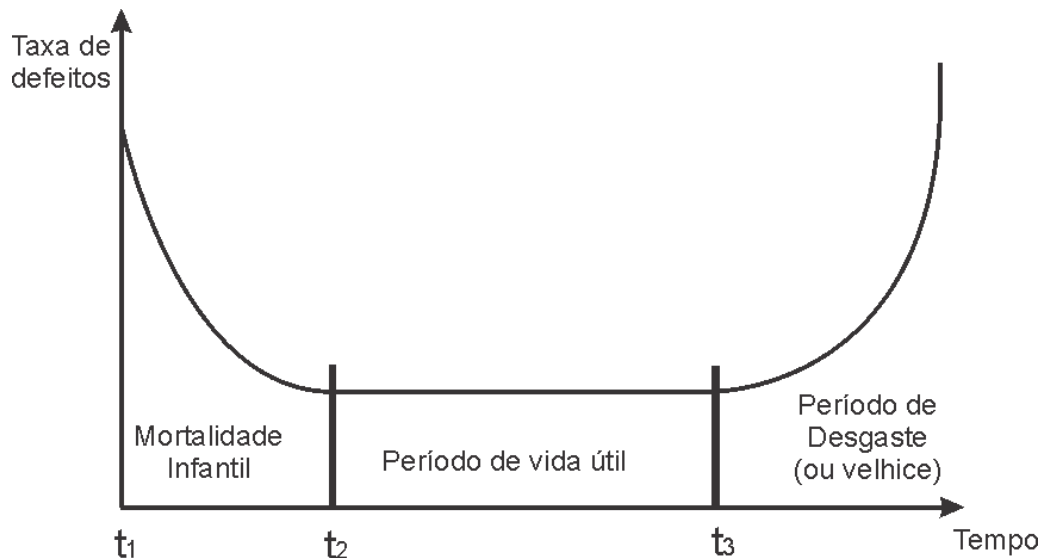


Figura 6 - Fases da vida de componentes, "Curva da Banheira". (Pereira, 2011)

- **Mortalidade infantil:** Período de falhas prematuras, geralmente causadas por erros de processos de manufatura, qualidade, instalação, mão de obra, etc.
- **Vida útil:** Falhas aleatórias, onde dificilmente são evitadas, geralmente causadas por sobrecargas, tensão, fenômenos de origens externas, falhas não detectadas por manutenções preventivas ou preditivas, etc.
- **Velhice:** Logo após o período de vida útil do equipamento. Caracterizado por envelhecimento natural do equipamento perante o uso, atritos, fadigas, corrosão, etc.

Segundo (Pereira, 2011), as falhas possuem duas linhas básicas de análise para identificação e redução de seus efeitos:

- Falha por quebra de componentes ou sistemas e
- Falha por erro humano.

Em estudos de análises de falhas, as principais ferramentas de confiabilidade utilizadas são as seguintes:

- Análise do Modo e Efeito de Falha (FMEA – Failure Mode and Effect Analysis)
- 5 porquês;
- Diagrama Ishikawa;
- Árvore de falhas

Das técnicas exemplificadas, apenas será explicada a árvore de falha, pois consiste em uma completa ferramenta utilizada pela Engenharia de Manutenção e será utilizada como exemplo nesta monografia posteriormente.

A árvore de falha, também conhecida como Análise da Causas-Raízes de Falha consiste por um método ordenado de se encontrar as causas dos problemas e determinar ações que evite reincidências posteriores (Kardec & Nascif, 2012).

Na elaboração da árvore, avalia-se cada componente em função da falha em que ele pode apresentar, analisa-se então a interação entre as diferentes falhas, visando uma relação entre os efeitos no sistema (Nepomuceno, 1989).

Uma técnica simples para elaboração de uma árvore de falhas é sempre questionar os possíveis “Porquês” da falha seguindo assim até não ter mais sentido (Kardec & Nascif, 2012).

### 3.5.5 Técnicas Preditivas

Como mencionado anteriormente, as manutenções do tipo preditivas têm por finalidade o acompanhamento do estado do equipamento de modo a prever e intervir antes que a falha aconteça.

Importante a consideração de uma coordenação rígida e organizada das inspeções realizadas periodicamente entre departamentos de Manutenção e Produção. Inicialmente a aplicação de técnicas preditivas em uma organização acarretam em altos custos de implementação devido aos elevados custos de aquisição dos equipamentos e alterações dos métodos convencionais, transparecendo não ser um recurso que acarrete em um rendimento para uma organização (Nepomuceno, 1989).

Em princípio, os custos na Manutenção logo após uma aplicação de técnicas preditivas aumentarão, tanto pelo custo de equipamentos e também pelo aumento de demanda nas manutenções corretivas (planejadas) de modo a colocar os ativos em situação estável.

Estudos e dados, comprovam a eficiência da aplicação de técnicas preditivas, a seguir, na Tabela 2, estimativas de benefícios de adoção de um programa de Manutenção Preditiva segundo (Operations & Maintenance - Best Practices, 2010):

*Tabela 2 - Benefícios de aplicação de Manutenção Preditiva (Operations & Maintenance - Best Practices, 2010).*

<b>Benefícios</b>	<b>Dados</b>
Retorno sobre o investimento	10 x
Redução dos custos de manutenção	20 – 25 %
Eliminação de falhas	70 – 75 %
Redução da Indisponibilidade	35 – 45 %
Aumento na produção	20 – 25%

A seguir, na Tabela 3 uma apresentação de possíveis técnicas adotadas por tipos de componentes comumente presente nas indústrias segundo (NASA, 2010).

*Tabela 3 - Tecnologias preditivas aplicadas em tipos de equipamentos.*

<b>Tecnologia</b>	<b>Aplicações</b>	<b>Bombas</b>	<b>Motores elétricos</b>	<b>Geradores Diesel</b>	<b>Condensadores</b>	<b>Equipamentos pesados</b>	<b>Disjuntores</b>	<b>Válvulas</b>	<b>Trocadores de Calor</b>	<b>Sistemas Elétricos</b>	<b>Transformadores</b>	<b>Tanques/Tubulações</b>
Monitoramento /Análise de Vibração	X	X	X		X							
Lubrificação, Análise de óleo	X	X	X		X						X	
Análise do desgaste de partícula	X	X	X		X							
Análise temperatura de rolamento	X	X	X		X							
Monitoramento de Desempenho	X	X	X	X					X		X	
Deteção ultrassônica de ruído	X	X	X	X				X	X		X	
Fluxo ultrassônico	X			X				X	X			
Termografia infravermelha	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Ensaio não destrutivo (Espessura)				X					X			X
Inspeção Visual	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Resistência de isolamento		X	X				X			X	X	
Análise de corrente de motor		X										
Análise de circuitos de motores		X					X			X		
Índice de polarização		X	X							X		
Monitoramento elétrico										X	X	

#### 3.5.5.1 Análise de Vibração

Há várias décadas utiliza-se a aplicação da análise de vibração como diagnóstico de defeitos em sistemas rotativos. Dentre os principais defeitos, os mais comumente utilizados são:

- Desbalanceamentos;
- Desalinhamentos;
- Empenamento;
- Defeitos em engrenagens;
- Detecção de rolamentos danificados.

Os parâmetros de vibração relacionado a máquinas rotativas são basicamente deslocamento, velocidade e aceleração. Estes três parâmetros indicam uma quantificação da análise de vibração. A frequência de vibração permitirá diagnosticar a origem da vibração (Kardec & Nascif, 2012).

O detalhamento das espectrometrias obtidas em relação à falha não será abordado neste trabalho por não ser o objetivo, apenas será exemplificado um caso de utilização preditiva, de modo ao conhecimento de que a técnica permite diagnosticar o estado do equipamento anterior a uma falha.

#### 3.5.5.2 Termografia

A temperatura é um dos principais índices e de mais fáceis compreensão no acompanhamento de alterações em equipamentos (Kardec & Nascif, 2012).

A termografia consiste na medição da distribuição de temperatura em uma superfície do equipamento em análise. A medição é realizada através da detecção de radiações térmicas ou infravermelhas emitida por qualquer corpo, na qual são captadas por câmeras termográficas permitindo assim a visualização da distribuição do calor no corpo analisado (Pereira, 2011).

As câmeras termográficas fornecem imagens denominadas de termogramas, onde a distribuição de temperatura na superfície do corpo, permite o reconhecimento de algumas anomalias nos equipamentos.

A seguir alguns exemplos clássicos segundo (Kardec & Nascif, 2012) de alterações nos equipamentos que podem ser diagnosticadas por uma termografia

- Problemas em rolamentos, acoplamentos e lubrificação;
- Danos de isolamentos de carcaças, refratários, etc;
- Mau contato em componentes elétricos.

### 3.5.5.3 Análise de óleo lubrificante

A análise de óleo é considerada em muitas literaturas como um tipo de manutenção preditiva, pois tem como finalidade o acompanhamento do estado do lubrificante, identificando contaminantes, resíduos metálicos e características físico-químicas.

Na Tabela 4 a seguir, uma listagem dos ensaios físico-químicos existentes e normatizados pela ASTM e ABNT

*Tabela 4 - Tipos de análises físico-químicas de óleos lubrificantes (Kardec & Nascif, 2012).*

<b>Norma</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Finalidade</b>
ASTM D 1500	Cor	Padronização de produção e estado de oxidação do óleo.
ASTM D 445 (Saybolt Universal)	Viscosidade	Definir a resistência ao escoamento (propriedade mais importante).
ASTM D 2270	Índice de Viscosidade	Variação da viscosidade com a temperatura.
ASTM D 92 (Open cup)	Ponto de Fulgor	Determinação da menor temperatura na qual desprende vapores.
ASTM D 644	Índice de Acidez (TAN)	Grau de acidez.
ASTM D4793	Índice de Basicidade (TBN)	Grau alcalino.
ASTM D 2711	Demulsibilidade	Característica do óleo de separar-se da água rapidamente.
ASTM D 1401	Emulsibilidade	Característica de se misturar com a água.
ASTM D 482	Cinzas	Compostos não combustíveis presentes no óleo

ASTM D 892	Espuma	Estabilidade de espumas sob condições de aeração
ASTM D 189	Resíduo de Carbono (Conrad Residue Carbon Test)	Resíduo resultado da evaporação lenta sem presença de ar.
ASTM D 130	Corrosão em Lâmina de Cobre	Indicar o grau de corrosividade.
ASTM D 6304 ASTM D 1744 ASTM D 95	Teor de Água	Quantidade de água presente no óleo.
NBR – 6869	Rigidez Dielétrica	Medição da capacidade do óleo suportar tensões elétricas (Específico para óleos de Transformadores).
ASTM D 893	Insolúveis em Pentano/Tolueno	Determinação do nível e composição de contaminantes insolúveis no óleo

A aplicação do tipo de ensaio é determinada pelos tipos de aplicação do lubrificante e também por determinadas suspeitas levantadas.

Segundo dados de um laboratório de Análise de lubrificantes (Shell LubeAnalyst), a proporção para o setor industrial dentre as falhas encontradas em análise de óleos lubrificantes estão esquematizadas na Figura 7 a seguir:

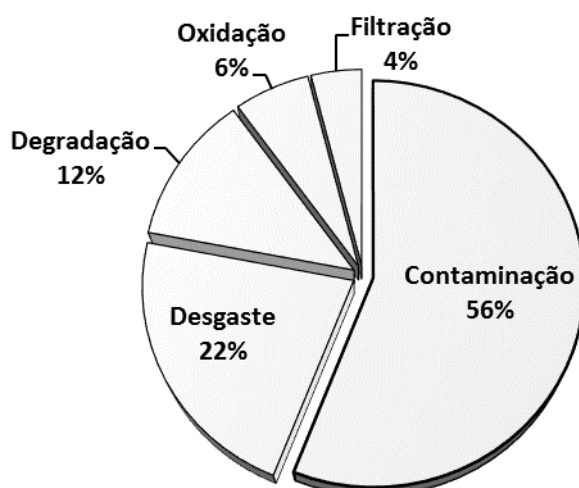


Figura 7 - Distribuição de falhas diagnosticadas por análise de óleo lubrificante (LubeAnalyst).

#### 3.5.5.4 Líquido penetrantes

A técnica de inspeção por líquido penetrante é um processo utilizado para detecção de trincas e porosidades superficiais. Basicamente o processo consiste dos seguintes passos (Kardec & Nascif, 2012):

- Aplicação de um líquido denominado penetrante com cor fluorescente com alta atração capilar, permitindo a entrada em poros e trincas;
- Aplicação de líquido removedor do excesso do líquido penetrante, porém não remove o líquido presente no interior de trincas e poros
- Por último, um líquido revelador que absorve o líquido penetrante permitindo assim a visualização da localização, tamanho e até gravidade da trinca ou poro.

#### 3.5.6 Inspeções Sensitivas

As inspeções sensitivas, como o próprio nome auxilia, trata-se da inspeção realizada através dos sistemas sensórias do corpo humano: tato, audição, olfato e visão.

Esta inspeção é muito dependente da experiência de identificação do profissional inspetor, porém alguns equipamentos básicos servem como auxílios:

- Caneta de vibração: Permite obter o valor de vibração global do equipamento e a aceleração.
- Estroboscópio: Equipamento com frequência de emissão de luz ajustável de modo a identificar as frequências de rotações estão em mesmas frequências.
- Termômetro digital: Permite a obtenção da temperatura em um ponto de análise.

#### 4. Métodos e Técnicas

As metodologias e técnicas utilizadas foram aplicadas de acordo com uma indústria de grande porte e numerosa quantidade de equipamentos rotativos no setor alimentício de processamento de frutas cítricas. Porém, vale ressaltar que as metodologias podem ser aplicadas em outros setores industriais desde que adaptadas para suas devidas especificidades de equipamentos e processos.

##### 4.1 Algoritmo de Classificação de Criticidade de equipamentos

Nas décadas passadas, as companhias classificavam apenas alguns equipamentos que consideravam mais importantes e levavam em consideração apenas aspectos relacionados ao setor produtivo. Atualmente há diversas maneiras de classificação de criticidade de equipamento adotados pelas indústrias. Porém de maneira geral, por mais diferentes que sejam os setores de atuação, as empresas precisam levar em consideração os seguintes parâmetros para uma completa classificação da criticidade do equipamento:

- Segurança, Saúde e Meio ambiente;
- Qualidade;
- Produção;
- Regime de Trabalho;
- Custo;
- Frequência de Falhas e
- Manutenibilidade.

Dentro de cada parâmetro, é realizado um nivelamento em três aspectos, com as seguintes simbologias da Tabela 5:

*Tabela 5 - Níveis e simbologias de parâmetro do algoritmo de Classificação de Criticidade.*

Nível	Simbologia
Alto	●
Médio	○
Baixo	▲



De maneira geral, cada aspecto possuirá seu nivelamento dos parâmetros com as seguintes características, de acordo com técnica aplicada na indústria base deste trabalho explicadas na Tabela 6.

*Tabela 6 - Parâmetros de avaliação e exemplificação do nivelamento.*

<b>Fator de Avaliação</b>	<b>Gradação dos Fatores</b>		
	<b>• (Grau Alto)</b>	<b>O (Grau Médio)</b>	<b>Δ (Grau Baixo)</b>
<b>Segurança, Saúde e Meio Ambiente</b> <b><u>SSMA</u></b>	Pessoas e ou Meio ambiente são gravemente atingidos.	Pessoas e ou Meio Ambiente poderão estar expostos a riscos de acidentes e contaminação.	Não há risco para Pessoas e ou Meio Ambiente.
<b>Qualidade</b> <b><u>Q</u></b>	A qualidade do Produto Final é diretamente afetada.	A qualidade do Produto Final pode ser afetada.	Não há efeito sobre a qualidade do Produto Final.
<b>Produção</b> <b><u>P</u></b>	Ocorre Perda de Produção.	Perda de Produção pode ocorrer se permanecer a falha.	Não Ocorre Perda de Produção.
<b>Regime de Trabalho</b> <b><u>RT</u></b>	O equipamento trabalha em regime de 24 horas.	O equipamento trabalha em regime de 8 ou 16 horas.	O equipamento somente trabalha ocasionalmente.
<b>Custos</b> <b><u>C</u></b>	Altos custos de produção e/ou o custo de reparo .	Médio custo de produção e/ou o custo de reparo.	Baixos custos de produção e/ou custo de reparo.
<b>Frequência</b> <b><u>F</u></b>	Frequência de falha inferior a 30 dias.	Frequência de falha entre 30 e 90 dias.	Frequência de falha superior a 90 dias.
<b>Manutenibilidade</b> <b><u>M</u></b>	Tempo de Manutenção > 4 horas com ou sem Equipamento Reserva	Tempo de Manutenção entre 1 e 4 horas com ou sem Equipamento Reserva.	Tempo de Manutenção < 1 hora com ou sem Equipamento Reserva

Para cada parâmetro, segue uma sequência de tabelas com as principais consequências, potenciais e ocorrências.

- Segurança, Saúde e Meio Ambiente

Tabela 7 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Segurança, Saúde e Meio Ambiente.

Nível	Consequência	Potencial	Ocorrências Possíveis
<b>Alto</b> •	Pessoas e ou Meio ambiente são gravemente atingidos.	Alto potencial de acidentes pessoais graves	<u>Seguranças:</u> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ocorre Explosão.</li> <li>2. Ocorre Incêndio.</li> <li>3. Ocorre a quebra com emissão de partículas.</li> <li>4. Ocorre o rompimento com emissão de partícula.</li> <li>5. Vazamento (gases: Tóxico; Aquecido; Criogênico).</li> <li>6. Vazamento (Líquido: Tóxico, Aquecido, Criogênico).</li> <li>7. Local de Instalação localizado em Espaço Confinado.</li> </ol>
		Agressões ao meio-ambiente não são controláveis	
<b>Médio</b> ○	Pessoas e ou Meio Ambiente poderão estar expostos a riscos de acidentes e contaminação.	Baixo potencial de acidentes pessoais graves ou alto potencial de acidentes pessoais leves	
		Agressões ao meio-ambiente são controláveis	
<b>Baixo</b> ▲	Não há risco para Pessoas e ou Meio Ambiente.	Baixo potencial de acidentes pessoais leves ou somente incidentes	
		Baixo potencial de agressões ambientais ou não existe possibilidade	<u>Meio Ambiente:</u> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bacia de Contenção para líquido não é suficiente.</li> <li>2. Produto atinge manancial de água.</li> <li>3. Agressão exerce influência sobre área vizinha.</li> <li>4. Agressão possui grau de ruído não controlado por atenuadores.</li> </ol>

- Qualidade

Tabela 8 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Qualidade.

Nível	Consequência	Potencial	Ocorrências Possíveis
<b>Alto</b> •	A qualidade do Produto Final é diretamente afetada.	Alto potencial para gerar produto com defeito.	1. Gera rejeitos não reaproveitáveis podendo causar danos ao meio ambiente ou a estocagem. 2. Gera produto de 2º qualidade com interferência na margem de lucro. 3. Gera produto para reprocesso com ou não interferência no regime do processo causando instabilidade. 4. Pode gerar devoluções do produto. 5. Pode gerar multa contratual.
		Sistema perde totalmente o controle da qualidade do produto.	
<b>Médio</b> ○	A qualidade do produto final pode ser afetada.	Pode gerar produto com defeito se a anomalia continuar.	
		Sistema opera com Variação controlada da qualidade do produto.	
<b>Baixo</b> ▲	Não há efeito sobre a qualidade do produto.	Não gera produto com defeito mesmo que a anomalia permaneça por tempo indeterminado.	
		Sistema opera com controle total da qualidade do produto.	

- Produção

Tabela 9 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Produção.

Nível	Consequência	Potencial	Ocorrências Possíveis
<b>Alto</b> •	Ocorre Perda de Produção	Ocorre a Perda de Produção com parada geral por falha no equipamento.	<b><u>Processo:</u></b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. O equipamento em falha para de imediato de todo o processo.</li> <li>2. O equipamento em falha irá interferir diretamente no processo em uma área causando redução no processo.</li> <li>3. O equipamento em falha não indisponibilidade o processo.</li> </ol> <b><u>Manutenção:</u></b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Necessidade de executar a manutenção no local.</li> <li>2. Existe o equipamento reserva.</li> </ol>
		Não possui outra rota de produção, não possui stand-by ou outra alternativa com mesma capacidade nominal do processo.	
<b>Médio</b> ○	Perda de Produção pode ocorrer se permanecer a falha.	Ocorre Redução de Produção com perda com a permanência da falha no equipamento.	
		Possui outra rota de produção, porém com capacidade menor que a nominal do processo.	
<b>Baixo</b> ▲	Não Ocorre Perda de Produção	Não ocorre Perda de Produção por falha no equipamento.	
		Possui outra rota de produção com capacidade para manter o nível do TQ de Estocagem.	
		Existe equipamento reserva ou é mais viável reparar após a falha.	

- Regime de Trabalho

Tabela 10 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Regime de Trabalho.

Nível	Consequência	Potencial	Ocorrências Possíveis
<b>Alto</b> •	O equipamento trabalha em regime de 24 horas	Alto risco de falha por fadiga devido à vida útil.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. O processo possui equipamento stand-by, mas não é realizado o revezamento operacional.</li> <li>2. O processo possui oscilação constante que exige picos de carga.</li> <li>3. Condições operacionais adversas como: Elevada carga de pó ou resíduo sobre o equipamento, alta temperatura, alta humidade e alta vibração externa.</li> </ol>
		Alto risco de quebra por variação no processo.	
<b>Médio</b> ○	O equipamento trabalha em regime de 8 a 16 horas	Risco moderado de falha por fadiga devido à vida útil.	
		Risco moderado quebra por variação no processo	
<b>Baixo</b> ▲	O equipamento somente trabalha ocasionalmente	Risco muito baixo de quebra por fadiga devido à vida útil.	

- Custos

Tabela 11 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Custos.

Nível	Consequência	Potencial	Ocorrências Possíveis
<b>Alto</b> •	Altos custos de produção e/ou o custo de reparo	Alto custo de Produção e/ou custo de Manutenção.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Gastos adicionais com produtos químicos.</li> <li>2. Gastos adicionais com Mão de Obra.</li> <li>3. Interfere com custos de outras áreas.</li> <li>4. Gastos adicionais com utilidades.</li> <li>5. Gastos com Meio Ambiente (Descartes).</li> <li>6. Gastos adicionais com transporte.</li> </ol>
<b>Médio</b> ○	Médio custo de produção e/ou o custo de reparo.	Médio custo de Produção e/ou custo de Manutenção.	
<b>Baixo</b> ▲	Baixos custos de produção e/ou custo de reparo.	Baixo custo de Produção e/ou custo de Manutenção.	

- Frequência de Falhas

*Tabela 12 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Frequência de Falhas.*

Nível	Consequência	Potencial	Ocorrências Possíveis
<b>Alto</b> •	Frequência de falha inferior a 30 dias.	Falha constante no equipamento provocado por desvios de processo.	1. Equipamento subdimensionado . 2. Sobrecarga constante pelo processo. 3. Condições ambientes de Temperatura, umidade e Vibração. 4. Posição incorreta de trabalho. 5. Trabalhando acima do limite de projeto. 6. Peças de reposição não adequada as especificações do fabricante.
		Falha constante pela concepção de projeto do equipamento	
<b>Médio</b> ○	Frequência de falha entre 30 a 90 dias.	Falha no equipamento provocado por desvio de processo	
		Falha no equipamento pela concepção de projeto.	
<b>Baixo</b> ▲	Frequência de falha superior a 90 dias.	Falha no equipamento por vida útil.	
		Desvios de processo não causa falha no equipamento.	

- Manutenibilidade

Tabela 13 - Nivelamento em relação a consequências, potenciais e possíveis ocorrências para Manutenibilidade.

Nível	Consequência	Potencial	Ocorrências Possíveis
<b>Alto</b> •	Tempo de Manutenção > 4 horas com ou sem Equipamento Reserva	MTTR afetado pela acessibilidade.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Necessita atendimento por especialista externo.</li> <li>2. Necessita de recurso especial para elevação e transporte.</li> <li>3. Necessita de peças especiais.</li> <li>4. Necessita de ferramentas especiais para montagem e desmontagem.</li> <li>5. Necessita montagem de andaime.</li> </ol>
		MTTR afetado pela necessidade de especialista (fornecedor).	
		MTTR afetado por peças de reposição (especiais).	
<b>Médio</b> ○	Tempo de Manutenção entre 1 e 4 horas com ou sem Equipamento Reserva.	MTTR afetado pela acessibilidade.	
		MTTR afetado pela necessidade de especialista (fornecedor).	
<b>Baixo</b> ▲	Tempo de Manutenção < 1 hora com ou sem Equipamento Reserva	MTTR afetado pela acessibilidade.	

Como mostrado anteriormente, o trabalho de classificação de criticidade de equipamentos necessita de conhecimento de diversos setores da organização. Portanto, em reuniões de classificações das criticidades é necessário a presença de profissionais com conhecimentos dos parâmetros citados acima. Como presenças básicas:

- Profissional da execução de manutenção,
- Operador de produção da área em análise e
- Profissional da área de Segurança ou Meio Ambiente.

A seguir, o algoritmo que segue a sequência de classificação para a criticidade de um equipamento, referenciado pela técnica utilizada na indústria base deste trabalho.

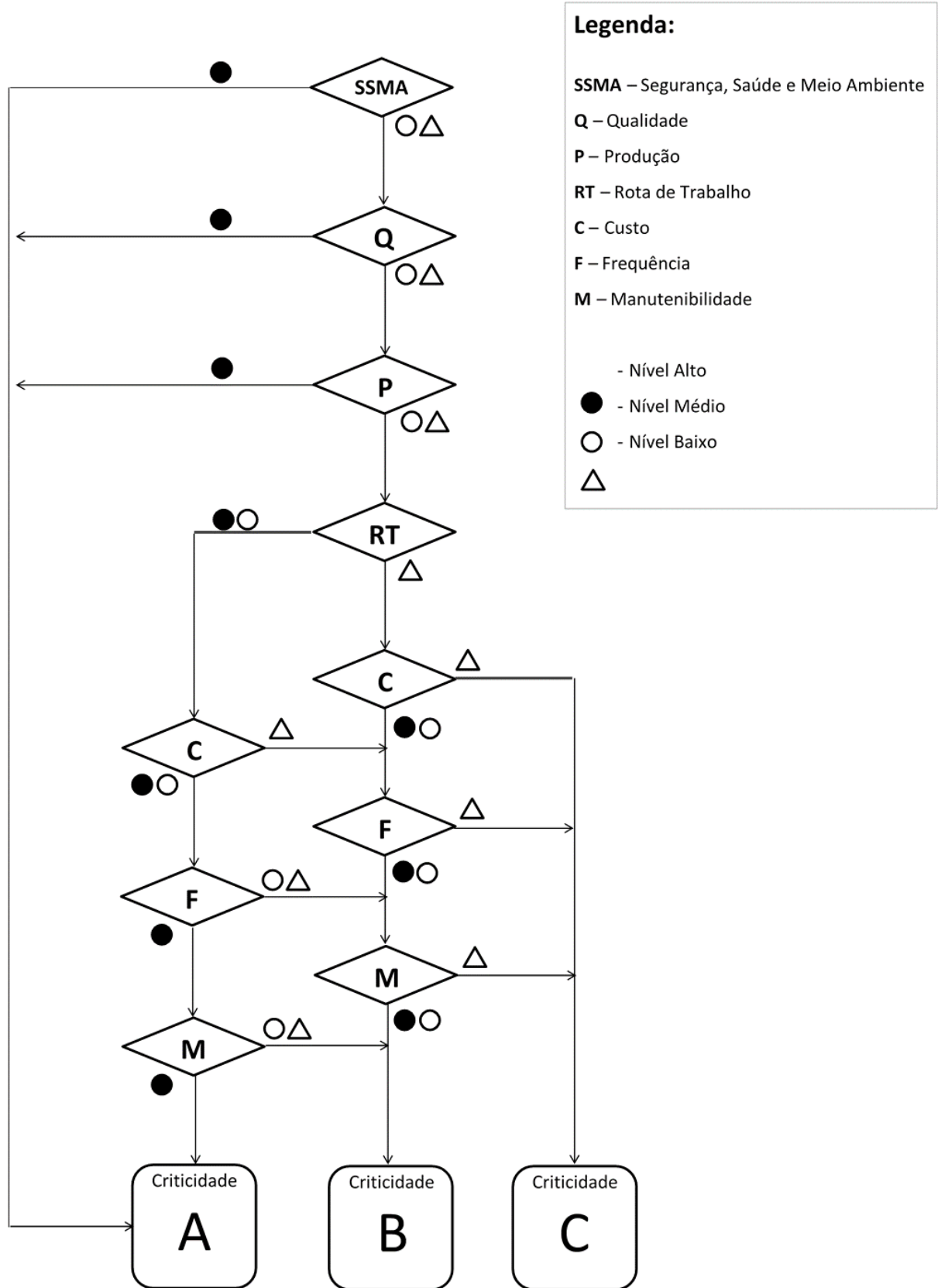


Figura 8 - Algoritmo de Classificação de Criticidade de equipamentos.



De modo a agilizar as classificações e reuniões para as classificações, foi elaborada uma matriz em software Excel, onde é possível inserir as denominações, juntamente com o TAG do equipamento e apenas as sinalizações nas células dos níveis dos parâmetros fornecem por meio de formulações a Criticidade classificada do equipamento. Segue um exemplo de aplicação na Figura 9.

=SE(E(OU(AN19<>"FALSO";AO19<>"FALSO";AP19<>"FALSO";AQ19<>"FALSO";AR19<>"FALSO";AS19<>"FALSO");SOMA(N19;R19;V19;Z19;AD19;AH19;AL19)>=1);J19;"")													
Discriminação								SSMA-Segurança			Q-Qu		
Item	Tipo de Objeto	Área/Subárea	LI - Local de Instalação	Descrição do local de instalação (LI)			Criticidade	●	○	Δ	●	○	Δ
1			TAG: XXX-XXXX				A	x					
2			TAG: XXX-XXXV				B				x		
3			TAG: XXX-XXXZ				C				x		
4							-						
5							-						
6							-						
7							-						
8							-						
9							-						

Figura 9 - Matriz de Classificação de Criticidade em software Excel.

#### 4.2 Análise de Lubrificante

O acompanhamento do estado de óleos lubrificantes de maneira geral é realizado por profissionais lubrificadores e inspetores sensíveis, porém é possível apenas acompanhar características sensoriais humanas como: cor, aspecto viscoso, partículas contaminantes visíveis.

Para uma análise mais aprofundada do estado do lubrificante, alguns equipamentos possuem uma periodicidade de análise físico-químicas realizadas em laboratórios específicos. Dentre os equipamentos que possuem esta sistemática de análise são:

- Lubrificantes de equipamentos com Classificados com Criticidade "A";
- Lubrificantes de equipamento de grande porte e
- Lubrificantes de equipamentos com altos custos.

A determinação da periodicidade de análise de óleos é determinada de acordo com o histórico de resultados obtidos nas análises anteriores, onde caso o resultado das análises apontadas por um determinado período não apontar nenhuma alteração nas características básicas, diminui-se a frequência de análises ou caso ocorra resultados aponte alterações, aumenta-se a frequência de análise para melhor acompanhamento.

Os ensaios realizados no laboratório Shell LuberAnalyst são retirados as seguintes informações:

- Físico-químico
  - Aparência: Nesta análise, o laboratório fornece informações quanto a presença de sólidos em deposição na amostra.
  - Viscosidade: A viscosidade é analisada sobre condições padrões de 40 °C e fornecida pelo laboratório em unidade centisokes (cts). Onde é feito um comparativo entre a viscosidade nominal do lubrificante com a viscosidade encontrada na análise.
  - Análise de metais

A seguir na Tabela 14, uma indicativa dos metais encontrados em lubrificantes indicando a origem

*Tabela 14 - Componentes em ensaio de óleo lubrificante de análise de metais*

<b>Desgaste</b>	<b>Contaminantes</b>	<b>Aditivos</b>
Fe	Si	Mg
Cr	Na	B
Ni	B	Ca
Al	V	Zn
Cu	K	P
Pb		Ba
Mo		Si
Sn		Li
Ag		

Para cada tipo de lubrificante há níveis em partes por milhão (ppm) aceitáveis, sendo o analisador responsável em dar o diagnóstico do resultado.

- FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy ou Scan Full Spectrum)  
Teste onde a absorção de luz infravermelha é usada para avaliar os níveis de fuligem, sulfatos, oxidação, nitro-oxidação, glicol de combustível e contaminantes da água.

Para coleta de amostragem a ser enviada para laboratório de análise de lubrificantes é preciso seguir os seguintes passos:

- Coleta um volume aproximado de 80 ml;
- Boa representatividade: Amostras precisam ser retiradas em mesmas condições que a análise anterior. Por exemplo, caso a amostra seja retirada 30 min após a parada do equipamento, é preciso fazer a coleta da amostra em mesmas condições em uma próxima coleta.
- Qualidade da amostra: Retirada deve ser realizada de modo que evite contaminações no momento de retirada e posteriormente deve-se vedar o recipiente de coleta de modo que não contamine a amostra com componentes externos.

#### 4.3 Análise de Vibração

A análise de vibração pode ser aplicada através de sensores em equipamentos de altos valores e com altíssimas criticidades, possuindo modos de alarmar automaticamente caso atinja níveis que possam causar problemas. Já as análises de inspeção de vibração realizada manualmente por um profissional da preditiva deve ser realizada periodicamente em equipamentos também críticos, porém nos quais não são possíveis a implementação de um sistema automático de análise e também em equipamentos que encontram em algum estado anormal diagnosticado pela inspeção sensível ou inspeções termográficas.

As análises de vibração contam com inspetores de vibração que realizam a coleta na área industrial utilizando um equipamento da marca OneProd ACOEN modelo Falcon (Figura 10) e um profissional analisador de vibração auxiliado pelo software de análise dos espectros da marca do equipamento.



*Figura 10 - Equipamento coletor de vibração (OneProd ACOEM, 2015).*

#### 4.4 Termografia Mecânica

Há dois modos básicos de análise termográficas, a termografia mecânica e elétrica. Diferenciando nos objetivos de análise, onde a mecânica é realizada em equipamentos dinâmicos, rotativos ou não, tanques, tubulações, etc. Buscando encontrar problemas de desgastes, atritos, lubrificação, etc. Na termografia elétrica os objetivos estão relacionados as instalações elétricas em busca de problemas como maus contatos, curtos, etc.

Foi realizado apenas testes de termografia mecânicas, com auxílio dos seguintes recursos:

- Câmera portátil termográfica FLIR, modelo E50 (Figura 11),
- Software específico da marca FLIR, para auxílio nas análises das imagens



*Figura 11 - Câmera termográfica FLIR E50 (FLIR Instruments, 2015).*

Foi realizado uma inspeção termográfica mecânica geral percorrendo toda a fábrica de modo a encontrar avarias relacionadas a temperaturas de equipamentos.

A seguir uma Tabela 15, um guia, para análise das termografias em rolamentos obtidas relacionando a gravidade (ordem crescente) para tratar o problema, o tipo de lubrificação e o tipo de rolamento do equipamento.

*Tabela 15 -Estado de rolamento através de análise de temperaturas por tipos de lubrificantes e rolamentos (Vibration, 1988).*

Estado	Tipos de Lubrificação / Tipo de rolamentos					
	Graxa		Banho de óleo		Circuito de óleo	
	Esferas	Rolos	Esferas	Rolos	Esferas	Rolos
Bom estado	25 – 70 °C	30 – 75 °C	20 - 65 °C	25 - 70 °C	20 - 60 °C	20 - 65 °C
Atenção	70 - 95 °C	75 - 100° C	65 - 90 °C	70 - 95 °C	60 - 75 °C	65 - 85 °C
Não permissível	>95 °C	>100 °C	>90 °C	>95 °C	>75 °C	>85 °C

#### 4.5 Inspeção Líquido penetrante

A inspeção por líquido penetrando, como explicado no item 3.5.5.4, consta com a aplicação dos seguintes materiais:

- Líquido penetrante;
- Líquido removedor e
- Líquido revelador

Para a análise são realizadas a inspeção de trincas e poros em equipamentos centrífugas nos períodos de grandes paradas da fábrica (no caso, anualmente) de modo a detectar problemas superficiais que inviabilizam o funcionamento do equipamento por se tratar de um equipamento de alto risco caso haja ocorrência de alguma falha.

#### 4.6 Análise de falha

Para análise de falha foram seguidos os seguintes passos:

1. Definição do problema;
2. Iniciar a análise de falha;
3. Identificar as possíveis causas;

4. Verificar a real causa;
5. Propor soluções para o problema;
6. Implantar a solução;
7. Acompanhar os resultados.

Foi realizada uma análise de falha em bombas que trabalham alimentando 3 evaporadores. Onde duas bombas alimentam cada evaporador, perfazendo um total de 6 bombas.

A ferramenta utilizada para análise foi Árvore de falhas, onde as identificações das denominadas causas raízes propõe o surgimento de planos de ações que acabem com as ocorrências de falhas. Nas reuniões envolveram-se profissionais da operação e manutenção de modo a adquirir maiores conhecimentos e dados do atual funcionamento do equipamento.

## 5 Resultados e Discussões

Assim como mencionado anteriormente, os resultados apresentados são referentes a exemplos aplicados em uma indústria de grande porte que conta com numerosa quantidade de equipamentos rotativos do setor alimentício de processamento de frutas cítricas. Ressaltando que as metodologias podem ser aplicadas em outros setores industriais desde que adaptadas para suas devidas especificidades de equipamentos e processos.

### 5.1 Classificação de criticidade de equipamentos

Para exemplificação de classificação de criticidade de equipamentos, foram classificados equipamentos de toda área de produção de Polpa Cítrica Peletizada (Ração cítrica) em uma fábrica processadora de laranja. A área de produção de Polpa Cítrica Peletizada possui um total de 719 equipamentos e é dividida em quatro subáreas:

- Prensagem;
- Peletização;
- Secagem e
- Silo Pelets

*Tabela 16 - Quantidade de equipamentos das subáreas da Polpa Cítrica Peletizada.*

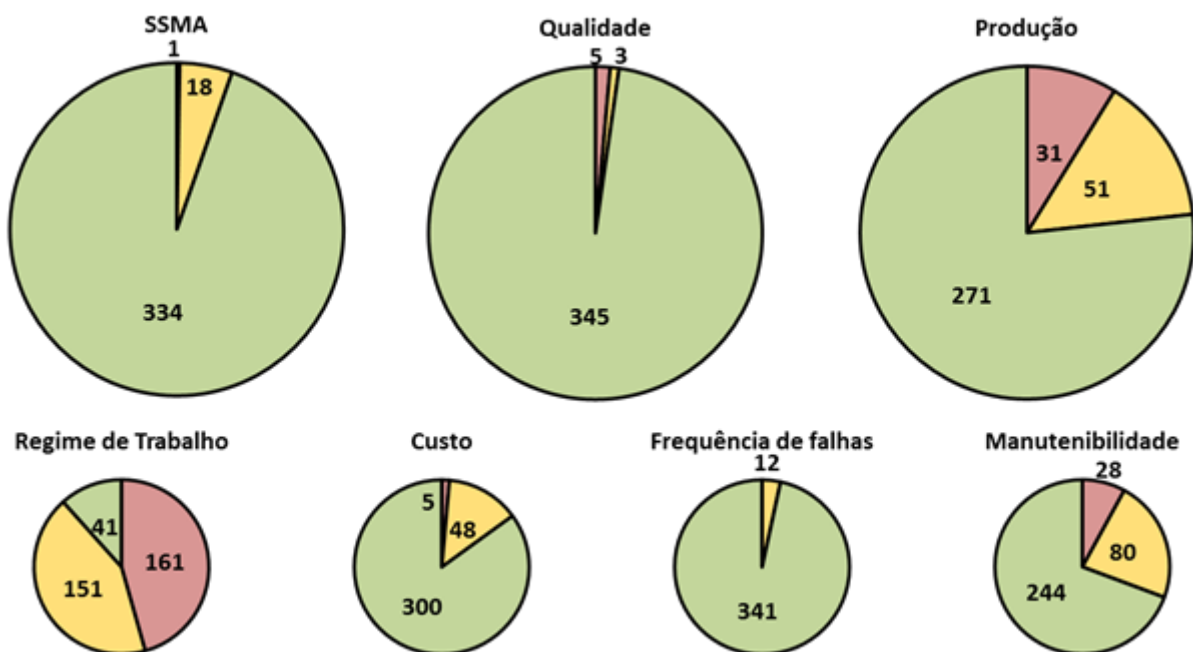
Subárea	Quantidade de equipamentos	Tipos de equipamento
Prensagem	353	Agitadores, Bombas, Prensas hidráulicas, Compressores, Válvulas, Motores, Moinhos, Peneiras, Roscas, Tanques, ...

Peletização	80	Motores, Bombas, Ciclones, Espalhadores, Válvulas, Peletizadoras, Resfriadores, Ventiladores, Roscas, ...
Secagem	225	Motores, Aquecedores, Compressores, Exaustores, Válvulas, Secadores, Geradores de gás quente, Ventiladores, Resfriadores,
Silo Pelets	61	Motores, Elevadores, Bombas, Válvulas, ...

A seguir na Figura 12 e Figura 13, uma representação da distribuição proporcional da quantidade dos parâmetros de classificação em cada subárea classificada na área de Polpa cítrica peletizada.



## Prensagem:



## Peletização:

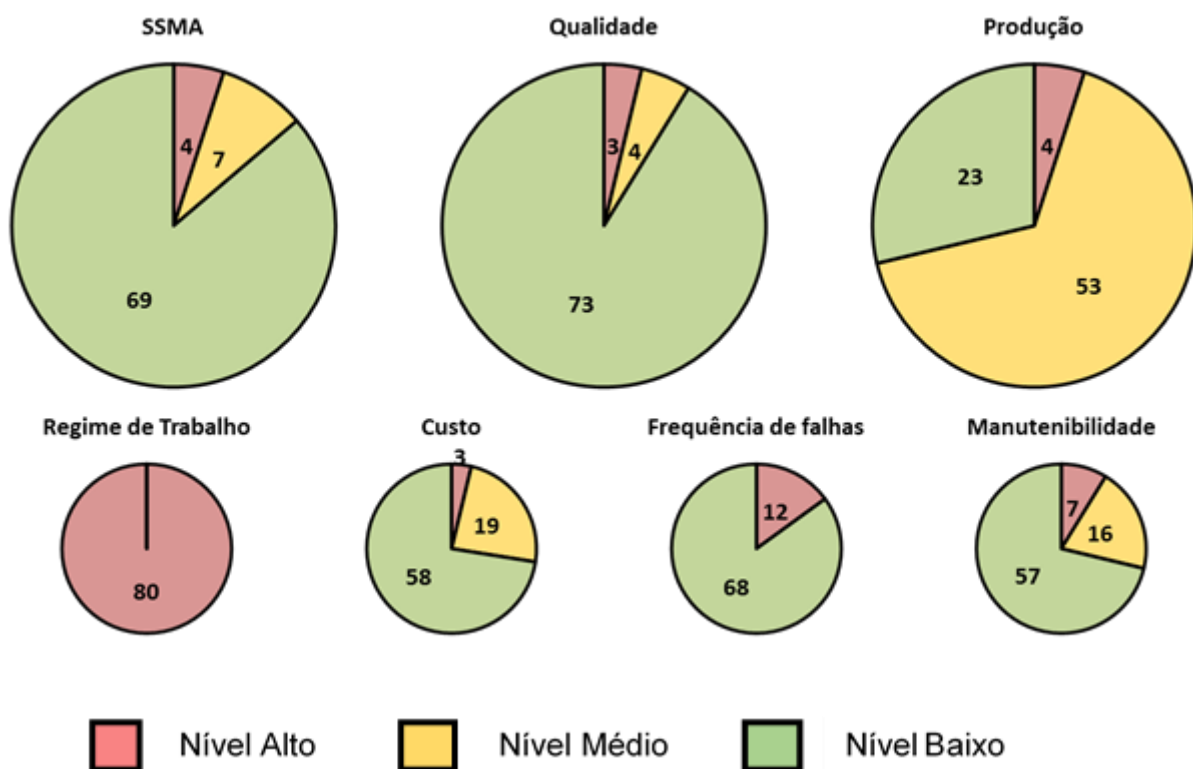
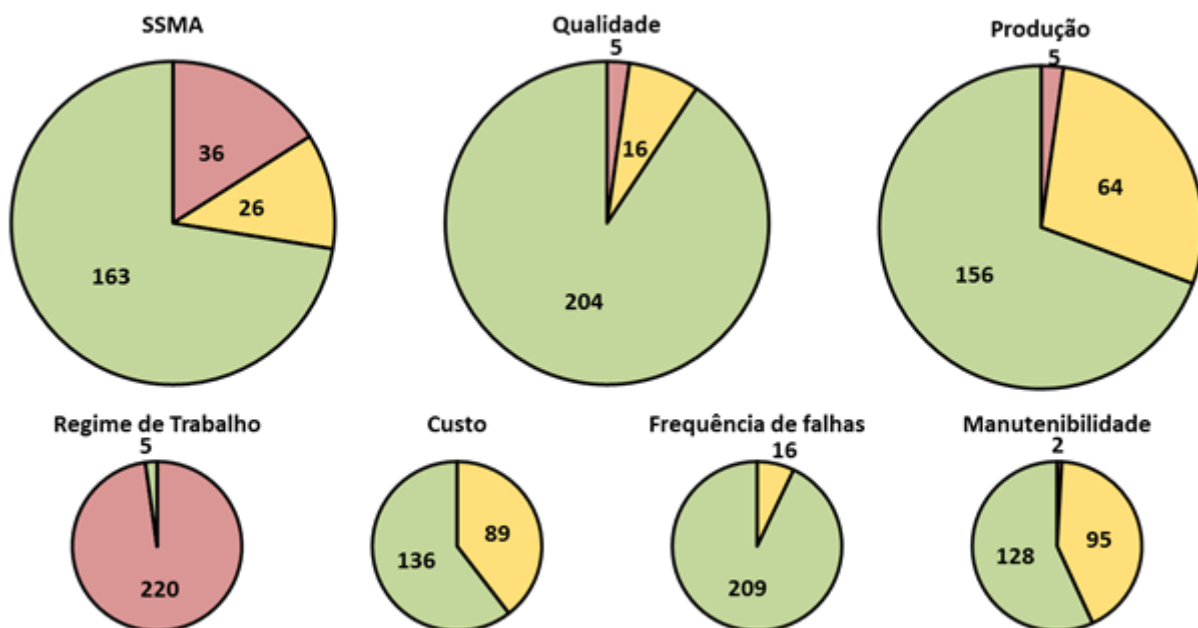


Figura 12 - Distribuição dos níveis de cada parâmetro para subáreas Prensagem e Peletização.

## Secagem:



## Silo Pelets:

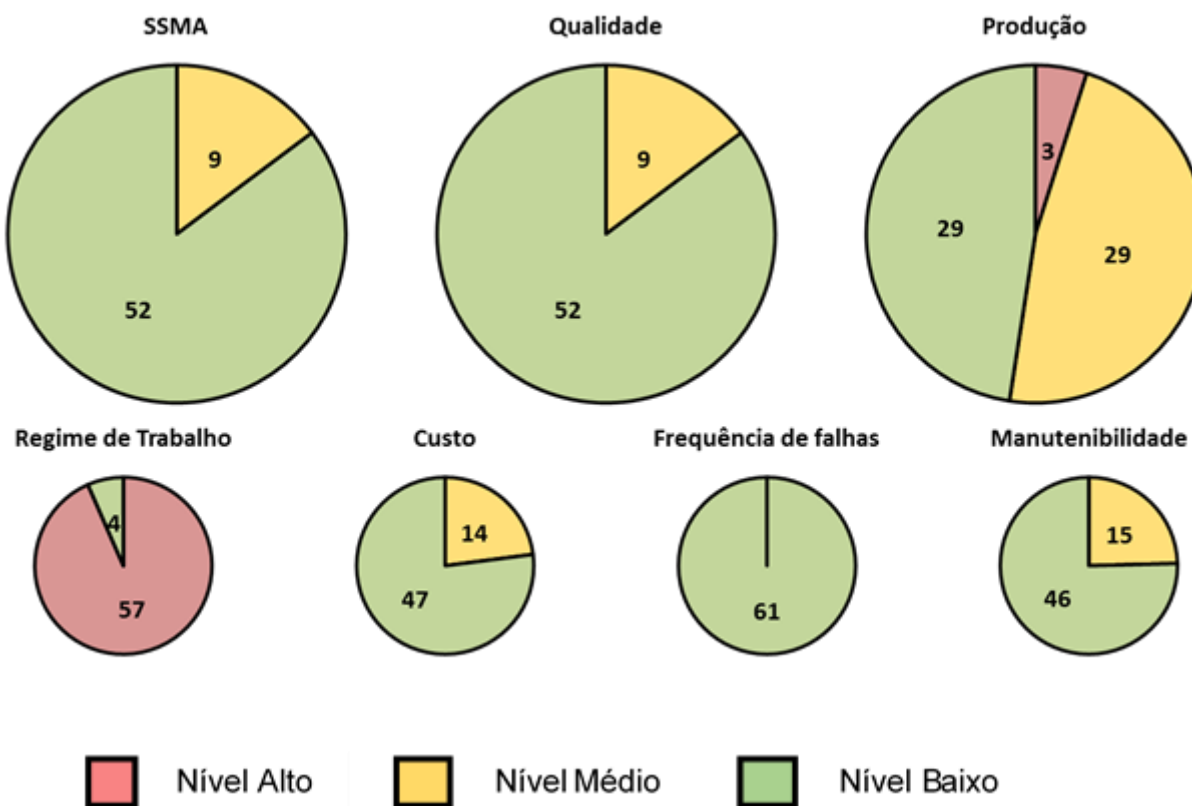


Figura 13 - Distribuição dos níveis de cada parâmetro para subáreas Secagem e Silo Pelets.

Pela distribuição das classificações dos parâmetros, é possível retirar informações importante da área de Polpa cítrica peletizada:

Para a subárea de Prensagem, foi possível visualizar que a maioria dos equipamentos não trabalham em regime de 24 horas em comparativos as outras subáreas. Na parte de Peletização, foi possível concluir que os equipamentos possuem grandes influências na produção, devido à grande quantidade de equipamentos classificados como Nível Médio no parâmetro de Produção. O destaque para a subárea de Secagem está para a quantidade de equipamentos importantes no parâmetro de Segurança, Saúde e Meio Ambiente.

A seguir na Figura 14, uma distribuição das quantidades de classificações recebidas para cada subárea na Polpa cítrica peletizada.

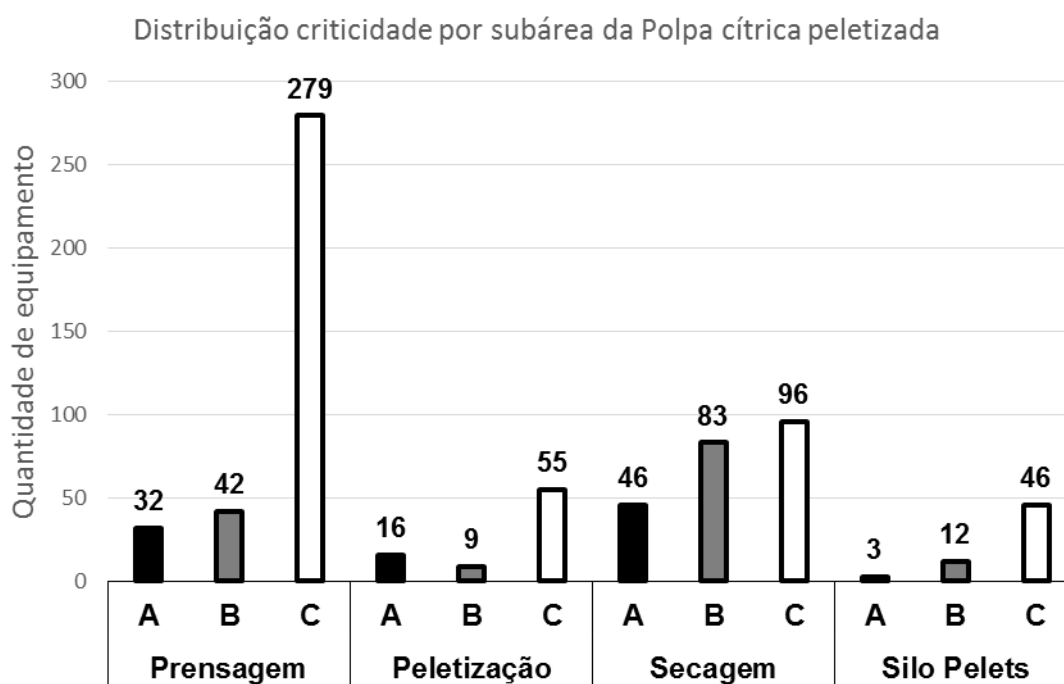


Figura 14 - Distribuição de classificação de criticidade em cada subárea da Polpa cítrica peletizada.

A seguir, a Tabela 17 representando a distribuição proporcional de classificações A, B e C em cada subárea.

Tabela 17 - Distribuição proporcional de equipamentos classificados em A, B e C em cada subárea.

Subárea	% de Criticidade		
	A	B	C
<b>Prensagem</b>	9,06 %	11,90 %	79,04 %
<b>Peletização</b>	20,00 %	11,25 %	68,75 %
<b>Secagem</b>	20,44 %	36,89 %	42,67 %
<b>Silo Pelets</b>	4,92 %	19,67 %	75,41 %

Como esquematizados na Tabela 17, as subáreas de Peletização e Secagem possuem as maiores proporções de equipamentos classificados com criticidade “A”. Peletização por influenciar bastante no quesito de Produção e Secagem por ser determinante no parâmetro de Segurança, Saúde e Meio Ambiente, portanto necessitarão de atenção especiais de planos manutenção. Apesar da menor proporção (9,06 %) de equipamentos com criticidade “A”, a subárea de Prensagem possui uma quantidade considerável em números absolutos (32 equipamentos).

Como explicado no item 3.5.2, os equipamentos classificados com criticidade “C” possuirão periodicidade de acompanhamentos menores, porém não podem ser totalmente abandonados em relação aos planos de manutenção, pois apesar de possuírem a menor criticidade podem iniciar uma grande quantidade de quebras na fábrica, gerando um alto custo de reparos.

## 5.2 Técnicas Preditivas

### 5.2.1 Análise de óleo lubrificante

A determinação da periodicidade de análise de óleos é determinada de acordo com o histórico de resultados obtidos.

As amostras são classificadas em quatro diferentes níveis:

- Normal: Quando a análise encontra todos parâmetros de acordo com as especificações e sem eventuais problemas de continuação de uso.
- Monitoramento: Quando se encontra algo que pode ocasionar em problemas posteriores, é realizado uma notificação de modo a acompanhar o problema em uma próxima análise.
- Atenção: Encontrado níveis considerado de contaminantes ou propriedade fora da especificação, porém é possível continuar trabalhando nestas condições, mas é preciso atentar-se ao equipamento e diminuir o período para uma análise posterior.
- Ação: Quando é encontrado condições de propriedades ou contaminantes que requerem ação para solução do problema de maneira imediata.

A seguir, uma exemplificação de 3 resultados de cada nível encontrado em amostras enviadas ao laboratório Shell LuberAnalyst:

1. Estado de Monitoramento:

Equipamento: Centrífuga de óleo  
 Componente: Caixa de redução  
 Lubrificante: Shell Omala S2 G220

- Aparência:
  - Concentração de sólidos em depósito

- Viscosidade 40° C:

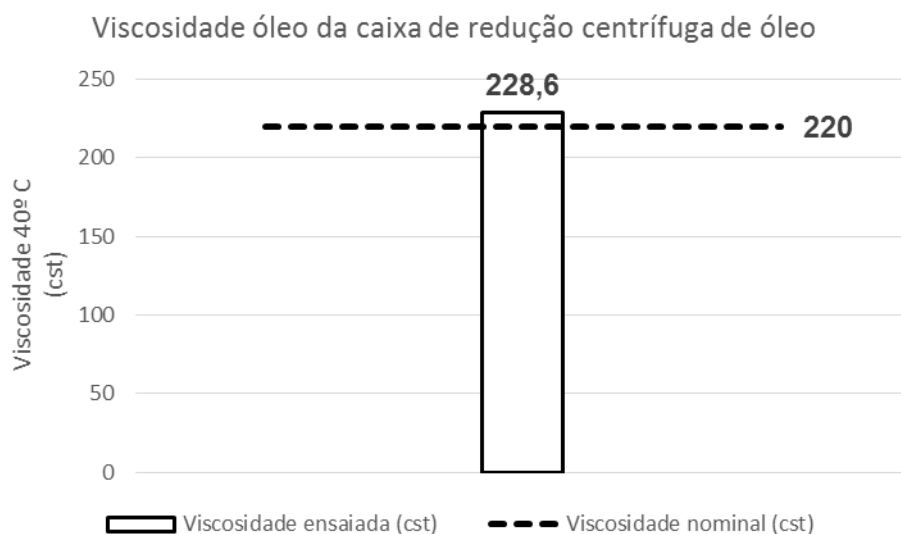


Figura 15 - Viscosidade óleo da caixa de redução de centrífuga de óleo

- Infravermelho (FTIR):

% Água	<0,05 %
--------	---------

- Metais de desgaste:

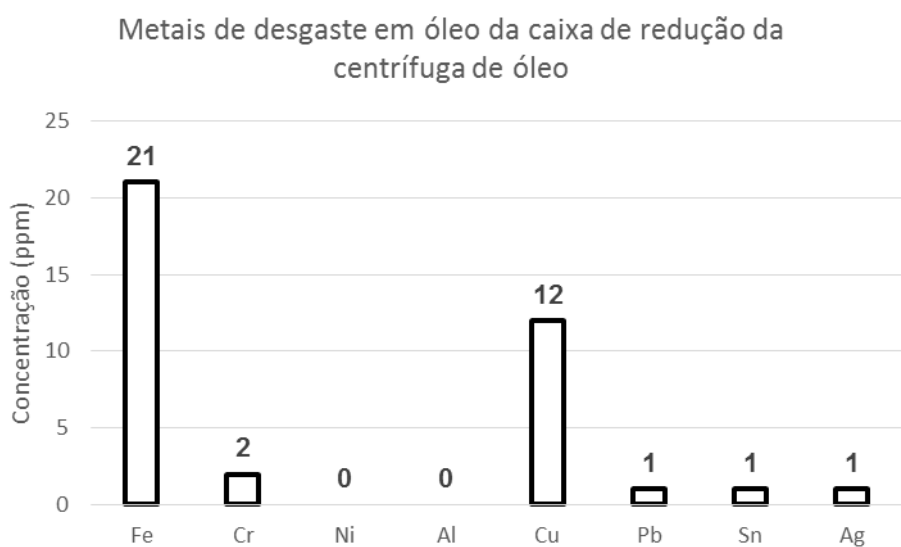


Figura 16 - Concentração de metais de desgaste em óleo da caixa de redução da centrífuga de óleo.

- Metais de contaminação:

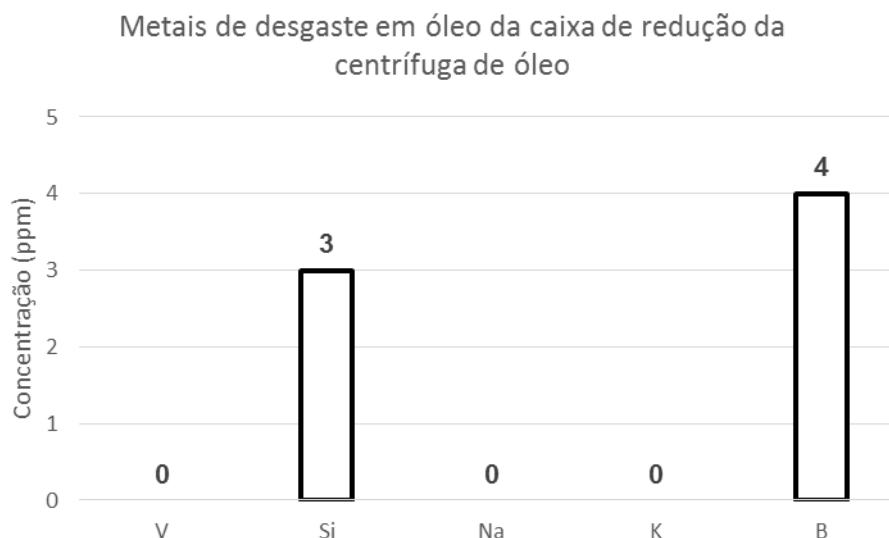


Figura 17 - Concentração de metais de contaminação em óleo da caixa de redução da centrífuga de óleo.

#### Análise:

Presença de partículas visíveis na amostra. A espectrometria apontou níveis de desgaste dentro dos limites aceitáveis para esse equipamento. As características analisadas do lubrificante são satisfatórias. Recomendado monitorar a tendência da próxima amostra.

#### 2. Estado de Atenção:

Equipamento: Centrífuga

Componente: Caixa de redução

Lubrificante: Shell Tellus 68

- Aparência:

- Concentração de sólidos em depósito

- Viscosidade 40° C:

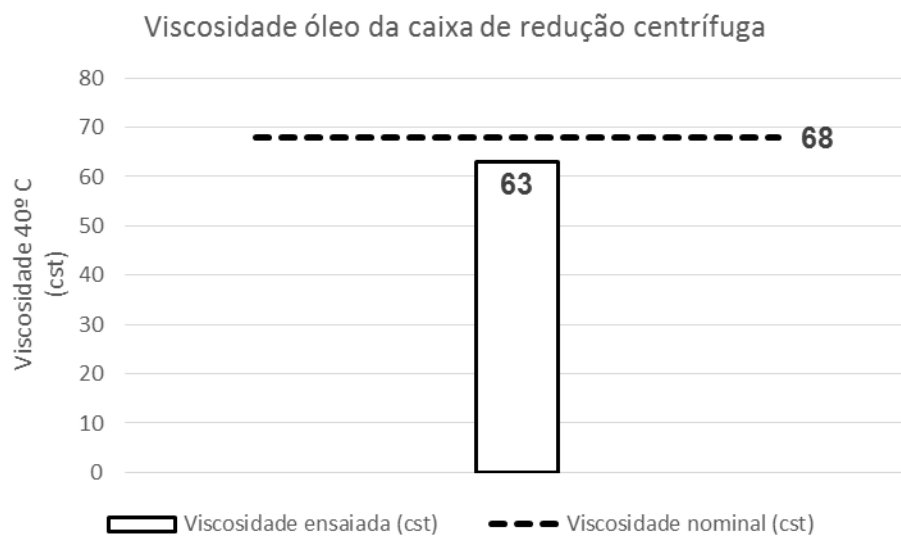


Figura 18- Viscosidade óleo da caixa de redução de centrífuga.

- Infravermelho (FTIR):

% Água	0,22 %
--------	--------

- Metais de desgaste:

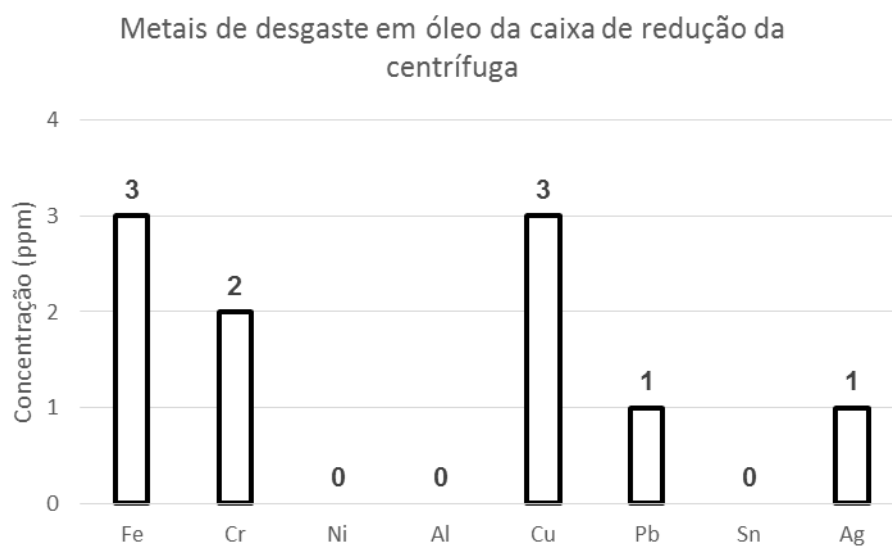


Figura 19 - Concentração de metais de desgaste em óleo da caixa de redução da centrífuga.



- Metais de contaminação:

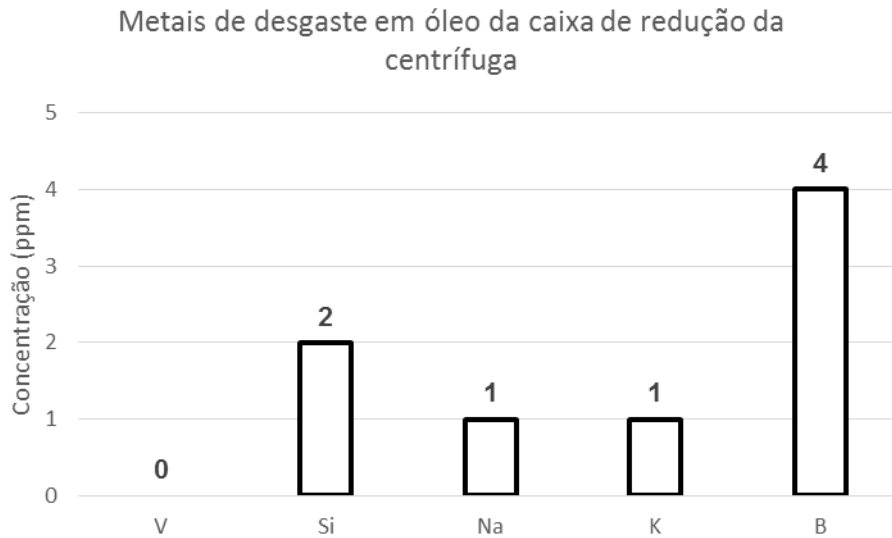


Figura 20 - Concentração de metais de contaminação em óleo da caixa de redução da centrífuga.

#### Análise:

O óleo contém uma pequena quantidade de água. Presença de partículas visíveis na amostra. A espectrometria apontou níveis de desgaste dentro dos limites aceitáveis para esse equipamento. As características analisadas do lubrificante são satisfatórias. Recomendado uma filtragem do óleo (com equipamento off-line) e a substituição dos filtros. Recomendado a remoção da água do óleo por meios apropriados (drenagem, purga, centrifugação ou outras técnicas de absorção de água). Recomendado monitorar a tendência da próxima amostra.

#### 3. Estado de Ação:

Equipamento: Redutor  
 Componente: Caixa de redução  
 Lubrificante: Shell Omala S2 G220

- Aparência:
  - Concentração de sólidos em depósito

- Viscosidade 40° C:

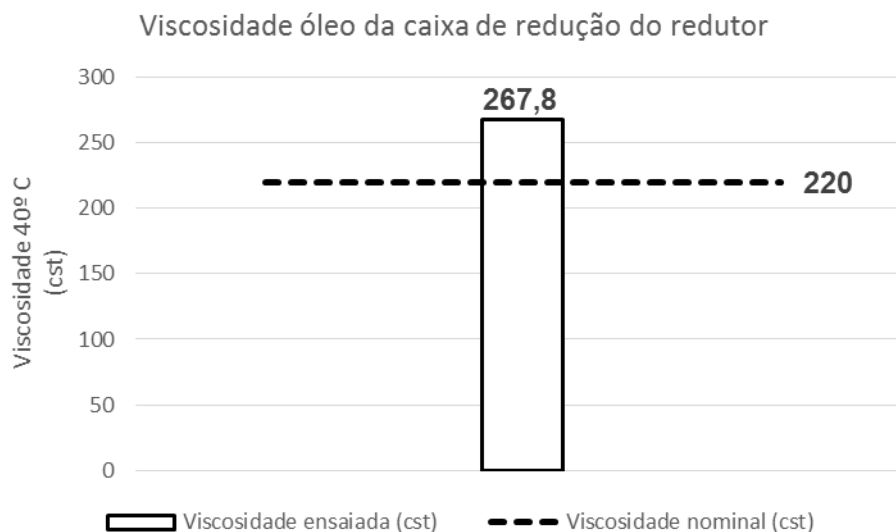


Figura 21 - Viscosidade óleo da caixa de redução do redutor.

- Infravermelho (FTIR):

% Água	<0,05 %
--------	---------

- Metais de desgaste:

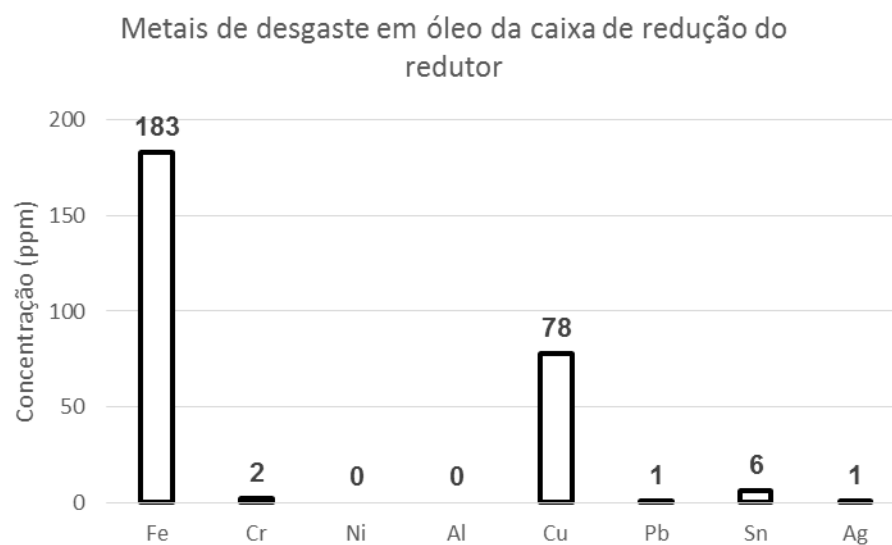
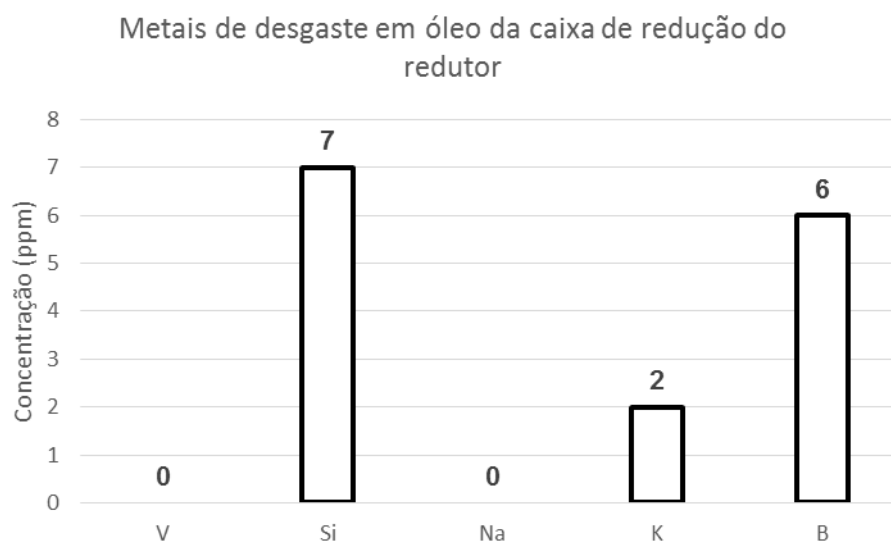


Figura 22 - Concentração de metais de desgaste em óleo da caixa de redução do redutor.

- Metais de contaminação:



*Figura 23 - Concentração de metais de contaminação em óleo da caixa de redução no redutor.*

#### Análise:

Presença de partículas visíveis na amostra. Verificado elevado teor de partículas de ferro e cobre. A viscosidade medida não está correlacionada com o tipo de óleo indicado no cadastro da amostra. Necessidade de verificação da especificação do tipo e viscosidade do óleo utilizado. Verifique e confirme que o sistema está funcionando corretamente. Favor atentar para a tendência de aumento de partículas de Cobre (Cu).

Cada caso exemplificado anteriormente possui sua especificação de óleos utilizados, portanto os níveis aceitáveis de concentração de contaminantes e variação de viscosidade perante a viscosidade nominal é dependente das condições e tipo de óleo. Sendo de responsabilidade do analisador do laboratório especificado relacionar o diagnóstico com cada especificação.

No caso exemplificado como “Monitoramento” possui todas variações dentro de limites aceitáveis e com condições para continuar em uso. Porém, é preciso um contínuo monitoramento para uma próxima análise, mantendo a mesma periodicidade de análise. No caso de “Atenção”, destaque para a presença considerável de água no óleo o que pode ser o indício falhas de vedações,

necessitando uma atenção para que o problema não continue em próxima análise podendo ser agravado e prejudicando no funcionamento do equipamento. O caso de “Ação” apontou desgastes nos componentes de acordo com concentrações de metais encontrados, principalmente de cobre (Cu), no qual possui níveis toleráveis menores que o ferro (Fe), por exemplo. Neste caso, cabe uma análise mais aprofundada do sistema e estudo do equipamento de melhorias ou análise de falhas.

Como foi exemplificado anteriormente, as análises de óleo permitem a detecção de problemas de funcionamento do equipamento anteriormente a uma falha que necessite de uma manutenção do tipo corretiva, na qual acarretaria em danos muito mais críticos, principalmente a estes equipamentos que passam por análises periódicas de óleos por serem de criticidade ou custos altos.

#### 5.2.2 Análise de vibração

Após diagnóstico de uma inspeção sensitiva de problemas encontrados em um compressor de amônia, houve a necessidade de realização de uma inspeção mais aprofundada do equipamento. Portanto iniciou-se uma análise de vibração no equipamento de modo a diagnosticar a falha ocorrida no equipamento.

A seguir o espectro na Figura 24 obtido e analisado pelo analisador de espectros de vibrações auxiliado pelo software.

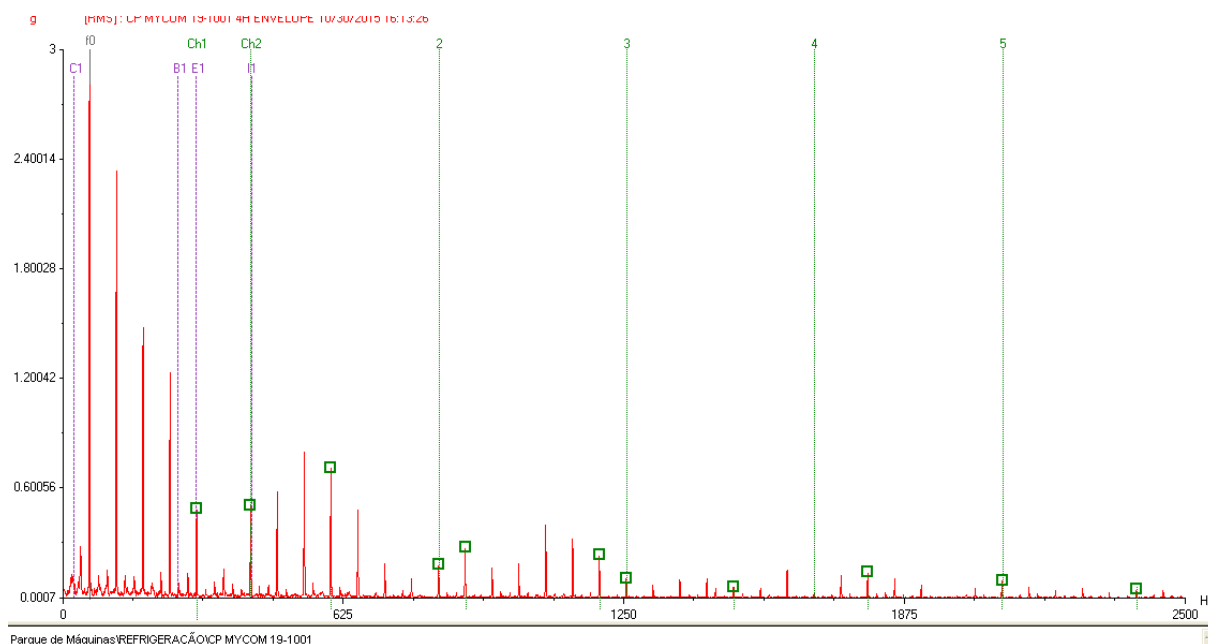


Figura 24 - Espectro de vibração do compressor de amônia.

Como explicado anteriormente, não será aprofundado os fundamentos de análises dos espectros, porém de acordo com morfologias específicas de comparação de espectros de vibração, o espectro da Figura 24 indica que os pequenos quadrados em verde quando coincide com picos de vibração trata-se de vibrações emitidas por defeitos na parte interna do rolamento e as linhas esquematizadas por Ch1, Ch2, 2, 3, 4 e 5 em encontro com picos dos espectros indicam falhas na pista externa do rolamento.

Com esta análise de vibração, foi recomendada a abertura do equipamento e confirmou os desgastes no rolamento necessitando de reparos imediatos.

Para este caso, não houve uma denominada antecipação da falha, porém o diagnóstico da preditiva de vibração realizada permitiu a conclusão de um problema já detectado e permitiu a tomada de ação anteriormente ao problema se agravar e danificar outros componentes do equipamento.

### 5.2.3 Termografia Mecânica

Em uma inspeção das temperaturas dos componentes dinâmicos, destaque para um caso exemplificado a seguir na Figura 25:

- Alta temperatura rolamento

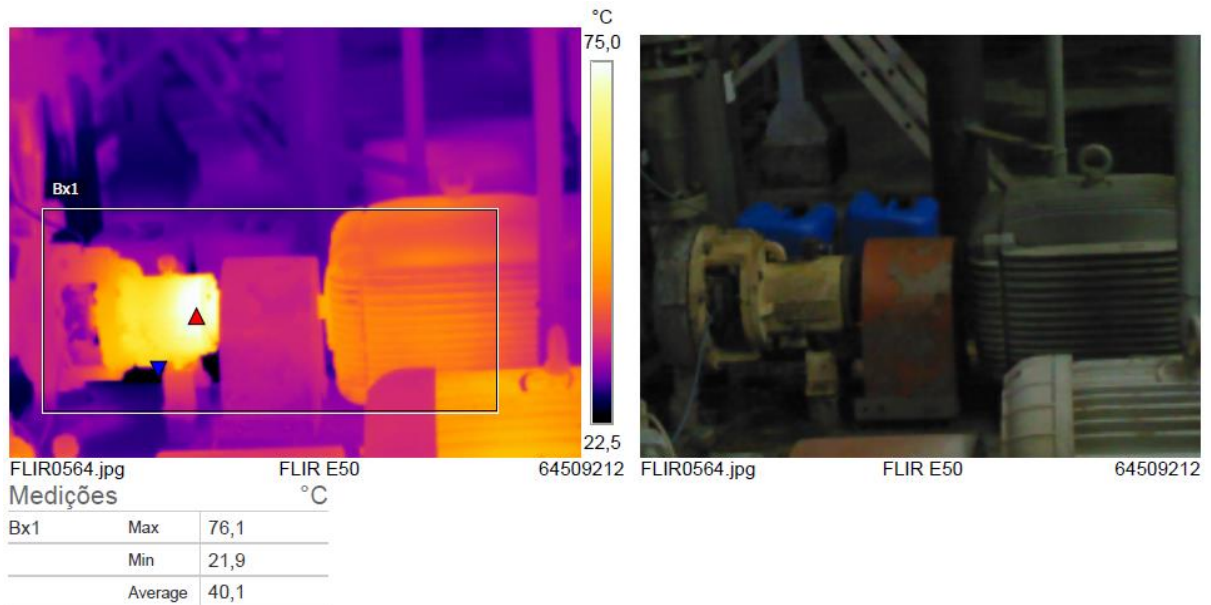


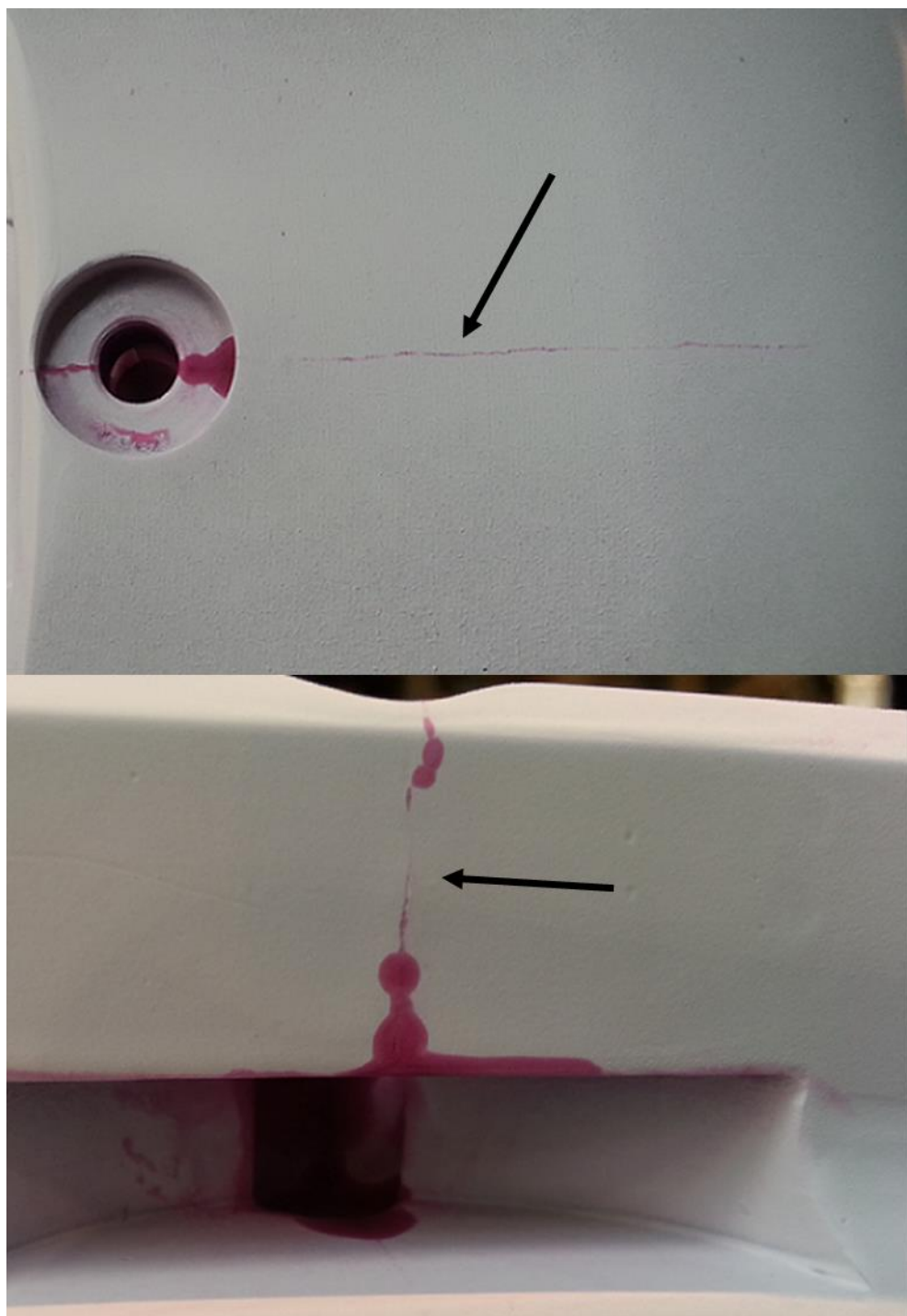
Figura 25 - Termograma com altas temperaturas no rolamento.

Como esquematizado na Figura 25, a região onde se encontra o rolamento da bomba, próxima ao acoplamento da bomba possui uma temperatura de aproximadamente 76 °C, onde de acordo com a Tabela 15, possui um estado classificado como “Atenção”. Portanto recomendou-se fazer uma verificação de análise de vibração no local e verificação do nível de óleo, possuindo grande possibilidades de encontrar uma contaminação, necessitando de uma troca do óleo no local.

Como exemplificado anteriormente, a manutenção preditiva de inspeção por análise termográfica permitiu uma antecipação ao acontecimento no rolamento da bomba. Apenas uma troca de óleo foi necessária para sanar o problema, no qual poderia ser a troca do rolamento (manutenção corretiva) caso o problema persistisse e não fosse descoberto causando maiores gastos no orçamento da Manutenção e comprometendo também paradas de produção, gerando maiores perdas financeiras.

#### 5.2.4 Líquidos penetrantes

Na aplicação da técnica de líquido penetrante realizadas anualmente em grandes paradas, foi possível a identificação de trincas superficiais na base de uma das centrífugas, como ilustrado na Figura 26 a seguir.



*Figura 26 - Trincas reveladas por técnica de líquidos penetrantes na base da centrífuga.*

Na Figura 26 é possível identificar que a trinca (apontado pela seta na ilustração) atravessa o furo de fixação da base. Portanto o elemento precisou ser condenado para utilização por se tratar de um equipamento de alto risco para utilização sobre condições irregulares.

Com esta preditiva aplicada, pode-se dizer que foi possível a detecção de uma falha em um estágio avançado na superfície do equipamento e evitando assim uma falha com piores consequências.

### 5.3 Estudos de Engenharia de Manutenção

#### 5.3.1 Análise de falha

Os resultados da Análise de falha nas bombas de alimentação de evaporadores serão apresentados de acordo com a sequência de passos requeridos para Análises de falhas apresentados anteriormente.

##### 1. Definição do problema

- Indisponibilidade por manutenção das bombas de alimentação dos evaporadores 1, 2 e 3.

Foi realizado um levantamento da quantidade de reincidências e intervenções baseado em um histórico de um período de 1 ano. A esquematização da quantidade por cada bomba está representada a seguir na Figura 27.



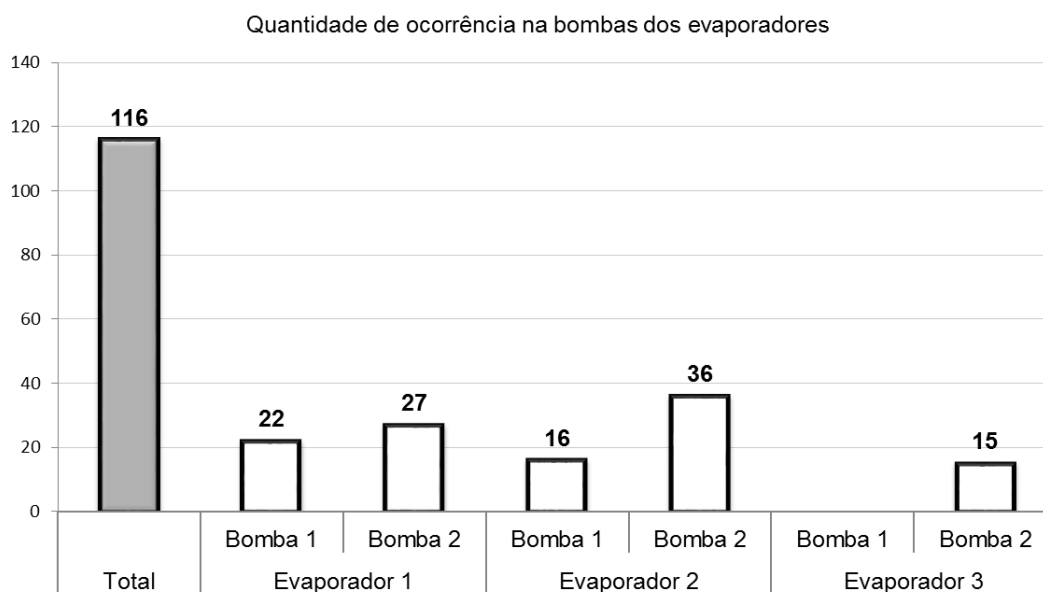


Figura 27 - Quantidade de ocorrências nas bombas de alimentação dos evaporadores em um ano.

A seguir na Figura 28, foi levantado a quantidade de ocorrências em cada componente da bomba para o mesmo período de um ano.

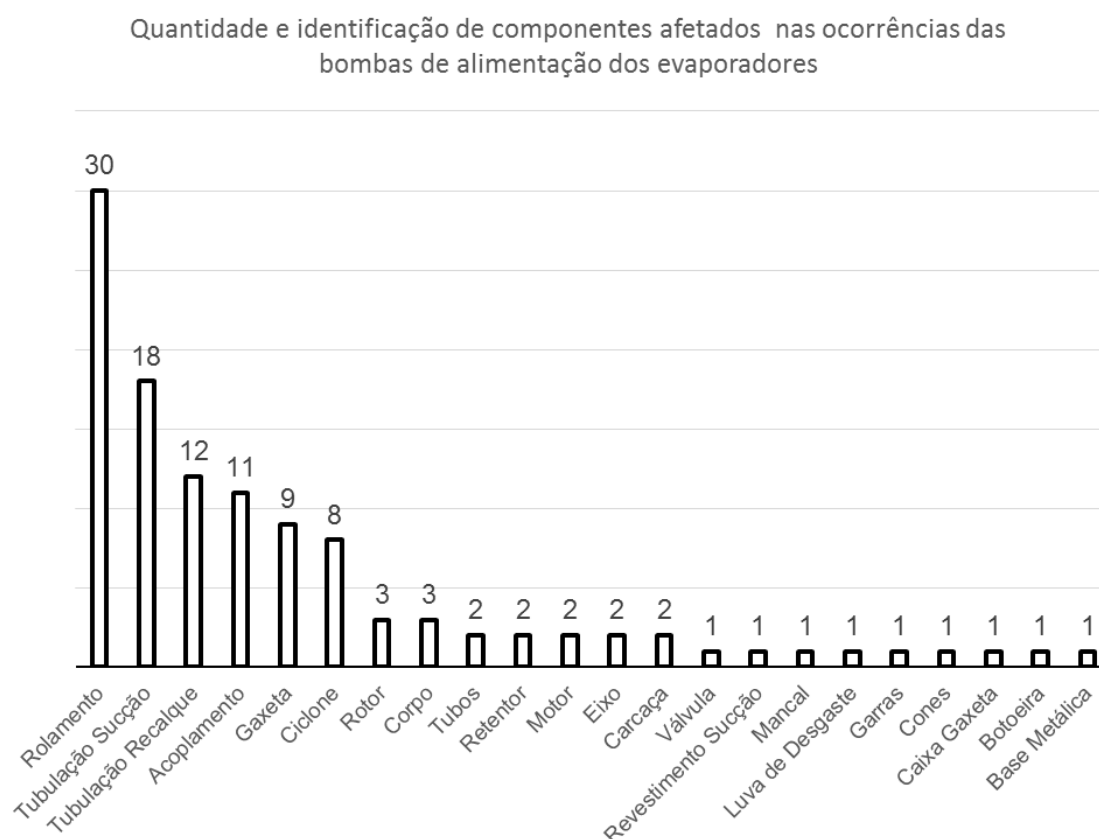


Figura 28 - Quantidade e tipo de componente afetados nas ocorrências das bombas de alimentação dos evaporadores.

De acordo com os dados levantados e experiência de mantenedores industriais, a quantidade de intervenções pelo período estudado estava em acima dos aceitáveis, gerando altos custos de manutenção, não somente pela perda de grandes quantidades de componentes como esquematizado na Figura 28, mas também pela perda de produção causado pela indisponibilidade nas intervenções destes equipamentos. Portanto, foi viabilizado um estudo mais aprofundado com objetivo de sanar estas ocorrências, iniciando uma análise de falha.

## 2. Realizar Análise de falha

Para início da análise de falha, foi preciso reunir uma equipe formada por:

- Execução de manutenção: fornecendo informações dos estados do equipamento encontrados nas falhas e históricos de ações corretivas;
- Planejamento de manutenção: fornecendo dados de quantidades e datas das ocorrências e quantidades de componentes utilizados nas correções;
- Produção: fornecendo informações sobre os modos de operação dos equipamentos;
- Fornecedor dos equipamentos: fornecendo dados técnicos de especificações de funcionamentos e melhores práticas do equipamento.
- Engenharia de Manutenção: estudando os dados citados acima e avaliando as condições de funcionamento.

## 3. Identificação das possíveis causas

Perante uma reunião da equipe citada anteriormente, foi possível elaborar uma sequência de causas para as falhas ocorridas nas bombas. Esta sequência de causas foi estruturada em uma Árvore de Falhas (Figura 29) como esquematizado a seguir:



#### 4. Verificação das possíveis causas

Seguindo os dados obtidos por equipe no estudo de análise de falha, foi possível concluir as principais causas para as ocorrências em estudo. Os quadros em verde da Figura 29, exemplificam as principais causas das falhas em estudo, onde as extremidades relatam chamadas causas raízes a seguir:

- Bomba operando fora do BEP: Bomba opera em níveis de vazão e pressão manométrica com valores distantes do “Best Efficiency Point” (BEP) ou seja, operando com perdas de energias internas.
- Falta de rigidez mecânica da base: Permitindo vibrações e desalinhamentos no conjunto.
- Falta de fluido: Outro problema operacional que acarreta em cavitação da bomba.
- Falta de limpezas periódicas: Problemas operacionais na produção
- Falta de informação do projeto.

#### 5. Proposição de soluções para os problemas

Para melhor esquematização, segue na Tabela 18 os planos de ações para solução das causas raízes citadas anteriormente:

*Tabela 18 - Ações para solução das causas raízes das falhas nas bombas de alimentação dos evaporadores.*

<b>Causa</b>	<b>Ações/Soluções</b>
<b>Bomba fora do BEP</b>	1. Estudo de melhoria, com informações do BEP ideal para as bombas e repassado a Produção.
<b>Rigidez mecânica da base</b>	1. Confecção de uma nova base 2. Alinhamento a laser do conjunto 3. Instalação de Juntas de expansão nas tubulações de entrada.
<b>Falta de fluido</b>	1. Trabalhar apenas com uma bomba em alimentação.
<b>Limpezas periódicas</b>	1. Elaboração de procedimentos para limpezas de ciclones anterior ao processo.
<b>Informações projeto</b>	1. Requisição e estudo de informações com os fornecedores dos equipamentos.

### 5.3.2 Melhorias

Os estudos de melhorias de instalações é um trabalho de Engenharia de Manutenção, no qual assim como uma análise de falha necessita da utilização de dados de históricos de ocorrências para melhor estudar o problema a ser solucionada e melhorado.

A seguir uma exemplificação de um trabalho de melhoria aplicada em um sistema de separação composto por uma centrífuga de fermento.

- Problemas

O histórico de um período de um ano de falhas consta altos números de ocorrências na centrífuga. A seguir na Figura 30 uma representação da quantidade de incidências no equipamento pelo elemento da máquina.

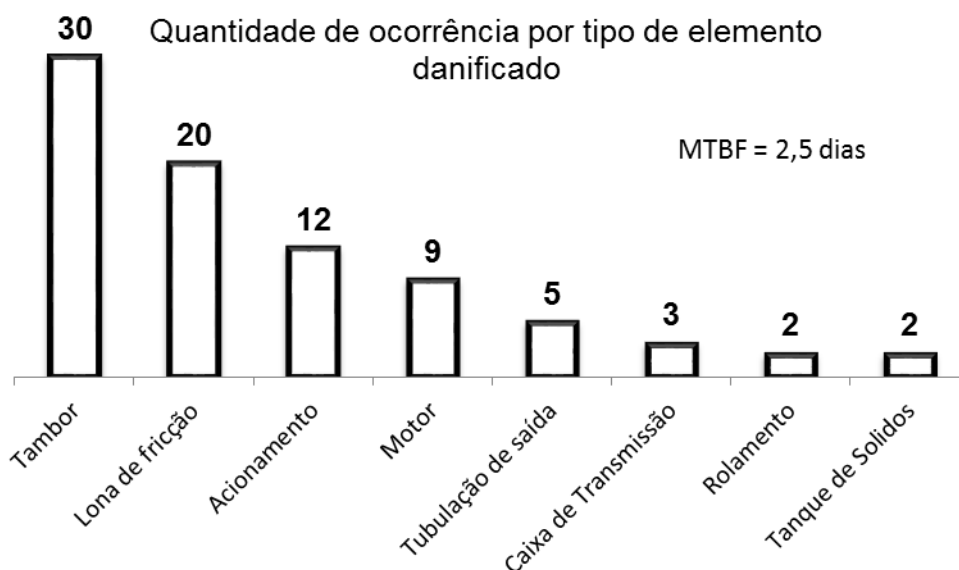


Figura 30 - Quantidade de ocorrência pelo elemento do equipamento centrífuga de fermento.

Totalizando 80 ocorrências em um período de um ano e com um tempo médio entre falhas (MTBF) de apenas 2,5 dias, foram listados os principais problemas para este equipamento.

1. Falta de conhecimento do operador e mecânico em relação ao funcionamento do equipamento;
2. Falta de procedimentos de limpeza e manutenção;

3. Grandes quantidades de reincidências e intervenções, como esquematizado na Figura 30.
4. Erosões no corpo do rotor da centrífuga

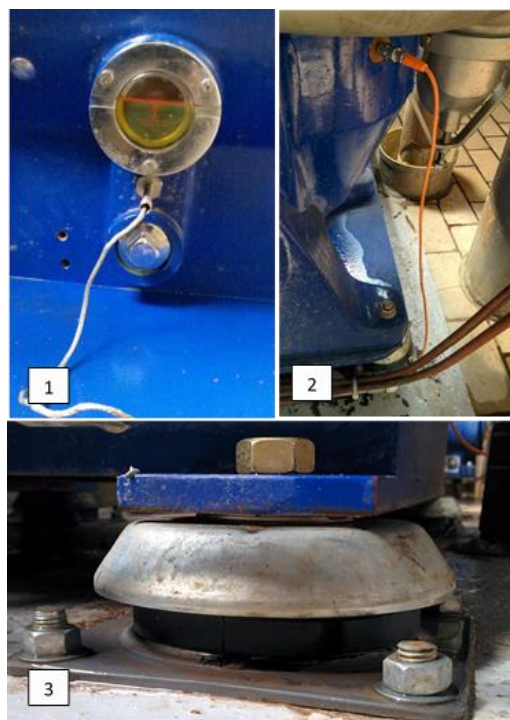


*Figura 31 - Erosão no corpo do rotor da centrífuga.*

- Proposições de melhorias

Diante da gravidade dos problemas do equipamento mencionados anteriormente e por se tratar de um elevado potencial de risco humano, foram aplicadas as seguintes medidas de melhorias:

1. Aquisição de uma nova máquina com tecnologias e funcionamentos atualizados, como esquematizado na Figura 32;



*Figura 32 - Componentes no novo equipamento. 1) Sensor de temperatura de óleo. 2) Sensor de vibração e 3) Sistema de amortecimento da base.*

2. Substituição de todo cabeamento elétrico do equipamento
3. Aplicação de treinamentos técnicos com o fabricante do equipamento para os profissionais da operação e manutenção do equipamento.
4. Elaboraões de Planos de manutenção periódicos:
  - Diário: Check-list do estado dos componentes do equipamento;
  - Semanal: Manutenção sensitiva
  - Mensal: Inspeções preditivas;
  - Trimestral: Planos de Lubrificação

As melhorias aplicadas neste sistema exemplificado anteriormente proporcionaram uma melhor capacitação dos profissionais envolvidos juntamente com uma atualização do sistema gerando assim uma maior segurança, rendimento da produção, redução dos custos de manutenção do equipamento e aumento da confiabilidade do sistema.

## 6 Conclusão

- Uma manutenção aplicada de maneira estratégica tem como consequência uma atuação mais eficiente em relação aos reais objetivos da Manutenção. Não sendo apenas o departamento que cuida dos “maus necessários” ou o “apagador de incêndios” e sim o departamento que cuida da “saúde” dos ativos de uma unidade industrial.
- A classificação de criticidade além de fornecer informações importantes para elaborações de planos de manutenção, também fornece informações úteis em relação a cada área de uma indústria de acordo com cada parâmetro. Sendo possível fazer um mapeamento para possíveis ações em relação à Segurança, Meio Ambiente, Qualidade de produção, Produção, Custos e muito mais.
- Aplicação de uma manutenção baseada no estado do equipamento, permite uma melhor otimização dos gastos de manutenção, ou seja, as denominadas “antecipação as falhas” são mais eficientes pensando nos objetivos da Manutenção Industrial. Portanto cada técnica necessita ser aplicada da melhor forma e ao melhor custo.
- Evidências comprovam o aumento da disponibilidade da fábrica com aplicação de uma manutenção preditiva juntamente com estudos estratégicos da manutenção, aumentando assim a confiabilidade dos equipamentos e uma maior produção.



## 6.1 Sugestão trabalhos futuros

- Estudos de aplicação de outras técnicas e equipamentos de manutenções preditivas, acompanhando as novas tecnologias que irão surgindo com o decorrer do tempo.
- Explicação aprofundadas de cada técnica preditiva aplicada de maneira a adquirir o profundo entendimento não somente da estrategicamente das técnicas da manutenção, mas também de maneira analítica individual de cada técnica mencionada nesta tese.

## Bibliografia

ABRAMAN. (Novembro de 2015). *ABRAMAN - Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos*. Fonte: <http://www.abraman.org.br>

Engfaz. (maio de 2014). Apostila de Planejamento, Programação e Controle de Manutenção.

FLIR Instruments. (10 de Outubro de 2015). Fonte: FLIR:  
<http://www.flir.com.br/instruments/display/?id=56911>

Kardec, A., & Nascif, J. (2012). *Manutenção - Função Estratégica* (4ª ed.). Rio de Janeiro, Brasil: Qualitymark.

LubeAnalyst, S. (s.d.). *SHELL LUBE ANALYST*. Fonte: <https://www.shell-lubeanalyst.shell.com/Lubes/Include/OfflineForms/LBRA/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20Shell%20LubeAnalyst.pdf>

NASA. (2010). *Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment*. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration.

NBR 5462 ABNT. (1994). *Confiabilidade e Manutenibilidade*. Rio de Janeiro.

Nepomuceno, L. (1989). *Técnicas de Manutenção Preditiva* (1ª ed., Vol. 1). São Paulo: Edgard Blücher.

OneProd ACOEM. (10 de Outubro de 2015). Fonte: One Prod:  
<http://oneprod.acoemgroup.com.br/catalogo/OneProd-FALCON-Coletor-Analisador-de-Vibracoes>

*Operations & Maintenance - Best Practices*. (Agosto de 2010). Acesso em 2015, disponível em Office Energy Efficiency Renewable Energy:  
[http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/omguide\\_complete.pdf](http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/omguide_complete.pdf)

Pereira, M. J. (2011). *Engenharia de Manutenção - Teoria e Prática*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna LTDA.

Vibration, M. (Março de 1988). *Vibrations Magazine*, vol. 4 num.1.

