

**GUILHERME DE FARIA CUSSOLIM**

**Estudo da análise vibrações em equipamentos rotativos para melhoria da confiabilidade  
na indústria de papel e celulose.**

Guaratinguetá – SP  
2018

**Guilherme de Faria Cussolim**

**Estudo da análise vibrações em equipamentos rotativos para melhoria da confiabilidade na indústria de papel e celulose.**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

Guaratinguetá - SP  
2018

C986e	<p>Cussolim, Guilherme de Faria Estudo da análise vibrações em equipamentos rotativos para melhoria da confiabilidade na indústria de papel e celulose / Guilherme de Faria Cussolim. – Guaratinguetá, 2018. 97 f : il. Bibliografia: f.95-97</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins</p> <p>1. Manutenção produtiva total. 2. Vibração - Medição. 3 Confiabilidade (Engenharia). 4. Papel -Industria. I. Título</p> <p>CDU 658.581</p>
-------	---

**GUILHERME DE FARIA CUSSOLIM**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS  
Coordenador



**BANCA EXAMINADORA:**

PROF. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS  
ORIENTADOR/UNESP-FEG

PROF. Me. EVERTON COELHO DE MEDEIROS  
UNESP-FEG

PROF. Me. ANTONIO DOS REIS DE FARIA NETO  
UNESP-FEG

Novembro de 2018

## **DADOS CURRICULARES**

### **GUILHERME DE FARIA CUSSOLIM**

**NASCIMENTO** 31.01.1994 – Ribeirão Preto / SP

**FILIAÇÃO** Marcos Roberto Cussolim  
Rosana de Faria Cussolim

**2013/2018** Curso de Graduação  
Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia do  
Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

de modo especial, ao meu filho Heitor, que com os seus primeiros anos de vida, foi a grande incentivador e motivador para que eu finalizasse o curso e buscasse o melhor de mim, e à minha Família que sempre me suportou e acompanhou-me na trajetória acadêmica, profissional e pessoal.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais, incentivadores e apreciadores do meu progresso, companheiros da minha trajetória, coautores das minhas conquistas,

ao meu filho, *Heitor da Silva Cussolim*, fonte de motivação para os momentos turbulentos e pedra fundamental da minha obra em construção,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins* que jamais deixou de me incentivar. E apesar da distância e adversidades, ajudou-me a realizar este trabalho com sua orientação e paciência.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento não somente neste trabalho mas também durante todo o curso de graduação.

“Deixe o futuro dizer a verdade, e avaliar cada um de acordo com seus trabalhos e suas conquistas.”

Nikola Tesla

## RESUMO

Com o desenvolvimento deste trabalho é esperado a difusão das melhores práticas de manutenção do mercado de papel e celulose para toda a comunidade. São estudados modelos de manutenção bem como as formas de sua gestão. Para elucidar os conhecimentos, é apresentado também um estudo de caso sobre como é a realização de dois tipos específicos de manutenção, a manutenção preditiva e corretiva. Instalada no interior do estado de São Paulo, a unidade de produção estudada produz 1200 toneladas de papel por dia e contempla em suas instalações mais de 100 mil equipamentos que demandam manutenção e cuidados operacionais diários que usam como base a análise de vibrações como principal ferramenta de diagnóstico situacional. A importância econômica deste conhecimento é dada na comparação dos resultados da aplicação das diferentes manutenções em um mesmo equipamento onde os impactos são traduzidos em valores financeiros, disponibilidade de produção e confiabilidade. Guardada as proporções, este estudo é aplicável à qualquer tipo de indústria de produção, uma vez que o foco é mantido em manutenção e seu estudo de caso é de um olhar crítico sobre os efeitos da escolha do momento e forma da aplicação e as consequências decorrentes da mesma.

**PALAVRAS-CHAVE:** Manutenção Preditiva. Manutenção Corretiva. Análise de Vibração. Papel e celulose. Gestão da Manutenção.

## **ABSTRACT**

With the development of this work, it is expected the dissemination of the best practices of maintenance of the paper and pulp market for the whole community. Maintenance models are studied as well as the forms of their management. To elucidate the knowledge, a case study is also presented on how to perform two specific types of maintenance, predictive and preventive maintenance. Installed in the interior of the state of São Paulo, the production unit studied produces 1200 tons of paper per day and includes in its facilities more than 100 thousand equipment that demands maintenance and daily operational care based on vibration analysis as the main tool of situational diagnosis. The economic importance of this knowledge is given in the comparison of the results of the application of the different maintenance in the same equipment where the impacts are translated into financial values, availability of production and reliability. Given the proportions, this study is applicable to any type of production industry, since the focus is kept on maintenance and its case study is a critical look at the effects of choosing the moment and form of the application and the consequences thereof of the same.

**KEYWORDS:** Predictive Maintenance. Corrective maintenance. Vibration Analysis. Paper And Pulp. Maintenance management.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição das indústrias de papel e celulose brasileiras .....	15
Figura 2 – Vibração Linear (Princípio da superposição dos efeitos) .....	24
Figura 3 – Movimento Harmônico Simples .....	26
Figura 4 – Movimento Harmônico Simples Projeção de um ponto .....	27
Figura 5 – Estrutura do GMS .....	42
Figura 6 – Ilustração IMS .....	43
Figura 7 - Planejamento da Parada Anual .....	46
Figura 8 - Sistemática de atuação do Basic Care .....	48
Figura 9 – Curva P-F .....	50
Figura 10 – Curva P-F com as Zonas .....	51
Figura 11 – Ciclo do MWS .....	55
Figura 12 – Ciclo de uma intervenção de manutenção .....	62
Figura 13 – Layout da Unidade de Luiz Antônio da International Paper .....	64
Figura 14 – Desenroladeiras, Cortadeira e Embaladoras .....	66
Figura 15 – Fluxo da Cortadeira .....	66
Figura 16 – Cortadeira .....	67
Figura 17 – Os Subgrupos da linha de Cortados .....	70
Figura 18 – Esquema do acionamento principal da Will .....	71
Figura 19 – Coletor portátil de dados .....	74
Figura 20 – Exemplo Análise de espectral .....	75
Figura 21 - Estágios de falha em um rolamento .....	76
Figura 22 – Relatório de parada da Linha Will 1 .....	77
Figura 23 – Parada programada da linha para troca de sistemas de corte.....	83
Gráfico 1 – Vibração no domínio do Tempo .....	30
Gráfico 2 – Vibração no domínio da Frequência .....	30
Gráfico 3 – Espectro de velocidade do Rolamento .....	36
Gráfico 4 – Nível geral de vibração de Luiz Antônio .....	59
Gráfico 5 – Tempos de parada da Linha Will 1 .....	78
Gráfico 6 – Velocidade de produção no dia da parada emergencial .....	78
Gráfico 7 – Velocidade de produção antes da parada .....	79
Gráfico 8 – Preço médio da tonelada de papel .....	81
Gráfico 9 – Velocidade de produção no dia da parada programada .....	84

Gráfico 10 – Tendência da Aceleração Envelope da Vibração .....	85
Gráfico 11 – Tendência da Aceleração da Vibração .....	86
Gráfico 12 – Tendência da Velocidade da Vibração .....	87
Quadro 1 – Procedimento de análise para o caso não-linear .....	25
Quadro 2 – Amplitude e Frequência das vibrações .....	25
Quadro 3 – Elementos do GMS .....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicação dos esforços de manutenção .....	17
Tabela 2 – Velocidade por gramatura .....	66
Tabela 3 – Dimensões dos formatos de corte .....	67
Tabela 4 – Tabelas de Aceitação de vibração mecânica .....	70
Tabela 5 – Lista de itens fora da normalidade de vibração (SKF) .....	71
Tabela 6 – Resumo dos custos diretos com material .....	77
Tabela 7 – Pedidos dos dias afetados .....	78
Tabela 8 – Perdas em toneladas do evento .....	79
Tabela 9 – Cálculo do Faturamento Cessante .....	80
Tabela 10 – Custos da Emergência .....	80
Tabela 11 – Custos operacionais da Manutenção Preventiva .....	81
Tabela 12 – Aceleração Envelope da Vibração .....	88
Tabela 13 – Aceleração da Vibração .....	89
Tabela 14 – Velocidade da Vibração .....	90
Tabela 15 – Resumo dos custos das ocorrências .....	91

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	OBJETIVO .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1	INTRODUÇÃO À MANUTENÇÃO .....	17
<b>2.1.1</b>	<b>Manutenção Corretiva</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Manutenção Preventiva</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Manutenção Preditiva</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Manutenção Centrada Em Confiabilidade</b> .....	<b>21</b>
2.2	TEORIA DA VIBRAÇÃO .....	22
<b>2.2.1</b>	<b>Histórico Das Vibrações</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Conceitos Básicos Sobre Vibração</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Relação Entre Tempo E Frequência</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Domínio Do Tempo E Domínio Da Frequência</b> .....	<b>29</b>
2.3	MÉTODOS DE TEMPO-FREQUÊNCIA .....	30
<b>2.3.1</b>	<b>Introdução À Métodos De Transformação</b> .....	<b>31</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Análise De Fourier</b> .....	<b>32</b>
2.4	TÉCNICA DE ANÁLISE DE DADOS .....	33
<b>2.4.1</b>	<b>Análise De Espectro</b> .....	<b>34</b>
2.4.1.1	Recolha Informações Úteis .....	37
2.4.1.2	Analisar Dados Espectrais .....	38
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>41</b>
3.1	SISTEMA DE GESTÃO DA MANUFATURA - GMS (GLOBAL MANUFACTURING SYSTEM) .....	41
<b>3.1.1</b>	<b>Elemento De Confiabilidade (Reliability – Reli)</b> .....	<b>43</b>
3.1.1.1	Paradas Anuais (AO) .....	44
3.1.1.2	Cuidados Com Equipamentos (EC) .....	46
<b>3.1.1.2.1</b>	<b><i>Cuidados Básicos (BC)</i></b> .....	<b>46</b>
<b>3.1.1.2.2</b>	<b><i>Manutenção Preditiva (PDM)</i></b> .....	<b>49</b>
<b>3.1.1.2.3</b>	<b><i>Manutenção Preventiva (PM)</i></b> .....	<b>51</b>
3.1.1.3	Preservação De Fábrica (FP) .....	53
3.1.1.4	Lubrificação (LUB) .....	54

3.1.1.5	Sistema De Produção Em Manufatura (MWS) .....	55
3.1.1.6	Design De Confiabilidade Organizacional (ROD) .....	57
3.1.1.7	Práticas De Precisão (PP) .....	57
<b>3.1.1.7.1</b>	<b><i>Manutenção De Precisão Mecânica (MPM)</i></b> .....	<b>57</b>
<b>3.1.1.7.2</b>	<b><i>Manutenção De Precisão Para Instrumentação E Elétrica (IEPM)</i></b> .....	<b>59</b>
<b>3.1.1.7.3</b>	<b><i>Manutenção Em Equipamentos EPD (EPD)</i></b> .....	<b>60</b>
3.1.1.8	Análise De Causa Raiz De Falhas (RCFA) .....	62
3.1.1.9	Certificação De Confiabilidade (RC) .....	62
3.2	INTRODUÇÃO AO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO PAPEL.....	63
3.3	MAQUINA CORTADEIRA .....	65
<b>3.3.1</b>	<b>Ficha Técnica Operacional .....</b>	<b>67</b>
3.3.1.1	Velocidades .....	67
3.3.1.2	Energia.....	69
3.3.1.3	Subgrupos De Componentes Principais .....	69
3.4	ROTAS DE MONITORAMENTO DA SKF .....	71
<b>3.4.1</b>	<b>Atuação Da SKF .....</b>	<b>71</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Técnica de Análise .....</b>	<b>74</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS DADOS .....</b>	<b>77</b>
4.1	APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CORRETIVA .....	77
4.2	APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA .....	82
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE ATUAÇÕES.....	84
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>92</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>94</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b>	<b>95</b>

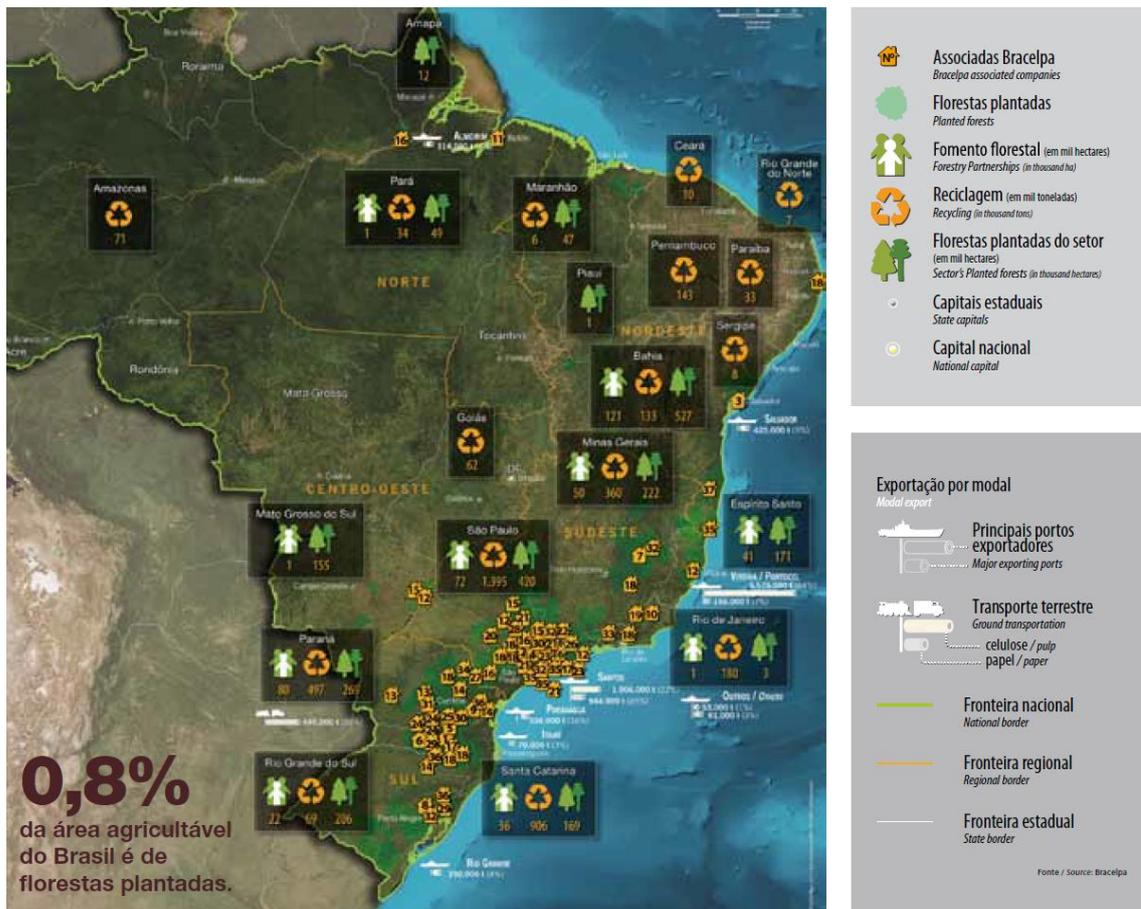
## 1 INTRODUÇÃO

O papel é um dos produtos mais consumidos no mundo e, há séculos, faz parte do cotidiano da humanidade. Como meio básico de educação, comunicação e informação para a maioria das pessoas, compõe livros, jornais, revistas, documentos e cartas e, assim, contribui para a transmissão do conhecimento. Serve, também, a um amplo espectro de usos comerciais e residenciais, a exemplo das caixas para transporte de mercadorias, das embalagens que protegem alimentos e centenas de outros produtos, das folhas para impressão por computadores a uma variedade de produtos para higiene e limpeza (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Acessado em 24 de ago. de 2018).

Com objetivo de abastecer esta demanda, dezenas de unidades (mais de 60) de produção se instalaram no país nos últimos 80 anos e o maior desafio desta indústria é se manter sustentável diante mudanças de cenário econômico e político que o país passou desde a instalação da primeira unidade de produção de papel e celulose (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 2010).

Ainda segundo a Associação Brasileira De Celulose E Papel (2010), a Figura 1 traz a distribuição das indústrias de papel e celulose no território nacional, a distribuição é concentrada nas sul e sudeste, porém a saturação nestas regiões está levando as indústrias a se expandirem fora deste eixo, sendo que das 5 unidades de produção mais recentes dos país, 4 estão distribuídas em MS, PA e BA.

Figura 1 – Distribuição das indústrias de papel e celulose brasileiras.



Fonte: Associação Brasileira de Celulose e Papel (2010).

Segundo Oliveira (2013), com a competitividade global onde a redução de custos de produção é fator primordial para a viabilização do negócio, a manutenção adquire valor estratégico. Reduzir custos passa diretamente por aumentar a eficácia. Os indicadores de Qualidade e Produtividade nos dão referências da eficácia, bem como nos permite analisar tendências, permitindo assim agir gerencialmente.

Antes, tratada como função de apoio ao processo produtivo, hoje a manutenção é uma variável que compõe a produção somada à operação e à engenharia. Em função dessa nova visão, o conceito de manutenção também têm se aperfeiçoado. No passado era definida como o reestabelecimento das condições originais dos equipamentos/sistemas, hoje se define como a garantia da disponibilidade da função dos equipamentos/sistemas com disponibilidade e confiabilidade, segurança e preservação do meio ambiente, sempre ao menor custo possível; ou ainda a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo supervisão, destinadas a manter ou restabelecer um item para um estado no qual possa desempenhar sua função requerida (OLIVEIRA, 2013).

Ainda segundo Oliveira (2013), é importante diferenciar indicadores de Qualidade de Ferramentas Gerenciais. Enquanto o primeiro é referencial para medir os resultados da função, o segundo auxilia na obtenção desses resultados. O CCQ (Círculo de Controle de Qualidade), TPM (Manutenção Preditiva Total), e MCC (Manutenção Centrada em Confiabilidade) representam algumas das ferramentas gerenciais.

Assim como todo setor industrial, a manutenção é um segmento que vem apresentando constantes alterações nos últimos anos. O acirrado mundo econômico atual e a globalização fazem com que as empresas busquem um alto nível de qualidade de seus produtos, com custos baixos e em tempo de produção cada vez menores. Além desse cenário globalizado, grandes alterações se deram devido ao nível de automação e tecnologia presente nos itens físicos (equipamentos, instalações), com projetos muito mais complexos e dinâmicos. Esse novo paradigma industrial tem afetado diretamente o setor de manutenção das empresas, mudando conceitos e criando uma nova visão de planejamento, execução e das responsabilidades cabíveis da manutenção (GARCIA, 2013).

No passado recente, de acordo com Kumar e Chaturvedi (2011), a estratégia de manutenção centrada na confiabilidade (MCC) ganhou mais adaptabilidade na indústria de processos devido à sua força na decisão dos requisitos de manutenção usando uma abordagem lógica estruturada para garantir altos níveis de confiabilidade em ótimo gasto de manutenção. Com referência a setores como aço, energia e petróleo, observa-se que 3% a 5% do faturamento são gastos em manutenção.

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é a realizar de um estudo sobre o efeito da análise de vibrações nos custos da confiabilidade dos equipamentos da linha de produção de papel e celulose, bem como ela pode suportar a manutenção preditiva da linha de produção.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO À MANUTENÇÃO

Segundo Quintella (2016), a manutenção é um setor que participa diretamente da busca pela excelência, tendo responsabilidade direta sobre a disponibilidade dos ativos, qualidade e segurança da produção, sendo já há algum tempo encarado com a merecida importância pelos gestores e considerado estratégico para se obter os melhores resultados produtivos e operacionais. Por meio de uma manutenção sistemática bem realizada, é possível prever e evitar falhas que poderiam causar paradas inesperadas, acidentes, danos ao ambiente e perda de qualidade do produto final.

Hoje, em um mundo globalizado e cada vez mais competitivo, a manutenção tem sido vista como uma função estratégica para as empresas, pois para permanecer no mercado as empresas precisam cada vez mais aumentar sua produtividade com a contínua redução de custos e, ao mesmo tempo, atendendo a padrões de qualidade cada vez mais rigorosos. Neste cenário, a manutenção passa por um processo inverso: antes vista como uma função geradora de custos para então ser vista como uma função estratégica de mercado (QUINTELLA, 2016).

Podemos entender manutenção como o conjunto de “cuidados técnicos” indispensáveis ao funcionamento regular e permanente de máquinas, equipamentos, ferramentas e instalações. Esses cuidados envolvem a conservação, adequação, a restauração, a substituição e a prevenção. De modo geral, a manutenção em uma empresa tem como objetivos:

- Manter equipamentos e máquinas em condições de pleno funcionamento para garantir a produção normal e a qualidade dos produtos.
- Prevenir prováveis falhas ou quebras dos elementos das máquinas.

No passado a manutenção era vista como um mal necessário que envolvia um certo custo fixo e no qual a má sorte tinha um lugar frequentemente. Hoje a tendência nas indústrias competitivas é aplicar na manutenção os mesmos métodos de tecnologia e de gerência que são usados com sucesso na operação da planta (SENAI, 2006).

Pitoli (2013) complementa que a manutenção é um conjunto de atividades aplicadas ao equipamento ou processo que visa garantir a continuidade de sua função dentro dos parâmetros de qualidade, disponibilidade, custos e segurança adequados. O processo de manutenção deve começar antes da aquisição do equipamento e prosseguir até que esse seja descartado, sendo que sua principal função é o prolongamento de sua vida útil, garantindo os

itens citamos acima. Os resultados desse processo serão melhores quanto maior for a eficiência da gestão de manutenção.

A manutenção vem ganhando muita importância nos últimos anos, principalmente pelo maior fluxo de informações, onde existe uma constante modificação nos cenários produtivos mundiais, fazendo com que os ganhos com a produtividade, por menores que sejam, são obrigatórios para sua sobrevivência (OHTA, 2013).

O Gerenciamento de Manutenção (GM) é importante para fábricas em geral, usinas de geração de eletricidade e sistemas de distribuição, operações aéreas, instalações para edifícios, estradas e pontes, e assim por diante. A falta de um GM efetivo certamente pesa sobre a performance financeira. Além disso, isso pode levar a riscos de segurança e perda de vidas humanas. Manutenção trata de eventos, que são muito incertos, de natureza irregular. É bastante dependente da experiência e competências humanas, e principalmente da automação. Sem uma abordagem completa e sistemática, dificilmente é possível realizar funções de manutenção de forma satisfatória (PRITIBHUSHAN, 2015).

A maior competição entre as empresas fazem com que seja preciso produzir com mais qualidade sem aumentar os custos. Através da maior produtividade e competitividade dos produtos, a produção mecanizada e automatizada vem garantindo à linha de produção um melhor produto, em grandes volumes a um custo cada vez mais reduzido. Esta mudança deve-se a máquinas mais potentes, mais velocidades e com custos maiores, onde só será possível este equipamento desempenharem seu papel quando tiverem o rendimento de suas funções básicas constantes sem afetar a segurança e o meio ambiente. Assim a qualidade de uma produção depende cada vez mais de um bom funcionamento dos equipamentos e de todas as instalações da produção, gerando um aumento significativo na tarefa da gestão industrial, resultando em uma busca intermitente na aplicação de novas tecnologias, metodologias e filosofias (OHTA, 2013).

Tradicionalmente, o planejamento de manutenção utiliza a experiência profissional do pessoal envolvido e as instruções contidas nos manuais de fabricantes do equipamento para determinar o momento ou condição de substituição ou manutenção de componentes ou equipamentos. No entanto, a experiência pode ser limitada e as instruções contidas nos manuais dos fabricantes não são sempre calçadas em bases de dados reais, pois não consideram as condições específicas de operação ao qual o equipamento estará submetido. Também porque alguns fabricantes de equipamentos no âmbito comercial emitem recomendações de intervalos de substituição para maximizar as vendas de peças de reposição

e/ou minimizar seu nível de responsabilidade. Deste modo, a coleta e análise de dados reais de confiabilidade são tarefas cruciais em instalações industriais (QUINTELLA, 2016).

Segundo a Abraman (Associação Brasileira de manutenção e gestão de ativos) em 2013, conforme mostra a distribuição da Tabela 1, a conservação e reparo de ativos das indústrias seguiram uma tendência de em sua maioria, intervenções preventivas, seguidas por corretivas e por preditivas, somente 13,77% se baseou em métodos não sensitivos.

Tabela 1 – Aplicação dos esforços de manutenção.

Aplicação dos Recursos na Manutenção (%)				
Ano	Manutenção Corretiva	Manutenção Preventiva	Manutenção Preditiva	Outros
2013	30,86	36,55	18,82	13,77
2011	27,40	37,17	18,51	16,92
2009	26,69	40,41	17,81	15,09
2007	25,61	38,78	17,09	18,51
2005	32,11	39,03	16,48	12,38
2003	29,98	35,49	17,76	16,77
2001	28,05	35,67	18,87	17,41
1999	27,85	35,84	17,17	19,14
1997	25,53	28,75	18,54	27,18
1995	32,80	35,00	18,64	13,56
Hh (serviços de manutenção) / Hh (total de trabalho)				

Fonte: Associação Brasileira de Manutenção (2013).

### 2.1.1 Manutenção Corretiva

De acordo com o Manual da SKF Reliability Systems (2004), este foi o primeiro tipo de manutenção existente. Nela o equipamento sofre intervenção somente em último caso, ou seja, quando não for mais possível utiliza-lo, ele é substituído ou recondicionado. Essa forma de manutenção é dispendiosa e muito prejudicial à produção, pois provoca parada inesperada. Não é mais usada na maioria dos processos de produção.

### 2.1.2 Manutenção Preventiva

É bem mais elaborada que a anterior. Baseia-se na vida útil dos elementos constituintes da máquina. A manutenção tem data pré-determinada. Essas paradas programadas permitem um controle eficiente em cada máquina, evitando quebras inesperadas. Contudo, durante a intervenção é comum substituir peças que ainda não esgotaram sua vida útil. Mesmo assim a substituição deve ser feita, pois as peças não resistiram até a próxima intervenção. Esse método é bem mais econômico que o anterior e mais confiável (SKF - Reliability Systems, 2004).

### **2.1.3 Manutenção Preditiva**

De acordo com a SKF - Reliability Systems (2004), a manutenção preditiva é a maneira mais eficaz e econômica de se fazer a manutenção e controle dos equipamentos. Ela permite acompanhar diariamente a situação da máquina. A intervenção é programada para cada máquina considerando a sua “saúde” em particular. Assim percebe-se que máquinas exatamente iguais, podem ter paradas programadas com intervalos de tempo diferentes.

O desperdício chega a zero, dependendo da complexidade do sistema de manutenção/acompanhamento implantado. Pois nesse, as peças são substituídas quando é realmente necessário. Sem, contudo, ocorrer paradas inesperadas. O controle fornecido pela manutenção preditiva representa a situação da máquina com muito mais precisão. Os métodos empregados para diagnosticar o desempenho e vida da máquina são muito mais confiáveis que os outros explicados até o momento. A análise de vibrações é o principal método empregado na manutenção preditiva (SKF - Reliability Systems, 2004).

Toda máquina vibra, mas nem toda vibração é normal ou necessária. Existem limites de vibração para cada máquina. Esses são determinados considerando:

- Geometria da máquina;
- Forma construtiva e de operação;
- Movimentos envolvidos no funcionamento da máquina;
- Tipo de esforços a que a máquina é submetida, entre outros.

Segundo o Manual da SKF Reliability Systems (2004), para a implantação da Manutenção Preditiva em Máquinas rotativas através de medida e análise de vibrações, é necessário estabelecer o seguinte:

- Aparelho de medição e registro das vibrações;
- Lista dos equipamentos a serem medidos com respectiva identificação e cadastramento no sistema;

- Levantamento de dados construtivos e operacionais dos equipamentos, tais como: rolamentos, número de dentes das engrenagens, rotação, potência, desenhos construtivos, etc.;
- Histórico de manutenção dos equipamentos;
- Escolha dos pontos de medição e sua identificação no sistema e na máquina;
- Grandezas a serem medidas para cada ponto;
- Níveis de alarme para cada ponto de medição;
- Periodicidade das medições;
- Programação dos pontos de coleta de dados;
- Informações e relatórios periódicos;

#### **2.1.4 Manutenção Centrada Em Confiabilidade**

De acordo com Quintella (2016), Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM, do inglês: Reability Centered Maintenance) é um método que oferece uma estratégia para consolidação de um programa otimizado de manutenção, incorporando um novo entendimento quanto aos modos pelos quais os equipamentos falham em cumprir suas funções, formando uma base de ligação lógica entre as práticas de manutenção com as causas de falhas. O RCM visa preservar a integridade da função dos Equipamentos, Sistemas e Componentes (ESCs) através de uma análise estruturada de dados e informações referentes às práticas de manutenção, de modo a garantir maior confiabilidade e disponibilidade dos ESCs, ou seja visa a Confiabilidade do sistema de produção.

A definição formal do RCM (MCC – Manutenção centrada na Confiabilidade) é: “Processo usado para determinar o que precisa ser feito para assegurar que qualquer ativo continue a atender as necessidades dos usuários, no seu contexto operacional atual”, e sua filosofia: “Não basta executar certo as tarefas de manutenção, é preciso executar certo as tarefas certas” (MOUBRAY, 1997).

O RCM é um tema muito atual, pois novos trabalhos são publicados diariamente e aplicados nas empresas por todo o mundo. É, ainda, um forte diferencial estratégico para a função manutenção dentro das empresas. Por ser um método que traz ganhos econômicos, sejam eles através da redução de custos de manutenção ou através de ganhos de produtividade, disponibilidade e confiabilidade dos ativos. Deste modo, o RCM ainda é atual por trazer vantagem competitiva real para as empresas (QUINTELLA, 2016).

Ainda de acordo com Quintella (2016), depois de implantado, o RCM é uma prática econômica, eficaz e eficiente de manutenção. É econômica, pois busca atingir uma melhor relação custo-benefício nas tarefas de manutenção. É eficaz, pois as tarefas de manutenção devem atuar na causa raiz das falhas funcionais previamente identificadas. E, é eficiente, pois a execução das tarefas de manutenção deve ser possível com o mínimo esforço e, também, eliminando esforços desnecessários. O processo de implantação do RCM na prática é muito dispendioso, pois:

- Exige grande alocação de recursos em horas de trabalho qualificado por longos períodos de tempo;
- É imprescindível que os departamentos da empresa tenham uma boa sinergia, principalmente as áreas de manutenção e operação, em níveis técnicos e de engenharia;
- E também exige um forte envolvimento e apoio das gerências e da alta direção da empresa, de modo a sedimentar a introdução de seus novos conceitos e de modo a mitigar ou prevenir possíveis embates culturais que normalmente surgem dentro das organizações.

Assim, podemos dar por compreendido qual a influência do RCM na engenharia de confiabilidade. Uma vez compreendido o conceito de RCM, passamos agora a entender como ele utilizado na indústria do Papel e Celulose, concentrando-se no estudo de vibrações dos equipamentos e seu ambiente para efeito prático de uma melhoria na confiabilidade de um processo.

## 2.2 TEORIA DA VIBRAÇÃO

### 2.2.1 Histórico Das Vibrações

De acordo com Newton Soeiro (2008), o desenvolvimento da teoria da vibração resultou dos avanços das ciências básicas das quais deriva: matemática e mecânica geral. A origem, em termos históricos, encontra-se nos antigos filósofos gregos do primeiro milênio antes de Cristo. O primeiro filósofo grego a se envolver com um problema de natureza vibratória foi Pitágoras de Samos (cerca de 570-497 AC). A partir da percepção de que havia uma certa harmonia entre os diversos sons produzidos pelos martelos em uma forjaria, Pitágoras estabeleceu um método racional de medir frequências sonoras (origem do diapasão) podendo ser considerado como o fundador da acústica, tendo realizado experiências com martelos, cordas, tubos e placas criando o primeiro laboratório de pesquisas em vibrações conhecido.

Por volta do ano de 132 DC acredita-se que ocorreu a construção de um sismógrafo na China, pelo cientista e matemático Zhang Heng, o qual teve como objetivo informar à corte antecipadamente quando ocorria um terremoto, indicando a direção da área atingida. Já nos primórdios da era moderna Galileu estabeleceu formalmente a relação entre o comprimento do pêndulo e o seu período de oscilação e, também, observou a ressonância entre dois corpos, conectados por algum meio de transferência de energia e sintonizados em uma mesma Frequência natural. (SOEIRO, 2008).

Ainda com Soeiro (2008), a maioria das atividades humanas envolve alguma forma de vibração. Nós ouvimos porque o tímpano vibra, nós vemos porque ondas luminosas se propagam. A respiração está associada à vibração dos pulmões, os batimentos cardíacos são movimentos vibratórios do coração, a fala se fundamenta na vibração das cordas vocais e os movimentos humanos envolvem oscilações de braços e pernas. Em muitos outros campos da atividade humana, fenômenos apresentam variáveis cujo comportamento é oscilatório (economia, biologia, química, física, etc.). No campo tecnológico, as aplicações de vibrações na engenharia são de grande importância nos tempos atuais. Projetos de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas, sistemas de controle, e outros, exigem que questões relacionadas a vibrações sejam levadas em conta.

### 2.2.2 Conceitos Básicos Sobre Vibração

Vibração ou oscilação é qualquer movimento que se repete, regular ou irregularmente, depois de um intervalo de tempo. Assim, para o perfeito entendimento deste tipo de movimento, torna-se necessário o estudo do movimento de oscilação de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio, bem como das forças e/ou momentos a ele associadas. Em engenharia estes movimentos ocorrem em elementos de máquinas e nas estruturas em geral, quando submetidas a ações dinâmicas (SOEIRO, 2008).

As vibrações podem ser classificadas das seguintes formas:

#### **A. Quanto à Existência ou Não de Excitação:**

**Vibrações Livres (ou naturais):** São causadas por condições iniciais de movimento, ou seja, deslocamento inicial e/ou velocidade inicial.

**Vibrações Forçadas:** São causadas por uma força ou torque externos; as oscilações persistem durante a aplicação dos mesmos e, uma vez cessadas essas excitações, o sistema entra em vibração livre.

#### **B. Quanto à Existência ou Não de Amortecimento:**

**Vibrações não Amortecidas:** não há perda de energia. Se a vibração for livre, não haverá diminuição da amplitude da vibração e o sistema vibrará indefinidamente. Se a vibração for forçada, a excitação reporá energia no sistema, podendo ocorrer até aumento da amplitude da vibração.

**Vibrações Amortecidas:** há perda de energia por atrito. Se a vibração for livre, haverá sempre diminuição da amplitude da vibração e o sistema tenderá a parar na posição de equilíbrio. Se a vibração for forçada, poderá haver ou não diminuição da amplitude da vibração, porque a excitação repõe energia no sistema.

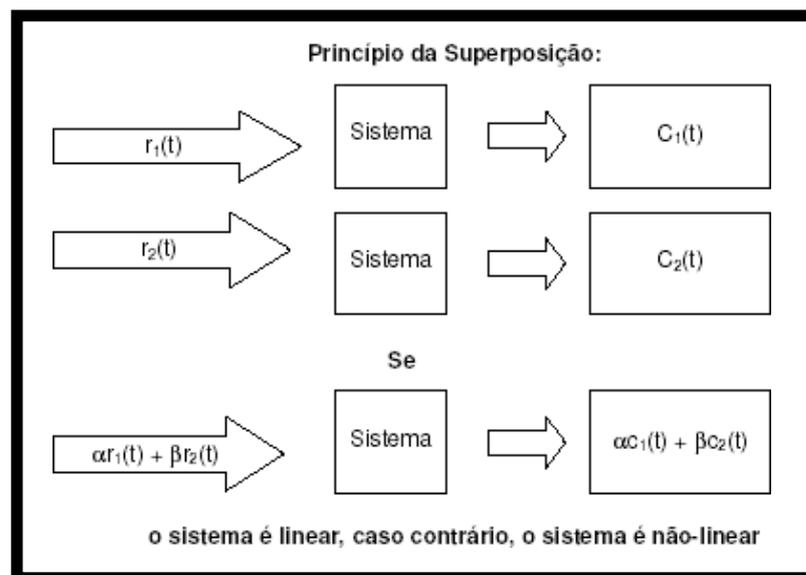
### C. Quanto à Linearidade:

**Vibrações Lineares:** obedecem ao Princípio da Superposição dos Efeitos, ou seja, existe uma proporcionalidade entre excitação e resposta.

**Vibrações Não-Lineares:** não obedecem ao Princípio da Superposição.

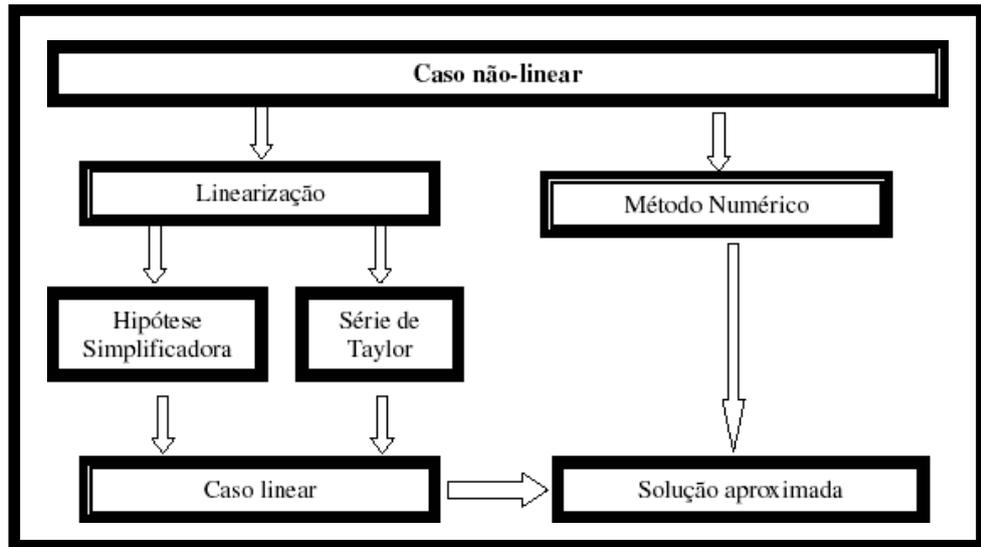
De acordo com Newton Soeiro (2008), no sistema linear existe proporcionalidade entre causa (excitação) e efeito (resposta). Se todos os componentes do sistema elástico comportarem-se linearmente, dizemos que a vibração é linear e o problema pode ser atacado com o procedimento indicado na Figura 2. No caso de vibração linear, o modelo matemático é composto por um sistema de equações diferenciais ordinárias lineares, EDOL's, de fácil solução analítica. Já no caso de vibração não-linear, o modelo matemático é composto por um sistema de EDO não-L, de difícil ou mesmo impossível solução analítica. No caso não-linear, podemos atacar o problema de acordo com o procedimento ilustrado no Quadro 1.

Figura 2 – Vibração Linear (Princípio da superposição dos efeitos).



Fonte: Soeiro (2008).

Quadro 1 - Procedimento de análise para o caso não-linear.



Fonte: Soeiro (2008).

Segundo o Manual da SKF Reliability Systems (2004), com a evolução da eletrônica, foi possível desenvolver equipamentos para coleta e análise de dados, visto que a conversão da vibração mecânica para um sinal eletrônico é o melhor caminho para análises de qualidade e com maior precisão. Os transdutores são o meio de conversão dos sinais mecânicos para sinais eletrônicos “entendíveis” por softwares de análises. O sinal de saída de um transdutor é proporcional a quão rápido (frequência) e a quão grande (amplitude) é o movimento. A frequência fornece qual é a fonte de vibração do equipamento e a amplitude qual é a sua severidade, tal afirmação é ilustrada no Quadro 2.

Quadro 2 – Amplitude e Frequência das vibrações.

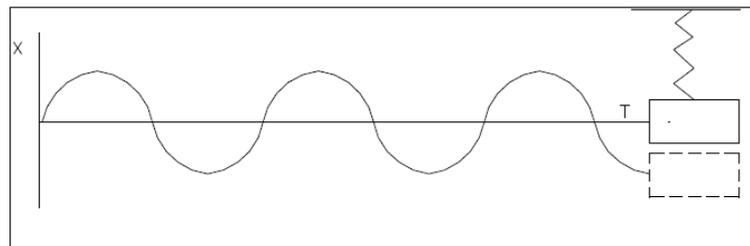


Fonte: Autoria própria.

Ainda de acordo com a SKF Reliability Systems (2004), alguns tipos de movimento são sempre presentes na dinâmica dos equipamentos girantes, tais como:

- **Movimento Periódico:** O Movimento oscilatório pode repetir-se regularmente, como no pêndulo de um relógio, ou apresentar irregularidade considerável, como em eventos da natureza (terremotos). Quando o movimento se repete a intervalos regulares de tempo (T) é denominado movimento periódico.
- **Movimento Harmônico:** A forma mais simples de movimento periódico é o movimento harmônico: Uma massa suspensa por uma mola e então deslocada de sua posição de equilíbrio irá oscilar em torno desse “equilíbrio” com um movimento harmônico simples. Se construirmos um gráfico que relaciona a distância da massa à posição de equilíbrio e o tempo, a curva obtida será uma senóide (Figura 3).

Figura 3 – Movimento Harmônico Simples.



Fonte: SKF - Reliability Systems (2004).

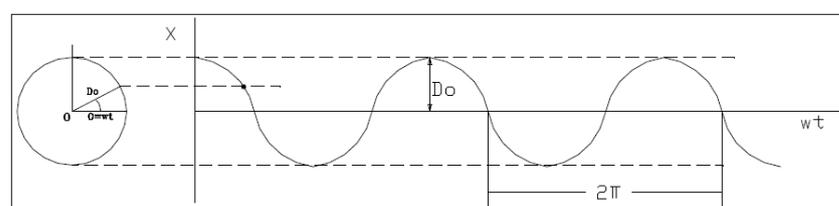
O movimento registrado na Figura 3 pode ser expresso pela equação 1:

$$x = A \times \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (1)$$

O movimento harmônico é muitas vezes representado como projeção numa linha reta de um ponto que se move numa circunferência à velocidade constante, como indicado na Figura 4. Designada por  $w$  a velocidade angular da linha  $op$ , o deslocamento  $x$  é expresso pela equação 2:

$$x = A \times \sin(wt) \quad (2)$$

Figura 4 – Movimento Harmônico Simples Projeção de um ponto.



Fonte: SKF - Reliability Systems (2004).

A grandeza  $\omega$  é definida como Frequência angular, e sua equação é dada pela equação 3:

$$\omega = \left( \frac{2\pi}{T} \right) = (2\pi f) \quad (3)$$

onde T é o período e f a frequência, vistos anteriormente.

Como foi mostrado na equação 3, a velocidade angular é expressa em radianos por segundo, uma vez que em um período, ou ciclo, a partícula em oscilação percorre uma circunferência completa, ou  $2\pi$  radianos, e o período é expresso em segundos.

- **Movimento Randômico:** Movimento randômico ocorre de uma maneira aleatória e contém todas as frequências em uma banda específica de frequência, podendo ser também chamado de ruído. Movimento randômico é cada movimento que não é repetitivo (Ex.: o estourar de pipocas dentro de uma panela).

### 2.2.3 Relação Entre Tempo E Frequência

A SKF Reliability Systems (2004), traz algumas definições da mecânica clássica em seu manual de treinamento para técnicos de inspeção e essas definições serão aqui explicitadas, tais como:

- **Tempo:** Tomemos como exemplo uma linha AC, cuja Frequência é de 60 ciclos por segundo, isto significa que a cada período de tempo de um segundo 60 ciclos estão presentes. Por outro lado fica inviável observar durante o período de um segundo e contar o número de ciclos. Nós podemos medir o período de tempo para um ciclo e calcular sua frequência. O período é o recíproco da frequência e vice-versa. Por exemplo, se 60 ciclos ocorrem em um segundo, dividindo um por 60 teremos o período para cada ciclo. Quando determinamos a frequência a partir de um período de tempo para um ciclo, dividimos um pelo período de tempo:

$$f = 1/T \quad (4)$$

Se 60 ciclos ocorrem em um segundo, então o período de tempo para um ciclo é de 0.0167 segundos.

$$f = 1/0.0167; f = 60 \text{ Hz}$$

Note que o período para um ciclo de todas as Frequências acima de 1Hz será menor que um segundo.

- **Frequência:** é o número de ciclos que ocorrem em período de tempo. Frequência é usualmente identificada por “ciclos por segundo” ou Hertz (Hz). A conversão de ciclos por segundo (Hz) para ciclos por minuto (CPM) é bastante simples e nos mostra o tempo em função da rotação do equipamento:  

$$\text{CPM} = \text{Hz} \times 60 \quad (5)$$
- **Amplitude de Medição:** Existem quatro maneiras diferentes de expressar o nível de amplitude de uma medição: Pico-a-Pico, Pico, RMS e Valor-Médio.

*Medição Pico-a-Pico:* mostra o nível de vibração do topo do pico positivo à base do pico negativo. Esta medição se refere à amplitude total de deslocamento do equipamento em relação a uma referência (zero). Indicando o percurso máximo da onda, este valor pode ser útil onde o deslocamento vibratório de uma parte da máquina é crítico para a tensão máxima ou onde a folga mecânica é fator limitante.

*Medição Pico:* mostra o nível de vibração do topo do pico positivo à linha de referência (zero). Este é um valor particularmente válido para a indicação de choques de curta duração, porém indica somente a ocorrência do pico, não levando em consideração o seu histórico no tempo da onda.

*Medição de Valor-Médio retificado:* representa  $(0.637 * \text{Pico})$  da onda senoidal. Este valor calculado é exato somente quando a onda medida é uma senóide pura. Este é um valor que leva em consideração o histórico no tempo da onda, mas na prática é de interesse limitado, por não estar relacionado diretamente com qualquer quantidade física útil.

*Medição RMS (raiz média quadrática):* é a verdadeira representante do valor eficaz da curva. O valor eficaz (RMS) pode ser calculado através de:

$$\cos 44^\circ \times (0 - \text{pico}) = 0,707 \times (0 - \text{pico}) \quad (6)$$

ou através da aquisição do RMS Verdadeiro – calculado pela raiz quadrada da média do somatório dos quadrados de pontos da curva. Portanto, o valor RMS é a medida de nível mais relevante, porque leva em consideração o histórico no tempo da onda e dá um valor de nível, o qual é diretamente relacionado à energia contida na vibração e, portanto, à capacidade destrutiva da mesma.

- **Fase da Vibração:** Informa-nos sobre a interação cinética entre os esforços atuantes e a reação física da máquina ou componente. Em máquinas rotativas temos que em um ponto de referência da máquina temos a atuação da

força num determinado instante  $t$  e, para toda ação existe uma reação igual e contrária.

Contudo, em função da impedância mecânica dos sistemas, estamos diante de um amortecimento da força de ação, o que torna a força de reação menor do que a de ação.

“Força de Reação = Força de Ação – Amortecimento”

A força de ação é rotacional e, quando ocorrer a reação, o ponto forçante não mais estará no ponto de referência. Esta diferença angular é chamada de fase do movimento.

Outro conceito importante de fase é quando temos mais de um evento vibratório com amplitudes ou frequências diferentes entre si. Dizemos que estas vibrações estão em fase, caso os ciclos se iniciem no mesmo angulo, num instante “ $t$ ” (SKF - Reliability Systems, 2004).

#### **2.2.4 Domínio Do Tempo E Domínio Da Frequência**

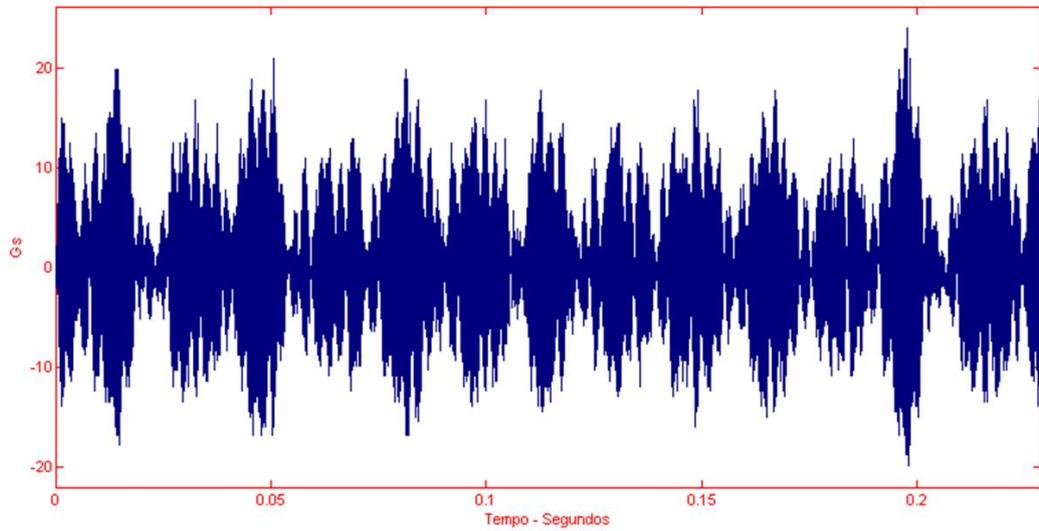
O domínio da Frequência é tudo ao redor de nós. Entretanto, algumas vezes nós chamamos Frequência por outros nomes. Por exemplo, luz é Frequência. A cor vermelha é Frequência. Som é Frequência. Nós não referimos a estes itens como Frequências, nós apenas as chamamos de luz cor e som. O corpo humano está limitado a um determinado “range” de Frequência (Ex.: conseguimos identificar sons entre 20 e 20.000 Hz - para pessoa jovem), indicando desta forma que nós não podemos identificar certos tipos de defeitos em máquinas, ou ainda que estes defeitos em máquinas podem estar mascarados por outros fora de nosso range de detecção (SKF - Reliability Systems, 2004).

Segundo a SKF - Reliability Systems (2004), analisando alguns destes problemas no domínio do tempo, poderemos diagnosticar alguns tipos de defeitos. Entretanto, os sinais no domínio do tempo para máquinas rotativas, se mostram bastante complexos vide exemplo na Gráfico 1, que é uma representação do sinal transmitido no domínio do tempo.

Para análise de vibração é necessário dominar diagnósticos no domínio do Tempo e da Frequência para uma análise completa e precisa.

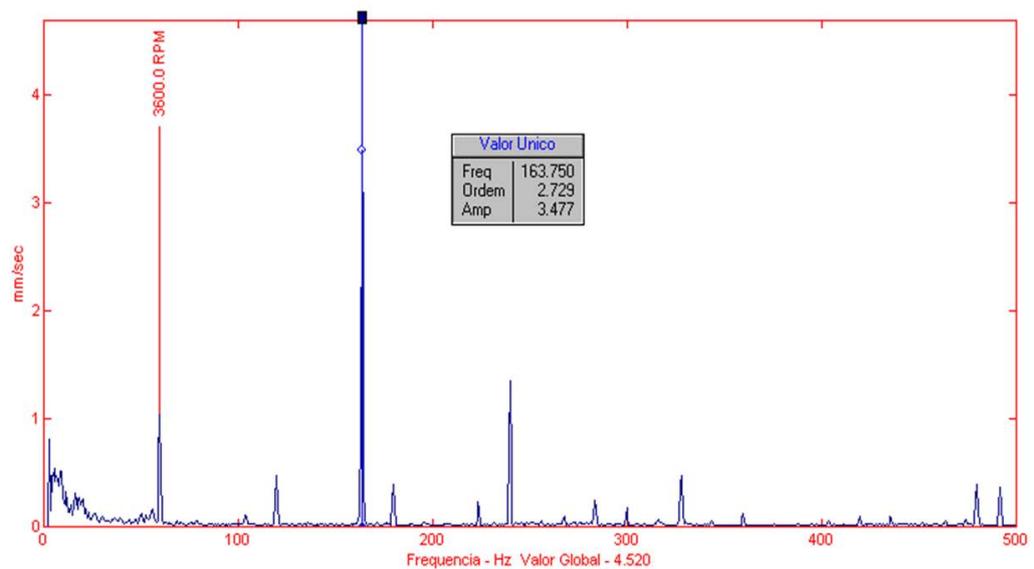
Para mover do domínio do tempo para o domínio da Frequência (espectro mostrado na Gráfico 2) é necessário aplicar a Transformada de Fourier ao sinal. Utilizado na transformação do sinal no tempo em espectro de Frequência, a tecnologia de Fourier permitiu implementar nos computadores um algoritmo com bastante precisão: a Transformada Rápida de Fourier (FFT do inglês, *Fast Fourier Transform*) (SKF - Reliability Systems, 2004).

Gráfico 1 – Vibração no domínio do Tempo



Fonte: SKF - Reliability Systems (2004).

Gráfico 2 – Vibração no domínio da Frequência



Fonte: SKF - Reliability Systems (2004).

### 2.3 MÉTODOS DE TEMPO-FREQUÊNCIA

De acordo com Braun (2002). Ewins (2002), Rao (2002), os princípios da análise de Frequência encontraram ampla aplicação em muitas áreas de análise de vibração. Usando estas técnicas, que representa um sinal no domínio do tempo como uma função da frequência.

Uma representação no domínio da frequência permite observar prontamente quais são as Frequências importantes dentro de um sinal. Uma tal representação fornece informação

incompleta quando o sinal em análise é não estacionário, isto é, quando o espectro do sinal varia em função do tempo. Uma representação mais completa de tais sinais é fornecida por métodos de tempo-frequência, que buscam representar a energia de um sinal em função do tempo e da Frequência simultaneamente, onde há, inevitavelmente uma análise matemática de transformação de domínios.

### 2.3.1 Introdução À Métodos De Transformação

Transformações matemáticas são ferramentas principais de disciplinas que lidam com sinais digitais e sistema. Análise (e síntese) nos complementos do domínio de transformação o do domínio do tempo, e muitas vezes tem específico vantagens (BRAUN, 2002; EWINS, 2002; RAO, 2002.)

A existência de transformações (diretas) e de seu inverso permite alternância entre os dois domínios. A informação em ambos domínios é, portanto, equivalente, mesmo se o tipo de apresentação é marcadamente diferente (BRAUN, 2002; EWINS, 2002; RAO, 2002.)

Ainda com Braun (2002), Ewins (2002), Rao (2002), a relação de transformação é aqui denotada por uma flecha dupla. Uma letra maiúscula (L para Laplace, Z para transformada-Z e F para Fourier) mostra a transformação em mãos, e um sobrescrito de  $^{-1}$ denota a transformada inversa. Letras maiúsculas serão usadas para transformações domínios e letras minúsculas para o domínio do tempo. Por exemplo, para a transformada de Laplace:

$$X(s) = L[x(t)] \quad (7.a)$$

$$x(t) = L^{-1}[X(s)] \quad (7.b)$$

$$x(t) \leftrightarrow X(s) \quad (7.c)$$

Algumas transformações são voltadas para sinais contínuos e sistemas, por exemplo as transformadas de Laplace e de Fourier; outros, como a transformada Z e as transformadas discreta de Fourier são voltadas para as discretas (BRAUN, 2002; EWINS, 2002; RAO, 2002.)

A dinâmica de parâmetros lineares e sistemas contínuos é modelada por equações diferenciais lineares, aquelas de sistemas discretos por equações diferenciais. A resposta de tais sistemas a um sinal de excitação é dada (com condições iniciais zero) pela convolução da entrada e pela resposta ao impulso do sistema. Uma propriedade importante dessas transformações diz respeito à operação da convolução: a transformação da convolução é igual ao produto das transformações. A aplicação da transformação resulta, então, em um conjunto de equações algébricas, em oposição às diferenciais ou diferenças. Solução analítica, em

seguida, exige a resolução de equações algébricas. Esta é uma das razões pelas quais os métodos de transformação prevalecem em muitos textos teoricamente orientados (BRAUN, 2002; EWINS, 2002; RAO, 2002.)

De acordo com Braun (2002), Ewins (2002), Rao (2002), outro aspecto é o da computabilidade. A possibilidade de calcular numericamente a transformada de Fourier através do eficiente algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT) praticamente revolucionou o processamento do sinal. Os métodos de Fourier são, portanto, centrais para a análise espectral e para as tarefas de identificação de sistemas na área de engenharia de vibração.

### 2.3.2 Análise De Fourier

Segundo Braun (2002), Ewins (2002), Rao (2002), o uso de métodos de Fourier para análise de sinais é uma das técnicas de processamento de sinais mais conhecidas. A base dos métodos de Fourier é o par de transformações:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-2\pi ift} dt \quad (8.a)$$

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{2\pi ift} df \quad (8.b)$$

onde  $x(t)$  é o sinal, nominalmente no domínio do tempo, e  $X(f)$  é a sua transformada de Fourier e  $f$  é a variável de frequência. A transformada de Fourier é uma operação linear, de modo que a transformada de Fourier da equação 9 é dado pela equação 10, como mostra:

$$c_1 a(t) + c_2 b(t) \quad (9)$$

$$c_1 A(f) + c_2 B(f) \quad (10)$$

onde  $A(f)$  e  $B(f)$  são as transformadas de Fourier de  $a(t)$  e  $b(t)$  respectivamente.

Em muitos casos, escolhe-se trabalhar, não com a transformada completa de Fourier, mas apenas para considerar sua magnitude quadrada, a qual aqui nos referimos como o espectro do sinal. (O termo espectro pode ter uma variedade de significados, mas aqui é tomado para representar  $|X(f)|^2$ .) Uma razão para se concentrar no espectro é porque o espectro é invariante para mudanças de tempo no sinal, de modo que o espectro de  $x(t-\tau)$  é idêntico ao espectro de  $x(t)$ . Essa invariância de deslocamento surge porque, ao se computar o espectro, a fase da transformada de Fourier é descartada e é nessa fase que se transmite informação sobre a localização temporal dos componentes do sinal (BRAUN, 2002; EWINS, 2002; RAO, 2002.)

De acordo com Braun (2002), Ewins (2002), Rao (2002), o espectro é suficiente para representar a distribuição de energia do sinal ao longo da Frequência, no sentido de que se pode expressar a energia na faixa de Frequência ( $f_1$ ;  $f_2$ ). Como na equação 11:

$$\int_{f_1}^{f_2} |X(f)|^2 df \quad (11)$$

O espectro é uma transformação bilinear, de modo que a transformação se relaciona com o sinal através de uma função quadrática. Assim, diferentemente da transformada de Fourier, o espectro não obedece a um princípio de superposição; especificamente, o espectro de  $x(t) = c_1.a(t) + c_2.b(t)$  que é dado por:

$$|X(f)|^2 = c_1^2|A(f)|^2 + c_2^2|B(f)|^2 + 2c_1c_2Re\{A(f)B(f)^*\} \quad (12)$$

onde o asterisco indica conjugação complexa. O terceiro termo do lado direito da equação 12 é um termo de interação que surge como consequência da operação de quadratura. Este termo de interação só será significativo se houver bandas de Frequência onde  $A(f)$  e  $B(f)$  são grandes (BRAUN, 2002; EWINS, 2002; RAO, 2002.)

O termo de interação será pequeno se os dois componentes ocuparem diferentes bandas de frequência. Em resumo, a transformada de Fourier, que é uma representação de sinal linear, contém informações sobre a localização dos componentes de sinal no tempo, codificados, predominantemente, em sua fase. É difícil interpretar diretamente esta informação de fase. O espectro, que é uma representação de sinal bilinear, não contém informações sobre a localização absoluta de um sinal, mas é facilmente interpretado (BRAUN, 2002; EWINS, 2002; RAO, 2002.)

Segundo Braun (2002), Ewins (2002), Rao (2002), objetivo dos métodos de tempo-frequência é construir representações de sinais que representem de forma concisa (não-estacionários) sinais, permitindo ao usuário identificar rapidamente quais componentes de Frequência estão presentes em um sinal em um determinado momento e como cada componente evolui com o tempo.

## 2.4 TÉCNICA DE ANÁLISE DE DADOS

Vários métodos foram aplicados com sucesso variável. A maioria dos métodos usados no diagnóstico de máquinas rotativas pode ser aplicada para o monitoramento do desgaste da mesma. Os principais problemas são devidos à mudança das condições de operação inerentes às máquinas operatrizes. Para superar esses problemas, técnicas de análise de reconhecimento

de padrões são usadas (redes neurais, técnicas de diagnóstico difuso) (BRAUN, 2002; EWINS, 2002; RAO, 2002.)

Ainda de acordo com Braun (2002), Ewins (2002), Rao (2002), as propriedades do sinal envolvem a resposta de estruturas (incluindo sensores) cujas propriedades dinâmicas não são fáceis de prever. Eles são excitados por forças periódicas (às vezes intermitentes como em moagem). Seu conteúdo espectral é, portanto, bastante complexo.

### 2.4.1 Análise De Espectro

Um espectro de vibração FFT (Fast Fourier Transform – “Transformada rápida de Fourier”) é uma ferramenta útil para análise de vibração de máquinas. Se existe um problema de maquinaria, os espectros de FFT fornecem informações para ajudar a determinar a origem e a causa do problema e, com tendências, por quanto tempo até o problema torna-se crítico (SVENSKA KULLAGERFA BRIKEN - SKF, 2008).

Ainda de acordo com a Svenska Kullagerfa Briken - SKF (2008), espectros de FFT nos permitem analisar as amplitudes de vibração em várias frequências componentes no espectro FFT. Desta forma, podemos identificar e rastrear a vibração que ocorre em frequências específicas. Como sabemos que problemas específicos de maquinário geram vibrações em frequências específicas, podemos usar essa informação para diagnosticar a causa da vibração excessiva.

O Gráfico 3, é um exemplo de um espectro de velocidade que contém velocidade de operação (em  $F = 2\ 700$  RPM ou 45 Hz), harmônicos de velocidade de operação (em  $F = 4\ 500$  RPM ou 75 Hz) e Frequências de defeito do rolamento (em  $F = \sim 31\ 000$  RPMs (516 Hz) e  $\sim 3$

De acordo com a Svenska Kullagerfa Briken - SKF (2008) há várias etapas a seguir como diretrizes para ajudar a alcançar um programa de monitoramento de vibração bem-sucedido. Segue-se uma lista geral destes passos usados na Indústria como base para este trabalho:

- 1) Recolha informações úteis - Veja, ouça e sinta a máquina para verificar a ressonância. Identifique quais medidas são necessárias (ponto e tipo de ponto). Realize testes adicionais se forem necessários mais dados.

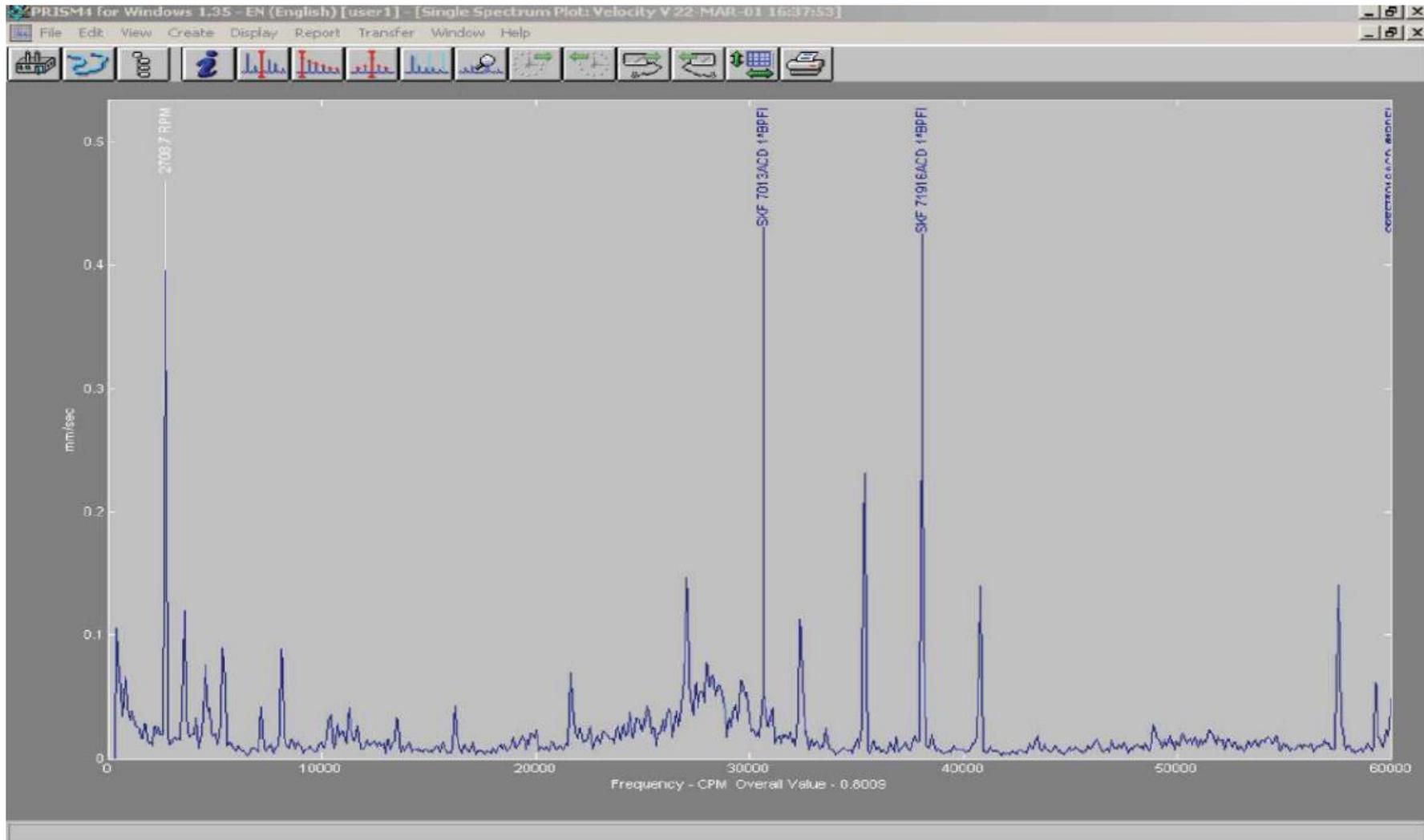
- 2) Analisar dados espectrais - Avaliar os valores globais e frequências específicas correspondentes a anomalias de maquinaria. Compare os valores globais em diferentes direções e medições atuais com dados históricos.

3) Monitoramento multiparâmetro - Use técnicas adicionais para concluir o tipo de falha. (Ferramentas de análise como medições de fase, análise de corrente, envelope de aceleração, análise de óleo e termografia podem ser usadas.)

4) Realizar análise de causa raiz (RCFA) - Para identificar as causas reais do problema e evitar que ocorra novamente.

5) Relatórios e ações de planejamento - Use um sistema de gerenciamento de manutenção de computadores (MWS) para corrigir o problema e tomar medidas para alcançar um plano. 9.000 RPM (650 Hz) marcadas com marcadores de sobreposição dos rolamentos).

Gráfico 3 – Espectro de velocidade do Rolamento.



Fonte: SKF - Reliability Systems (2004).

### 2.4.1.1 Recolha Informações Úteis

Ainda com a SKF - Reliability Systems (2004) temos:

**Colete informações úteis:** Ao conduzir um programa de vibração, certas informações preliminares são necessárias para realizar uma análise. A identificação de componentes, velocidade de operação, ambiente operacional e tipos de medições devem ser determinados inicialmente para avaliar o sistema como um todo.

**Identifique os componentes da máquina que podem causar vibração:** Antes que um espectro possa ser analisado, os componentes que causam a vibração dentro da máquina devem ser identificados. Por exemplo, você deve estar familiarizado com esses componentes principais:

- Se a máquina estiver conectada a um ventilador ou bomba, é importante saber o número de pás ou impulsores do ventilador.
- Se os rolamentos estiverem presentes, conheça o número de identificação do rolamento ou sua designação.
- Se a máquina contiver ou estiver acoplada a uma caixa de engrenagens, saiba o número de dentes e as velocidades do eixo.
- Se a máquina for acionada com correias, conheça os comprimentos das correias.

As informações acima ajudam a avaliar os componentes do espectro e ajudam a identificar a fonte de vibração. Determinar a velocidade de operação é o tarefa inicial. Existem vários métodos para ajudar a identificar esse parâmetro.

**Identifique a velocidade de operação:** Conhecer a velocidade de funcionamento da máquina é crítico ao analisar um espectro FFT. A velocidade de operação está relacionada à maioria dos componentes dentro do máquina e, portanto, ajuda a avaliar a saúde geral da máquina. Existem várias maneiras de determinar a velocidade de corrida:

- Leia a velocidade da instrumentação na máquina ou da instrumentação na sala de controle monitorando a máquina.
- Procurar picos no espectro a 1 800 ou 3 600 RPMs (1 500 e 3 000 RPM para países de 50 Hz) se a máquina for elétrica de indução motor, uma vez que os motores elétricos normalmente funcionam nessas velocidades. Se a máquina tiver velocidade variável, procure por picos no espectro próximos ao velocidade de operação da máquina durante o tempo em que os dados são capturados.
- O pico de velocidade de Operação de um FFT é "tipicamente" o primeiro pico significativo no espectro ao ler o espectro da esquerda para a direita. Olhe para

este pico e verifique os picos em duas vezes, três vezes, quatro vezes, etc. Múltiplos da frequência de velocidade de operação podem ser uma indicação de saúde da máquina.

**Outras considerações importantes:** Há muitas outras considerações a serem levadas em conta ao analisar uma máquina. Por exemplo: Se a máquina opera na mesma vizinhança que outra máquina, é importante saber a velocidade de operação de a máquina adjacente. Ocasionalmente, a vibração de uma máquina pode variar através da fundação ou estrutura e afetar os níveis de vibração em uma máquina adjacente.

Saiba se a máquina está montada na horizontal ou na vertical. A orientação de montagem afeta a resposta da máquina à vibração.

Saiba se a máquina está suspensa ou conectada a qualquer coisa que esteja pendurada. O suporte da máquina pode afetar a resposta da vibração sensor.

**Identifique o tipo de medição que produziu o espectro FFT:** Os programas de monitoramento de vibrações usam muitos tipos de medições para determinar a condição das máquinas. É importante determinar quais tipo de medição exige o necessário.

- O deslocamento, a velocidade, a aceleração, etc. foram medidos? Dependendo da informação necessária, uma medida particular deve ser adaptada para capturar os resultados apropriados.
- Como o sensor foi posicionado: horizontal, vertical, axial, na zona de carga, etc.? A resposta do sensor varia dependendo da montagem orientação.
- Os valores registrados anteriormente, FFTs ou gráficos de tendência geral estão disponíveis? A história pode ajudar a determinar o nível de vibração normal de uma máquina ou rapidamente uma máquina está degradando.

#### 2.4.1.2 Analisar Dados Espectrais

A Svenska Kullagerfa Briken - SKF (2008) complementa que:

**Analisar espectro:** Uma vez que a identificação e coleta de vibração da máquina esteja concluída, o processo de análise do espectro pode ser conduzido. Análise geralmente segue um processo de eliminação: eliminar os componentes ou problemas que não contribuem para o sistema. Dos componentes restantes, identificar qual é o fator contribuinte que afeta a saúde da máquina.

**Componentes comuns de espectros de vibração:** Os componentes mais comuns de um espectro de vibração devem ser analisados inicialmente para determinar se o espectro

indica problema possível. Compare os valores globais de medição com medições anteriores para determinar se houve um aumento significativo.

**Avaliar o status do alarme de um ponto de medição:** Se os alarmes gerais estiverem definidos corretamente, isso pode ajudar a indicar quando uma medição precisa avaliação posterior.

**Identifique o tipo de medição que indica um problema:** Por exemplo, sinais envelopados podem indicar danos ao rolamento ou dente da engrenagem danos, enquanto as medições de velocidade se relacionam mais com a saúde geral da máquina. Uma vez que uma avaliação da medição é realizada, Frequências específicas devem ser identificadas.

**Identifique e verifique as frequências de falha suspeitas:** Os espectros podem produzir picos nas frequências de falha identificadas. Esses picos podem ou não representar a falha indicada. Procurando por harmônicos Da Frequência de falta, informações adicionais podem ser avaliadas se as Frequências geradas são uma indicação da falha. Para exemplo:

- Se um pico aparece na frequência de falha fundamental e outro pico aparece duas vezes (2x) a falha fundamental, é um indicação muito forte de que a falha é real.
- Se nenhum pico aparece na frequência de falha fundamental, mas os picos estão presentes em dois, três e talvez quatro vezes a falha fundamental Frequência, há uma forte indicação de que a falha é válida.
- A identificação de quaisquer harmônicos de velocidade de operação (2x, 3x, etc.) ajuda a determinar se uma falha está presente.

Uma vez que a fonte de vibração é determinada, o nível de severidade deve ser avaliado para avaliar se uma ação corretiva deve ser tomada.

**Determinar a gravidade da falha:** Grande importância deve ser dada à determinação da gravidade de uma falha em particular. Alguns componentes de uma máquina podem vibrar muito altos níveis e ainda estar operando dentro de limites aceitáveis. Outros componentes podem estar vibrando em níveis muito baixos e estar fora do aceitável limites. Assim, a amplitude é relativa, portanto, todo o sistema deve ser avaliado, não apenas a amplitude.

- Compare a amplitude com leituras passadas realizadas durante a operação sob as mesmas condições consistentes para determinar a gravidade.
- Compare a amplitude de uma leitura particular com o mesmo tipo de leitura de uma máquina similar. Uma leitura mais alta que o normal em um das máquinas pode indicar um problema nessa máquina em particular.

- Obter histórico anterior na máquina para ajudar a identificar os vários níveis em que a máquina operou e ajuda na avaliação da máquina saúde em seu estado atual.
- Determine se uma medida de base (ou seja, uma medida tomada na instalação de uma máquina nova ou recondicionada) foi ocupado. Nesse caso, compare a nova leitura com a leitura da linha de base para ajudar a indicar a gravidade da vibração.

Depois que as informações são coletadas e os componentes são identificados, você pode começar a usar os espectros coletados para diagnosticar problemas de maquinário. As seções a seguir ajudam a avaliar problemas comuns de maquinário e identificar suas causas e efeitos associados. Além disso, exemplos de Os espectros resultantes são incluídos para usar como modelos ao identificar esses problemas comuns. Questões como desalinhamento, desequilíbrio, frouxidão, eixos dobrados e defeitos de rolamento são discutidos.

### 3 ESTUDO DE CASO

#### 3.1 SISTEMA DE GESTÃO DA MANUFATURA - GMS (GLOBAL MANUFACTURING SYSTEM)

O Global Manufacturing System (GMS) da International Paper (IP) é um sistema de gerenciamento integrado que consiste em cinco elementos-chave de fabricação:

- EHS
- Pessoas
- Redução de Custos
- Capital
- Confiabilidade

Cada um desses elementos é dividido em subelementos. Os subelementos são uma compilação de sistemas universais comprovados e melhores práticas que definem como ser bem-sucedido no respectivo elemento ao qual se enquadram. Essas práticas recomendadas comprovadas foram derivadas de operações de unidades diversas da IP, bem como das muitas operações que a IP adquiriu e representam um conjunto de padrões destinados a promover melhorias contínuas, deliberadas e sustentáveis em toda a empresa. O principal objetivo do GMS é permitir que o IP se torne uma das melhores empresas de manufatura do mundo.

Quadro 3 – Elementos do GMS

	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ EHS (dos inglês <i>Environmental, Health and Safety</i> – Saúde, Meio Ambiente e Segurança) – Elemento que é responsável por fornecer diretrizes de Saúde, Meio Ambiente e Segurança;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ PEOPLE (Pessoas) – Elemento responsável por Recursos Humanos;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ COST REDUCTION (Redução de Custos) –Elemento que garante um processo contínuo e integrado que é atualizado anualmente através do plano de instalação da fábrica, plano estratégico e orçamento para a sustentabilidade financeira da companhia;</li> </ul>

	<p>➤ CAPITAL – Elemento responsável por gerir projetos de investimento da International Paper.</p>
	<p>➤ RELIABILITY- Elemento fundamental e foco deste trabalho, responsável por garantir a confiabilidade da fábrica.</p>

Fonte: Autoria própria.

A Figura 5 é uma esquematização dos elementos do GMS e como ele se encaixa no sistema de melhoria continua da empresa. *Manufacturing excellence* é o do inglês para excelência em manufatura, que é responsável pelo suporte na produção. *Integrated management system* também do inglês para Sistema integrado de gestão, ou seja, visa garantir que a alta gestão da empresa se conecte com todos os nível de atuação. E *Leadership IP way forward* é o termo em inglês para Modo IP de liderança.

Figura 5 – Estrutura do GMS



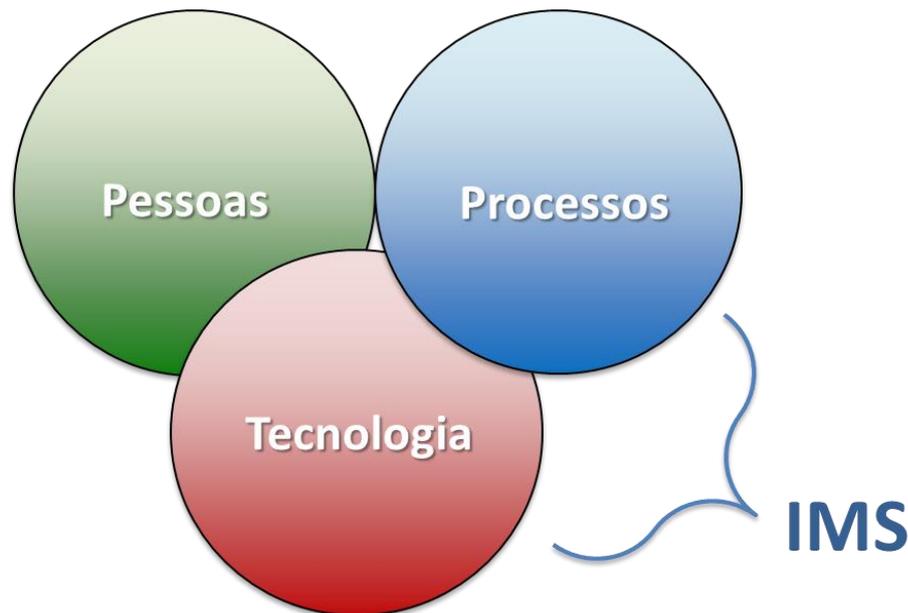
Fonte: International Paper (2018).

O IMS (do inglês *Integrated Management System* – “Sistema integrado de Gestão”) é o fluxo de trabalho necessário para sustentar de forma sustentável a revisão, implementação e melhoria contínua de todos os subelementos em nossos locais de produção. Os processos e procedimentos do IMS garantem a viabilidade contínua dos subelementos do GMS, fornecendo:

- Estrutura de gerenciamento de documentos;
- Tarefas e atividades do subelementos necessárias para sustentar o desempenho e impulsionar a melhoria;
- Ferramentas de geração de relatórios para empresas e fábricas;
- Indicadores e métricas corporativas padrão.

O IMS, ilustrado na Figura 6 é projetado para integrar-se à vida útil diária de produção usando estruturas e sistemas corporativos conhecidos. Este não é um trabalho adicional; as tarefas no IMS são projetadas para suportar os esforços que as fábricas já estão fazendo em direção a cada subelementos.

Figura 6 – Ilustração IMS



Fonte: Autoria própria.

O objetivo de apresentar, de forma simplificada o GMS, é a compreensão da sistemática adotada para a gestão da companhia e como as informações são geridas e direcionada. Assim o Elemento de Confiabilidade será o fornecedor de informação e diretrizes para a manutenção da empresa, doravante este trabalho.

### 3.1.1 Elemento De Confiabilidade (Reliability – Reli)

O elemento de Confiabilidade dentro do GMS é estritamente baseado na engenharia. Ele é responsável por cobrir os campos de gestão de dados, manutenção, processos de produção e organização estrutural da indústria. Assim como o todos os outro elementos do GMS, a Confiabilidade apresenta nove subelementos ao todo. São eles:

- A. RELI-01: Paradas Anuais (Annual Outage - AO).
- B. RELI-02: Cuidados com Equipamentos (Equipment Care - EC).
- C. RELI-03: Preservação de Fábrica (Facility Preservation - FP).
- D. RELI-04: Lubrificação (Lubrication - LUB).
- E. RELI-05: Sistema de Produção em Manufatura (Manufacturing Work Systems – MWS).
- F. RELI-06: Design de Confiabilidade Organizacional (Reliability Organizational Design – ROD).
- G. RELI-07: Práticas de Precisão (Precision Practices – PP).
- H. RELI-08: Análise de Causa Raíz de Falhas (Root Cause Failure Analysis – RCFA).
- I. RELI-09: Certificação de Confiabilidade (Reliability Certification – RC).

Para melhor compreensão do trabalho, a seguir há uma breve descrição sobre a definição, objetivo e propósito de cada elemento do GMS.

#### 3.1.1.1 Paradas Anuais (AO)

O termo “Parada” no ambiente fabril de celulose e papel é usado para um trabalho que requer que uma ou mais linhas de produção ou áreas sejam desligadas, possivelmente por vários horas ou dias.

No Manual do GMS é possível encontrar 3 tipos paradas:

1. As Paradas mensais (Routine outages - RO): de rotina geralmente envolvem apenas uma linha de produção ou área e têm menos de 24 horas de duração.
2. As Grandes Paradas (Major Outage – MO): envolvem várias linhas ou áreas de produção e têm duração maior que 24 horas. As Paradas Anuais (Annual Outages – AO) estão incluídas neste grupo.
3. Paradas Totais da Fábrica (Total mill outages - TO) - são indisponibilidades nas quais todas as linhas / áreas de produção são desligadas - uma parada da fábrica

de frio também terá todas as instalações externas desconectadas, as TOs são muito incomuns.

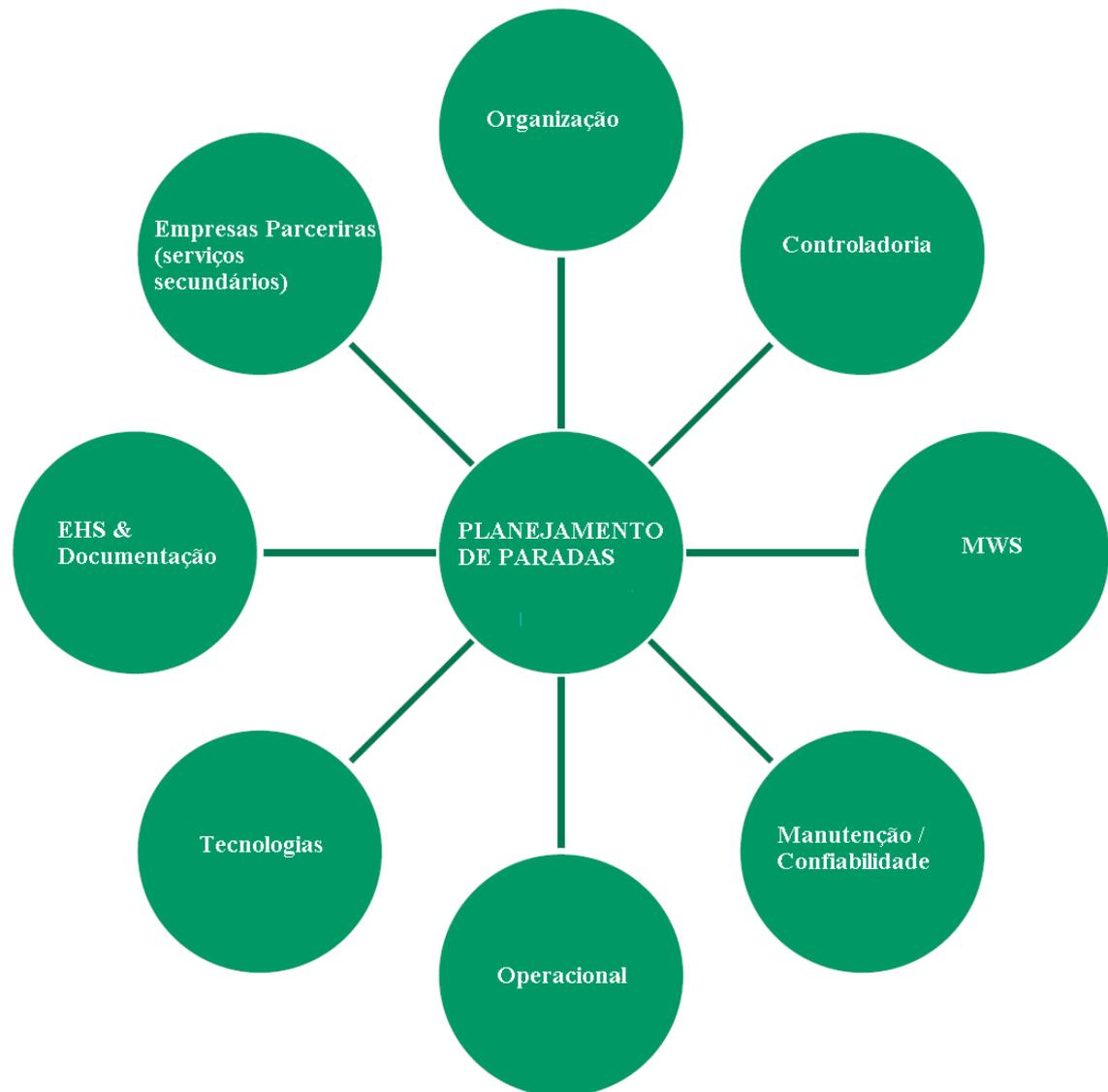
O elemento de Paradas Anuais do GMS têm como objetivo:

- Eliminar o tempo de parada não programado.
- Minimizar o tempo de parada anual total.
- Completar o trabalho de parada dentro do prazo alocado por meio de planejamento adequado, programação e coordenação de recursos, equipamentos e materiais.

De maneira geral, é razoável dizer que o Manual AO do GMS é focado em integrar todas as áreas envolvidas em uma Parada para que se planeje com segurança e precisão os trabalhos de manutenção, operação, tecnologia e qualquer oportunidade estratégica definida.

A Figura 7 ilustra o parágrafo acima.

Figura 7 - Planejamento da Parada Anual



Fonte: International Paper (2018).

### 3.1.1.2 Cuidados Com Equipamentos (EC)

Alguns subelementos estão fraccionados para melhor distribuição das atribuições de cada pessoal envolvida na melhoria da confiabilidade. No caso do EC, há 3 tópicos de redistribuição; Cuidados Básicos (Basic Care - BC), Manutenção preditiva (PdM) e Manutenção preventiva (PM).

#### 3.1.1.2.1 Cuidados Básicos (BC)

DEFINIÇÃO:

O Basic Care, assim será referenciado o elemento Cuidados Básicos com Equipamentos, é a abordagem sistemática para limpar, inspecionar e ajustar o equipamento do processo, operando o pessoal com frequência, para garantir a operação adequada do equipamento e a detecção antecipada de defeitos. A Assistência Básica Efetiva detectará e corrigirá defeitos antes que eles se tornem falhas.

A realização de reparos no equipamento antes da falha resulta em melhor disponibilidade do processo, melhor aceitação de qualidade e redução dos custos de reparo.

OBJETIVO:

Assim pode-se colocar o objetivo do RELI-02 como sendo uma forma de usar a inspeção baseada em tempo, usando inspeção de ferramenta sensorial e básica, para garantir que o equipamento atenda ou exceda as expectativas de vida útil e desempenho especificadas com zero interrupções não programadas. Isso é feito encontrando defeitos antes que eles possam causar uma falha. Aumentar o nível de envolvimento e habilidade dos colaboradores responsáveis por cuidar dos equipamentos.

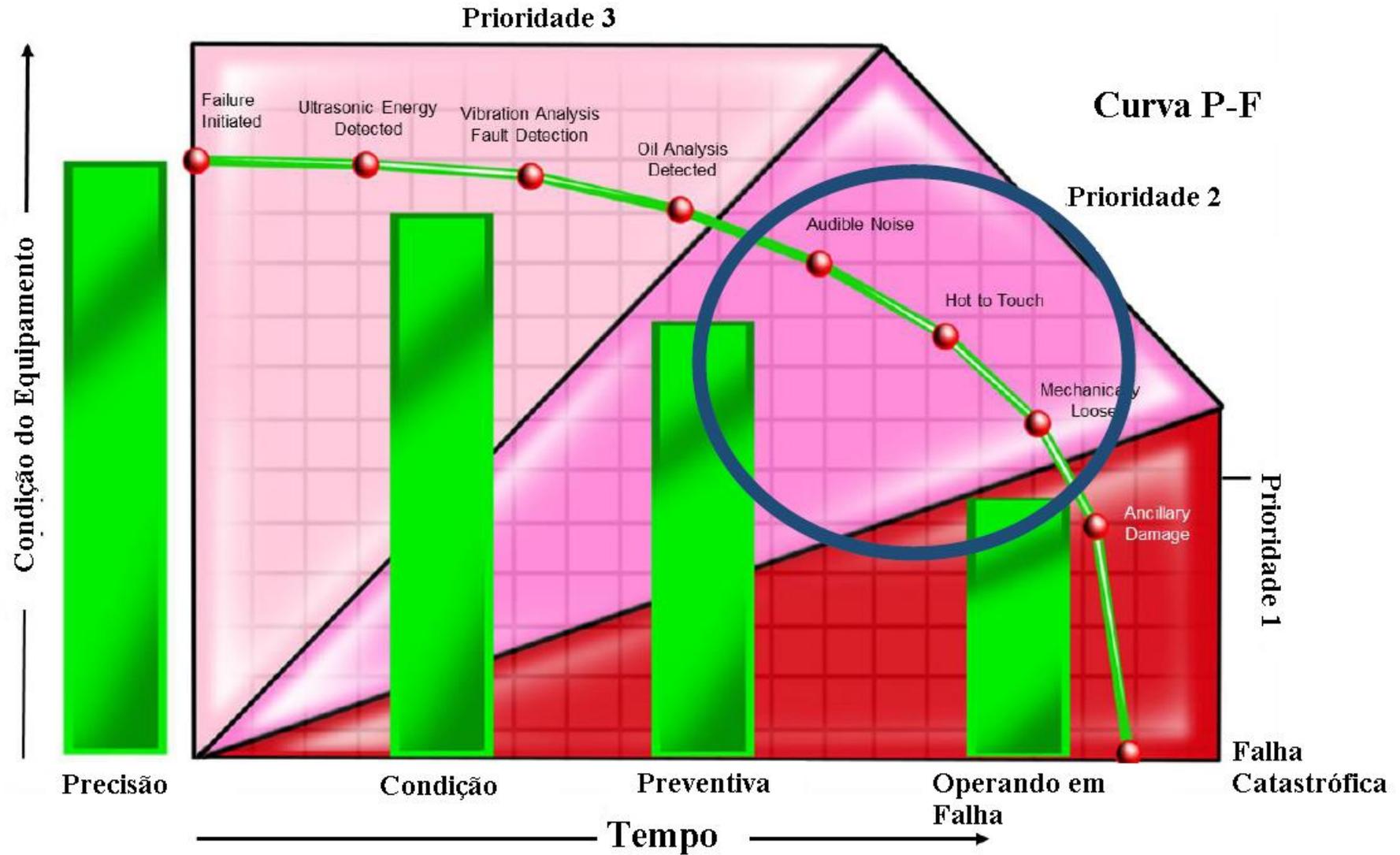
PROPÓSITO:

O Basic Care é um elemento essencial na confiabilidade geral do processo. Engaja os funcionários da produção operacional na realização de inspeções e reparos nos equipamentos, antes da falha. Isso resulta em melhor disponibilidade do processo e redução dos custos de reparo. O Basic Care, juntamente com os princípios de Lubrificação, Manutenção Preventiva, Manutenção Preditiva e Gerenciamento de Operações (outros subelementos da Confiabilidade GMS), é usado para reduzir todas as falhas de processo, não programadas, do equipamento.

A sistemática de atuação do Basic Care é puramente de inspecionar os equipamentos com base no histórico e na criticidade do mesmo, para garantir o funcionamento ideal do processo.

A Figura 8 ilustra a análise que é feita na criação, revisão ou extinção de uma rota de inspeção. No eixo Y temos a condição do equipamento que vai requerer diferentes tipos de manutenção, eixo X, a medida que vai se reduzindo. O Basic Care atua para que se evite a mudança da condição do equipamento, passando de uma prioridade 3 (Priority 3) para prioridade 1 (Priority 1).

Figura 8 - Sistemática de atuação do Basic Care.



Fonte: International Paper (2018).

### 3.1.1.2.2 Manutenção Preditiva (PDM)

#### DEFINIÇÃO:

Detectar falhas no equipamento usando técnicas de medição não invasivas e analisando os dados para prever quando a falha ocorrerá; Identificar e caracterizar problemas de equipamentos em um estágio inicial de falha, utilizando tecnologias especializadas de medição altamente sensíveis. A detecção será usada para colocar o trabalho no backlog para ação corretiva planejada e proativa.

A PdM inclui, mas não se limita a, monitoramento e análise de vibração, pesquisas de infravermelho, exame não destrutivo (NDE) e detecção de emissões ultrassônicas.

#### OBJETIVO:

Encontrar e corrigir defeitos menores usando a estrutura do MWS (quinto elemento do GMS) para planejar e programar reparos não emergenciais antes da falha; Permitir a transição de manutenção baseada em tempo para uma manutenção baseada em condições mais econômica, quando aplicável.

#### PROPÓSITO:

Manutenção Preditiva (PdM) é um elemento essencial no esforço da International Paper para melhorar a confiabilidade geral do processo, identificando defeitos antes de sua falha catastrófica.

A ferramenta fundamental para prever falhas de equipamentos rotativos é a análise de vibrações, mas também inclui outras tecnologias, como termografia, testes ultrassônicos e testes acústicos. Fazer reparos planejados no equipamento, antes da falha, resulta em melhor disponibilidade do processo e redução dos custos de reparo. Manutenção Preditiva (PdM), juntamente com Basic Care, Cuidados de Lubrificação, Manutenção Preventiva (PM) e princípios de gerenciamento de operações reduzirão as falhas de processo e o tempo de inatividade do equipamento.

A abordagem econômica da confiabilidade reconhece que todos os equipamentos em uma instalação não são de igual importância - para o processo ou para as necessidades e segurança das instalações. Concentrar-se na confiabilidade do equipamento significa reconhecer que o projeto e as operações do equipamento são diferentes. Cada equipamento terá uma probabilidade diferente de sofrer uma falha de degradação. Uma abordagem focada na confiabilidade significará estruturar um programa de manutenção com base no entendimento das necessidades e prioridades do equipamento, bem como recursos financeiros

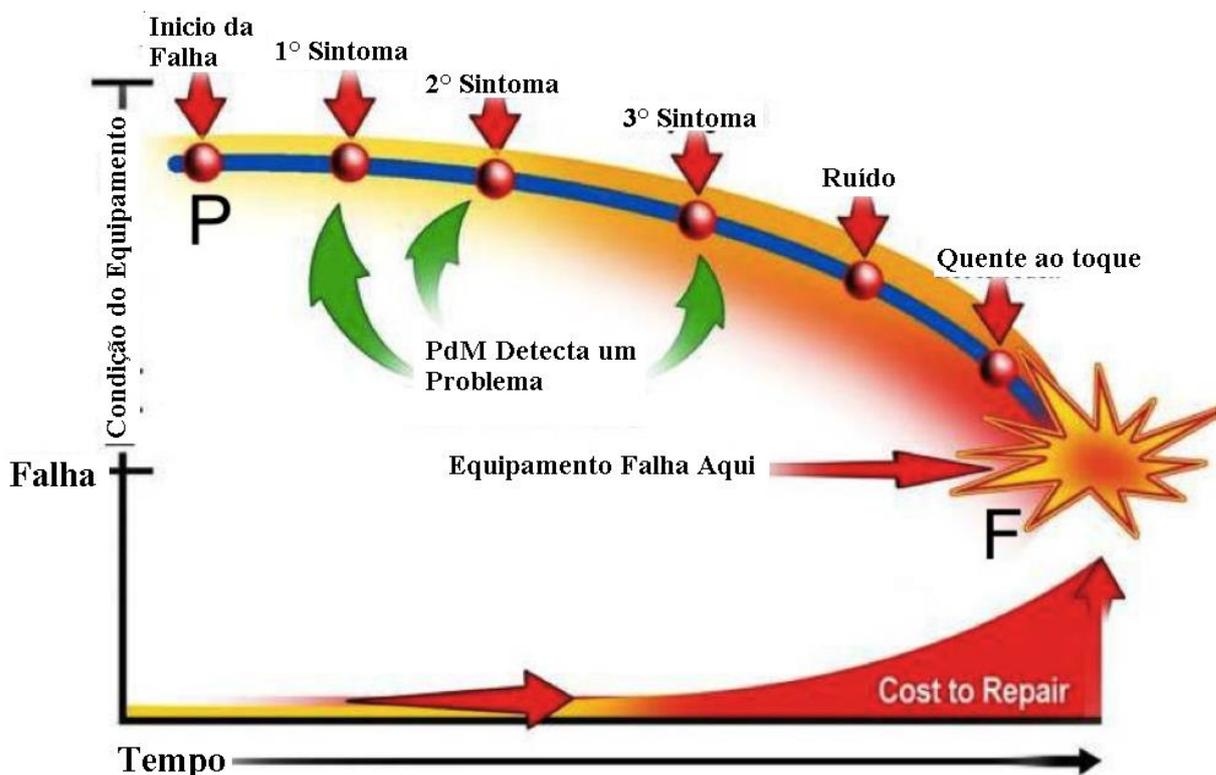
e de pessoal limitados, para planejar atividades de modo que a manutenção do equipamento seja priorizada enquanto as operações são otimizadas.

A manutenção preditiva utiliza monitoramento e análise de condições. A coleta de dados é automatizada ou usa tecnologia para auxiliar na coleta; captadores em rede ou, possivelmente, identificação de equipamentos e armazenamento de dados baseados em chip magnético / código de barras / RF (radiofrequência). Sistemas eletrônicos de coleta de dados são usados para solicitar a ordem de inspeção e para registrar defeitos identificados no sistema computadorizado de gerenciamento de manutenção, no caso da International Paper o SAP é esta ferramenta. Certas ordens de serviço pré-planejadas são geradas como resultado de defeitos encontrados.

O monitoramento de condições e PdM não é um padrão estático. As rotas e atividades precisam de ajustes contínuos para refletir as condições operacionais atuais e as novas aplicações tecnológicas.

A Curva P-F (vista abaixo na Figura 9) é uma representação visual de uma progressão de falha típica. A intenção do PdM é identificar o defeito o mais próximo possível do ponto P, permitindo assim que o processo de MWS tome seu curso natural e elimine o defeito antes que as chances de falha aumentem drasticamente.

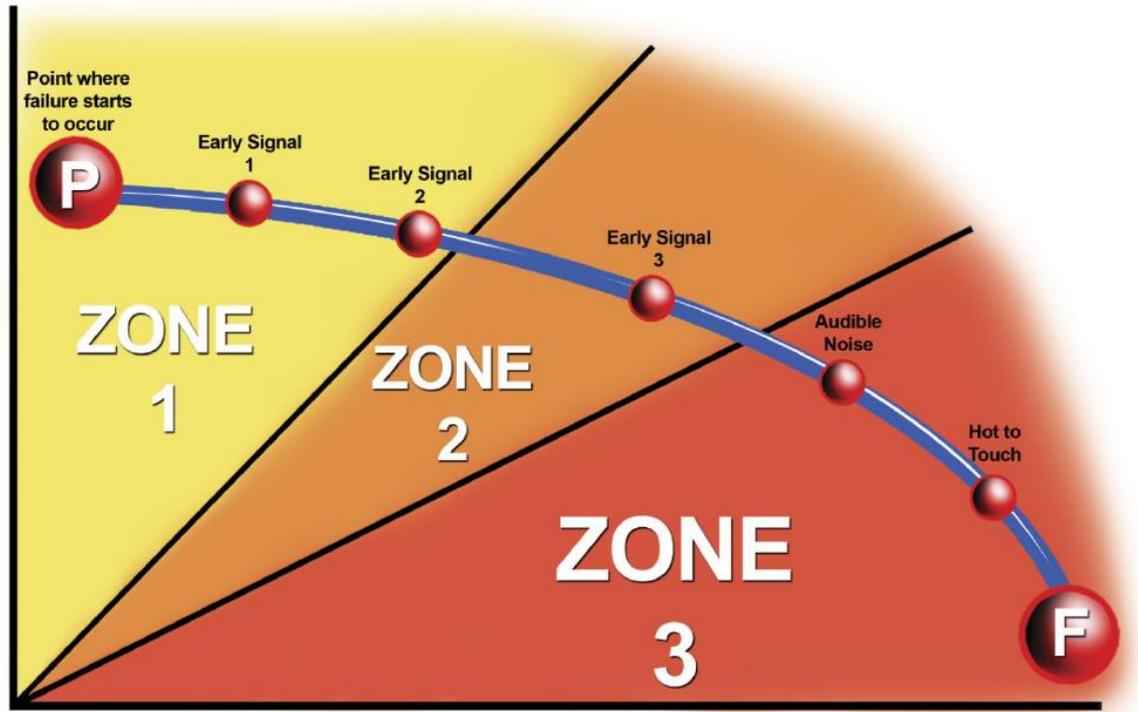
Figura 9 – Curva P-F



Fonte: International Paper (2018).

Observe a curva P-F com zonas na Figura 10, o design do programa PdM deve ser para identificar o defeito na Zona 1 e iniciar o processo MWS. O defeito é eliminado na Zona 2 depois que o trabalho foi planejado, programado, executado e validado. Assim, o defeito nunca evoluiu para a Zona 1, onde as chances aumentadas de falha e os custos maiores de reparo e paralisação provavelmente teriam sido incorridos.

Figura 10 – Curva P-F com as Zonas



Fonte: International Paper (2018).

### 3.1.1.2.3 Manutenção Preventiva (PM)

#### DEFINIÇÃO:

A Manutenção Preventiva (PM), do Equipment Care, é a abordagem para garantir a integridade dos ativos, inspecionando a condição do ativo, substituindo e ajustando itens de desgaste em um cronograma baseado em intervalos de tempo e evitando e mitigando o efeito das falhas aleatórias. A PM é executado em intervalos estabelecidos, refletindo os requisitos de manutenção do equipamento e levando em consideração o tempo de desenvolvimento de falhas ou a vida útil, conforme estimado ou estabelecido historicamente.

#### OBJETIVO:

Usar serviços e inspeções com base em intervalo para garantir que o equipamento atenda ou exceda as expectativas de vida útil e desempenho especificadas com zero

interrupções não programadas. Isso é feito substituindo peças e encontrando defeitos antes que eles possam causar uma falha. Durante a tarefa ou atividade de gerenciamento de projetos, os defeitos são corrigidos conforme as habilidades e oportunidades permitem; os defeitos que não podem ser corrigidos imediatamente são inseridos no backlog de trabalho pelo inspetor.

PROPÓSITO:

Os reparos são mais econômicos e o tempo de inatividade é minimizado quando uma ação corretiva é executada antes da falha. A substituição regular de itens de desgaste no equipamento de processo otimiza sua vida útil e prolonga sua condição de projeto original em níveis aceitáveis. A manutenção preventiva regular elimina o tempo de inatividade não programado e fornece um meio, durante a manutenção de rotina, para encontrar defeitos no equipamento antes que os defeitos possam causar uma falha. Além de eliminar o tempo de inatividade não programado, um programa robusto de PM também reduzirá o tempo de inatividade programado.

O conceito de compartilhar a responsabilidade pela manutenção rotineira de equipamentos entre a manutenção e o pessoal operacional é fundamental para maximizar a eficácia e a eficiência da MP. Manutenção preventiva é definida especificamente como atividades de intervalo e substituições; no entanto, o técnico de PM também deve usar detecção e observação de bom senso humano durante as rodadas. Além disso, a pessoa que executa tarefas de gerenciamento de projetos pode ter outras tarefas, preditivas ou de lubrificação a serem executadas. Especialmente à medida que os programas de cuidados com equipamentos passam do desenvolvimento para o de classe mundial, os deveres de cada classificação de cuidado podem se mesclar e ser realizados por indivíduos interfuncionais.

Após consolidar o que foi dito acima, podemos dizer que a PM consiste em quatro atividades principais:

1. Substitua os itens de desgaste nas frequências estabelecidas.
2. Recondicione e ajuste o equipamento nas frequências estabelecidas.
3. Encontre e corrija defeitos menores durante a execução da MP.
4. Registre os defeitos não reparados para revisão e atribuição de prioridade.

A Curva P-F (Figura 9 – Curva P-F) é uma representação visual de uma progressão de falha típica. A intenção do PM é identificar o defeito o mais próximo possível do ponto P, permitindo assim que o processo de MWS tome seu curso natural e elimine o defeito antes que as chances de falha aumentem drasticamente.

Observe a curva P-F com zonas (Figura 10 – Curva P-F com as Zonas), o design do programa de PM deve ser identificar o defeito na Zona 1 e iniciar o processo MWS. O defeito é eliminado na Zona 2 depois que o trabalho foi planejado, programado, executado e validado. Assim, o defeito nunca evoluiu para a Zona 1, onde as chances aumentadas de falha e os custos maiores de reparo e paralisação provavelmente teriam sido incorridos.

### 3.1.1.3 Preservação De Fábrica (FP)

O objetivo do FP é manter e proteger os ativos da International Paper para garantir a confiabilidade do processo de fabricação, a segurança do pessoal e a proteção do meio ambiente. Isto deve ser alcançado com instalações confiáveis, inspeções periódicas, práticas preventivas, reparos e atualizações.

Além das normas de EHS, também existem normas que ditam o estado mínimo de segurança para diversas áreas e equipamentos, a seguir se apresenta a lista de itens que são de responsabilidade do FP tanto a preservação como a construção e inspeção:

- Tanques de armazenamento;
- Vaso de Pressão e Dispositivos de Alívio;
- Aço e Pintura;
- Telhados;
- Edifícios e Concreto;
- Plataformas Elevadas, Escadas e Elevadores;
- AVAC e Ventilação de Edifícios;
- Pontes de tubulação e tubulação;
- Isolamentos Térmico, Físicos e Químicos;
- Bases de Equipamentos;
- Guindastes e Dispositivos de Elevação;
- Serviço de limpeza;
- Esgotos;
- Redução do Amianto;
- Estradas e Ferrovias;
- Proteção contra fogo;
- Vedações;
- Demolição e Edifícios Abandonados;
- Diques e Barragens;

- Exaustores e chaminés;
- Torres de refrigeração;

#### 3.1.1.4 Lubrificação (LUB)

##### DEFINIÇÃO:

A lubrificação é uma função projetada de uma máquina e seus lubrificantes, afetados pelas condições operacionais e ambientais, pela condição da máquina e pelas características específicas dos lubrificantes empregados e suas condições ao longo do tempo. A lubrificação efetiva requer a limitação da concentração de sujeira, detritos de desgaste e outras partículas, água, ar, produtos de degradação do lubrificante e quaisquer outros materiais não lubrificantes na interface das superfícies de desgaste. Os contaminantes unem ou interrompem o filme lubrificante, acelerando a abrasão superficial, a fadiga, a erosão, a corrosão e a incrustação.

##### OBJETIVO:

Este elemento visa controlar, parametrizar e manter os padrões de lubrificação, criando modelos de gestão de rotas que ajudem na reposição, melhorias e combater o principal inimigo da boa lubrificação, a contaminação. Muitos ambientes de fábricas de papel envolvem alta exposição à contaminação ou altas temperaturas, o que também compromete os filmes lubrificantes e pode ser visto como um contaminante. A contaminação é controlada através do uso de vedantes adequados, por purga ou troca de lubrificante contaminado ou degradado, e por meio de purificação ou condicionamento de lubrificante. Exemplos incluem filtração por partículas de meios porosos, filtração electrostática de produtos de degradação e remoção de água por sedimentação, desidratação por vácuo ou absorção.

##### PROPÓSITO:

O controle de contaminação é um aspecto fundamental da lubrificação efetiva. A má separação do filme - seja de película ou contaminação inadequada - resulta em degradação irreversível da superfície e encurta a vida útil da máquina. Setenta por cento da perda de utilidade do equipamento é atribuída à degradação da superfície, com 20% devido à corrosão e 50% devido ao desgaste, como estimado pelo professor Ernest Rabinowicz, MIT. Na pior das hipóteses, a inanição do filme causa degradação rápida com alta fricção, superaquecimento e falha funcional em dias, horas ou até minutos. A lubrificação é verdadeiramente a "força vital" do maquinário, essencial para a vida útil e a confiabilidade do equipamento. A lubrificação efetiva é a base da confiabilidade da fábrica.

### 3.1.1.5 Sistema De Produção Em Manufatura (MWS)

Sistemas de Trabalho de Manufatura (MWS) é um sistema que consiste em tarefas específicas conduzidas de maneira organizada e disciplinada com o objetivo de gerenciar o trabalho de manutenção e operações em nossas áreas de processo individuais.

Na International Paper, nosso MWS consiste em seis etapas, ilustradas na Figura 11 de alto nível para gerenciar o trabalho de manutenção:

- Identificação
- Planejamento
- Programação
- Execução
- Registro
- Auditoria / Avaliação

Figura 11 – Ciclo do MWS



Fonte: International Paper (2018).

Essas etapas são totalmente integradas ao sistema de gerenciamento de manutenção computadorizado da IP, SAP Plant Maintenance (SAP PM). Cada etapa desse processo de

trabalho de manutenção é executada por meio do sistema SAP E01 (Produção) ou da ferramenta de relatórios do SAP, o Business Warehouse (BW).

Por meio do uso dessas ferramentas, o trabalho de manutenção / operações solicitado deve ser completamente verificado, aprovado com informações de todas as partes afetadas, planejado de forma completa e precisa, programado e executado de acordo com o cronograma e, finalmente, devidamente documentado para posterior análise e análise.

O MWS não é apenas um sistema de conclusão e gravação de trabalho. É também uma cultura e exige responsabilidade de todos para desempenhar o papel que lhe foi atribuído.

A cultura MWS é aquela que valoriza altamente o trabalho planejado em relação ao trabalho reativo. Um sistema de gerenciar (ou administrar mal) o trabalho sem levar em conta o custo, o tempo e as pessoas envolvidas é insustentável. Quando o trabalho é escolhido e atribuído de acordo com a política pessoal, a emoção humana ou a urgência sem fundamento, arriscamo-nos a colocar nossos funcionários em situações inseguras e a gastar dinheiro desnecessário na falha e reparo de equipamentos. Embora nenhuma instalação possa evitar completamente o colapso e o mau funcionamento do equipamento, aqueles que adotaram a cultura de MWS como uma maneira rotineira de gerenciar tarefas podem identificar com mais facilidade o verdadeiro trabalho de emergência.

Os benefícios do MWS foram alcançados em toda a International Paper na forma de melhor utilização de recursos, ambientes de trabalho mais estáveis e organizados com menos horas extras, menor tempo ocioso da máquina, menos retrabalho, equipamentos mais confiáveis e menos trabalho não essencial, para citar apenas poucos.

Para todos os fatores que parecem entrar em ação em um processo bem sucedido de MWS, tudo ainda se resume aos seis passos essenciais listados acima. Os detalhes necessários para concluir cada etapa são centrados no gerenciamento consistente do processo de MWS, reuniões diárias estruturadas, no uso do SAP-PM e no suporte e engajamento de cada pessoa na organização.

Compromisso com este sistema deve vir de todos. Isso começa no topo, já que a experiência mostra que a gerência deve apoiar ativamente e defender o processo. Os Gerentes devem constantemente incentivar um ambiente propício para essa cultura. Cada área depende do pessoal-chave que deve compreender completamente o processo e a importância do seu papel nele. Este sistema não pertence a um grupo; é da responsabilidade de todos.

Um equívoco comum em relação ao MWS é que ele é exclusivamente de manutenção e sem preocupação com produção / operações. Nada poderia estar mais longe da verdade. O tempo dedicado às atividades de MWS deve ser tratado como uma parte sagrada e essencial

do processo de fabricação. Essas atividades serão discutidas em maior detalhe ao longo deste manual.

#### 3.1.1.6 Design De Confiabilidade Organizacional (ROD)

Neste elemento é definido as atribuições de cada membro do time de GMS. O líder deste elemento é diretamente responsável por distribuir e fiscalizar se as atribuições de cada engenheiro, planejador e colaborador estão respeitando o que o manual do GMS implementa. A Organização das estruturas e da própria confiabilidade é definida neste elemento.

A organização da instalação é a espinha dorsal da confiabilidade. Uma organização de confiabilidade funcional e saudável deve ser construída propositalmente e não deve ser desmantelada. O desmantelamento de uma estrutura organizacional de confiabilidade efetiva e a remoção de funções viáveis (por exemplo, a não substituição de aposentados, a combinação de cargas de trabalho com níveis excessivos, atribuições de pessoal deficientes) são os primeiros passos para a não sustentabilidade da Confiabilidade.

#### 3.1.1.7 Práticas De Precisão (PP)

Este elemento do GMS, assim como o EP, é um elemento que devido à abrangência do escopo original de 2014 foi sendo “refinado” até a versão atual, 2018, onde é subdividido em 3 subelementos:

- Manutenção de Precisão Mecânica (Mechanical Precision Maintenance - MPM);
- Manutenção de Precisão para Instrumentação e Elétrica (Instrument and Electrical Precision Maintenance – IEPM);
- Manutenção em Equipamentos EPD (EPD).

##### 3.1.1.7.1 Manutenção De Precisão Mecânica (MPM)

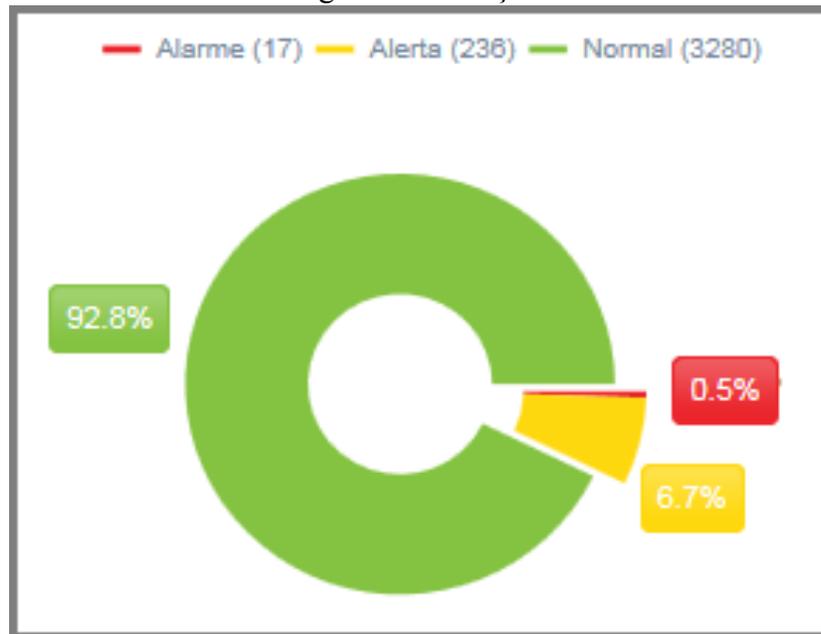
Manutenção de Precisão conforme o termo é aplicado a novas instalações ou trabalhos de reparo dentro da International Paper significa que os itens a seguir foram totalmente satisfeitos:

- Nível geral de vibração da máquina medido e documentado como igual ou inferior a .10 IPS (IPS – *inch per second* aproximadamente 2,54 mm/s). Os níveis de vibração devem ser confirmados pelo menos 3 vezes em um período de

6 meses para que a máquina seja classificada em um estado de precisão. A verificação deve ser feita através de Rotinas Preditivas de Manutenção de Análise de Vibração de rotina e registradas no banco de dados de equipamentos da SAP. As máquinas que não conseguirem manter o nível de vibração dentro de 3% não serão consideradas como tendo sido instaladas em um estado de precisão;

- Uma inspeção técnica de condição do equipamento será conduzida usando a lista de verificação de precisão de 20 pontos. As deficiências serão registradas em ordens de trabalho de ação corretiva de rotina no sistema SAP CMMS.
- O equipamento sendo designado como em um Estado de Precisão não deve ter tido nenhuma ordem de trabalho de manutenção de ação corretiva desde que foi designado como candidato para estar em um estado de precisão. A emissão de uma ordem de trabalho de ação corretiva exigirá que o período de análise de vibração de 6 meses seja reiniciado com base na data na data de emissão da ordem de serviço do SAP.
- O equipamento em ou sendo designado como em um Estado de Precisão deve ser incluído no programa de Assistência Básica da área e registrado no banco de dados normal de equipamentos da SAP.
- Calcule o valor da economia de energia com base na melhoria de vibração no momento da instalação inicial de precisão. Máquinas não operacionais serão rastreadas, mas nenhum cálculo de energia é necessário.
- Como parte do processo de precisão, um registro em nível de fábrica e nível de nível geral de vibração será mantido para todos os equipamentos. Esses dados devem ser obtidos do programa de Manutenção Preditiva de Análise de Vibração da fábrica de rotina, o gráfico 4 trás o índice geral de monitoramento citado acima.

Gráfico 4 – Nível geral de vibração de Luiz Antônio



Fonte: SKF - Reliability Systems (2004).

Uma vez estabelecido o processo de MPM na unidade, a preocupação passa a ser a retenção de capital humano na planta que esteja totalmente capacitado para implementar, manter e melhorar o processo de MPM. Ou seja, treinar novos Especialistas em MPM. No Manual do MPM é possível encontrar como deve ser feita a seleção para especialistas e o treinamento contínuo do profissional. Uma série de requisitos devem ser constantemente avaliados e re-treinados quando alguma falha é detectada, mas como isto foge do escopo deste trabalho, não será abordado.

### 3.1.1.7.2 Manutenção De Precisão Para Instrumentação E Elétrica (IEPM)

O IEPM é um programa contínuo e abrangente para melhorar o conjunto de habilidades da força de trabalho de Elétrica e Instrumentação (EI) e melhorar o desempenho dos ativos de EI dentro da International Paper. O IEPM se esforça para alavancar os resultados de negócios por meio do engajamento das pessoas, diminuição da variabilidade de nossos processos e aumento da confiabilidade de todos os ativos de EI. Obstáculos a superar são o envelhecimento dos ativos de EI no sistema das fábricas, as forças de trabalho enxutas de EI, aposentadoria das forças de trabalho de EI, mercado competitivo de talentos de EI e aumento de custos.

O objetivo do programa da IEPM é alavancar todos os talentos, tecnologia e processos de trabalho para manter a International Paper como uma empresa de alto desempenho no setor de celulose e papel.

Em sua forma mais pura, o IEPM é um modelo de Processo de Gerenciamento de Ativos, cujo escopo está se expandindo com o tempo à medida que aprendemos técnicas e metodologias novas e aprimoradas para alcançar o desempenho e a confiabilidade dos ativos de EI desejados.

De 2003 até o presente, a International Paper desenvolveu e implantou quatro cursos de manutenção de precisão de instrumentos e elétrica (IEPM):

- IEPM - Controls Essentials (apresentando o processo do IEPM para a melhoria do loop de controle)
- IEPM-CVP - Programa de válvula de controle (com diagnóstico de válvulas)
- Distribuição de energia elétrica do IEPM-EPD (com equipamento EPD de 1kv a 15kv)
- Programa de Ar Comprimido IEPM-CAP (com sistema de ar comprimido completo)

Cada fábrica deve adotar e implementar esses cursos (e cursos futuros) como parte de seu programa de melhoria da confiabilidade. Equipamentos de treinamento, ferramentas, hardware e sistemas relacionados devem ser criados e / ou comprados por cada fábrica para participar dos programas. Números orçamentários estão presentes neste documento para ajudar no seu planejamento.

### **3.1.1.7.3 Manutenção Em Equipamentos EPD (EPD)**

Este sub-elemento trata de Práticas de precisão em Equipamentos de geração, distribuição e conversão de grandes quantidades de energia, e não é válido para o estudo deste trabalho.

### **3.1.1.8 Análise De Causa Raiz De Falhas (RCFA)**

O RCFA é uma forma de descobrir os motivos que ajudaram no surgimento de um problema, uma vez que, se tentar atacar logo as causas, o problema será mais bem resolvido. Partindo desse pressuposto, a elaboração e aplicação de um plano de ação corretiva tornam-se

possível e as causas dos defeitos passam a ser controladas, atuando em toda a cadeia do processo e então, evitando que o defeito volte a acontecer.

Tendo a solução correta e mais efetiva em mente, a International Paper entende que as análises RCFA são de fundamental importância para a confiabilidade das suas unidades, uma vez que RCFA bem executados são, além de formas de correção, uma fonte de aprendizado para unidades que enfrentam problema semelhante.

De acordo com o Manual RCFA do GMS, a razão básica para investigar qualquer falha é identificar cursos de ação viáveis que identificarão ações corretivas que impedirão a reincidência quando implementadas, evitando assim lesões, produção perdida ou de baixa qualidade e impactos negativos no meio ambiente. A análise de falha de causa raiz deve ser abordada com uma mente aberta e sem suposições. Uma abordagem de equipe usando uma ferramenta de solução de problemas metódica é a melhor maneira de chegar à causa da falha. Essa equipe deve trabalhar em conjunto para desenvolver itens de ação e sistemas para evitar a recorrência da falha, abordando as causas principais.

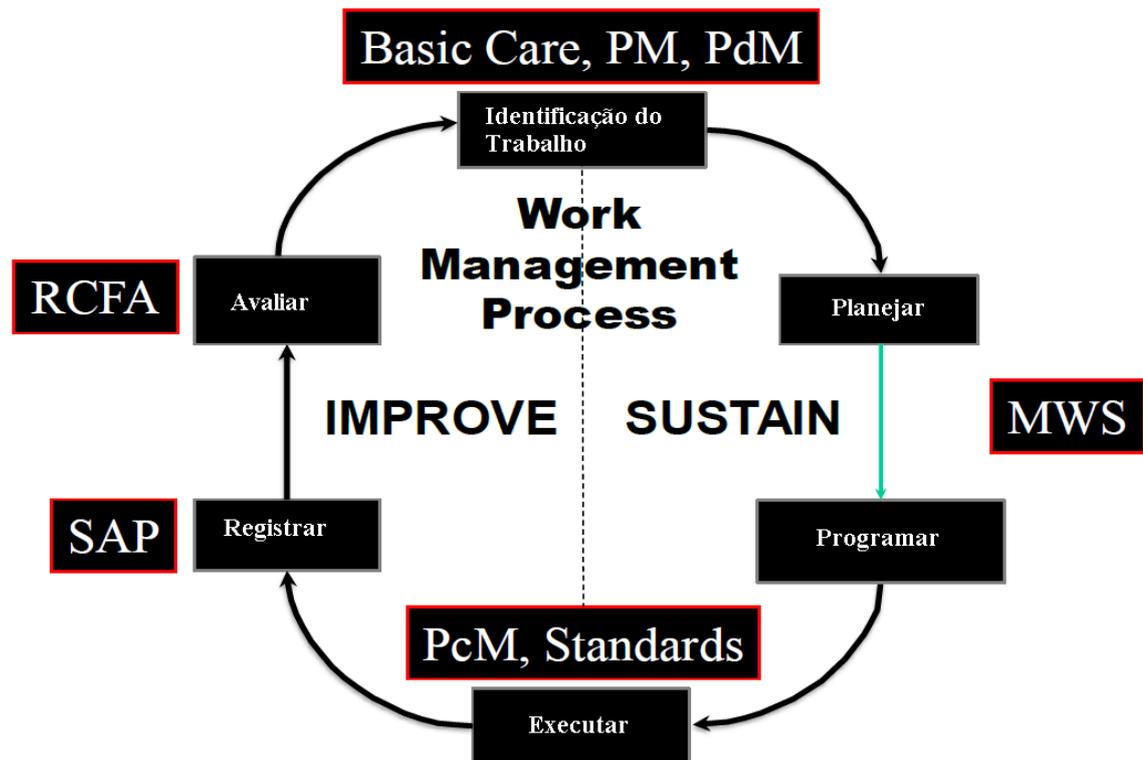
Os objetivos de realizar um RCFA são:

- Eliminar o risco de recorrência.
- Transferir conhecimento de como o evento foi resolvido usando o RCFA.
- Evitar a duplicação da mesma análise por outros.
- Os BENEFÍCIOS da realização de RCFA são:
  - Tempo de inatividade reduzido e maior confiabilidade do equipamento, identificando falhas de equipamentos específicos e suas causas e corrigindo-as.
  - Redução de reclamações de clientes, identificando e resolvendo problemas de equipamentos e processos que afetam a qualidade do produto.
  - Redução de custos e desperdícios, resolvendo problemas que drenam os recursos da fábrica.
  - Fornecer uma abordagem estruturada para a solução de problemas que ajude as pessoas a entender a natureza das falhas e como rastrear as causas para que elas possam ajudar a evitar falhas ou problemas semelhantes no futuro.
  - Maior produtividade, eliminando problemas que impedem que a fábrica atinja seu verdadeiro potencial de produtividade.
  - Melhorar as habilidades de resolução de problemas por meio da utilização de equipes multifuncionais.

Existem muitos métodos ou técnicas RCFA bons. Para os propósitos deste manual, a Árvore Lógica apresentada pelo Centro de Confiabilidade Incorporada será usada, pois é o método básico usado pela IP e é a base para o Banco de Dados de Confiabilidade.

Uma avaliação de RCFA dentro da manutenção se encaixa após a execução de alguma intervenção, seja preventiva, preditiva ou de emergência. Como mostra a Figura 12, o RCFA é precedido de um registro correto de uma ação executada que foi planejada e é sucedido por inspeções e cuidados dos elementos de EC.

Figura 12 – Ciclo de uma intervenção de manutenção.



Fonte: International Paper (2018).

### 3.1.1.9 Certificação De Confiabilidade (RC)

Este elemento cria um banco de profissionais de confiabilidade treinados em técnicas analíticas avançadas de confiabilidade. Este elemento é uma parte fundamental da sustentabilidade.

O Profissional de Confiabilidade Certificado IP é fundamental para o sucesso e a sustentabilidade de uma instalação porque:

Estabelece um padrão consistente para o conhecimento e as habilidades necessárias para praticar a Confiabilidade Deliberada.

Estabelece uma capacidade para a fábrica se concentrar na estratégia pró-ativa do gerenciamento do modo de falha.

Fornecer as ferramentas quantitativas necessárias para avaliar os riscos e priorizar os problemas de confiabilidade ANTES QUE possam ocorrer, permitindo que os recursos finitos se concentrem em onde possam evitar problemas de maneira mais eficaz.

Fatores Críticos de Sucesso para o Processo de Certificação:

O processo de equilibrar a demanda (volume de oportunidades) com o fornecimento (recursos certificados para atuar nas oportunidades). Certificação de profissionais de Confiabilidade segue 4 categorias principais:

1. Identifique Necessidades / Oportunidades
2. Selecione Candidatos
3. Desenvolva Candidatos
4. Certifique Candidatos

O objetivo é que 100% das atuações, decisões e estratégias que são tomadas na confiabilidade, sejam realizadas por pessoas certificadas em Confiabilidade.

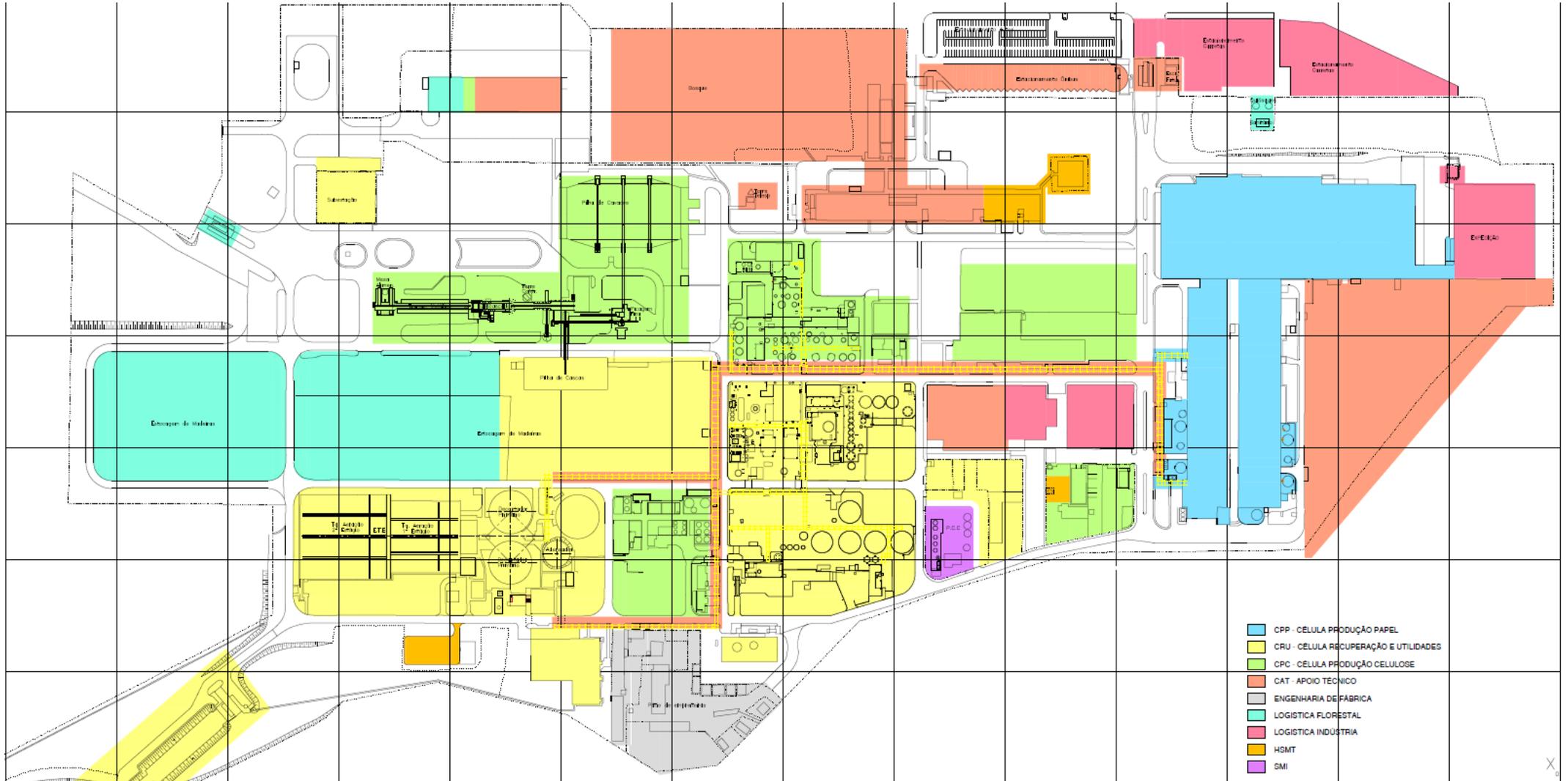
### **3.2 INTRODUÇÃO AO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO PAPEL**

Uma unidade de produção de papel e celulose completa contempla uma variedade de processos e de áreas da engenharia que se possibilita a aplicação deste tipo de estudo, indo desde áreas florestal à logística de transporte do produto acabado. Por motivos de qualidade da observação e estudo dos dados e resultados, iremos nos concentrar em uma linha de papel acabado, onde o processo produção envolve maquinário de alta performance e de igual complexidade às demais áreas da fábrica.

Uma fábrica de papel e celulose é em termos gerais, uma indústria química de transformação, mas todo o processo é uma confluência de todos os ramos de engenharia desde civil até à nanoengenharia, em fábricas mais modernas. O Brasil é um dos maiores produtores de Papel e Celulose do mundo, com centenas de fábricas espalhadas em todo o território variando de pequeno à grande porte.

O desenvolvimento deste trabalho ocorre em Unidade sediada em Luis Antônio – SP. Esta unidade é definida como completa, pois trabalha desde o manejo das florestas de eucaliptos até a expedição de papel pronto para uso em gráficas, empresas e residências. A Figura 13 mostra um esquema do Layout da fábrica.

Figura 13 – Layout da Unidade de Luiz Antônio da International Paper



Fonte: International Paper (2018).

A unidade contempla células de cultivo florestal (chamada de Florestal), onde é feita a produção de novas mudas, plantio, planejamento da colheita e as tratativas de qualquer questão referente às florestas de posse da empresa.

Após o recebimento de madeira da floresta, este material vai para o primeiro local da fábrica onde ocorre manufatura, o Pátio de madeira (Início da Linha de Fibras). Neste ponto a madeira é estocada e de acordo com a demanda de produção de celulose, é descascada e levada para ser cortada em um tamanho pré-definido formando assim o Cavaco. Então este cavaco entra no processo químico que o transforma em celulose. Neste ponto cabe a observação de que a descrição do processo é inoportuna para o trabalho, mas facilmente encontrada em literaturas nacionais.

O processo químico termina onde a Linha de Fibras termina, nas máquinas de papel. Neste ponto a decisão gerencial da fábrica escolhe se a celulose vai ser vendida para outras fábricas de papel, que não possuem uma Linha de Fibras, ou se a celulose vai ser transformada em papel.

Quando as máquinas de papel terminam o processo de secagem, dimensionamento e especificações do papel, ele é mandado para máquina enroladora, mais uma vez a demanda por tipos de papel define o caminho da matéria prima. Se o cliente for outra indústria como gráficas ou outras fábricas, bobinas sem acabamento são expedidas, mas se o papel for requisitado para usos específicos ou tamanhos e cortes menores ele segue para o último setor de manufatura, o Acabamento.

Além de local onde será desenvolvido o estudo, o acabamento é o local onde inspeções de qualidade, corte em formatos padrões (A4, A3, etc) são realizados. A escolha para este local como fonte do estudo é dada pelo fato de ser um local onde há uma variedade grande de equipamentos rotativos.

### **3.3 MAQUINA CORTADEIRA**

Nestes trabalhos chamaremos de máquina cortadeira, um conjunto de máquinas, produzidas pela ECH Will que tem como função principal o corte de papel vindo das máquinas de produção de papel em formatos diversos, dentre eles o A4, A3, Carta OffSet e outros e é ilustrado com na Figura 14 retirada do sistema de monitoramento online da International Paper o PI.

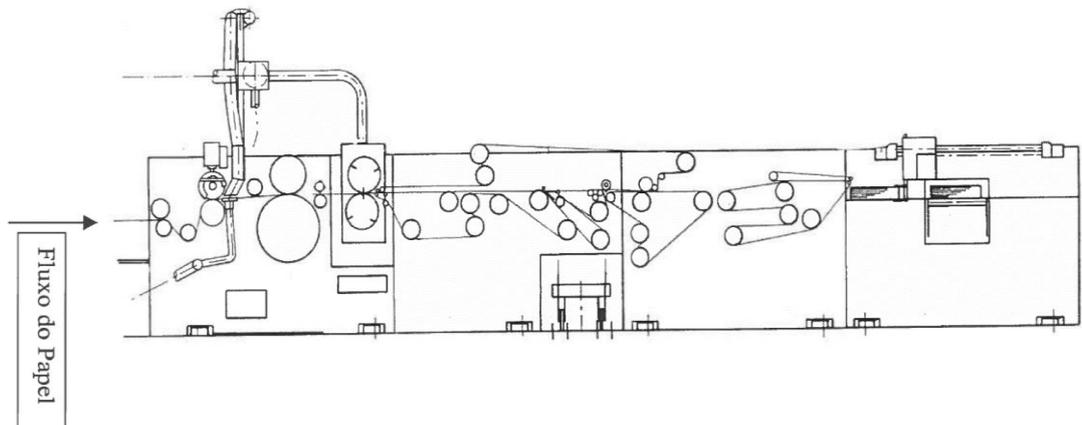
Figura 14 – Desenroladeiras, Cortadeira e Embaladoras.



Fonte: International Paper (2018).

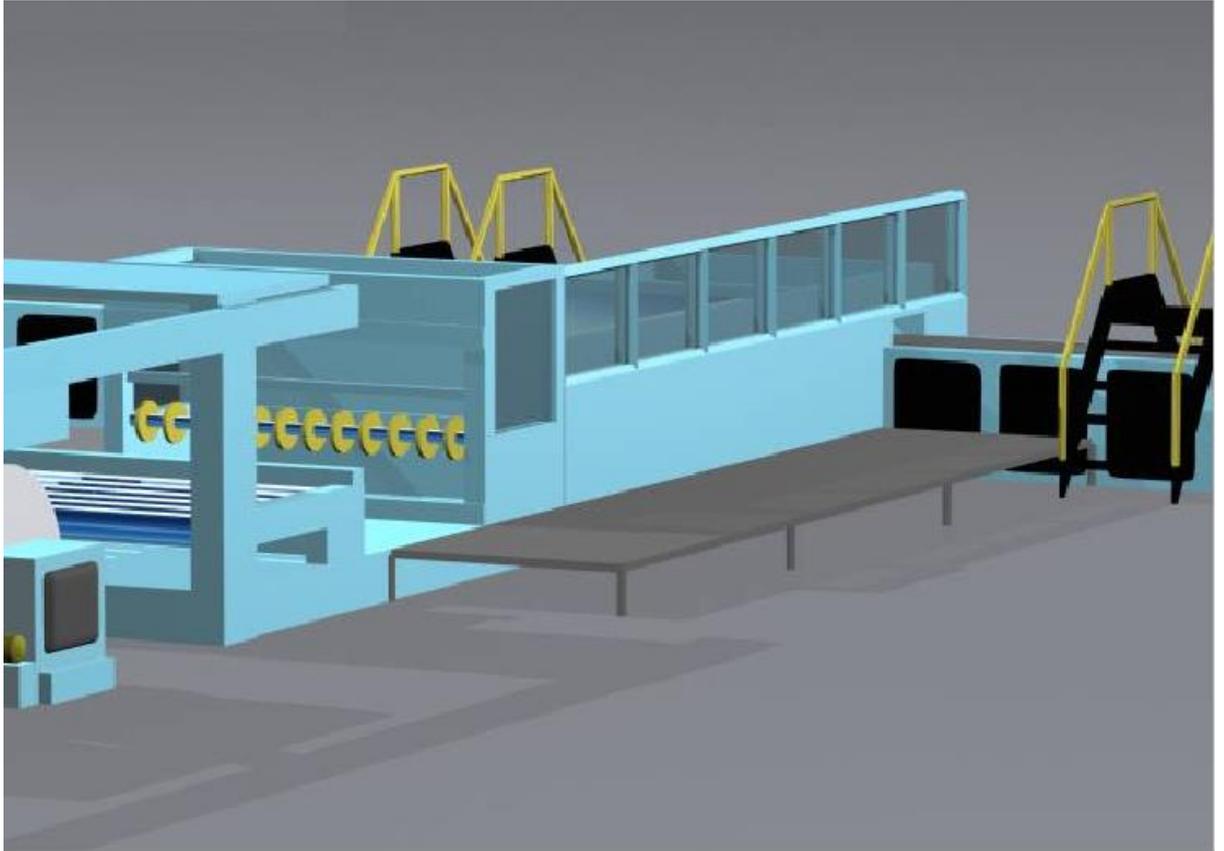
Esta máquina está no início do processo CUT SIZE (Formato pequeno), mostrado na Figura 15, que se destina ao corte de formatos de papel que são provenientes das Desenroladeiras de papel também produzidas na Alemanha pela ECH Will. A operação destas cortadeiras tem por objetivo fornecer pacotes de papel (resmas) para embaladora de resmas, as quais executam o empacotamento das resmas e são continuidade ao processo CUT SIZE.

Figura 15 – Fluxo da Cortadeira



Fonte: E.C.H. Will (1989).

Figura 16 – Cortadeira.



Fonte: International Paper (2018).

Esta cortadeira da Figura 17, encontra se equipada com: Rolos, sistema de corte, correias, sistema de contagem e formação de resmas.

### 3.3.1 Ficha Técnica Operacional

Para entender a forma de avaliação de produtividade e diagnostico de operação satisfatória, alguns parâmetros são de indispensável conhecimento.

#### 3.3.1.1 Velocidades

Velocidade Nominal de Operação (VN): Velocidade que é considerada a velocidade padrão para os operadores manter as FOLHAS das Desenroladeiras. É dada na Tabela 2.

A VN é o valor utilizado pela Manutenção quando se precisa realizar medições para o MPM, PdM ou PM. Ou seja, quando se vai coletar a vibração para algum ponto o primeiro parâmetro coletado é a velocidade nominal. Mas esta velocidade é usada somente quando as condições da linha está em total disponibilidade, sem nenhum tipo de redução de capacidade e

esta capacidade é muitas vezes apresentada para a manutenção, pela operação, como uma relação entre resmas cortadas por minutos, para fins de facilitar os cálculos chamaremos esta velocidade de VR, Velocidade de Resmas por Minuto. E cabe ao engenheiro de manutenção calcular através da “velocidade” de resmas/minuto a VN pela equação 13.

Tabela 2 – Velocidade por gramatura.

<b>Gramatura [g/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Velocidade [m/min]</b>	<b>Formato</b>
60	350	Officio e 1
65	350	Officio 2 e 1
70	350	Officio 9, 2 e 1
75	300	A4, A3, CARTA
80	300	A4, A3, CARTA
85	300	CARTA
90	250	A4, CARTA

Fonte: Adaptado do Sistema PI – International Paper (2018).

$$VR = \frac{VN \times n^{\circ} \text{ de resmas na caixa de coleta} \times n^{\circ} \text{ de Rolos}}{\text{Formato} \times n^{\circ} \text{ folhas}} \quad (13)$$

Onde:

VR = Número de resmas por minuto [pacotes/min];

VN = Velocidade de da folha de papel [m/min];

Nº de resmas na caixa de coleta = Número de caixas de coleta sendo usadas no momento;

Nº de rolos = Número de desenroladeiras operando, normalmente de 3 à 5. Sendo que 3 já uma situação muito rara e inviável do ponto de vista de produção.

Formato = Comprimento da folha que esta sendo cortada [m], sempre considerar a dimensão maior, vide Tabela 3;

Nº folhas = Número de folhas que irão para as resmas, entre 250 e 2500 unidades, variando de acordo com o pedido dos clientes.

Tabela 3 – Dimensões dos formatos de corte.

<b>Formato</b>	<b>Dimensões [mm]</b>
A4	210 x 297
A3	420 x 297
Carta	216 x 279
Officio 9	215 x 315
Officio 2	216 x 330
Officio 1	216 x 355,5

Fonte: E.C.H. Will (1989).

### 3.3.1.2 Energia

- Voltagem – 440V;
- Frequência da rede – 60Hz;
- Corrente de entrada – 242KVA;
- Fusível – 420A;
- Variação máxima da Voltagem -  $\pm 5\%$

### 3.3.1.3 Subgrupos De Componentes Principais

A cortadeira WILL é um conjunto de mais de 30 mil componentes, mas existe subgrupos destes componentes que são fontes recorrentes de manutenções, e eles estão mapeados. Ao todo são 28 subgrupos, como mostrado na Figura 17 mas iremos coletar dados somente de um deles.

Mais especificamente, o sistema de acionamento o pilar fundamental da Cortadeira, pois é nele que são realizados, além do acionamento, os sincronismos, velocidades e formatos. Uma indisponibilidade em outros sistemas pode causar uma redução de produção, mas o Sistema de Acionamento realiza uma função que se vir a ser cessada, causará parada total da sua linha, ou seja 33,3% da capacidade de produção de papel da fábrica depende da confiabilidade deste equipamento.

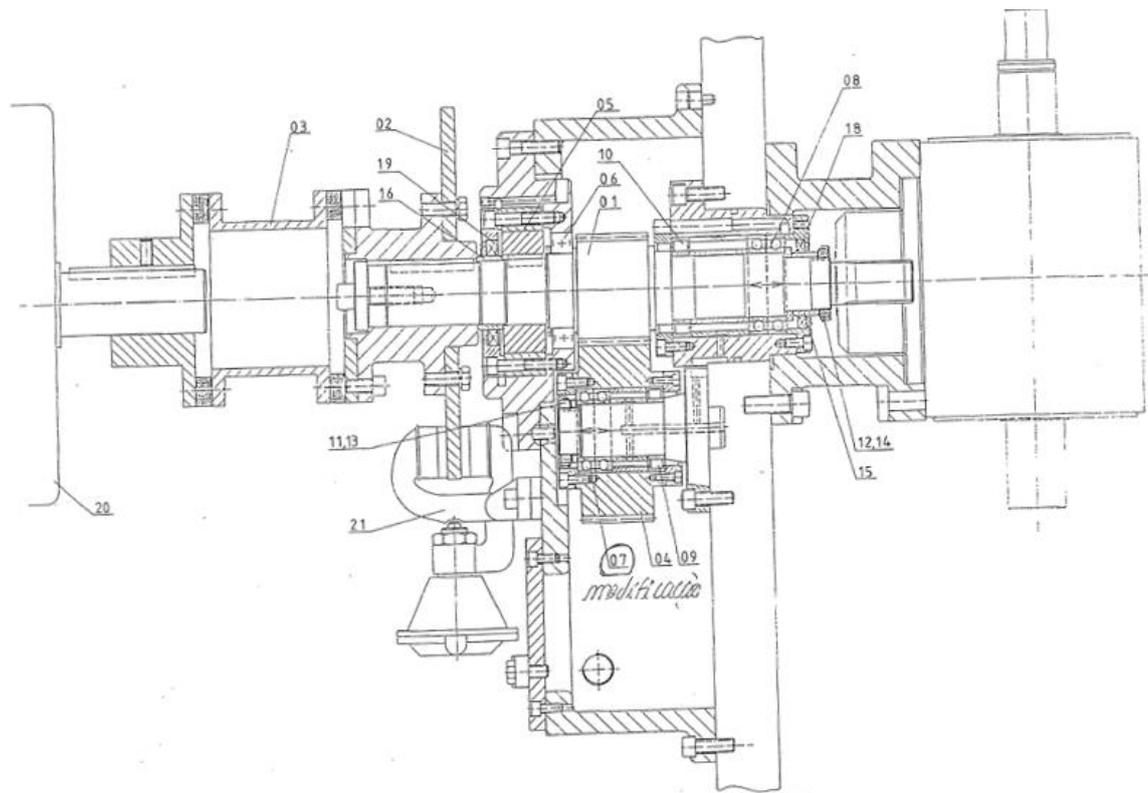
A Figura 18 mostra o sistema de acionamento e como ele é relativamente simples com somente alguns componentes que serão o alvo do nosso estudo.

Figura 17 – Os Subgrupos da linha de Cortados.

Change Functional Location: Structure List				
Functional Location	MG19	Valid From	09/20/2018	
Description	LUIZ ANTONIO MILL			
▶  MG19-743	SISTEMA TRANSPORTE DE BOBINAS	LOGICO		
•  MG19-800-00-000	ACABAMENTO DE PAPEL	MECANICO		
•  MG19-800-FE01	ED. MAG. VAZÃO AFA P/ ACAB.	INSTRUMENTACAO		
•  MG19-800-FI01	TR. MAG. VAZÃO AFA P/ ACAB.	INSTRUMENTACAO		
▶  MG19-810	SEC. ACABAMENTO E SALA DE ESCOLHA	LOGICO		
•  MG19-810-OF-001	OFICINA DE MANUTENÇÃO ACABAMENTO	LOGICO		
•  MG19-811	CORTADEIRA DE PAPEL JAGENBERG I	LOGICO		
▶  MG19-813	CORTADEIRA WILL I	LOGICO		
•  MG19-813-00-000	LINHA CUT SIZE-1	MECANICO		
▶  MG19-813-01-001	CORTADEIRA WILL-1	MECANICO		
▶  MG19-813-01-138	EMBALADORA DE RESMA PEMCO 37RHS	MECANICO		
▶  MG19-813-01-159	ETIQUETADEIRA / INSPETORA L.34	MECANICO		
▶  MG19-813-01-167	ACUMULADOR DE RESMAS L.34	MECANICO		
▶  MG19-813-01-177	ENCAIXOTADEIRA L.34	MECANICO		
▶  MG19-813-01-203	ROTULADEIRA DE CAIXAS L.34	MECANICO		
▶  MG19-813-01-211	SIST. DE TRANSPORTE DE SAIDA ENC. L.34	MECANICO		
▶  MG19-813-01-215	EMBALADORA DE RESMAS PEMCO 37	MECANICO		
▶  MG19-813-01-237	ETIQUETADEIRA / INSPETORA DE RESMAS L.37	MECANICO		
▶  MG19-813-01-245	ACUMULADOR DE RESMAS L.37	MECANICO		
▶  MG19-813-01-255	ENCAIXOTADEIRA L.37	MECANICO		
▶  MG19-813-01-281	ROTULADEIRA L.37	MECANICO		
▶  MG19-813-01-287	SISTEMA DE TRANSPORTE DE CAIXAS L.37	MECANICO		
▶  MG19-813-01-351	SIST. DE INTERLIGACAO L.34 COM L.37	MECANICO		
▶  MG19-813-01-359	UNID. SELAGEM TÉRMICA INFERIOR PEMCO-37	MECANICO		
•  MG19-813-08-113	ACION PRINCI SISTEM VEDACA LATERA 37R-HS	MECANICO		
•  MG19-813-08-114	ACIONATO SISTEMA VEDACAO INFERIOR 37R-HS	MECANICO		
•  MG19-813-11-095	CONJ. ROLETES CORREIAS SUP. 1° GR N-95	MECANICO		
•  MG19-813-11-096	CONJ. ROLETES CORREIAS INF. 1° GR N-96	MECANICO		
•  MG19-813-31-003	PAINEL ELETRIC EMBALA RESMAS PEMCO 37R-HS	ELETRICO		
•  MG19-813-31-013	PAINEL ELETRICO ALIMENT. CINTADEIRA L-34	ELETRICO		
•  MG19-813-31-027	PAINEL ELETRICO ALIMENT. CINTADEIRA L-37	ELETRICO		
•  MG19-813-31-033	PAINEL CONTR.TEMP.SEL.LINHA37 LD WILL 1	ELETRICO		
•  MG19-813-31-035	PAINEL CONTR.TEMP.SEL.LINHA37HS LE WILL1	ELETRICO		
•  MG19-813-36-017	SERVOC ACION. TRANSF. EMBALAGEM EMB. L37	ELETRICO		
•  MG19-813-37-003	SERVO-CONTROLE ACION. CORREIA CRUZADA V1	ELETRICO		
▶  MG19-815	SISTEMA PALETIZAÇÃO WILL-1	LOGICO		

Fonte: International Paper (2018).

Figura 18 - Esquema do acionamento principal da Will



Fonte: E.C.H WILL (1989).

### 3.4 ROTAS DE MONITORAMENTO DA SKF

A atuação do elemento de Cuidados Básicos (BC) é pautada pelo planejamento que é estipulado pelo fluxo do MWS. E a principal parceira no tangente à monitoramento de equipamentos rotativos é a SKF do Brasil.

#### 3.4.1 Atuação Da SKF

Inúmeros parâmetros devem ser considerados, afim de realizar testes eficazes para a obtenção dos resultados desejados. Um bom teste começa na fase de planejamento. Seguindo o fluxo apresentado anteriormente do MWS, listas de itens que precisam de uma análise imediata são adicionados ao itens que já estão dentro de rotas programadas de acordo com as métricas do BC, PdM e PM. O fluxo do MWS também se aplica à SKF que possui Rotas programadas e um padrão de atendimento para itens fora de rota. E alguns equipamentos que são capturados fora das condições normais, dentro das zones 3, 2, ou 1 da Curva P-F (Figura 9 na página 51) são levados para serem discutidos dentro das reuniões diárias do MWS, a

Tabela 5 mostra uma lista que é compilada pela prestadora com os itens que estão dentro do estado de alerta ou alarme.

Dentro da reunião diária do MWS de cada célula da fábrica é necessário a presença de um profissional da SKF que pode ajudar na definição de criticidade dos equipamentos discutidos, e ai então decidir se atua ou não. A Tabela 4 é a referência usada para a SKF como primeiro filtro de urgência, mas há ressalvas.

Tabela 4 – Tabelas de Aceitação de vibração mecânica

Severidade da Vibração		Limites de Range de Velocidade e Classes de Máquina Padrão ISO 10816-1			
mm/s RMS	pol/s Pico	Máquinas Pequenas Classe I	Máquinas Médias Classe II	Máquinas Grandes	
				Suportes Rígidos Classe III	Suportes Menos Rígidos Classe IV
0,28	0,02	Bom	Bom	Bom	Bom
0,45	0,03				
0,71	0,04	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
1,12	0,06				
1,80	0,10	Insatisfatório (Alerta)	Insatisfatório (Alerta)	Satisfatório	Satisfatório
2,80	0,16				
4,50	0,25	Insatisfatório (Perigo)	Insatisfatório (Perigo)	Insatisfatório (Alerta)	Insatisfatório (Alerta)
7,10	0,40				
11,20	0,62	Insatisfatório (Perigo)	Insatisfatório (Perigo)	Insatisfatório (Perigo)	Insatisfatório (Perigo)
18,00	1,00				
28,00	1,56				
45,00	2,51				

Fonte: SKF - Reliability Systems (2004).

Tabela 5 – Lista de itens fora da normalidade de vibração (SKF).



### MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO

SEMANA 40 - DE 01/10/2018 A 05/10/2018

#### ACABAMENTO



TAG	DESCRIÇÃO	FALHA DETECTADA E/OU RECOMENDAÇÃO	Parada	Disciplina	Ultimo valor	Medição Atual	Valor Médio	Status
MG19-813-11-060	Sistema rolo prensa (xadrez) e Rolo central	Revisão sistema nip cortadeira (revestimento /batimento /cilindros pneum.) rolos prensa e central)	Will 1	Mecânica	16,5 mm/s	13-ago-18	5,0 mm/s	ALARME
MG19-823-01-083	Sistema acionamento principal - will 2	Trocar parafusos de fixação dianteira da sub base metalica do motor (espanados)	Will 2	Mecânica	3,1 mm/s	06-ago-18	2,0 mm/s	ALERTA
MG19-821-08-005	Sistema acionamento principal	Substituir o redutor e inspeção do eixo cardan	Jagenberg 2	Mecânica	7,2 mm/s	20-ago-18	3,0 mm/s	ALERTA
MG19-833-07-011	Ventilador de ar forçado motor sistema puxador princ.	Substituir os rolamentos do motor e inspeção / limpeza do rotor do ventilador	Will 3	Motores	2,3 gE	28-ago-18	1,2 gE	ALERTA
MG19-833-05-013	Sistema bomba de lubrificação cx. engr. sist.pux.	Substituir os rolamentos do motor e trocar o elemento elastico do acoplamento	Will 3	Motores	4,1 gE	28-ago-18	2,5 gE	ALERTA

Fonte: Autoria Própria.

### 3.4.2 Técnica de Análise

As técnicas de seleção de método e coleta já foram citadas no item 2.4, e não são foco deste estudo. Porém a forma como é devolvido para a IP o diagnóstico de um equipamento é de fundamental importância.

Uma vez que um problema na máquina é detectado, o fluxo do MWS iniciado e se for o caso uma verificação em campo é requerido. Com uma caneta de vibração, Figura 19, o técnico da SKF vai até o equipamento e:

- Coleta os dados de referência do equipamento (velocidade de trabalho e temperatura). Geralmente a um TAG de identificação estão vinculados todos os parâmetros para a conversão da FFT;
- Para propósito de análise, frases relativas dos equipamentos são avaliadas. Isso aumenta a probabilidade de sucesso no diagnóstico;
- A equipe de análise da SKF compara as leituras de valor global de todo o trem das Máquinas vinculados ao equipamento;
- Origem e amplitude da vibração no leitor.

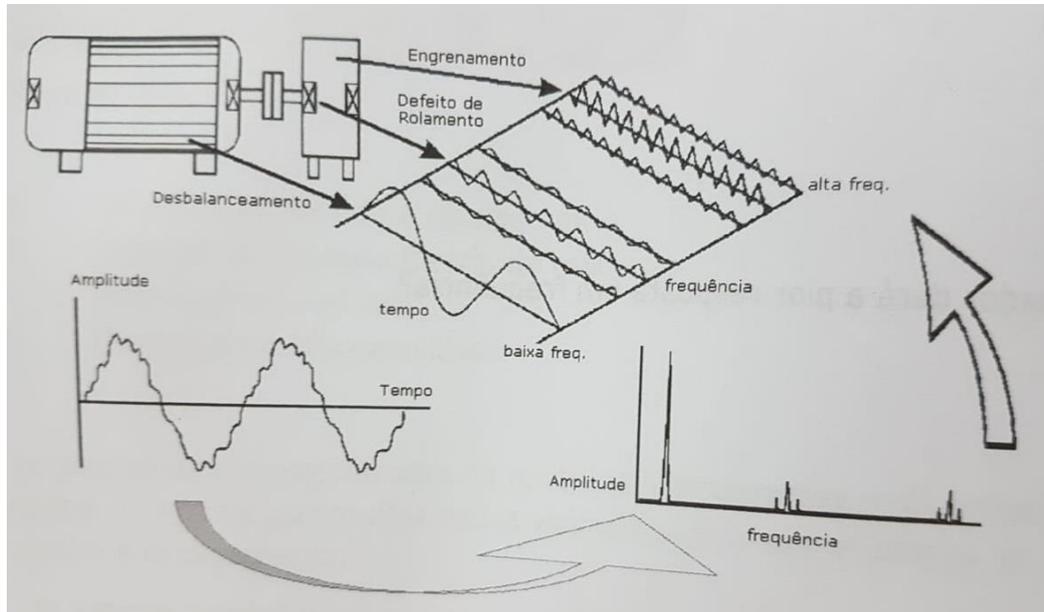
Figura 19 – Coletor portátil de dados.



Fonte: SKF - Reliability Systems (2004).

Uma vez que as informações acima são conhecidas Pode-se prosseguir para análise dos espectros coletados.

Figura 20 – Exemplo Análise de espectral.



Fonte: Autoria própria.

Na análise espectral o objetivo é basicamente:

- Identificar qualquer a harmônica na frequência de rotação;
- Identificar frequências de falha de rolamento identificar passagem de pas, se aplicável;
- Identificar frequência de engrenamento, se aplicável;
- Identificar frequências no motor da bomba, se aplicável;
- Identificar vibração de máquinas próximas;
- E motores elétricos identificar se o picos de frequência referente a problemas elétricos ou mecânicos.

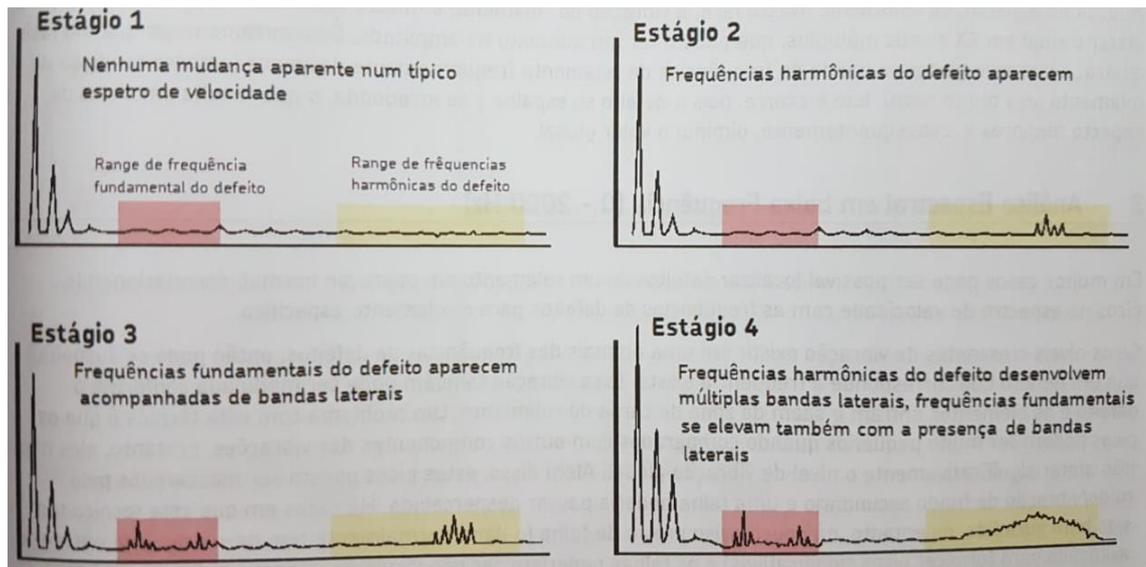
O espectro coletado pode reproduzir picos em frequências de falhas identificadas previamente, esses picos podem representar ou não falhas estas. Veja as harmônicas das frequências de falhas para verificar se os bicos são provenientes de falhas já estudas. Se o pico se refere a uma frequência de falha Fundamental e outro a duas vezes a frequência e assim por diante é uma forte evidência de que a falha é real. Se o pico da frequência fundamental não parece mas está presente na segunda terceira ou talvez quarta harmônica (múltiplos da frequência fundamental) isso também representa uma forte indicação de falha.

Um método de se determinar a severidade da falha é compara sua amplitude com a norma ISO para a classificação da máquina. Um método melhor é comparar amplitude atual

com as leituras passadas em condições consistentes de análise (análise de Tendência). Um terceiro método para comparar a amplitude de outras leituras de máquinas similares operando em mesmas condições.

As Figuras 20 e 21 são exemplos de avaliações prévias de falhas em rolamentos e que podem demonstrar a relação entre os múltiplos de harmônicos que se busca em qualquer análise de equipamentos rotativos.

Figura 21 - Estágios de falha em um rolamento.



Fonte: SKF - Reliability Systems (2004).

## 4 ANÁLISE DOS DADOS

Para melhor análise do efeito da avaliação por vibração nos equipamentos rotativos, será exposto neste capítulo duas ocorrências que se deram no mesmo equipamento mas em datas diferente, porém próximas.

Ambos eventos ocorreram no sistema de acionamento citado no item 3.3.1.3 e por posterior análise RCFA também foi constatada mesma falha raiz.

### 4.1 APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CORRETIVA

A Figura 22 e o Gráfico 5 fazem parte de um relatório que é gerado automaticamente pelo sistema da International Paper, e que traz um descritivo de todas as paradas que ocorrem nos equipamento. No dia 3 de maio de 2018 foi registrado uma parada não programada de 580 minutos para a realização de uma troca emergencial do redutor da transmissão do acionamento principal da linha da WILL 1, no sistema chamada de LW01.

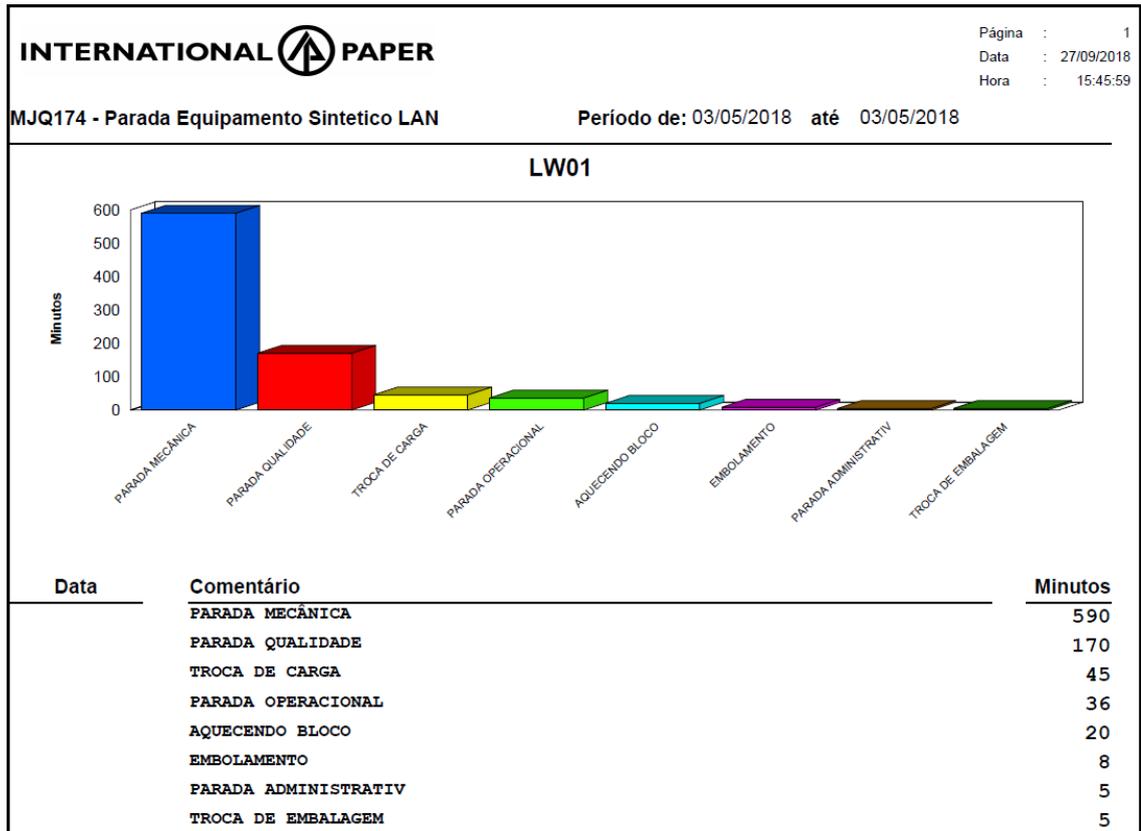
Estes 580 minutos são referentes ao momento em que a máquina foi parada até o instante que a primeira resma foi embalada para o cliente. No Gráfico 6 é possível ter uma ideia da magnitude do impacto que o incidente provocou na produção.

Figura 22 – Relatório de parada da Linha Will 1.

INTERNATIONAL  PAPER		<i>Paradas de Equipamentos</i>		27/09/2018
MJQ176		Período de 02/05/2018 à 04/05/2018		15:45
		<b>LW01</b>		
<u>Data</u>	<u>Comentário</u>			<u>Minutos</u>
04/05/2018 20:43	Preparando a carga na desenroladeira 2a devido 2b ter trocado a pinça de freio e ter ar no sistema.			7
04/05/2018 18:46	Apos parada na pemco hs , quebra da ponta desenroladeira 2b enroscando na barra desencanoadora quebrando as demais pontas , devido perda de freio por vazamento na pinça do freio lado direito, passando pontas.Rodando com a desenroladeira 2a para trocar a pinça da 2b.			40
04/05/2018 18:13	Perda de freio na desenroladeira 1b , ar no sistema apos trocar a pastilha de freio			20
04/05/2018 14:49	quebrou o pino do dedo da encaixotadeira 37, troca do mesmo			41
04/05/2018 09:28	quebrou o pino do dedo da encaixotadeira 37, troca do mesmo			17
04/05/2018 09:01	travando a placa do elevador no dedo do acumulador, ajuste da posição do mesmo			27
03/05/2018 10:15	Placa do elevador de pacotes " torta" para baixo amassando pacotes no acumulador 37			45
03/05/2018 08:00	troca do redutor do motor do acionamento principal			65
02/05/2018 23:00	retirar vazamento de oleo no redutor do motor principal			50
02/05/2018 17:00	Estourou retentor do redutor do eixo do motor principal			10
02/05/2018 16:20	Colocando dispositivo mecanico na mesa de transferencia do p aletizador			25
03/05/2018 00:00	manutenção no redutor do motor do acionamento principal, com desgaste			580

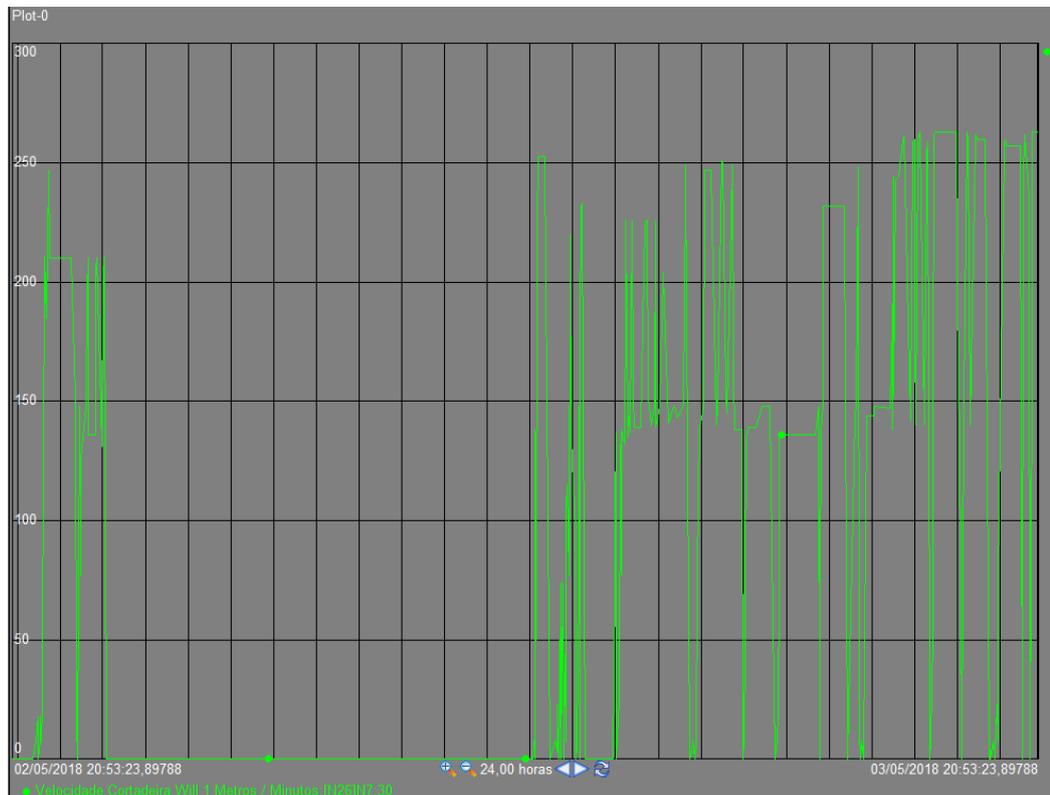
Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 5 – Tempos de parada da Linha Will 1.



Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 6 – Velocidade de produção no dia da parada emergencial.



Fonte: Autoria Própria.

Ao deixar a linha parada diversos impactos são sentidos na gestão da produção, alguns destes impactos são atribuídos à manutenção, uma vez que está falhou na atuação preventiva. Na Tabela 6, é demonstrado que o custos diretos da emergência em estudo.

Tabela 6 – Resumo dos custos diretos com material.

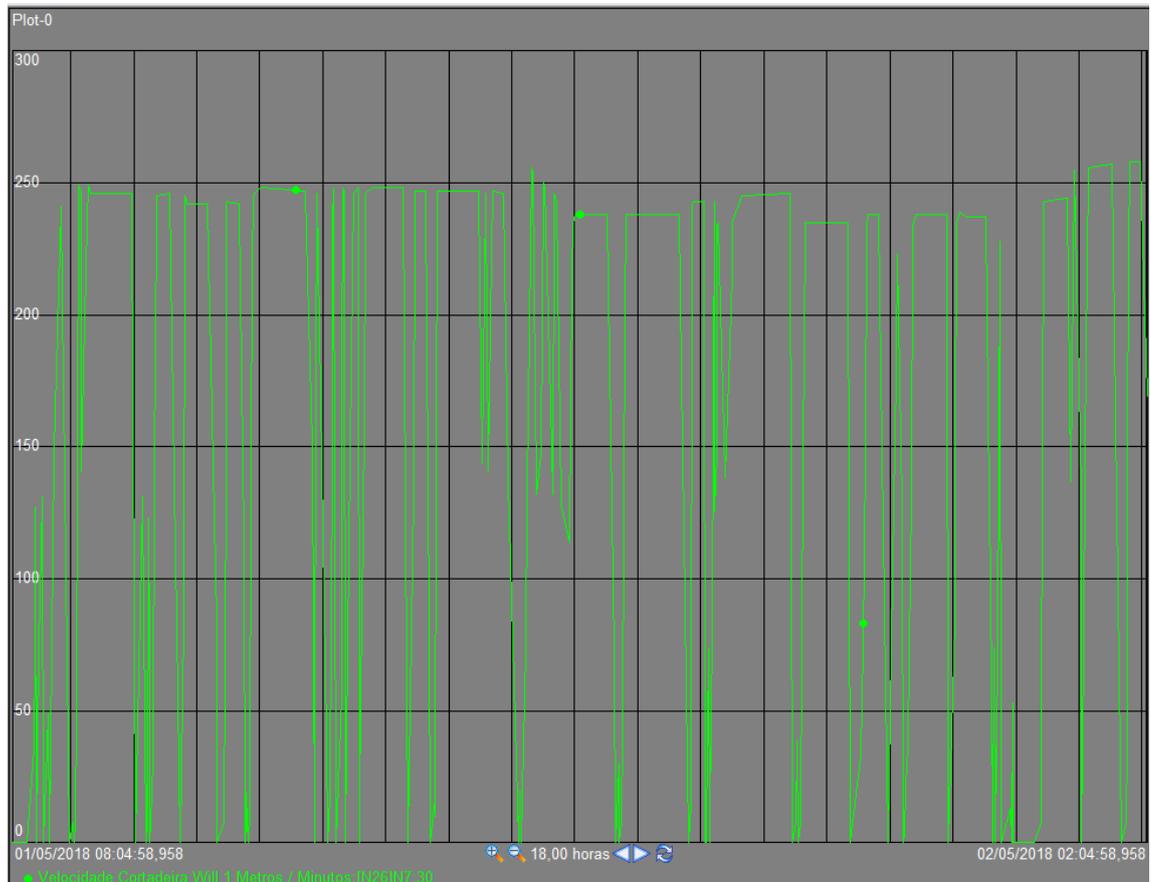
Ordem	Origem Nota SAP	Data-base do início	Texto breve	Custos totais plan.	Custos tot.reais
4115158773	InspeçãoMEC	02/05/2018	(P)REDUTOR COM RUÍDO	R\$ -	R\$ -
4115160398	PlanACAB	03/05/2018	(P)REVISÃO DA CAIXA DE TRANSMISSÃO	R\$ 851,68	R\$ 942,54
4108833885	PlanACAB	03/05/2018	(E)COMPRAR CAIXA TRANSM. TANDLER	R\$ 12.598,00	R\$ 11.743,47
4114538572	PlanACAB	03/05/2018	(E)TROCAR ROLAMENTOS ACION PRINCIPAL W1	R\$ 21.781,25	R\$ 19.641,75
				<b>R\$ 35.230,93</b>	<b>R\$ 32.327,76</b>

Fonte: Autoria Própria.

Mas também é possível estimar o lucro cessante deste tempo perdido utilizando os parâmetros médios da Linha junto com o histórico médio dos dias de operação normal.

O gráfico 7 mostra o estado de operação normal antes de se para o equipamento, com uma velocidade média de, aproximadamente 245m/min. Cada coluna do gráfico é o intervalo de 1 hora, e neste gráfico temos um alcance de 18 horas.

Gráfico 7 – Velocidade de produção antes da parada.



Fonte: Autoria Própria.

Considerando a velocidade média de 245 m/min e a equação 13, 11 caixas de coleta, no dia todas as 5 desenroladeiras estavam funcionando e o formato era o A4, temos:

$$VR = \frac{VN \times n^{\circ} \text{ de resmas na caixa de coleta} \times n^{\circ} \text{ de Rolos}}{\text{Formato} \times n^{\circ} \text{ folhas}} \quad (13)$$

Onde:

VR = Número de resmas por minuto [pacotes/min];

VN = 245 [m/min];

Nº de resmas na caixa de coleta = 11;

Nº de rolos = 5;

Formato = A4 (0,297 m), vide Tabela XXX (pagina 54);

Nº folhas = 500 folhas.

Assim:

$$VR = \frac{245 \left[ \frac{m}{min} \right] \times 11 \text{ pacotes} \times 5}{0,297 \text{ m} \times 500}$$

$$\underline{\underline{VR=91 \text{ pacotes/min}}}$$

Este valor, 91 pacotes a cada minuto, é importante para quantificar a quantidade de pacotes que deixaram de ser produzidas na ocasião da emergência.

*Total de perda cessante = produção média x tempo de manutenção*

$$\text{Total de perda cessante} = 91 \left[ \frac{\text{pacotes}}{\text{minuto}} \right] \times 590 [\text{min}]$$

$$\underline{\underline{\text{Total de perda cessante} = 53\,690 \text{ pacotes}}}$$

Levando em consideração a Tabela 2 e a Tabela 7 que nos dá a gramatura do papel programado para ser feito no dia da ocorrência da falha, podemos calcular a perda em toneladas de papel.

Tabela 7 – Pedidos dos dias afetados.

Seq	Tipo	Pedido-It	Pacotes	Data	Qtd Caixas	Descr do Pedido
1	CutS	287319-03	19200	02/05/2018	3840,0	(G)HP H&OF CHP150 80 g/m2 A4 5R V17 PP6 E/FSC
2	CutS	287331-02	9600	02/05/2018	1920,0	(G)HP H&OF CHP150 80 g/m2 A4 5R V17 PP6 E/FSC
3	CutS	286450-01	72238	03/05/2018	14447,7	(G)HP H&OF CHP150 80 A4 5R V17 P11 E/FSC
4	CutS	287323-01	3179	03/05/2018	635,7	(T) XEROX UNIVERSAL 80G A4 5R PP06 V17

Fonte: Autoria Própria.

Através dos dados dimensionais de uma folha da Tabela 2, calculamos a área total de uma folha e por conseguinte a área total da resma. Com os dados dos pedidos temos a

gramatura e assim podemos transformar a perda de pacotes para Toneladas, como é mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Perdas em toneladas do evento.

Perda de Papel		
Formato:	A4	Unidade
Gramatura:	80,0	g/m <sup>2</sup>
Largura:	21,0	cm
Comprimento:	29,7	cm
Área (1 folha):	0,06237	m <sup>2</sup>
Área (500 folhas):	31,185	m <sup>2</sup>
Peso de uma Resma	2,49	kg
Resmas perdidas no evento	53690	Pacotes
<b>Perda Total de Papel</b>	<b>133,95</b>	<b>Toneladas</b>

Fonte: Autoria Própria.

Por questão de contrato com clientes da International Paper, os preços de venda não podem ser divulgados. Mas o Gráfico 8 mostra uma aproximação muito real dos preços praticados pelo mercado como um todo.

Gráfico 8 – Preço médio da tonelada de papel.



Fonte: Bradesco (2018).

Com essa estimativa de preço e a perda de produção, temos uma projeção do faturamento cessante do evento e apresenta-lo na Tabela 9:

Tabela 9 – Cálculo do Faturamento Cessante.

<b>Estimativa de Faturamento Cessante</b>	
Perda de Produção (ton):	133,95
Preço de Mercado (US\$):	680
Cotação do Dolar em 31/05/2018 (R\$):	3,72
Faturamento Cessante (R\$):	<b>338.839,92</b>

Fonte: B<sup>3</sup> Bovespa (2018).

Da Tabela 8 temos o valor que foi deixado de ser faturado pela empresa nas 9 horas que o equipamento ficou parado. Assim temos que em 3 de maio de 2018 por conta da emergência da troca da caixa de transmissão do acionamento da E.C.H WILL 1 foram gastos R\$ 32.327,76 com custos operacionais de atendimento fora do programado e ainda foram R\$ 338.839,92 de perda virtual, totalizando R\$ 371.167,68 resumidos na Tabela 10. Este valor de “perda virtual” devido ao fato de que a produção daquele espaço de tempo teve que ser alocada no espaço de produção que poderia estar sendo usado para atender outros clientes. O ocorrido foi o deslocamento de pedidos menores para os meses de setembro e outubro.

Tabela 10 – Custos da Emergência.

Custos Operacionais	Faturamento Cessante	Custo Total da Emergência
R\$ 32.327,76	R\$ 338.839,92	R\$ 371.167,68

Fonte: Autoria Própria.

## 4.2 APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Tendo em vista o acontecimento do tópico 4.1, a equipe de manutenção da unidade decidiu atuar de forma diferente no mesmo equipamento 4 meses depois. A mesma tendência de dias antecedentes à ocorrência do dia 2 de maio de 2018, de aumento nos índices de vibração, foi detectada nos dias anteriores ao dia 13 de setembro deste ano. Contudo devido ao impacto gerado pela emergência do dia 2 de maio, a atitude desta vez foi uma atuação “de oportunidade”. Ou seja, assim que houvesse uma parada programada para a operação, o time de manutenção entraria na Cortadeira WILL 1 para efetuar uma manutenção.

Em comum acordo com a operação do acabamento, foi programada também a rosca da transmissão do acionamento adjunto com a substituição do conjunto de corte, passou do

formato Carta para A4, troca dos rolamentos da comporta de rejeito entre outras atividades como mostra a Figura 23

Figura 23 – Parada programada da linha para troca de sistemas de corte.

INTERNATIONAL  PAPER		<i>Paradas de Equipamentos</i>		14/09/2018
MJQ176		Período de 13/09/2018 à 13/09/2018		08:04
<b>LW01</b>				
<b>Data</b>	<b>Comentário</b>			<b>Minutos</b>
	<b>PARADA OPERACIONAL</b>			<b>275</b>
	AW1 - Will I Cort.			<b>275</b>
13/09/2018 21:44	Travou caixas na régua do formato da mesa fixa paletizador, tirando o sensor de posição, recolocando o sensor			12
13/09/2018 19:44	Queda de pacotes no acumulador travando a placa de transferência de pacotes			9
13/09/2018 16:35	Passando pontas			8
13/09/2018 16:30	Desbloqueando o equipamento			5
13/09/2018 16:00	Ajuste fino da faca transversal			30
13/09/2018 13:06	Troca da faca e contra faca transversal 2, troca do rolamento do acionamento das correias de rejeito do damper 37, troca do inversor do transportador de roletes na saída da encaixotadeira 37 e ajuste fino da faca transversal			174

Fonte: Autoria Própria.

A parada do dia 13 de setembro estava programada para o dia 18, a qual foi adiantada para o dia 13, sem haver qualquer problema de perda de produção, uma vez que a parada de 3 horas é mensalmente programada para estas atividades rotineiras.

A Tabela 11 trás o controle dos custos relacionados somente ao equipamento foco deste estudo.

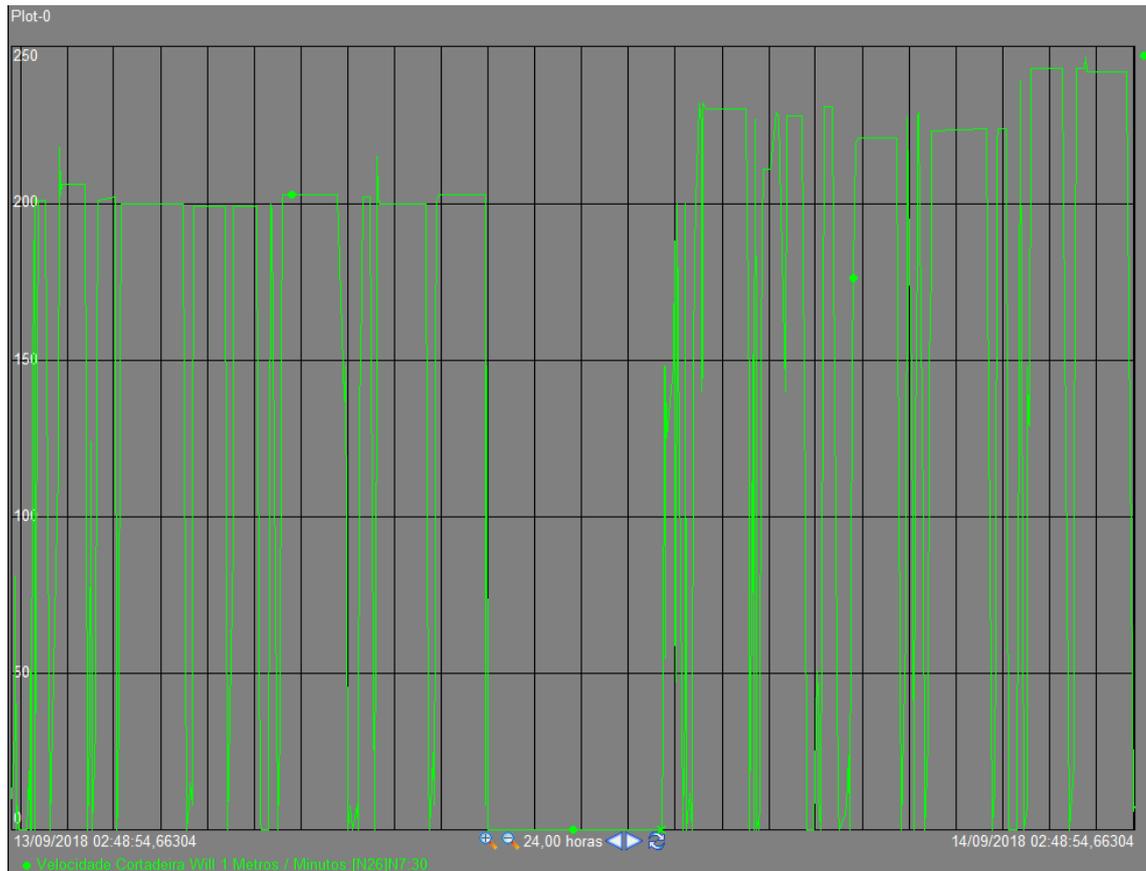
Tabela 11 – Custos operacionais da Manutenção Preventiva

<b>Ordem</b>	<b>Origem Nota SAP</b>	<b>Data-base do início</b>	<b>Texto breve</b>	<b>Custos totais plan.</b>	<b>Custos tot.reais</b>
4115595485	SKFInspec	10/09/2018	VAZAMENTO DE OLEO/REPOSICAO EMERGENCIAL	R\$ 1.788,06	R\$ 1.587,40
4107579857	PlanACAB	13/10/2012	TROCAR REDUTOR	R\$ -	R\$ -
4115685836	PlanACAB	14/09/2018	REVISAR CAIXA ACION. PRINCIPAL WILL 1	R\$ 1.934,51	R\$ 1.986,41
				<b>R\$ 3.722,57</b>	<b>R\$ 3.573,81</b>

Fonte: Autoria Própria.

O Gráfico 9 mostra a proporção da parada programada no intervalo de 24 horas, mesmo intervalo que o Gráfico 7.

Gráfico 9 – Velocidade de produção no dia da parada programada.



Fonte: Autoria Própria.

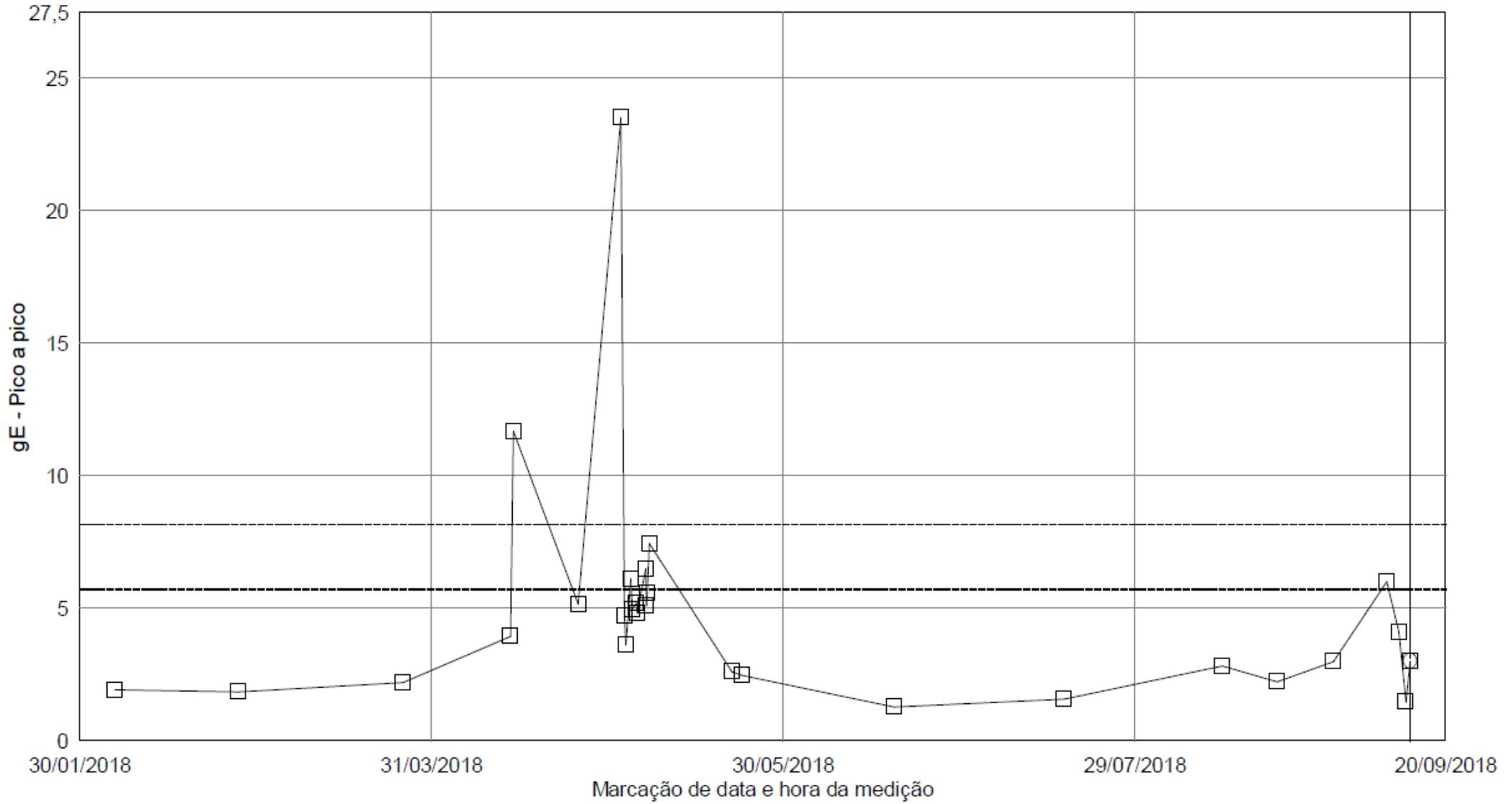
Os 174 minutos não foi o tempo de troca do equipamento, mas sim o tempo de realização de todas as atividades programadas. A troca do reduto ocorreu em 50 min, pois esta seguiu o fluxo do MWS que planeja e prepara toda a intervenção antes da execução em si. Ou seja, o equipamento reserva é revisado, deslocado para o local, as ferramentas separadas e os profissionais condicionados, tudo antes de se parar o equipamento.

Por consequência, a mesma atividade do dia 2 de maio, troca do redutor do acionamento foi executada em menos de 1 hora, e com custo de R\$ 3573,81 (vide Tabela 10).

#### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE ATUAÇÕES

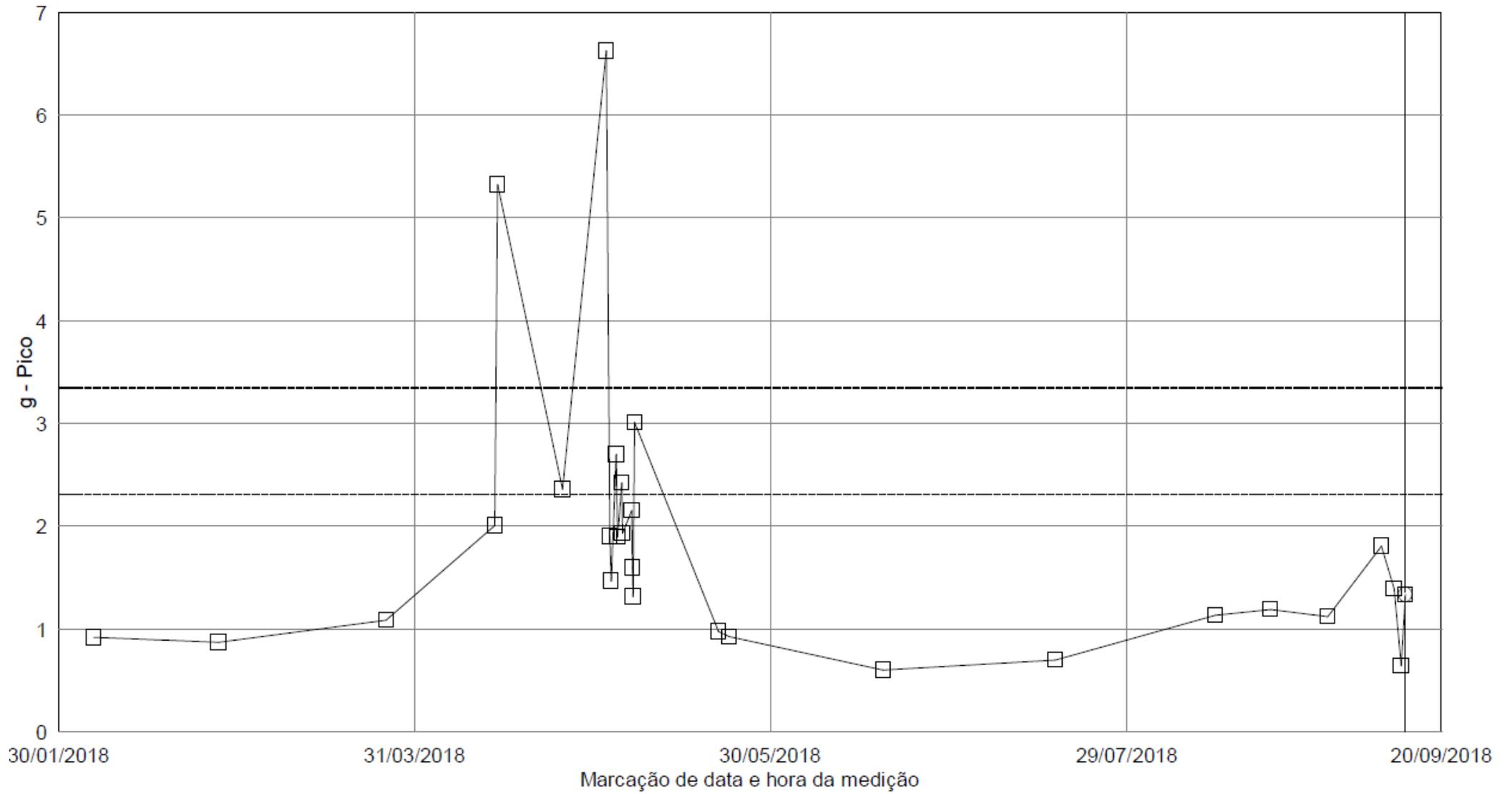
Do ponto de vista do Elemento de Confiabilidade do GMS, houve uma sequência de falhas que geraram a ocorrência ilustrada neste trabalho no item 4.1. Essa afirmação de falha é respaldada por um histórico mostrado nos Gráficos 10, 11 e 12 e Tabelas 12, 13 e 14 onde as rotas de inspeção de vibração que foram executadas estão compiladas com seus valores em gE, g e mm/s conforme padrão de atuação da SKF. Todos os Gráficos e suas respectivas Tabelas apontam a tendência de crescimento da vibração do equipamento.

Gráfico 10 – Tendência da Aceleração Envelope da Vibração.



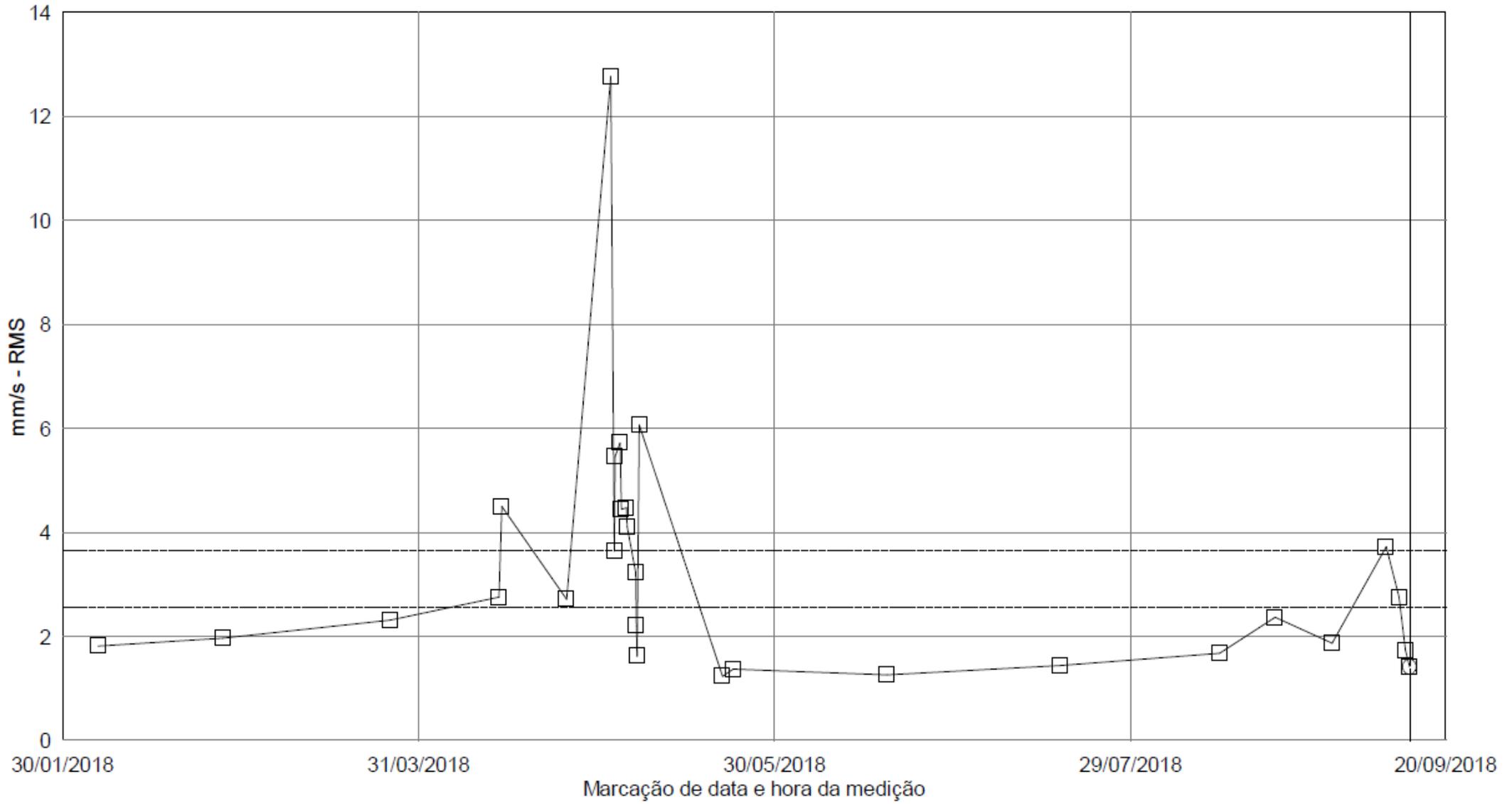
Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 11 – Tendência da Aceleração da Vibração.



Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 12 – Tendência da Velocidade da Vibração.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 12 – Aceleração Envelope da Vibração.

Equipamento		REDUTOR TANDLER i=1:1
TAG		MG19-813-08-081-A
Unidades		gE
Fundo escala		24
Alarme		8,165
Alerta		5,713
Data	Hora	Aceleração Envelope
14/09/2018	10:58:06	3,018
13/09/2018	16:59:20	1,461
12/09/2018	13:10:51	4,1
10/09/2018	10:04:49	5,995
01/09/2018	08:41:34	Sem Medição
22/08/2018	16:26:10	Sem Medição
13/08/2018	09:44:55	Sem Medição
17/07/2018	11:22:05	Sem Medição
18/06/2018	09:25:05	Sem Medição
23/05/2018	10:19:52	Sem Medição
21/05/2018	16:28:45	Sem Medição
07/05/2018	14:21:15	Sem Medição
07/05/2018	06:27:37	Sem Medição
07/05/2018	04:25:23	Sem Medição
07/05/2018	00:22:41	Sem Medição
05/05/2018	12:47:05	Sem Medição
05/05/2018	10:07:27	5,17
04/05/2018	16:20:44	4,977
04/05/2018	10:22:37	6,096
03/05/2018	13:54:09	3,602
03/05/2018	10:09:37	4,694
02/05/2018	19:39:13	23,51
25/04/2018	10:41:53	5,156
14/04/2018	10:08:15	11,69
13/04/2018	22:56:32	3,944
26/03/2018	14:36:44	2,179
26/02/2018	12:15:02	1,824
05/02/2018	09:50:41	1,911

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 13 – Aceleração da Vibração.

Equipamento		REDUTOR TANDLER i=1:1
TAG		MG19-813-08-081-A
Unidades		g
Fundo escala		5
Alarme		3,346
Alerta		2,312
Data	Hora	Aceleração
14/09/2018	10:58:06	1,331
13/09/2018	16:59:20	0,6381
12/09/2018	13:10:51	1,389
10/09/2018	10:04:49	1,802
01/09/2018	08:41:34	1,119
22/08/2018	16:26:10	1,186
13/08/2018	09:44:55	1,134
17/07/2018	11:22:05	0,6955
18/06/2018	09:25:05	0,602
23/05/2018	10:19:52	0,9254
21/05/2018	16:28:45	0,9695
07/05/2018	14:21:15	3,006
07/05/2018	06:27:37	1,309
07/05/2018	04:25:23	1,594
07/05/2018	00:22:41	2,15
05/05/2018	12:47:05	1,929
05/05/2018	10:07:27	2,422
04/05/2018	16:20:44	1,892
04/05/2018	10:22:37	2,699
03/05/2018	13:54:09	1,467
03/05/2018	10:09:37	1,903
02/05/2018	19:39:13	6,625
25/04/2018	10:41:53	2,36
14/04/2018	10:08:15	5,318
13/04/2018	22:56:32	2,004
26/03/2018	14:36:44	1,086
26/02/2018	12:15:02	0,8715
05/02/2018	09:50:41	0,9141

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 14 – Velocidade da Vibração.

Equipamento		REDUTOR TANDLER i=1:1
TAG		MG19-813-08-081-A
Unidades		mm/s
Fundo escala		10
Alarme		3,642
Alerta		2,559
Data	Hora	
14/09/2018	10:58:06	1,402
13/09/2018	16:59:20	1,723
12/09/2018	13:10:51	2,75
10/09/2018	10:04:49	2,72
01/09/2018	08:41:34	4,466
22/08/2018	16:26:10	Sem Medição
13/08/2018	09:44:55	Sem Medição
17/07/2018	11:22:05	Sem Medição
18/06/2018	09:25:05	Sem Medição
23/05/2018	10:19:52	Sem Medição
21/05/2018	16:28:45	Sem Medição
07/05/2018	14:21:15	Sem Medição
07/05/2018	06:27:37	Sem Medição
07/05/2018	04:25:23	Sem Medição
07/05/2018	00:22:41	Sem Medição
05/05/2018	12:47:05	Sem Medição
05/05/2018	10:07:27	4,466
04/05/2018	16:20:44	4,444
04/05/2018	10:22:37	5,716
03/05/2018	13:54:09	5,455
03/05/2018	10:09:37	3,634
02/05/2018	19:39:13	12,77
25/04/2018	10:41:53	2,711
14/04/2018	10:08:15	4,499
13/04/2018	22:56:32	2,745
26/03/2018	14:36:44	2,306
26/02/2018	12:15:02	1,965
05/02/2018	09:50:41	1,806

Fonte: Autoria Própria.

De acordo com os procedimentos de MPM, assim que um item apresenta índice de vibração que passar do alerta, ele deve ser monitorado de forma diferenciada. Diariamente na reunião diária do MWS o representante da SKF leva aos Supervisores, Gerente e Inspetores de cada área os itens que estão em estado de alerta e alarme. Mediante essa lista, são tomadas decisões que deveriam seguir o fluxo do planejamento, tal lista está ilustrada na Tabela 5.

Além dos indicadores da SKF, é perceptível a tendência de aumento de todos os 3 parâmetros medidos nas Tabelas e gráficos acima. No intervalo entre o dia 13 de abril até o dia 02 de maio (dia da Falha) houve picos e a tendência mostra que o equipamento passou por alerta e alarme antes da falha. Sendo essa uma evidencia que favorece o pensamento de que a emergência poderia ter sido evitada.

Ao se comparar a ocorrência emergencial com a manutenção preventiva temos diversos pontos a serem comparados, mas o principal são os custos. A Tabela14 resume estes custos para que tenha-se uma perspectiva da dimensão das diferenças.

Tabela 15 – Resumo dos custos das ocorrências.

<b>Manutenção no Redutor da transmissão</b>	<b>Emergencial (03/05/2018)</b>	<b>Preventiva (13/09/2018)</b>
Custos Operacionais	R\$ 32.327,76	R\$ 3.573,81
Faturamento cessante	R\$ 338.839,92	R\$ -
<b>Total</b>	<b>R\$ 371.167,68</b>	<b>R\$ 3.573,81</b>

Fonte: Autoria Própria.

Houve uma diferença expressiva de custos, sendo a manutenção preventiva 0,96% o valor absoluto da emergência ocorrida meses antes.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho se concentrou em explicitar a importância estratégica de uma manutenção preventiva e preditiva para a indústria do papel e celulose, contudo os resultados são traduzidos em valores monetários para que se possa estender sua análise à qualquer unidade de produção de papel bem como à outros ramos da indústria.

Como principal parâmetro de referência da manutenção, estudou-se a Análise de vibração e como ela pode ser de importância imperativa na tomada de decisões que podem tem impacto altíssimo na produção de uma companhia. Passou-se por alguns conceitos básicos de manutenção, uma revisão sobre fundamentos da vibração e uma explicação sobre o modelo de gestão da manutenção da empresa estudada.

O estudo de caso consistiu em analisar duas ocorrências de manutenção no mesmo equipamento da mesma parte da linha de produção, sendo diferenciadas apenas no momento da tomada de decisão pela atuação da manutenção, o que muda o conceitualmente a manutenção em si. No primeiro caso é clara a opção pela manutenção corretiva, e seus resultados foram classificados pela alta gestão da empresa como “Catastróficos”, tanto financeiramente como comercialmente. Já o segundo caso foi uma atuação muito mais assertiva com uma decisão que comparativamente, tinha o mesmo potencial de perda da primeira mas apresentou custos na ordem de 1% da antecessora.

A principal avaliação para a aplicação deste estudo, foi o modelo de produção da companhia, que por ser um processo contínuo, qualquer interrupção é perda de competitividade e sustentabilidade. Assim a contribuição deste trabalho para qualquer indústria que opere no mesmo modelo é o esclarecimento da importância da análise de vibração na manutenção, bem como ela supre os engenheiros na tomada de decisão. Também pode se concluir que a análise de vibrações pode garantir um processo com uma confiabilidade alta, uma vez que seu foco é em predição de condição, possibilitando assim ações planejadas, estruturadas e eficientes.

Por fim este trabalho e seus resultados podem ser usados por outros estudantes, engenheiros ou pessoa interessada como fonte de pesquisa e informação para estudos relacionados.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Relatório de Sustentabilidade**. São Paulo: BRACELPA, 2010. 54 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO. **Documento Nacional** - ano de 2013. Salvador, BA: ABRAMAN, 2013.

B<sup>3</sup> BOVESPA - BRASIL BOLSA BALCÃO S.A. **Cotações e Câmbio**. Disponível em: <[http://www.b3.com.br/pt\\_br/market-data-e-indices/servicos-de-dados/market-data/cotacoes/](http://www.b3.com.br/pt_br/market-data-e-indices/servicos-de-dados/market-data/cotacoes/)> Acesso em: 14/09/2018.

BANCO BRADESCO S.A. **FOEX - Fórum de mercado Externo do Papel e Celulose**. Ed. **2018/2**. São Paulo, SP: DEPEC – Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos, 2018. 72 p.

BRAUN, S.; EWINS, D.; RAO, S. S. **Encyclopedia of vibration**. London: Academic Press, 2002. 1597 p.

E.C.H. WILL. **Manual do cliente: máquina cortadeira** – modelo: 12744, Wedel, Alemanha: Departamento de Projetos, 1989.

GARCIA, T. C. **Aplicação dos conceitos de RCM e a ferramenta FMEA no aumento de confiabilidade em equipamentos de uma indústria química**. 2013. 88 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Histórico de dados**. Disponível em: <<https://www.iba.org/historico-de-desempenho>>. Acesso em: 24 ago.2018.

INTERNATIONAL PAPER USA INC. **GMS's Implementation Manual (Managers' edition)** 4. ed. Memphis: International Paper's Knowledge Center, 2018. 654 p.

INTERNATIONAL PAPER USA INC. **GMS's Management Manual (Assistant's edition)** 2. ed. Memphis: International Paper's Knowledge Center, 2018. 436 p.

KUMAR, E. V.; CHATURVEDI, S. K. Prioritization of maintenance tasks on industrial equipment for reliability: A fuzzy approach. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Kharagpur, India, v. 28, n. 1, p 109-126, out. 2011.

MOUBRAY, J. **Reliability** - centered maintenance. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. 440 p.

OHTA, R. **Gestão da manutenção centrada na confiabilidade em pontes rolantes**. 2013. 66 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

OLIVEIRA, J. C. S.; SILVA, A. P. Análise de indicadores de qualidade e produtividade da manutenção nas indústrias brasileiras. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, Ano 8, n. 3, p. 53-69, jul. 2013

PITOLI, M. H. **Sistema portátil para monitoramento e identificação de falhas em motores de indução trifásicos através da técnica da análise da assinatura elétrica**. 2013. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Automação e Sistemas Elétricos Industriais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

PRITIBHUSHAN, S.; Towards higher maintenance effectiveness: integrating maintenance management with reliability engineering. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Kolkata, India, v. 32, n. 7, p 754-762, mar. 2015.

QUINTELLA, L. C. **Aplicação da manutenção centrada em confiabilidade (RCM) na otimização do programa de manutenção de centrais termoeletricas**. 2016. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Prática da Manutenção: curso técnico em mecânica industrial**. Divinópolis: SENAI, 2006. 178 p.

SKF Reliability Systems. **Tecnologia de vibrações**. 2. ed. Jundiaí: SKF do Brasil, 2004. 90 p.

SOEIRO, N. S. **Curso de fundamental de vibração e balanceamento de rotores**. Belém,PA: Instituto de Tecnologia – ITEC, 2008. 125 p.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASEA BROWN BOVERI - ABB LTDA. **Curso ABB de vibrações em equipamentos rotativos**, Guarulhos: Centro de conhecimento e divulgação ABB, 2001.

ARYA, S. C.; O'NEILL, M. W.; PINCUS, G. **Desing of Structures and foundations for vibranting machines**. Houston, EUA: Gulf Publishing Company, 1979. 197 p.

BLOOM, N. **Reliability centered maintenance (RCM): implementation made simple**. Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill, 2006.

HOWLAN, S. Reliability-Centred Maintenance (RCM). **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, Zurich, v. 53, n. 8, p. 11-13, aug. 1981.

MABIE, H. H; REINHOLTZ, C. F. **Mechanisms and dynamics of machinery**. 4.ed. Virginia, EUA: Wiley & Sons, 1987.

SILVA, C. M.; CABRITA, C. M. P.; MATIAS, J. C. O. Proactive reliability maintenance: a case study concerning maintenance service costs. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 14, n.4, p.343-355. 2008.

SPAMER, F. R. **Técnicas preditivas de manutenção de máquinas rotativas**. 2009. 254 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2009.

TAYLOR, J. I. **The vibration analysis handbook**. Flórida: Vibration Consultants, 1994.

VERDE, M. M. A. **Identificação de falhas em sistemas rotativos empregando técnicas não lineares**. 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2008.