

MONITORAMENTO PREDITIVO ONLINE DE ATIVOS INDUSTRIAIS

Preditiva voltada à confiabilidade em ativos industriais

PREDICTIVE ONLINE MONITORING OF INDUSTRIAL ASSETS

Predictive for reliability in industrial assets

Diego Claudino Palmeiras

M.Sc. Eng. Renato Ribeiro Aleixo

RESUMO

A gestão estratégica da manutenção envolve o conhecimento integrado da empresa, de cada setor e cada equipamento, decidindo onde, quando e por que aplicar cada tipo de manutenção. O aumento da complexidade e a diversidade de ativos físicos dentro de uma organização aumenta ainda mais a demanda por sistemas de manutenção eficientes e economicamente viáveis. O presente trabalho busca uma abordagem para desenvolvimento de uma gestão da manutenção industrial eficaz, através de levantamento bibliográfico, pesquisa e análise, descrevendo de modo abrangente informações técnicas, critérios e práticas, para uma gestão da manutenção com foco na busca da excelência e segurança. O Monitoramento de Ativos Industriais tornou-se uma questão estratégica para o gerenciamento de custo da manutenção e atender a norma de segurança nacional e internacional referente a proteções de máquinas e equipamentos (NR12), devido as suas proteções, impossibilitarem as análises periódicas de vibração, temperatura e ruído. O sistema de monitoramento online de ativos recebe os dados 24 horas por dia sem a necessidade de parada dos equipamentos para realizar as análises. O sistema de monitoramento online de ativos busca o conceito de quebra zero, para não prejudicar a produção e poupar recursos e tempo. O sistema de monitoramento online de ativos traz lucro e a efetividade da produção da indústria, pois minimiza os custos e paradas das máquinas em virtude de falhas. Auxilia também o planejamento da manutenção sem prejudicar a produção, parando as máquinas somente quando necessário.

Palavras-chave: Gestão Estratégica, Confiabilidade, Planejamento da Manutenção, Monitoramento Online, Indústria 4.0, Excelência de Manutenção, Segurança, NR12, Custo de Manutenção, Engenharia de Manutenção.

ABSTRACT

Strategic maintenance management involves integrated knowledge of the company, each sector and each equipment, deciding where, when and why to apply each type of maintenance. The increased complexity and diversity of physical assets within an organization further increases the demand for efficient and economically viable maintenance systems. The present work seeks an approach to develop an effective industrial maintenance management, through bibliographic survey, research and analysis, describing in a comprehensive way technical information, criteria and practices, for a maintenance management with a focus on the search for excellence and safety. The Monitoring of Industrial Assets has become a strategic issue for the management of maintenance costs and to meet the national and international safety norms related to the protection of machinery and equipment (NR12), due to their protection, making periodic vibration analyzes impossible, temperature and noise. The online asset monitoring system receives data every 24ms, enabling 24-hour monitoring without the need to stop equipment and machines to perform the analysis. The online asset monitoring system seeks the concept of zero breakage, so as not to harm production and save resources and time. The online asset monitoring system improves the quality of the product, the profit and the effectiveness of the industry's production, as it minimizes costs and machine downtime due to failures. It also helps with maintenance planning without jeopardizing production, stopping machines only when necessary and in the amount required.

Keywords: Strategic Management, Reliability, Maintenance Planning, Online Monitoring, Industry 4.0, Maintenance Excellence, Safety, NR12, Maintenance Cost, Maintenance Engineering.

1. Introdução

A expansão tecnológica, globalização, o desaparecimento das fronteiras e a incorporação da sustentabilidade e responsabilidade social dentro das empresas são, certamente, grandes indicativos da evolução da economia mundial. Ao mesmo tempo, acirra-se a concorrência entre as organizações e estas se veem obrigadas a melhorar a agilidade a que respondem ao mercado, inovando e efetuando melhorias contínuas. Neste cenário, é preciso que a atividade de manutenção se integre de maneira eficaz ao processo produtivo, contribuindo para que a empresa caminhe rumo à excelência. A grande interseção do setor de manutenção com o de produção, influenciando diretamente a qualidade e produtividade, faz com que o mesmo desempenhe um papel estratégico fundamental na melhoria dos resultados operacionais e financeiros dos negócios (XENOS, 1998). Portanto, a manutenção deve se configurar como agente proativo dentro da organização. Para isso, a gestão da empresa deve ser sustentada por uma visão de futuro e os processos gerenciais devem focar na satisfação plena dos clientes, através da qualidade intrínseca de seus produtos e serviços, tendo como balizadores a qualidade total dos processos produtivos (KARDEC & NASCIF, 2009).

Segundo Kardec & Nascif (2009), a atividade de manutenção precisa deixar de ser apenas eficiente para se tornar eficaz; ou seja, não basta, apenas, reparar o equipamento ou instalação tão rápido quanto possível, mas, principalmente, é preciso manter a função do equipamento disponível para a operação, evitar a falha do equipamento e reduzir os riscos de uma parada de produção não planejada. Os gestores de manutenção devem ter ampla visão e atuação sistêmica dentro de suas organizações, de tal forma que a diversidade de modelos e fundamentações do planejamento e controle da manutenção, plenamente consolidados, sejam úteis à maximização dos equipamentos, assim como os lucros da organização.

A manutenção, vista como função estratégica, responde diretamente pela disponibilidade e confiabilidade dos ativos físicos e qualidade dos produtos finais, representando, portanto, importância capital nos resultados da empresa. Kardec & Nascif (2009) cita os três paradigmas da manutenção em relação ao tempo:

- 1) Paradigma do passado: o homem da manutenção sente-se bem quando executa um bom reparo;

2) Paradigma do presente: o homem da manutenção sente-se bem quando também evita a necessidade do trabalho, a falha.

3) Paradigma do futuro: o homem da manutenção sente-se bem quando ele consegue evitar todas as falhas não planejadas.

Muitas empresas brasileiras ainda atuam dentro do paradigma do passado, algumas poucas já conseguiram caminhar para o paradigma moderno e, apenas, uma pequena minoria já trabalha, hoje, dentro do paradigma do futuro e estão dando grandes saltos nos resultados empresariais. É necessário planejar a manutenção, de maneira a administrar corretamente as mais diversas variáveis envolvidas em sua gestão: desde o planejamento de compras e dimensionamento de estoques de materiais até a interferência na produção, com planos de paradas. Sem um estudo minucioso de cada área e cada ativo físico, destacando a criticidade para o processo e os impactos de uma possível falha, dificilmente será estabelecido um plano de manutenção que beneficie amplamente a empresa, reduzindo custos, aumentando disponibilidade e vida útil de equipamentos e melhorando a segurança do ambiente de trabalho.

2. Monitoramento Preditivo Online

Poucas empresas trabalham com Sistema Online Preditivo, basicamente utilizam um método adotado na década de 50, tendo como consequência paradas de produção por quebra. A Primeira Geração da Manutenção perdurou até meados de 1950. Nessa época, manutenção não era o ato de manter o ativo e sim, de repará-lo de acordo com a necessidade. Ou seja, existia apenas a Manutenção Corretiva. A Segunda Geração da Manutenção surgiu no período pós Segunda Guerra Mundial devido à alta competitividade e crescimento do consumo devido às circunstâncias. No Japão, os Engenheiros Industriais começaram a perceber que alguns equipamentos falhavam em intervalos semelhantes e ali nascia a Manutenção Preventiva. Em 1970, impulsionada pela Terceira Revolução Industrial (chegada da automação industrial), surgia a Manutenção Centrada na Confiabilidade e o movimento conhecido por Terceira Geração da Manutenção.

Evolução das Técnicas de Manutenção

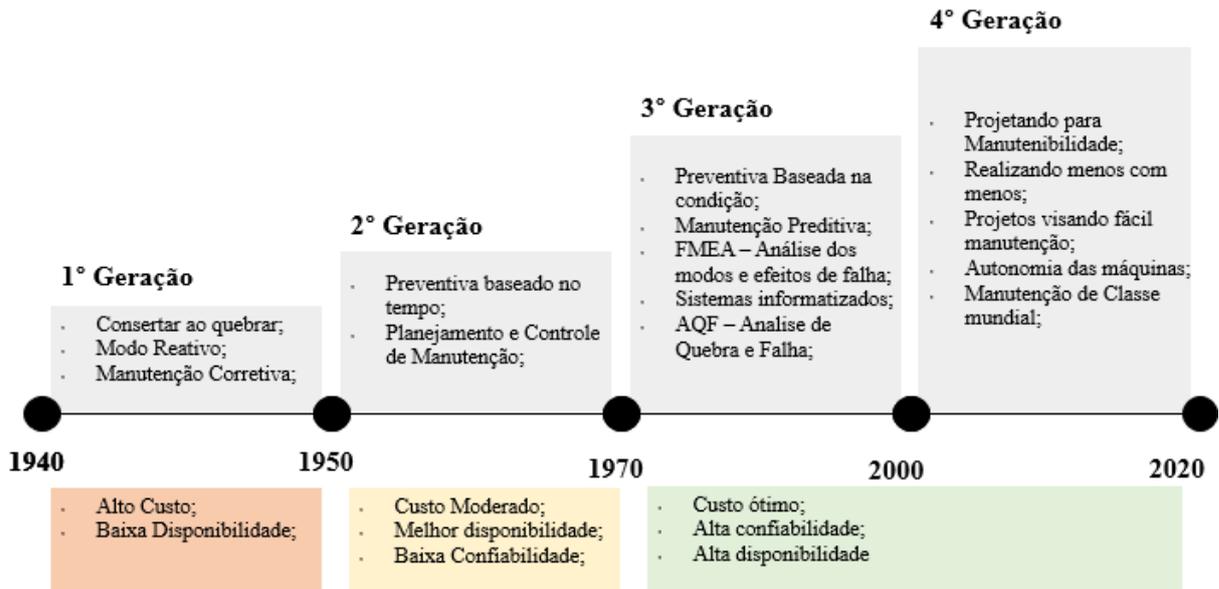


Figura 1: Evolução das Técnicas de Manutenção

(Fonte: Próprio Autor)

A proposta deste trabalho é justificada pela grande janela de oportunidades que rodeiam o setor de manutenção, haja vista, a gestão estratégica do mesmo ainda é pouco praticada no Brasil e no mundo, e muitas empresas sequer possuem controle de suas atividades neste âmbito, concentrando suas práticas em manutenções corretivas, ao acaso do tempo, sem indagar se realmente tais práticas otimizam seus ganhos. Há grande demanda por sistemas de manutenção eficientes e economicamente viáveis e pouca informação. De acordo com a norma NBR-5462 convencionada em 1994, os três principais tipos de manutenção são a manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva. A principal forma de entender a diferença entre os três tipos é através da Curva PF.

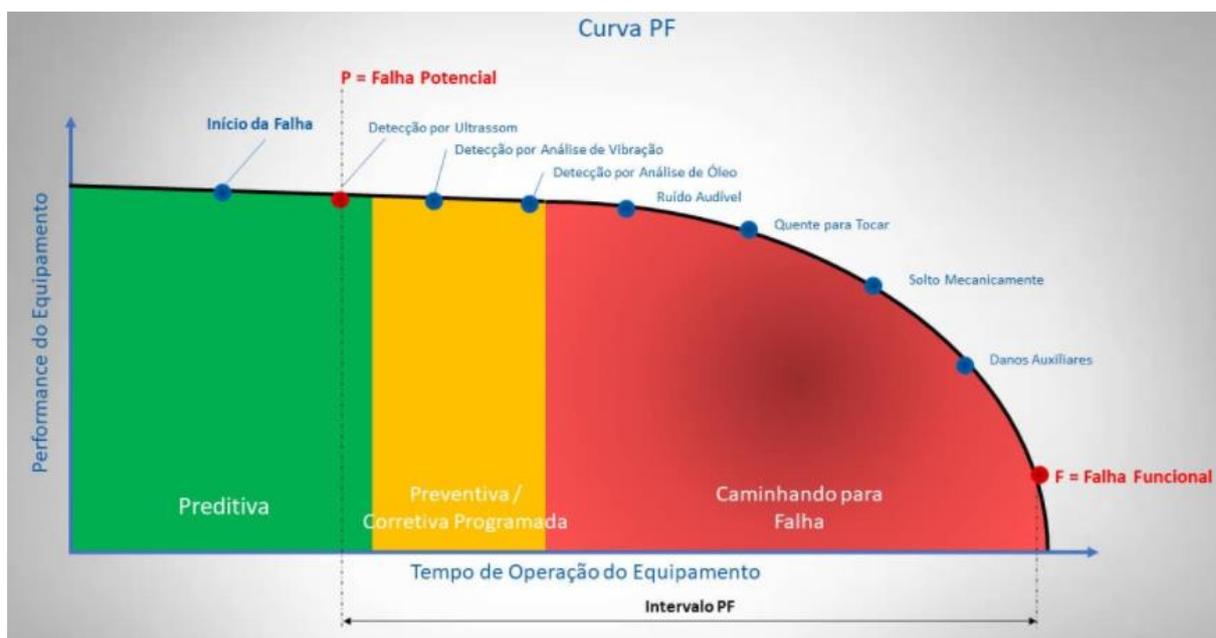


Figura 2: Curva PF

(Fonte: TELES, Jhonata. *Bíblia do RCM*. 2. ed. Brasília: Editora Engeteles, 2019)

Em resumo, pode-se dizer que: Manutenção Corretiva é aquela realizada para corrigir e eliminar a causa da falha. Seja potencial ou funcional. Manutenção Preventiva é aquela que é realizada para reduzir a probabilidade de falha potencial. A mesma é realizada para monitorar as condições de funcionamento do equipamento e encontrar a falha potencial ainda em estágio inicial. Dentro de cada tipo de manutenção, derivam-se outras categorias. Tais categorias são chamadas de “Estratégias de Manutenção”. Essas estratégias que deverão ser alinhadas aos objetivos de médio e longo prazo da empresa.

2.1 Manutenção Corretiva

Nem todas as Manutenções Corretivas são iguais. Existem basicamente dois tipos: manutenção corretiva emergencial (também conhecida como corretiva não-programada) ou manutenção corretiva programada. A diferença entre os dois tipos é basicamente se a manutenção é executada após a falha potencial ou após a falha funcional.

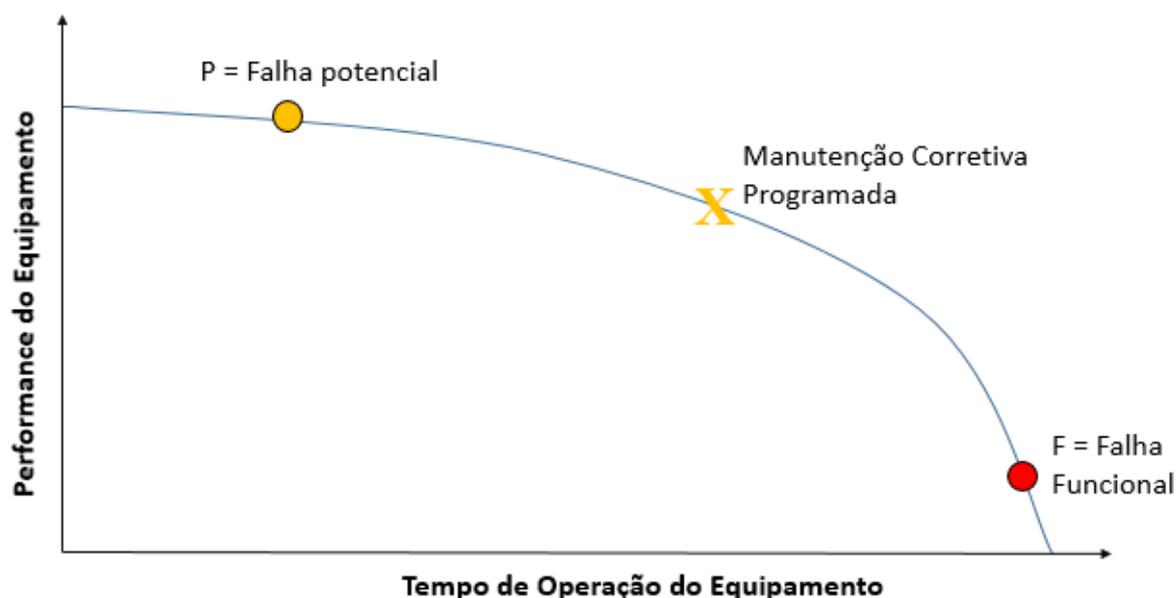


Figura 3: Curva PF de Manutenção Corretiva

(Fonte: Próprio Autor)

2.1.1 Manutenção Corretiva Emergencial

Como o próprio nome sugere, a Manutenção Corretiva Emergencial é aquela que é realizada após a falha funcional do equipamento e por esse motivo, o equipamento deve ser reparado em caráter de urgência por conta do lucro cessante (momento em que a empresa deixou de “lucrar” por conta da parada do equipamento).

2.1.2 Manutenção Corretiva Programada

A Manutenção Corretiva Programada é aquela realizada para eliminar a falha potencial antes que ela evolua para a falha funcional. Se a falha potencial não trazer risco à segurança ou problemas de qualidade, ela pode ser programada para ser eliminada quando for mais conveniente para empresa. Seja por questões de produção, custo, disponibilidade de materiais ou mão de obra.

2.2 Manutenção Preventiva

Segundo a norma NBR-5462, Manutenção Preventiva é a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item. A

NBR-5462 elenca três tipos de manutenção: Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva e Manutenção Preditiva. O que irá definir qual tipo usar e quando usar é a estratégia de manutenção adotada para manter a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos.

Ao contrário do que muitos profissionais imaginam, a manutenção preventiva ainda não é a manutenção que tem o melhor custo/benefício dentre as três. A manutenção preventiva custa, em média, 3 vezes mais que a manutenção preditiva e é aplicável em apenas 11% dos equipamentos. A manutenção preventiva traz resultado apenas nos equipamentos onde as falhas que estão relacionadas diretamente com a idade do equipamento. Ou seja, ela é ineficiente em 89% dos equipamentos, onde as taxas de falhas não estão relacionadas a idade do equipamento, mas sim, com as condições de operação. Para que fique claro, deve-se analisar a definição de Manutenção Preventiva segundo a NBR-5462 e destacar três pontos: intervalos predeterminados, critérios específicos e redução da probabilidade de falhas. Esses pontos são conhecidos como “gatilhos”, ou seja, uma vez que ocorre um evento predeterminado como gatilho, é executada uma ação de manutenção. Os gatilhos são critérios ou condições específicas que irão determinar quando um equipamento deve passar por manutenção.

Existem basicamente quatro tipos de gatilhos, sendo eles:

1. Tempo – Exemplo: “Lubrificar mancais a cada 6 meses”
2. Horas de Funcionamento – Exemplo: “Lubrificar mancais a cada 1200 horas”
3. Produtividade - Exemplo: “Lubrificar mancais a cada 1500 peças produzidas”
4. Gatilho Misto - Exemplo: “Lubrificar mancais a cada 6 meses, 1200 horas de funcionamento ou 1500 peças produzidas. O que acontecer primeiro, entre duas condições.



Figura 4: Gatilhos para Manutenção Preventiva

(Fonte: Próprio Autor)

2.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva também é conhecida como manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento. É baseada na tentativa de definir o estado futuro de um equipamento ou sistema, por meio dos dados coletados ao longo do tempo por uma instrumentação específica, verificando e analisando a tendência de variáveis do equipamento. Esses dados coletados, por meio de medições em campo como temperatura, vibração, análise físico-química de óleos, ultrassom e termografia, permitem um diagnóstico preciso. Esse tipo de manutenção caracteriza-se pela previsibilidade da deterioração do equipamento, identificando e quantificando a criticidade das falhas, ainda em estágio inicial, por meio do monitoramento dos parâmetros principais, com o equipamento em funcionamento.

Existem várias técnicas e métodos de Manutenção Preditiva disponíveis no mercado. Exemplo são as quatro técnicas mais comuns no meio industrial:

1. Análise de vibrações;
2. Termografia;
3. Análise de Óleo;
4. Ultrassom;



*Figura 5: Técnicas de Manutenção Preditiva
(Fonte: Próprio Autor)*

Cada técnica de Manutenção Preditiva irá focar na análise de um modo de falha, para aumentar a confiabilidade e precisão do diagnóstico, elas podem ser usadas em conjunto. Os conceitos e aplicações da Manutenção Preditiva já estão inseridos no ambiente de manutenção há muito tempo, se efetivou como importante ferramenta de produtividade a partir dos anos 70, sendo que sua evolução vem se destacando desde meados dos anos 1990. Manutenção preditiva é um método que tem a finalidade de indicar as condições reais de funcionamento das máquinas com base em dados que informam o seu desgaste ou processo de degradação. A proposta da manutenção preditiva é fazer o monitoramento regular das condições mecânicas, eletrônicas, pneumáticas, hidráulicas e elétricas dos equipamentos e instalações e, ainda, monitorar o rendimento operacional de máquinas, equipamentos e instalações quanto a seus processos.

2.3.1 Análise de Vibração

Tem sido a técnica de monitoramento de condição mais completa para a detecção de defeitos mecânicos, a Análise de Vibração é presença obrigatória em qualquer programa de manutenção preditiva em equipamentos rotativos. Além de detectar defeitos existentes nas máquinas essa técnica trabalha na causa raiz de outros defeitos que possam a vir ocorrer e causar a parada de produção.

Principais defeitos detectáveis:

- ❖ Desbalanceamento de massa;
- ❖ Desalinhamento e empenamento de eixos;
- ❖ Desgaste de rolamentos;
- ❖ Desgaste de engrenagens;
- ❖ Problemas estruturais;
- ❖ Lubrificação deficiente;
- ❖ Folgas.

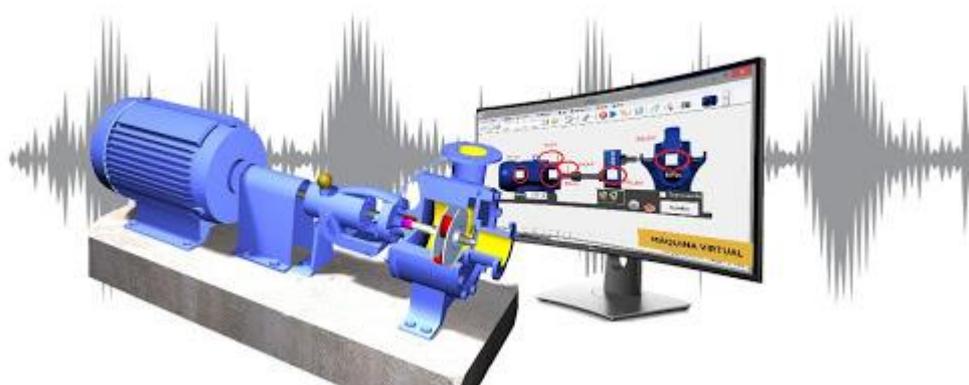


Figura 6: Análise de Vibração

(Fonte: VTK Soluções em Preditiva – Acesso em 20/09/2020)

A vibração de um sistema mecânico é uma constante troca entre energia cinética e energia potencial, sendo esta reduzida por um elemento dissipador. Assim pode-se dizer que um corpo armazena energia na forma de vibração, até que seja totalmente dissipada. Caso haja uma excitação constante, o equilíbrio entre a excitação e a energia dissipada resultará em um determinado nível de vibração. As fontes de vibração mais comuns em maquinários estão relacionadas com a inércia de partes móveis na máquina. As leis de Newton determinam que uma força é necessária para acelerar uma massa, e outra força deve surgir como reação a primeira. Se as forças forem periódicas, haverá como resultado um movimento da massa também periódico.

O problema da vibração é acentuado devido à presença de excitações externas variantes no tempo, por exemplo, o problema da ressonância em uma máquina rotativa, que é causado pela presença inevitável de desbalanceamento no rotor. As partes rotativas não balanceadas irão gerar, devido à segunda lei de Newton, uma reação nos suportes dos rolamentos, que será uma força rotativa. Esta força rotativa irá provocar uma aceleração centrípeta sobre o centro de massa do rotor, provocando sua vibração. Transdutores podem ser utilizados para medir a vibração, assim a componente fundamental da vibração medida, é igual à frequência de rotação do eixo da máquina tendo como origem principalmente o desbalanceamento, enquanto distorções existentes podem ter diversas causas, como por exemplo, desalinhamento do eixo e desgaste dos rolamentos.

As vibrações podem se tornar muito grandes se a frequência de excitação (frequência de rotação do rotor) estiver muito próxima a frequência de rotação natural da estrutura da máquina, ou seja, a frequência de ressonância do sistema. Toda a estrutura real possui um número infinito de frequências naturais, mas muitos problemas de vibração em máquinas envolvem apenas uma dessas frequências.

2.4 Padrões e Limites de Vibração

A amplitude da vibração está relacionada ao grau de severidade de um defeito incipiente da máquina, e assim determinar se é seguro manter esta máquina em operação. O objetivo da análise de vibração é diagnosticar defeitos em um estágio inicial, o que seria muito difícil sem que houvesse guias disponíveis, as quais foram providas através da experiência daqueles que são familiarizados com a vibração em máquinas. O padrão mais utilizado como indicador de severidade é a ISO 10816, a qual determina níveis aceitáveis de vibração para diversas classes de máquinas.

2.4.1 Características de Vibração

A vibração é um movimento periódico e harmônico, e a posição da massa em função do tempo possui características senoidais. A Frequência é o número de vezes em que a vibração se repete em um segundo, ou seja, o número de ciclos por segundo. A unidade padrão é o hertz, homenagem a o físico alemão Heinrich Hertz. O Comprimento de Onda é a distância ocupada no espaço por um ciclo da onda. A Amplitude é a altura do pico da onda em relação à referência. A amplitude está relacionada com a quantidade de energia relativa transmitida pela onda. A Forma de onda é a representação visual do valor instantâneo, exibido em relação ao tempo, em outras palavras, é o formato que a onda possui. Pico de velocidade – À medida que a massa vibratória se move, a sua velocidade se altera. A velocidade é zero quando há uma mudança na direção, e torna-se máxima quando a massa se encontra na posição neutra. Esta velocidade máxima é denominada Pico de velocidade. Velocidade de vibração RMS – A sigla RMS (*root mean square*), é utilizada para determinar a velocidade eficaz de uma função periódica. O valor RMS tende a prover a energia contida no sinal de vibração, assim foi escolhido pela organização internacional de padrões (ISO), para estabelecer os limites aceitáveis de vibração.

SEVERIDADE DE VIBRAÇÃO POR ISO 10816						
MÁQUINA			CLASSE I	CLASSE II	CLASSE III	CLASSE IV
Velocidade Vibração (RMS) 10 - 1000Hz			Máquinas Pequenas	Máquinas Médias	Base Rígida Grande	Base Mácia Grande
	pol/s	mm/s				
	0,01	0,28				
	0,02	0,45				
	0,03	0,71				
	0,04	1,12				
	0,07	1,80				
	0,11	2,80				
	0,18	4,50				
	0,28	7,10				
	0,44	11,20				
	0,70	18,00				
0,71	28,00					
1,10	45,00					

Figura 7: Quadro ISO 10816

(Fonte: ISO 10816)

Grupos de máquinas

Classe 1	Peças individuais de motores ou máquinas (normalmente motores elétricos de até 15 kW) integradas como peças de máquinas completas.
Classe 2	Máquinas de escala média sem base específica (normalmente motores elétricos de 15 kW a 75 kW) e motores ou máquinas (máximo de 300 kW) montadas em uma base rígida.
Classe 3	Maquinário de geração em grande escala ou máquinas rotativas montadas em uma base rígida.
Classe 4	Máquinas de geração ou máquinas rotativas em grande escala montada em uma base rígida comparativamente macia (por exemplo, grupos turbogeradores e turbinas a gás com potência de no mínimo 10 MW).

Figura 8: Quadro ISO 10816 – Grupo de Máquinas

(Fonte: ISO 10816)

Zonas de avaliação

Zona A	Zona de vibração, incluindo valores de vibração de uma nova máquina instalada. (Bom)
Zona B	Zona de vibração na qual uma máquina pode funcionar por muito tempo sem qualquer limitação (Aceitável)
Zona C	Zona de vibração em que não se pode esperar que uma máquina funcione por muito tempo (Insatisfatório)
Zona D	Zona de vibração em que uma máquina pode ser danificada (Inaceitável)

Figura 9: Quadro ISO 10816 – Zonas de Avaliação

(Fonte: ISO 10816)

2.5 Processamento Digital de Sinais

Análise de Domínio do Tempo de Sistemas em Tempo Discreto. Os sinais discretos são coleções de números que representam situações discretas como, por exemplo, amostragem populacional, modelos de renda nacional e rastreamento por radar. O sinal amostrado a partir de um sinal contínuo no tempo também é uma fonte de sinais discretos. Nessa última categoria se enquadra o sinal de vibração do acelerômetro visto que este é um sinal contínuo no tempo, mas, variável em amplitude durante o tempo. Através de equipamentos como, por exemplo, conversores A/D (analógico para digital) um sinal analógico é convertido para um sinal digital, o sistema em tempo contínuo é convertido para um sistema em tempo discreto e assim é possível aproveitar todas as vantagens dessa conversão.

As vantagens do Processamento Digital de Sinais são:

- 1) Operações em sistemas digitais podem tolerar variações consideráveis do sinal e, portanto, são menos sensíveis as variações da temperatura, idade e outros fatores. Isto resulta em precisão e estabilidade. Geralmente são circuitos binários e com circuitos mais complexos a precisão pode ser aumentada bastando aumentar o tamanho da palavra binária, sujeito apenas a limites de custo.
- 2) Sistemas digitais não perdem a precisão quando é necessário duplicar seus volumes. Ajustes de fábrica não são necessários. Esses sistemas podem ser substituídos por um único chip usando circuitos VLSI (*very large scale integrated*).

- 3) Filtros digitais são tão flexíveis quanto o programa usado para programar esses filtros. As características são programadas em software e alterando esses programas tem-se filtros flexíveis. Microprocessadores, circuitos digitais, chaves eletrônicas, circuitos VLSI podem ser usadas para implementar filtros digitais de maneira muito eficiente.
- 4) Sistemas digitais podem implementar vários tipos de filtros.
- 5) O armazenamento dos sinais digitais pode ser facilmente feito em diversas mídias como, por exemplo, discos rígidos, memórias, CD e fitas magnéticas. A indexação desses sinais e as buscas são relativamente fáceis de serem implementadas e rápidas de serem executadas. A busca em sites remotos também pode ser feita facilmente.
- 6) Com os sinais digitais tem-se alta fidelidade, baixa taxa de erro e codificação.
- 7) As aplicações que utilizam filtros digitais podem ser compartilhadas e alterações podem ser feitas para que um filtro tenha diversas entradas. A multiplexação dos sinais digitais pode ser realizada e um canal pode ser compartilhado com vários sinais ou sistemas digitais.
- 8) É mais vantajoso o transporte e armazenamento de sinais digitais que os sinais analógicos. As mensagens analógicas podem perder qualidade a cada estágio de reprodução.

2.5.1 Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier refere-se à Transformada de Fourier para funções contínuas, e esta por sua vez detecta frequências e representa qualquer função integrável $f(t)$ como a soma de exponenciais complexas com frequência angular ω e amplitude complexa $F(f)(\omega)$:

$$F(f)(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

$$f(t) = F^{-1}(F(\omega)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)e^{-i\omega t} d\omega \quad (2)$$

A função $f(t)$ descreve o comportamento de um dado fenômeno analisado no domínio do tempo, EQUAÇÃO (1) (TITCHMARSH,1962). A transformada de Fourier de f é representada por F , que possui inversa F^{-1} . A Transformada de Fourier de uma dada função leva a informação do domínio do tempo para o domínio de frequência. A Transformada de Fourier possui diversas propriedades operações como por exemplo: combinações lineares, diferenciação, translação, dilatação, multiplicação por polinômios e convolução. Segundo TITCHMARSH, de fato, $F(F^{-1}(F)) = F$ e $F^{-1}(F(f)) = f$, ou seja F e F^{-1} são inversas uma da outra.

2.5.2 Amostragem

A amostragem é o principal processo na conversão de um sinal contínuo no tempo e um sinal discreto no tempo. O domínio do tempo e da frequência são utilizados para análise do sinal de vibração e apresentam informações importantes. Como esses sinais são analógicos e contínuos no tempo deve-se filtrá-los e em seguida realizar a amostragem para assim ser possível a análise das informações contidas no espectro de frequência. Tais informações são importantes na análise de vibração presente no equipamento monitorado.

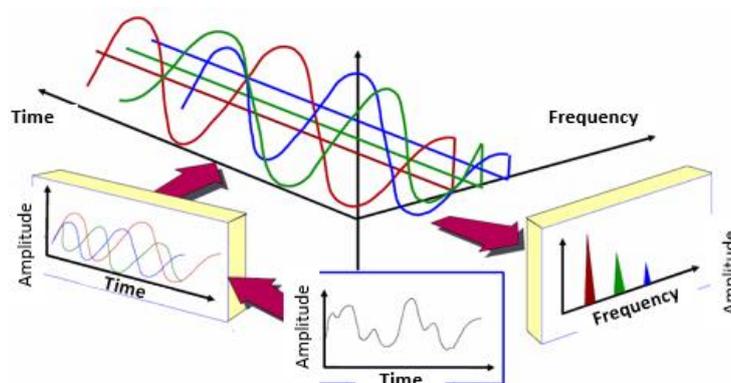


Figura 10: Amostragem

(Fonte: *The Fourier Transform* – Acesso em 20/09/2020)

2.5.3 Técnicas Estatísticas

A análise de vibração utiliza como parâmetro dados amostrados que são de natureza estocástica, ou seja, não apresentam comportamento periódico. A assinatura de vibração de uma máquina sempre possui uma variação aleatória, de forma que seu valor instantâneo não pode ser pré-determinado. Para uma interpretação correta dos dados é necessário, portanto um tratamento estatístico. A função no tempo de uma forma de onda de um ruído aleatório muda constantemente de maneira não periódica, resultando, portanto em um espectro inconstante da transformada de Fourier.

Conseqüentemente, nas amostras consecutivas de um ruído aleatório irão produzir conjuntos de coeficientes de Fourier em cada frequência, e estes irão formar uma distribuição aleatória que pode ser descrita apenas por seus valores médios, mínimos, máximos e desvio padrão. É de se esperar que formas de onda aleatórias gerem picos de alta amplitude ocasionalmente se estas medidas são tomadas isoladamente a informação não será representativa. Entretanto, os métodos estatísticos, como média e mediana permitem que valores médios e extremos possam ser avaliados apropriadamente com o auxílio do software VSE004.

3. Monitoramento Preditivo Online do Ativo

O sistema de monitoramento preditivo online oferece monitoramento automatizado das máquinas, levando assim informações atualizadas todo o tempo, para otimizar a operação de ativos de produção fundamental. Completando assim o uso de instrumentos de coleta de dados periódica, facilitando uma abordagem proativa à confiabilidade com monitoramento 24 horas das máquinas em locais perigosos, remotos, não seguros ou de difícil acesso. Com o sistema de monitoramento Online de Ativos é possível obter dados de vibração de forma precisa e ágil. Obter diagnóstico avançado em uma fração de minutos e obter dados com altíssima frequência.



Figura 11: Painel do Sistema Preditivo Online

(Fonte: Próprio Autor)

O painel do sistema preditivo online tem basicamente a função de coletar as informações dos sensores. Como a Figura 12 apresenta, existem 6 componentes que são imprescindíveis para que o sistema funcione de maneira adequada:

- 1) Disjuntor de proteção – Utilizado para proteção do painel. Devidamente dimensionado para alimentação de uma fonte de energia 24VDC e 7 monitores VSE002.
- 2) Ponto de Energia 127VAC – Utilizada para alimentação do Switch de rede.
- 3) Fonte de alimentação 24VDC – Utilizada para alimentação dos Monitores VSE002.
- 4) Monitor VSE002 – Projetado para a conexão de 4 sensores de vibração e 2 grandezas do processo, Exemplo de aplicação é a medição de temperatura. Ele avalia os sinais dos 6 sensores e avisa se o valor limite ajustado previamente para o respectivo sensor. O mesmo é utilizado para leitura dos sensores

VSA001 e TS2229, Sensor de Vibração e sonda de temperatura respectivamente.

- 5) Switch de Rede – Utilizado para interligar os monitores presentes no painel a rede ethernet do estabelecimento.
- 6) Ponto de rede ethernet – Utilizado para fornecer acesso a rede do estabelecimento e caso necessário envio de dados a nuvem. Nesse projeto não é utilizado nuvem.

No equipamento (Decoradora) são aplicados os seguintes dispositivos:



Figura 12: Equipamentos de Medição – Vibração e Temperatura

(Fonte: Próprio Autor)

- 7) Acelerômetro VSA001 – Utilizado para medir a aceleração própria de um sistema. O conceito de aceleração própria surgiu em 1915 com os trabalhos de Albert Einstein sobre a Teoria da Relatividade Geral. A aceleração própria de um sistema é medida em relação a outro sistema em queda livre, de modo que está atrelada à sua sensação de peso. Portanto, um acelerômetro em repouso sobre a superfície da Terra indicará uma aceleração de 1 g ($9,81 \text{ m/s}^2$) para cima, pois, em relação a um objeto em queda livre, o acelerômetro está acelerado a $9,81 \text{ m/s}^2$ para cima. Por outro lado, quando em queda livre, seja na Terra ou na Lua, um acelerômetro indicará aceleração nula, embora a aceleração de

coordenadas (isto é, a aceleração em seu sentido convencional), seja bastante diferente em cada um dos casos.

- 8) Monitor de temperatura TP3237 – Responsável por fazer as leituras de temperatura que o TS2229 lhe encaminha. Após realizada a leitura o mesmo é processado digitalmente e direcionado ao VSE002.
- 9) Sensor de Temperatura TS2229 – Responsável por levar as medições de temperatura até o monitor de temperatura TP3237.

2.5.4 Parametrização

A parametrização do sistema eletrônico de diagnóstico VSE ocorre através do software VES004. O software permite criar uma estrutura de árvore, na qual são integrados os aparelhos e sensores. Isso permite ao usuário uma orientação em sua própria estrutura das fábricas, instalações e máquinas. A criação de jogos de parâmetros é apoiada por assistentes, que facilitam a definição das tarefas para o monitoramento de vibrações e dos valores do processo. Tarefas simples de monitoramento podem então ser definidas e configuradas no sistema eletrônico de diagnóstico, sem que praticamente sejam necessários conhecimentos específicos. A gestão dos dados, como o histórico de jogos de parâmetros, dados de medição, gravações e arquivos de histórico, também é realizada através da estrutura de árvore definida no projeto.

O Software da Empresa IFM VES004, é um software de licença gratuita que a empresa coloca à disposição do usuário que adquire os produtos da empresa. O mesmo tem comunicação com acelerômetros, sondas de temperatura, analisadores de partícula, entre outras aplicações. O mesmo também é responsável por toda a parametrização na aplicação. Conforme é possível observar na Figura 13, existem vários *bar graphics* na aplicação, os mesmos são seguidos de cores: Verde, Amarela e Vermelha, onde Verde significa que o ponto monitorado está em boas condições, amarelo significa que o ponto monitorados está em estado de alerta e Vermelho significa que o ponto monitorado está em está eminencia de falha funcional (quebra).

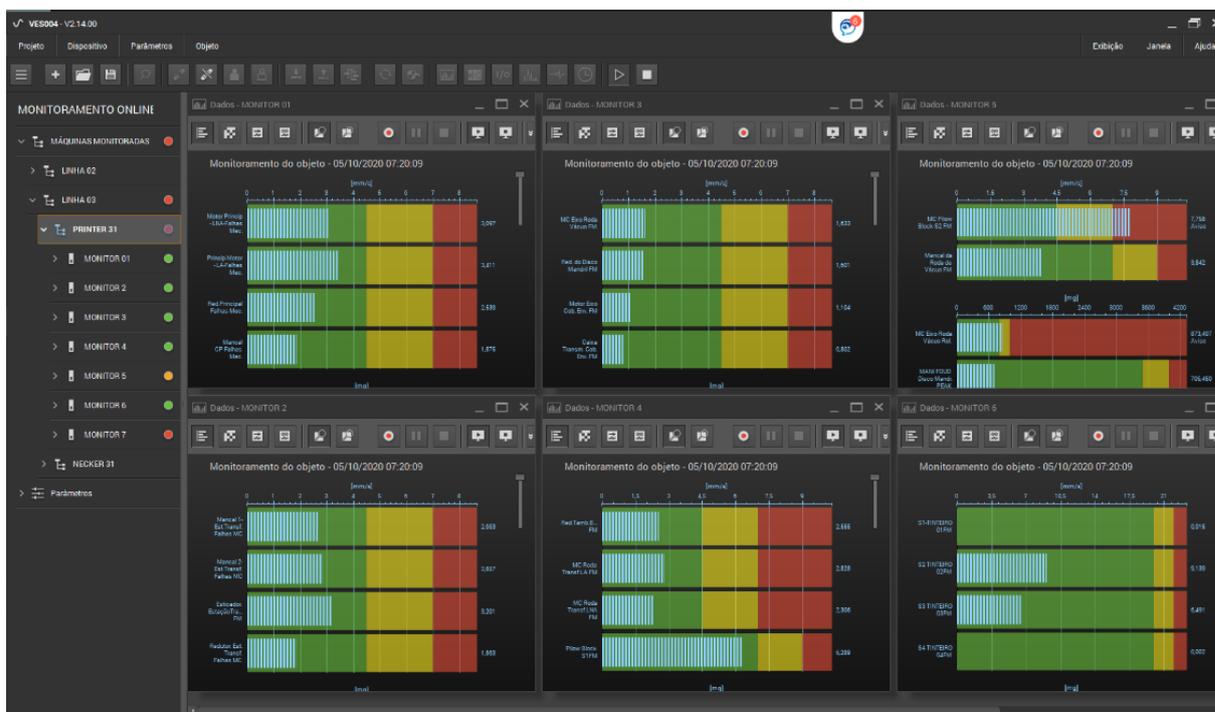


Figura 13: Tela do Software VES004 – Aplicado na Decoradora

(Fonte: Próprio Autor)

2.6 Aplicação do Projeto

O projeto inicial visa implementar o sistema de monitoramento preditivo online em equipamentos de uma indústria metalúrgica, no ramo de Embalagens metálicas. O primeiro equipamento será um equipamento denominado de Decoradora (*Printer*). A Decoradora foi escolhida para o projeto por se tratar de ser o equipamento gargalo da linha de produção, ou seja, é o equipamento que manda na velocidade de produção da linha produtiva. Outro ponto muito que leva a decorado ser apontada como piloto do projeto é a sua idade, a mesma foi construída em 1992. Outro ponto são os *downtimes* (paradas de produção), as mesmas são causadas em sua grande maioria por quebras.

As Decoradoras Stolle Rutherford mais novas aplicam até oito cores mais verniz em uma velocidade impressionante de 2.200 latas por minuto com a resolução e a precisão de qualidade superior que os fabricantes de latas associaram ao nome da Rutherford ao longo de 50 anos de história. A Decoradora do projeto aplica 6 cores mais verniz. A mesma possui 6 tinteiros que necessitam de refrigeração 100% do

tempo de funcionamento, essa refrigeração é fornecida por um sistema de refrigeração denominado de Chiller. Cada cor solicita uma pressão de impressão específica, caso o operador aplique pressão em excesso o tinteiro emite vibração em demasia, por esses motivos a aplicação de acelerômetros e sondas de temperatura.



Figura 14: Printer Rutherford

(Fonte: Stolle Machinery)

Na prática o sistema funciona de forma de ciclo como um PDCA. O PDCA é um método de gerenciamento com foco na melhoria que tem como objetivo controlar e melhorar os processos e produtos de uma forma contínua. O PDCA cresceu muito e se tornou famoso dentro da Qualidade Total (TQC), considerada como um sistema de gestão inovador para a época e até para os dias atuais. As etapas do PDCA são:

- Planejar (*Plan*)
 - Depois de uma breve identificação do problema-oportunidade, é realizado um consistente levantamento de dados e informações, para que, assim, o escopo deste projeto de correção, prevenção ou de melhoria possa ser o mais completo possível.

- Executar (*Do*)
 - Com o plano de ação em mãos para resolver o problema, todas as tarefas entram de fato em funcionamento!
- Avaliar (*Check*)
 - Essa etapa basicamente é uma reflexão sobre os resultados e sobre o comprometimento dos responsáveis com a implementação das ações definidas.
- Agir (*Act*)
 - Essa etapa visa padronizar, buscando a eliminação da falha.



Figura 15: Ciclo PDCA

(Fonte: Voitto)

O operador do equipamento tem interface direta com o painel do sistema. Foram inseridas duas rotinas fabris, uma para o operador e outra para técnico do equipamento, ambas buscam a avaliação do sistema de modo geral o operador checa o painel 4 vezes ao dia. Ou seja a cada 6 horas o operador analisa a presença de informativo luminoso no painel conforme a Figura 17, caso o equipamento apresente informativo luminoso amarelo ou vermelho, o operador necessita imediatamente de entrar em

contato com o setor de manutenção, para que a falha seja eliminada ou planejada de forma estratégica. No caso da rotina do técnico, o mesmo a cada 7 dias grava o histórico de todos os pontos de monitoramento.



Figura 16: Painel de Monitoramento – Sistema de Monitoramento Preditivo Online

(Fonte:Próprio Autor)

2.7 Localização dos Sensores

Os Sensores de Vibração (Acelerômetros) e Temperatura (sondas de temperatura), foram instalados em 27 pontos estratégicos, para monitoramento do ativo. No projeto em questão foram utilizados 7 Monitores de Vibração para interligação com os 16 Sensores de Vibração, 11 Monitores de temperatura e 11 Sensores de temperatura.

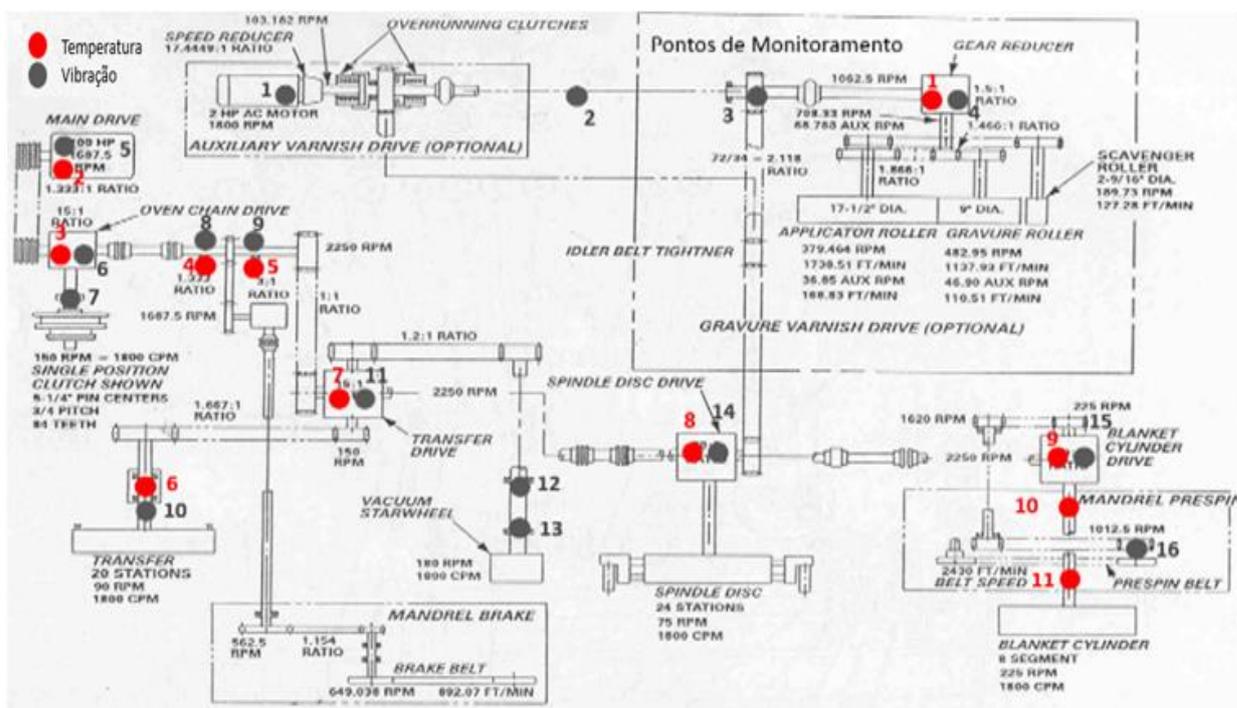


Figura 17: Localização dos Sensores de Vibração e Temperatura.

(Fonte: Próprio Autor)

DECORADORA	S1 - Vibração	S2 - Vibração	S3 - Vibração	S4 - Vibração	IN1 - Temperatura	IN2 - Temperatura
MONITOR #01	Motor Principal LNA	Motor Principal LA	Mancal do Redutor da Corrente Pinada	Mancal do Redutor da Corrente Pinada	Motor Principal	Redutor Corrente da Pinada
MONITOR #02	Mancal01-Eixo do Redutor da Estação de Transferência	Mancal02-Eixo do Redutor da Estação de Transferência	Esticador da Correia do Redutor da Estação de Transferência	Redutor da Estação de Transferência	Mancal Corrente Pinada	Eixo Redutor da Estação de Transferência
MONITOR #03	Mancal do Eixo Roda Vácuo	Motor de Acionamento Transmissão da Envernizadora Cobertura	Transmissão da Envernizadora Cobertura	Redutor do Disco do Mandril	Mancal 02 Eixo da Envernizadora Cobertura	Esticador da Correia do Redutor da Estação de Transferência
MONITOR #04	Redutor do Tambor de BLANKET	Roda de Transbordo LNA	Roda de Transbordo LA	Manifould - Disco Mandril	Redutor da Estação de Transferência	Mancal do Eixo Roda Vácuo
MONITOR #05	Pilow Block S1	Pilow Block S2	Mancal da Roda de Vácuo	Reserva	Motor de Acionamento Transmissão da Envernizadora Cobertura	Caixa Transmissão da Envernizadora Cobertura
MONITOR #06	Tinteiro 01	Tinteiro 02	Tinteiro 03	Tinteiro 04	Redutor do Disco do Mandril	Redutor do Tambor de BLANKET
MONITOR #07	Tinteiro 05	Tinteiro 06	Reserva	Reserva	Reserva	Reserva

Legenda:

LNA: Lado não acoplado

LA: Lado Acoplado

Figura 18: Pontos de Sensores de Vibração e Temperatura.

(Fonte: Próprio Autor)

4. Resultados

Após a implementação do Sistema Preditivo Online é possível analisar dados importantes. A implementação na Decoradora teve fim em maio de 2020. Todos os gráficos de foram gerados pelos Softwares Minitab e Excel (programa de computador voltado para fins estatísticos). O primeiro gráfico demonstra a quantidade de quebras

de Janeiro a Setembro 2020. É possível analisar que houve uma queda significativa na quantidade de *Downtime*.

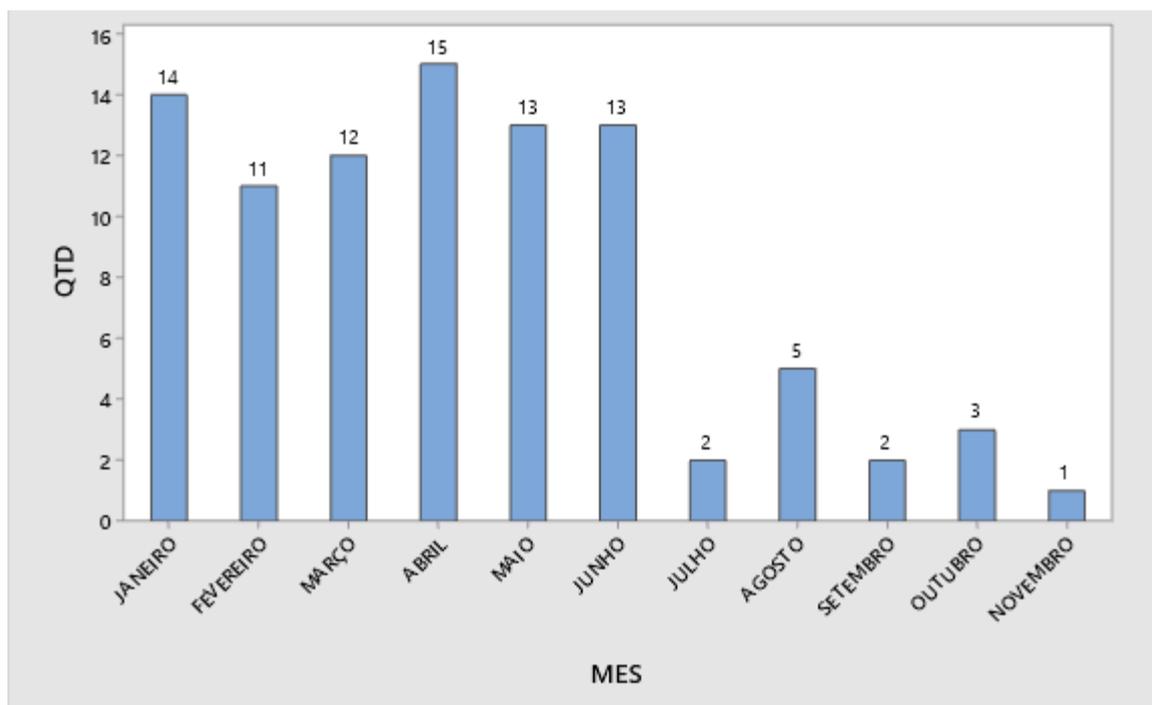


Figura 19: Quantidade de Quebras Mensal

(Fonte: Próprio Autor)

No segundo gráfico foi utilizado o Excel para realizar o cálculo de média móvel sobrepondo as quantidades de quebras de mês em mês, para monitorar a média e a variação do processo. Com base no gráfico abaixo é possível analisar com base na média móvel a dispersão média das falhas e as quantidades desordenadas dentro do processo de manutenção. Na análise foram utilizados os dados de janeiro a novembro do ano de 2020, com isso a fábrica teve um resultado bastante positivo na média móvel de quebras, no mês de Janeiro a unidade tinha um resultado de 14 quebras e em Novembro um resultado de 7 quebras.

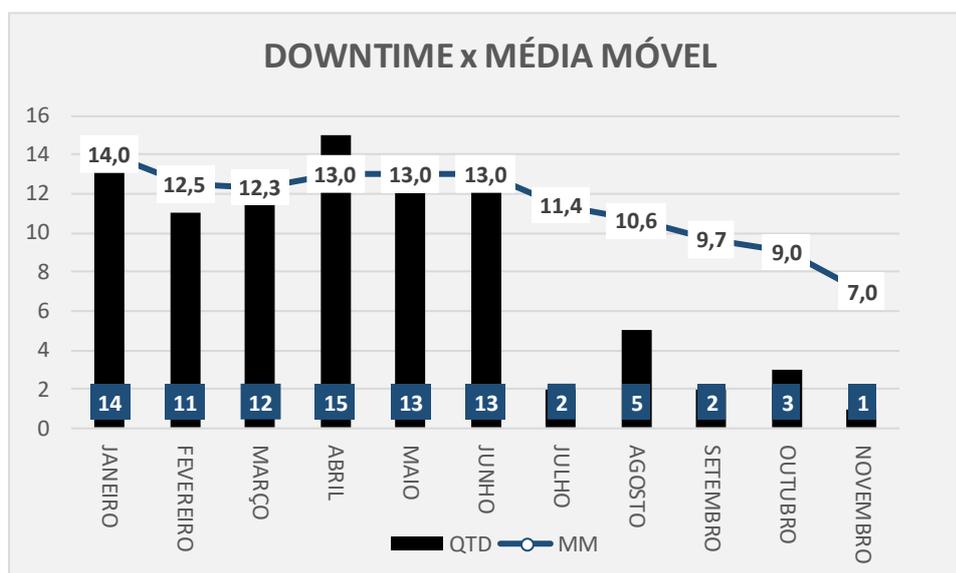


Figura 20: Gráfico de Média Móvel x Quantidade de Downtime

(Fonte: Próprio Autor)

Na terceira amostragem é utilizado um gráfico de Boxplot, para avaliar e comparar o formato, tendência central e variabilidade de distribuições de amostra, e para procurar por *outliers*. Os *outliers* são dados que se diferenciam drasticamente de todos os outros, são pontos fora da curva normal. No primeiro trimestre o equipamento tinha uma média de aproximadamente 12 quebras mensais, no segundo trimestre o equipamento apresentou 13 quebras mensais, no terceiro trimestre o equipamento apresentou uma média de 3 quebras mensais e no quarto trimestre o equipamento apresentou uma média de 2 quebras mensais.

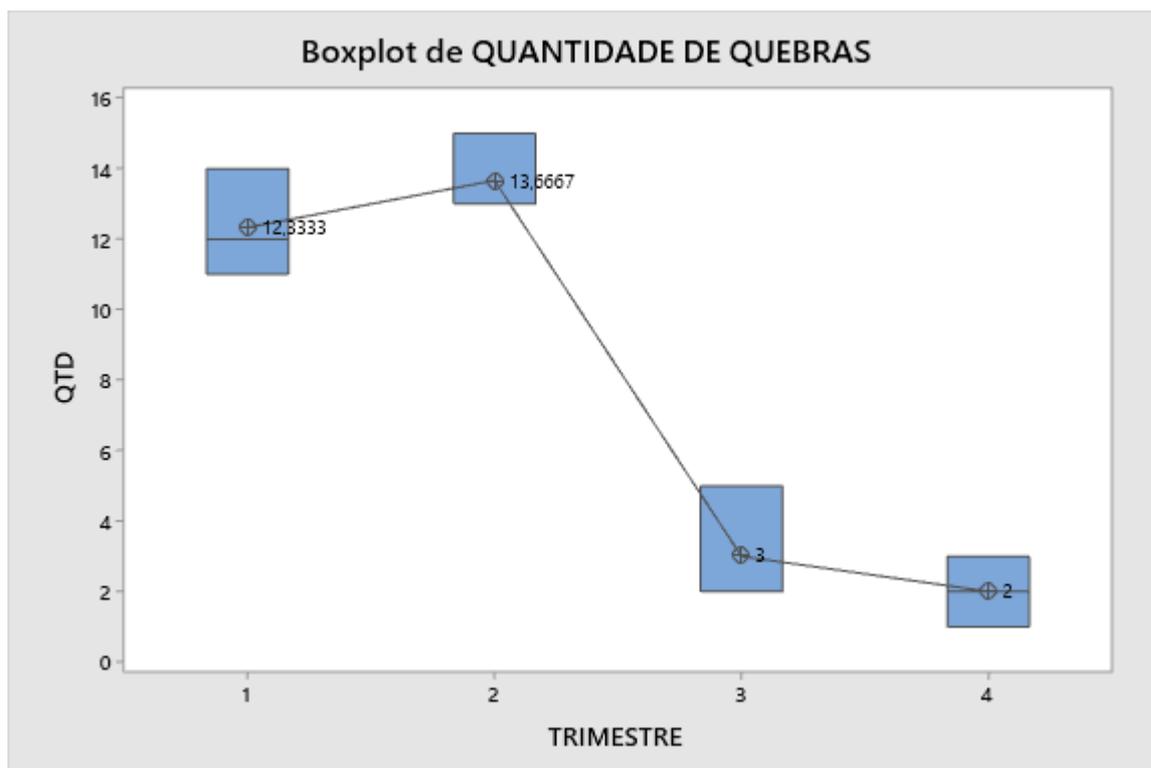


Figura 21: Gráfico Boxplot Trimestral – Média de Quebras

(Fonte: Próprio Autor)

Através do MTBF (*Mean Time Between Failures*), que em tradução livre é Tempo Médio entre falhas. O MTBF é parte de um modelo que assume que o sistema falhou e é imediatamente reparado. A definição de MTBF depende da definição do que é considerado falha. As falhas são condições que deixam o equipamento fora de operação ou em um estado para o reparo. A EQUAÇÃO (3) apresenta o cálculo do MTBF, o mesmo é um dos indicadores de manutenção que compõem a matriz de indicadores usados para controlar e impulsionar os resultados do setor de manutenção.

$$MTBF = \frac{(TD - TM)}{P} \quad (3)$$

Segundo Kardec & Nascif (2009), para calcular o MTBF, EQUAÇÃO (3) são necessárias três métricas:

TD = Tempo Total de Disponibilidade, é o tempo que o equipamento deveria estar funcionando caso não houvesse nenhuma parada ou intervenção.

TM = Tempo Total de Manutenção, é o tempo que o equipamento ficou parado devido as paradas de manutenção.

P = Número de Paradas, é a quantidade de vezes que o seu equipamento parou e necessitou de reparos.

Na figura 22 é possível analisar o aumento do MTBF em horas após a instalação do sistema preditivo online.

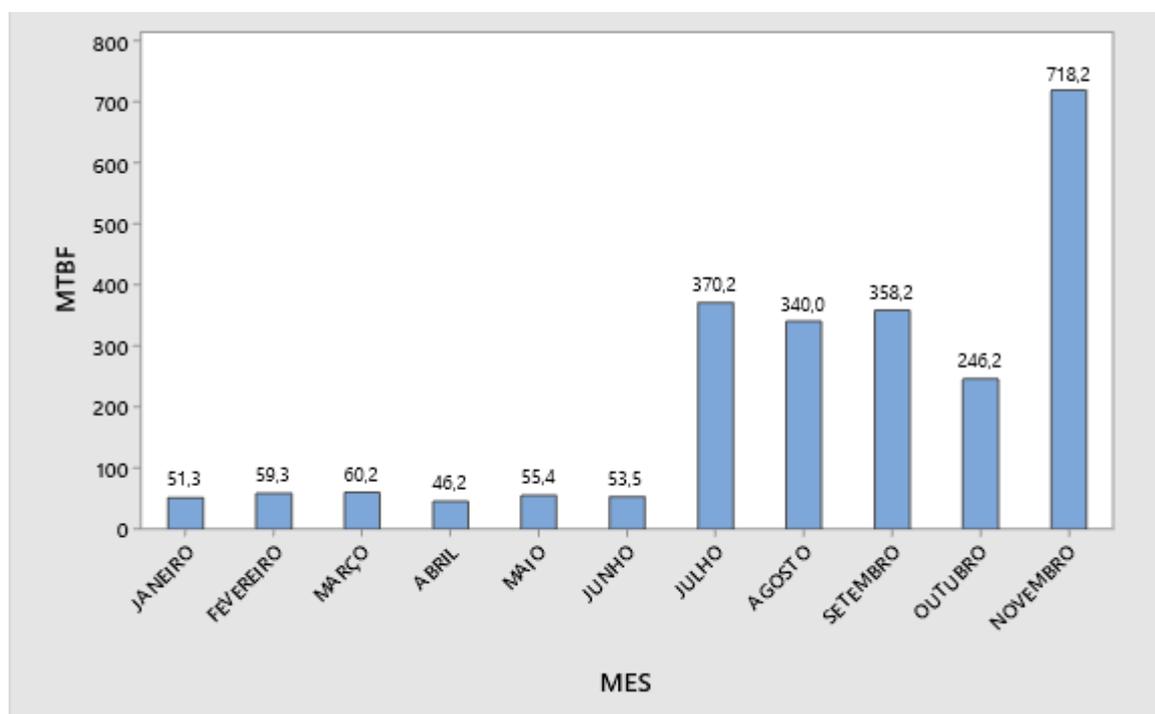


Figura 22: Gráfico de Barras - MTBF

(Fonte: Próprio Autor)

Com base nos resultados é possível comprovar que após a instalação do sistema preditivo online o equipamento fica mais tempo disponível e com esses dados é possível realizar estudos para possíveis trocas de componentes analisando a condição do mesmo ou preventivamente, mediante o tempo ou até mesmo pela condição do equipamento.

5. Conclusão

Nota-se que a análise de vibração tem sido cada vez mais aplicada em Sistemas de manutenção preditiva. O conhecimento teórico abordado e os estudos realizados na área indicam que sistemas de monitoramento online por análise de vibração, temperatura e análise de particulado, podem ser perfeitamente viáveis, permitindo a implementação de manutenção preditiva com custos reduzidos e de maneira eficaz. As técnicas abordadas, quando aplicadas em conjunto, garantem a disponibilidade do sistema ao mesmo tempo em que o tornam economicamente viável.

Através das técnicas de análise de frequência, observa-se que é possível realizar um diagnóstico com grau de precisão satisfatório sobre as causas de defeitos nos motores, redutores e mancais. A aquisição, amostragem e tratamento dos dados podem ser efetuados utilizando transdutores e placas de aquisição de baixo custo através da instrumentação virtual e programados utilizando a linguagem de programação visual. Finalmente, para garantir um sistema de atuação eficaz, um pré-tratamento de dados deve ser aplicado durante o monitoramento, utilizando ferramentas estatísticas que permitam a correta interpretação dos dados amostrados.

Referências

XENOS, Harilaus. **Gerenciando a Manutenção Produtiva**. 1. ed. Belo Horizonte: Editora Gerencial, 1998.

TELES, Jhonata. **Bíblia do RCM**. 2. ed. Brasília: Editora Engeteles, 2019.

TELES, Jhonata. **PCM Descomplicado**. 1. ed. Brasília: Editora Engeteles, 2019.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção Função Estratégica**. 3. ed. São Paulo: Editora QualityMark, 2009.

ISO 10816-3:2009. **Mechanical Vibration**. 1. ed. ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5462 Confiabilidade e Manutenibilidade**. 1. Ed. Rio de Janeiro, 2004.

BELHOT, R. V.; CAMPOS, F. C. **Relações entre manutenção e engenharia de produção: uma reflexão**. 5. ed. Revista Produção [On line], 2005.

TITCHMARSH, E. C., **Introduction to Fourier Integrals**, Clarendon Press, Oxford, 1962.

Walker, J. S., **Fast Fourier Transforms**, 2 Ed., CRC Press, 1996.

Walker, J. S., **Fourier Analysis**, Oxford University Press, Oxford, 1988.

SILVA, Alecir, **Estatística Aplicada com o Minitab**, 1. Ed. São Paulo: Editora Moderna, 2012.

WERKEMA, Cristina, **Métodos PDCA e Demaic e Suas Ferramentas Analíticas**, 1 Ed. São Paulo: Editora Campus, 2012.

COUTINHO, Thiago, **O que é o ciclo PDCA?**, Juiz de Fora, 2017