



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
PERNAMBUCO

Campus Recife

Coordenação Acadêmica do Curso Superior em Engenharia Mecânica

Engenharia Mecânica

ADALGISIO SILVA AGUIAR NETTO

**APLICAÇÃO DO MONITORAMENTO PREDITIVO ONLINE COMO ESTRATÉGIA
DE MANUTENÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE PAPEL RECICLADO**

Recife

2023

ADALGISIO SILVA AGUIAR NETTO

**APLICAÇÃO DO MONITORAMENTO PREDITIVO ONLINE COMO ESTRATÉGIA
DE MANUTENÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE PAPEL RECICLADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentada a Coordenação Acadêmica do Curso Superior em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.

Recife

2023

Ficha elaborada pela bibliotecária Maria do Perpétuo Socorro Cavalcante
Fernandes CRB4/1666

A283a

2023 Aguiar Netto, Adalgisio Silva

Aplicação do monitoramento preditivo online como estratégia de manutenção em uma indústria de manutenção em uma indústria de papel reciclado./Adalgisio -----Recife: O autor, 2023.
70. il. Color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, 2023.

Inclui Referências.

Orientador: Professor Dr José Ângelo Peixoto da Costa.

1. Engenharia mecânica- 2. Indústria 4.0. 3. Manutenção preditiva. 4. Monitoramento online. 5. Sensores. I. COSTA, José Ângelo Peixoto da (orientador). II. Instituto Federal de Pernambuco. III. Título.

CDD 532 (21ed.)

**APLICAÇÃO DO MONITORAMENTO PREDITIVO ONLINE COMO ESTRATÉGIA
DE MANUTENÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE PAPEL RECICLADO**

Trabalho aprovado. Recife, 12/01/2024.

José Ângelo Peixoto da costa

Gustavo de Novaes Pires Leite

Rômulo Cesar Carvalho de Araújo

Recife

2023

Dedico este trabalho aos meus pais e minha irmã, que sempre me incentivaram na jornada acadêmica, vocês são minha fonte de inspiração.

Em memória ao meu amigo de curso Gabriel Santana, cuja dedicação foi e permanece sendo motivo de orgulho para todos que acompanharam sua trajetória.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha profunda gratidão a Deus por me abençoar com sabedoria, inteligência, saúde e pela força nos momentos cruciais durante esta jornada acadêmica.

Ao meus pais, Adalgisio Filho e Lenilda Santos, agradeço por toda dedicação desde o início dos meus estudos, por focar em mim e acreditar no meu potencial.

À minha companheira, Camilla Francielle, agradeço por todo empenho que tivemos juntos durante o curso, sua contribuição e amizade foram fundamentais para chegarmos neste momento.

Agradeço aos amigos do curso, com quem compartilhei dias e noites de estudos, construindo memórias que levarei para sempre.

Aos professores, expresso gratidão por todo incentivo e aprendizado. Suas orientações e empenho com os alunos foram cruciais para o desenvolvimento de todos.

Em especial, expresso meus agradecimentos ao coordenador do curso e meu orientador, José Ângelo. Seus esforços para transformar este curso em uma referência demonstram que você faz o que ama.

Ao IFPE, expresso minha sincera gratidão pelas oportunidades proporcionadas, pela dedicação de seus servidores e por todo o conhecimento adquirido ao longo da minha jornada acadêmica.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

Isaac Newton

RESUMO

Com o propósito de aumentar a produtividade e reduzir custos, as melhores práticas de manutenção devem ser aplicadas nas empresas para garantir a disponibilidade dos ativos. Para controlar as condições dos equipamentos, a manutenção deve utilizar práticas preditivas, identificando o momento ideal de intervenção em uma máquina. Nesse cenário, a Indústria 4.0 surge como uma proposta inovadora, incorporando tecnologias que integram sensores aos equipamentos, permitindo o monitoramento em tempo real de variáveis como vibração e temperatura. Com o intuito de elevar a disponibilidade de equipamentos rotativos em uma indústria de papel reciclado, este trabalho propõe analisar a implantação de uma estratégia de manutenção preditiva online. No estudo, foram explorados conceitos fundamentais de manutenção, destacando as principais técnicas preditiva e evidenciando os benefícios e métodos para a aplicação eficaz do monitoramento em tempo real. Os resultados obtidos após o primeiro ano de implementação foram significativos, evidenciando redução de quebras, melhorias no custo de manutenção e otimização dos processos de manutenção preditivo. Destaca-se a eficácia da metodologia proposta, com uma diminuição de 78% na indisponibilidade dos ativos monitorados. Estes resultados positivos enfatizam o impacto favorável na eficiência operacional da indústria de papel reciclado, reforçando a importância da abordagem preditiva na gestão de ativos e fortalecendo a integração de tecnologias da Indústria 4.0.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Manutenção preditiva; Monitoramento online; Sensores.

ABSTRACT

In order to increase productivity and reduce costs, best maintenance practices must be applied in companies to ensure asset availability. To control the condition of equipment, maintenance must use predictive practices, identifying the ideal time for intervention on a machine. In this scenario, Industry 4.0 appears as an innovative proposal, incorporating technologies that integrate sensors into equipment, allowing real-time monitoring of variables such as vibration and temperature. In order to increase the availability of rotating equipment in a recycled paper industry, this work proposes to analyze the implementation of an online predictive maintenance strategy. In the study, fundamental maintenance concepts were explored, highlighting the main predictive techniques and highlighting the benefits and methods for the effective application of real-time monitoring. The results obtained after the first year of implementation were significant, showing a reduction in breakdowns, improvements in maintenance costs and optimization of predictive maintenance processes. The effectiveness of the proposed methodology stands out, with a 78% decrease in the unavailability of monitored assets. These positive results emphasize the favorable impact on the operational efficiency of the recycled paper industry, reinforcing the importance of the predictive approach in asset management and strengthening the integration of Industry 4.0 technologies.

Keywords: Industry 4.0; Predictive maintenance; Online monitoring; Sensors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Processo de fabricação de papel reciclado	19
Figura 2. Representação esquemática dos tipos de manutenção	20
Figura 3. Percentual de horas trabalhadas apropriadas nos serviços de manutenção por setores industriais.....	21
Figura 4. Sistema massa mola excitado por um conjunto scotch yoke	25
Figura 5. Vibração no domínio do tempo	26
Figura 6. Análise FFT sinal no domínio da frequência e do tempo	27
Figura 7. Exemplo de espectro de vibração.....	28
Figura 8. Espectro com falha por desbalanceamento	29
Figura 9. Severidade de vibração ISO 10816 (2013)	31
Figura 10. Fluxo básico de medição de vibração	31
Figura 11. Evolução dos quatro tipos de indústria	34
Figura 12. Pilares da indústria 4.0	34
Figura 13. Tipos de técnicas de análise de criticidade de ativos.....	36
Figura 14. Relação da estratégia de manutenção	38
Figura 15. Estratégias de Manutenção	39
Figura 16. Representação esquemática de uma análise SWOT	41
Figura 17. Fluxo de implementação.....	42
Figura 18. Gráfico percentual de indisponibilidade por equipamentos na máquina de papel em 2022.....	44
Figura 19. Gráfico percentual de indisponibilidade por subárea na máquina de papel em 2022.....	45
Figura 20. Modelo de sensores aplicados.....	46
Figura 21. Fluxo de dados coletados	47
Figura 22. Gateway instalado no projeto.....	48
Figura 23. Fluxograma de implementação	48
Figura 24. Exemplificando posicionamento do sensor.....	51
Figura 25. Posicionamento do sensor numa bomba centrífuga e motor	51
Figura 26. Sensores instalados no conjunto de refinador.....	52
Figura 27. Exemplo de alerta gerado	54
Figura 28. Visualização do DMA	55
Figura 29. Tela de análise da plataforma.....	55
Figura 30. Gráfico métricas espectrais	56
Figura 31. Gráfico da evolução de temperatura na bomba.....	57
Figura 32. Bomba com anomalia no elemento elástico	58
Figura 33. Gráfico espectral evidenciando a falha de pista interna BPFI.....	59
Figura 34. Gráfico de velocidade RMS do equipamento.....	59
Figura 35. Rolo em monitoramento	60
Figura 36. Coleta de dados manual num redutor monitorado online	61
Figura 37. Gráfico de redução percentual de indisponibilidade 2022x2023	62
Figura 38. Quantidade de falhas evitadas a partir dos dados dos sensores	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classe de equipamentos segundo a ISO 10816-1	30
Tabela 2. Fatores e critérios para classificação ABC	43
Tabela 3. Características dos sensores selecionados.....	47
Tabela 4. Dados da implementação.....	63
Tabela 5. Critérios e características para seleção de tecnologia de monitoramento online.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A – Amplitude

ABRAMAN – Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos

BPFI – Frequência de Passagem na Pista Interna

CM – Fator de Custo de Manutenção

CNI – Confederação Nacional da Indústria

Cos – Cosseno

DMA – Assistente de Tomada de Decisão

f – Frequência

FFT – Transformada Rápida de *Fourier*

FO – Fator de Flexibilidade Operacional

g – Gravidade

HHT – Hora Homem Trabalhada

Hz – Hertz

IAS – Fator de Impacto na Segurança e Ambiente

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores

IFPE – Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Pernambuco

IO – Fator de Impacto Operacional

IoT – *Internet of Things*

ISO – *International Organization for Standardization*

kHz – Quilo-hertz

kW – Quilo-watt

m- Metro

MHz– Megahertz

mm – Milímetro

mm/s – Milímetro por segundo

mm/s² – Milímetro por segundo quadrado

MTBF – Tempo Médio Entre Falhas

MTTR – Tempo Médio de Reparo

NBR – Norma Brasileira

NR– Norma Regulamentadora

ONU – Organização das Nações Unidas

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

PoC – Prova de Conceito

RMS – Raiz Média Quadrada

RPM – Rotação por Minuto

Sen – Seno

SWOT - *Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*

t – Tempo

ω – Velocidade Angular

$x(t)$ – Deslocamento

$\dot{x}(t)$ – Velocidade

$\ddot{x}(t)$ – Aceleração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação	16
1.2 Objetivo geral	16
1.3 Objetivos específicos.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Produção de papel reciclado.....	18
2.2 Conceitos e tipos de manutenção	20
2.2.1 <i>Manutenção Corretiva</i>	21
2.2.2 <i>Manutenção Preventiva</i>	22
2.2.3 <i>Manutenção Preditiva</i>	22
2.3 Técnicas de Manutenção Preditiva	23
2.3.1 <i>Análise de vibração</i>	23
2.3.1.1 Tipos de movimentos	24
2.3.1.2 Sinais de vibração	26
2.3.1.3 Tipos de medidas e critérios de vibração	29
2.3.1.4 Fluxo de medição	31
2.3.2 <i>Análise de temperatura</i>	32
2.4 Indústria 4.0	33
2.4.1 <i>Sensores de monitoramento online</i>	35
2.5 Método de criterização de ativos	35
2.5.1 <i>Estratégia de manutenção dos ativos com base na criticidade</i>	38
3 METODOLOGIA	40
3.1 Estratégia para aumento de disponibilidade	40
3.2 Seleção de equipamentos	42
3.3 Seleção de tecnologia (sensores).....	45
3.4 Planejamento e implantação	48
3.4.1 <i>Definir sensor para cada ponto monitorado</i>	49
3.4.2 <i>Planejamento de instalação física</i>	49
3.4.3 <i>Treinamento e acesso ao sistema</i>	50
3.4.4 <i>Estruturação da árvore de ativos</i>	50
3.4.5 <i>Instalação dos sensores e gateway</i>	50

3.4.6 Adicionar informações dos equipamentos	52
3.4.7 Avaliar parâmetros e definir alarmes	53
3.5 Análise de dados	54
4 ANÁLISE DE RESULTADOS	57
4.1 Gestão de falhas	57
4.2 Ganhos na manutenção preditiva	60
4.2.1 Segurança	60
4.2.2 Otimização do tempo	60
4.2.3 Aumento da Confiabilidade na tomada de decisões	61
4.3 Validação dos resultados	61
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
REFERENCIAS	65
APÊNCIDE	70

1 INTRODUÇÃO

O setor de fabricação de papel reciclado vem passando por incessantes mudanças no cenário econômico, obrigando, cada vez mais, as empresas do setor a serem mais competitivas e buscarem uma alta qualidade de seus produtos, com custos baixos e maior produtividade. Nesse cenário, o desenvolvimento de um sistema de gestão da manutenção é estratégico para as empresas, de modo a garantir a confiabilidade e a disponibilidade dos sistemas de produção (SELEME, 2015).

Os impactos da ausência de gestão de manutenção têm efeitos diretos no sistema de produção das empresas, resultando na indisponibilidade dos equipamentos. Isso leva a perdas significativas, como tempo de produção, qualidade do produto, pontualidade de entrega, e custos elevados relacionados a estoques para reposições emergenciais. Esses fatores, como apontado por Pitoli (2013), exercem uma influência negativa sobre o valor competitivo dos produtos da empresa. No que diz respeito aos custos de manutenção na indústria nacional, a pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN), em 2022, que representa uma amostra diversificada das indústrias, observou-se que em setores como papel, celulose, siderúrgicas e mineração, o gasto com manutenção pode representar aproximadamente 10% do faturamento bruto das companhias.

Para que as falhas dos equipamentos possam ser controladas e aprimore a competitividade financeira da empresa, são necessárias estratégias adequadas de manutenção. Uma abordagem eficaz para aumentar a confiabilidade e disponibilidade das máquinas é a implementação de técnicas com foco em prever o comportamento dos ativos, indicando a necessidade de intervenção com base no estado do equipamento (KARDEC e NASCIF, 2009). Nesse cenário, a indústria 4.0 contribui com ferramentas para monitoramento de ativos, através de sensores, aprendizagem de máquinas e sistemas inteligentes que possibilitam antever falhas, fazer diagnósticos e acionar ações de manutenção (LI e WANG, 2016).

A incorporação das tecnologias da indústria 4.0 aprimora a manutenção preditiva através de técnicas avançadas, permitindo o monitoramento contínuo das

condições de máquinas. Essa evolução é possibilitada por meio de sistemas em tempo real, que utilizam sensores e software para coletar dados de comportamento dos ativos, fornecendo informações a todo instante e armazenando na nuvem, auxiliando assim nas tomadas de decisões (BOND, 2017).

1.1 Motivação

Na esfera da manutenção, as decisões estratégicas são complexas e envolvem variáveis para intervir num equipamento, tais como custo de manutenção, tempo de reparo, custos associados à inatividade da produção, frequência e entre outros fatores. A importância de acompanhar a condição dos ativos torna-se evidente, influenciando nas tomadas de decisões que afetam diretamente a saúde financeira das indústrias (GREGÓRIO, 2018).

Os métodos de monitoramento de equipamentos utilizados até então, como inspeções periódicas, sensível e coleta de vibração e temperatura *offline*, não atendem plenamente às expectativas do modelo de gestão proposto pela indústria 4.0, demandando, assim, uma abordagem inovadora no acompanhamento dos ativos. Diante desse cenário, surge a motivação de explorar e propor soluções que ofereçam uma supervisão contínua e precisa do estado das máquinas.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste na análise da implantação de uma manutenção preditiva online, que visa observar o desempenho de equipamentos produtivos através de sensores de monitoramento de vibração e temperatura, seguindo como estratégia de acompanhamento de ativos de uma indústria de papel reciclado.

1.3 Objetivos específicos

- Explorar como o monitoramento de ativos industriais se converte em um resultado positivo para a empresa;

- Determinar diretrizes para selecionar os equipamentos críticos a serem monitorados;
- Demonstrar o funcionamento da tecnologia aplicada;
- Avaliar os resultados da aplicação, identificando os desafios enfrentados e vantagens obtidas na manutenção de uma indústria de papel reciclado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

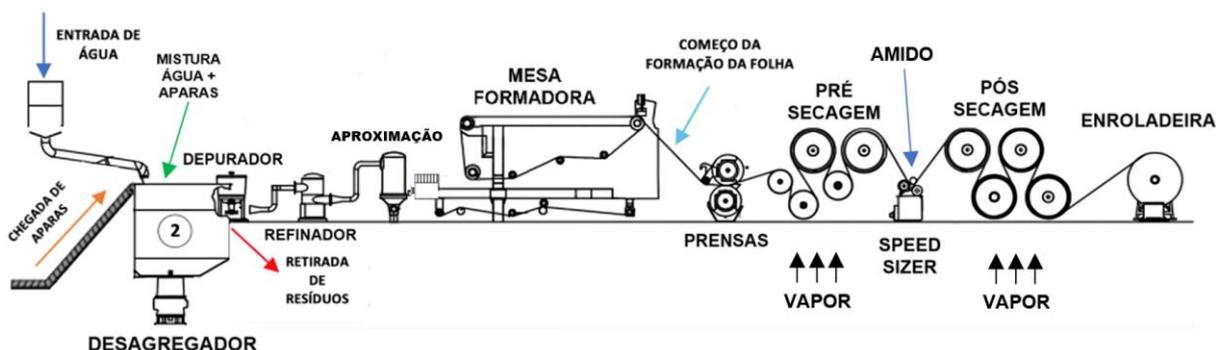
2.1 Produção de papel reciclado

Por questões ambientais, econômicas e sociais, a crescente prática da reciclagem tem se destacado no cenário brasileiro. Esse processo envolve uma cadeia que se inicia com a segregação dos resíduos sólidos, seguida pela coleta, triagem e preparação do material recolhido. Posteriormente, esse material é encaminhado à indústria para ser transformado em nova matéria-prima. No caso da indústria de papel, são os fardos de papéis recuperados (aparas). A importância dessa prática fica ainda mais clara quando considerado os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), em especial os ODS's 9 — Indústria, Inovação e Infraestruturas e 12 — Consumo e Produção Responsáveis, fortalecendo o compromisso com diretrizes que promovem condutas sustentáveis e eficientes na gestão de resíduos.

Conforme a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), em 2021, o papel está entre os produtos que apresentam maior taxa de reciclagem no Brasil. No resultado total de 2020, 66,7% do papel produzido no país (aproximadamente 5,02 milhões de toneladas) retornaram para o processo produtivo.

A fabricação de papel a partir da reciclagem demanda uma série de equipamentos essenciais para a realização eficiente das etapas, que incluem, em grande maioria, a separação de impurezas, preparação da polpa de papel, formação da folha, secagem e definição do formato (acabamento). Na Figura 1, observa-se o processo macro de fabricação de papel, que envolve significativa interação entre os equipamentos de natureza rotativa, como rolos, motores, bombas, agitadores e ventiladores, os quais estão sujeitos a altos níveis de esforços mecânicos em diversos cenários operacionais (AMOROSO, 2020).

Figura 1. Processo de fabricação de papel reciclado



Fonte: ADAPTADO de AMOROSO, 2020.

O processo se inicia com os fardos de aparas, que são depositados em uma esteira que conduz o produto até o primeiro desagregador (*pulper*). Este equipamento atua na produção de uma pasta, por meio da adição de água e rejeito, que são misturados em um rotor, removendo também os primeiros rejeitos pesados provenientes das aparas (BARBOSA, 2022).

Na etapa seguinte, a pasta é direcionada para a depuração por meio de bombeamento, passando por diversos equipamentos responsáveis pela remoção de impurezas, sendo algumas delas mais desafiadoras de serem separadas. Em seguida, ocorre a refinação, onde as propriedades das fibras são modificadas para garantir uma maior capacidade de união (AMOROSO, 2020).

A área de aproximação combina os aditivos necessários ao produto, estabelecendo a conexão entre a área de preparo de massa e máquina de papel. Na máquina, o processo inicia-se com injeção de massa na mesa formadora. Nessa etapa, a massa contém aproximadamente 99% de água e 1% de fibras (BARBOSA, 2022). Durante esse estágio inicial, o papel é transportado por telas e feltros que funciona como esteira, sendo impulsionada por rolos, que são acionados por motores e redutores.

Após o desagregamento na mesa formadora, o papel passa por prensas para retirar maiores percentuais de água, começando a definir o formato e a gramatura do papel. Na fase seguinte, a secagem, a folha recebe vapor saturado através de cilindros secadores, removendo o restante da água (AMOROSO, 2020), passando também pela *Speed Sizer*, um local destinado à aplicação de componentes químicos, como o amido, que confere impermeabilidade à água. Por fim, a folha de

papel é enrolada formando as bobinas de papel e encerrando o processo de fabricação.

2.2 Conceitos e tipos de manutenção

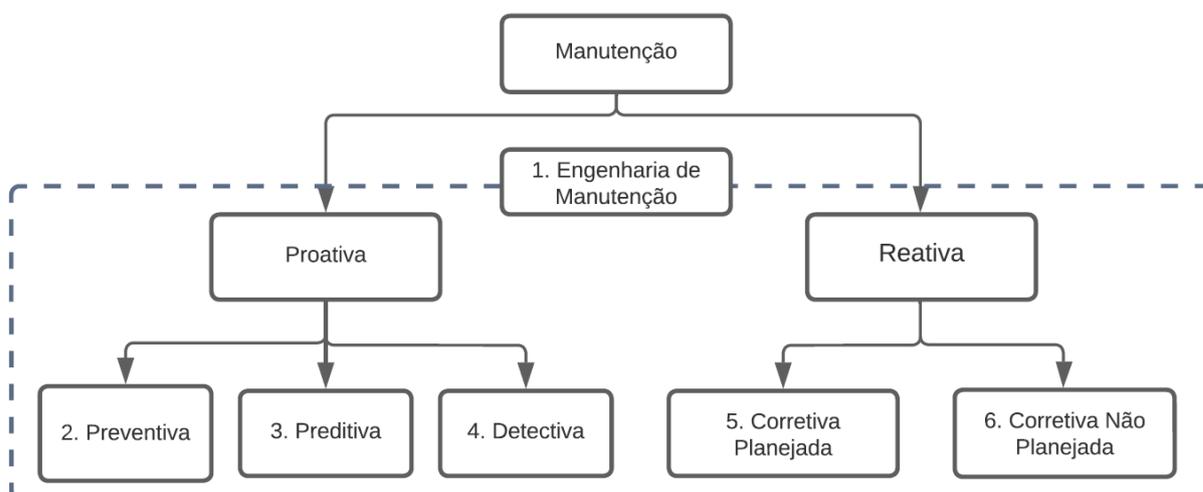
Conforme introduzido neste trabalho, a gestão da manutenção de ativos surge como uma saída estratégica para empresas. Para Pitoli (2013), a manutenção compreende um conjunto de ações aplicadas ao equipamento ou processo, com propósito de assegurar a continuidade de sua função dentro dos parâmetros de qualidade, disponibilidade, custos e segurança adequados.

A Norma Brasileira (NBR) 5462/1994 (Confiabilidade e Manutenibilidade), define manutenção como:

Combinção de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (NBR 5462,1994, p. 6).

Segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção na indústria é categorizada em seis tipos, numeradas na representação da Figura 2, destacando-se, entre eles, as modalidades de manutenção corretiva, preventiva e preditiva.

Figura 2. Representação esquemática dos tipos de manutenção



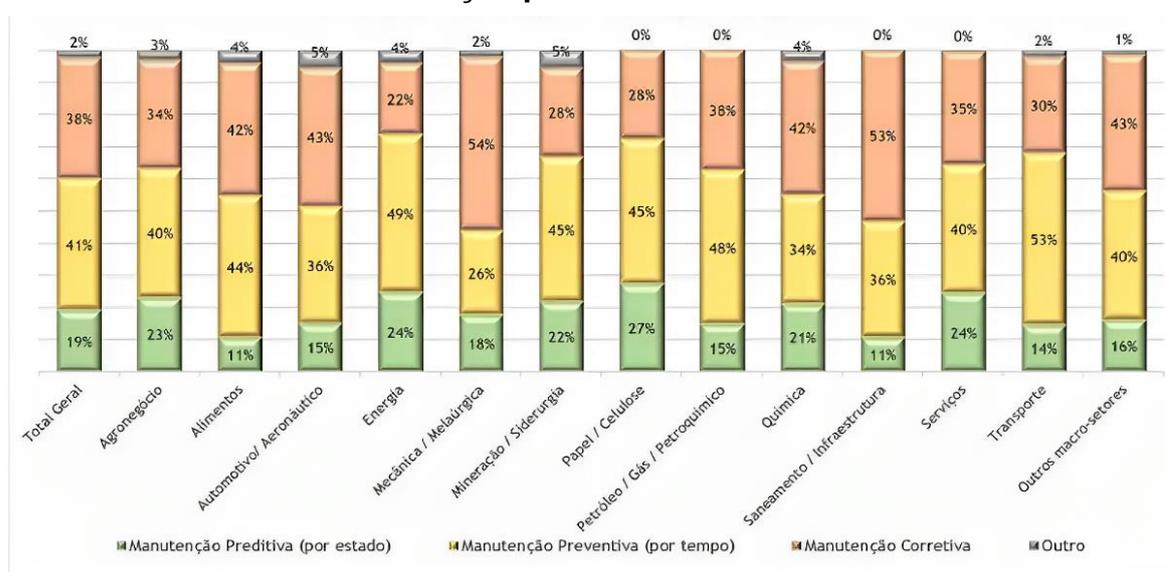
Fonte: AUTOR, 2023.

Compreender os tipos de manutenção e saber quando aplicá-los servem como base para a gestão de ativos, garantindo desempenho eficiente do sistema de produção. A escolha adequada entre corretiva, preventiva e preditiva, por exemplo,

tem implicações significativas nos custos, na disponibilidade operacional e na vida útil dos ativos.

Visando entender o cenário atual de aplicação dos tipos de manutenção na indústria, a ABRAMAN publicou, em seu documento nacional de 2022, um levantamento de percentual de horas trabalhadas por cada modalidade em setores macros de produção (Figura 3). Esse estudo proporciona uma visão abrangente do panorama da gestão de manutenção, permitindo identificar as práticas predominantes em cada setor e orientando a análise estratégica das necessidades de manutenção nas indústrias.

Figura 3. Percentual de horas trabalhadas apropriadas nos serviços de manutenção por setores industriais



Fonte: ABRAMAN, 2022.

Com o resultado da pesquisa, é notável que o setor de papel/celulose vem desempenhando maior participação no ramo preditivo, comparado com os demais setores de produção. Isto implica para as companhias paralelamente a diminuição de horas trabalhadas em manutenção corretiva, evitando paradas de processo e custos emergenciais.

2.2.1 Manutenção Corretiva

Considerado como o primeiro tipo conhecido de manutenção, conforme descrito por Marquez (2007), esse método consiste em realizar intervenções somente após a falha, com o intuito de retornar o equipamento às condições

necessárias para desempenhar sua função. Pode ser subdividido em corretiva não planejada e planejada.

A **manutenção corretiva não planejada** surge como resposta a uma quebra imprevista, interrompendo as operações produtivas do equipamento (GREGÓRIO, 2018). Esse tipo de intervenção acarreta custos elevados devido às perdas de produção e à extensão dos danos aos equipamentos, além de representar um risco para a segurança, ao meio ambiente e a qualidade do produto; já na **manutenção corretiva programada**, a falha não necessita ser tratada em caráter emergencial, podendo ser solucionada quando for mais conveniente, seja por custo, produção, disponibilidade de materiais ou mão de obra (TELES, 2019).

2.2.2 Manutenção Preventiva

Refere-se à atuação destinada a antecipar, evitar falhas ou quedas no desempenho dos equipamentos, por meio de um plano estabelecido com intervalos de tempo determinados, conhecido como abordagem preventiva sistemática. O objetivo central é reduzir ou eliminar a probabilidade de falhas em equipamentos por meio de práticas de manutenção, como limpeza, inspeções, lubrificações e substituição de componentes, realizadas em períodos predefinidos (SILVA, 2018).

2.2.3 Manutenção Preditiva

Também conhecida como manutenção baseada na condição, esta abordagem busca tornar o processo de manutenção mais preciso e acessível. É realizada monitorando as condições dos ativos, seus parâmetros operacionais e sua eventual degradação, utilizando medições ou inspeções que não impactam na operação do processo (FILHO, 2008).

Partindo da premissa de que a maioria das falhas não ocorre de maneira imediata, a manutenção preditiva fundamenta-se no acompanhamento periódico dos principais parâmetros de funcionamento dos equipamentos, determinando a necessidade ou não de intervenção em uma máquina com base em fenômenos como temperatura, vibração, ruídos, entre outros, obtidos por meio de instrumentos específicos (ALMEIDA, 2017).

Diferente da manutenção preventiva, que estabelece períodos para a realização de intervenções nos equipamentos, na preditiva, o monitoramento permite que as manutenções sejam realizadas com base na condição de funcionamento. Por consequência, observa-se um aumento no intervalo dos reparos por quebras — manutenção corretiva — e entre as intervenções planejadas com base na periodicidade — preventivas. Isso resulta, de modo geral, em uma redução no custo de manutenção quando comparado aos outros tipos de manutenção, e aumento da confiabilidade e disponibilidade dos ativos (TELES, 2019).

2.3 Técnicas de Manutenção Preditiva

Segundo Kardec e Nascif (2009), a avaliação do equipamento, no viés preditivo, pode ser classificada de três formas: sensitiva, objetiva e contínua.

- Sensitiva: Como o próprio nome sugere, esta depende dos sentidos (visão, audição, tato e olfato) do profissional para detectar as condições do ativo.
- Objetiva: São os dados coletados com ferramentas ou instrumentos específicos. Com os registros, estes servirão de base ou histórico do equipamento para verificar sua saúde.
- Contínua: Utilizada, geralmente, nos equipamentos críticos, essa abordagem implica na monitorização constante e em tempo real de parâmetros-chave. Normalmente, recorre a dispositivos que interagem com o operador/mantenedor, como alarmes e, até mesmo, mecanismo que desligam o equipamento ao atingir o valor limite estipulado.

Dentre estes métodos de inspeção, podem-se destacar algumas técnicas comuns em grandes empresas, como: análise de vibração, termografia, ultrassom, estroboscopia e análise de óleo. Neste trabalho, serão analisados os parâmetros de vibração e temperatura, grandezas monitoradas pelos sensores instalados.

2.3.1 Análise de vibração

A vibração está associada a um movimento que se repete, seja de forma regular ou irregular, após um intervalo de tempo. Para o entendimento desse tipo de movimento, é necessário o estudo do movimento de oscilação de um corpo em torno

de uma posição de equilíbrio, juntamente com as forças e/ou momentos que podem influenciá-lo, como desbalanceamentos e desalinhamentos. De modo geral, esses movimentos ocorrem em elementos de máquinas e em estruturas quando submetidos a ações dinâmicas (SOEIRO, 2008).

Segundo o manual da SKF Reliability Systems (2004), a análise de vibrações é o principal e mais completo método empregado para detecção de defeitos mecânicos em equipamentos rotativos na manutenção preditiva. A avaliação da vibração é importante para a manutenção devido aos potenciais impactos negativos associados à vibração excessiva em equipamentos. Essa condição pode desencadear uma variedade de problemas, como perdas de energia, redução na velocidade de produção, entre outros. Em situações mais críticas, tais níveis podem evoluir para falhas que resultam em avarias ao equipamento ou paradas não programadas.

Em sua condição normal, o equipamento exibe uma "assinatura de vibração", indicando um comportamento característico esperado. Durante a operação, todas as máquinas estão sujeitas a fatores como fadiga, desgaste, deformação e acomodação da fundação. À medida que permanecem em funcionamento, esses efeitos podem resultar em folgas, desbalanceamento, desalinhamentos que alteram a "assinatura de vibração", tendendo a aumentar os níveis de vibração. Através da análise é possível identificar as condições de falha, permitindo a implementação das primeiras ações de manutenção necessárias (RAO, 2008).

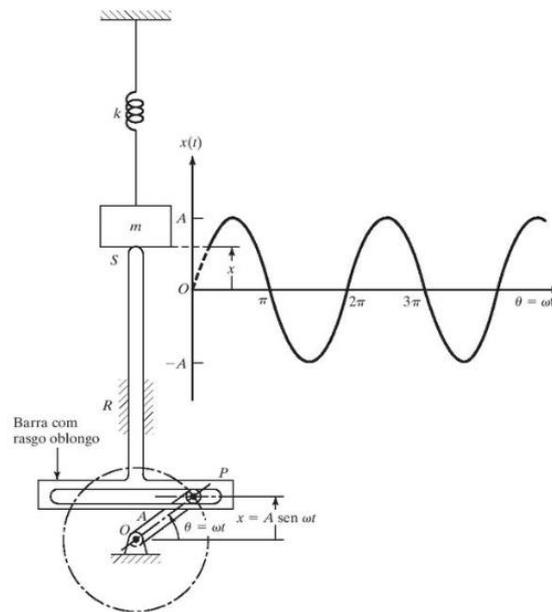
2.3.1.1 Tipos de movimentos

Alguns tipos de movimento estão sempre presentes na dinâmica dos equipamentos girantes, podendo ser classificados como periódico, harmônico e ou randômico (SKF, 2004).

- **Movimento Periódico:** Trata-se de um movimento oscilatório que se repete regularmente, como no caso de um pêndulo de relógio, ou apresentar considerável irregularidade, como em terremotos. A característica desse movimento é sua repetição em intervalos regulares de tempo, sendo, por isso, denominado movimento periódico.

- **Movimento Harmônico:** A forma mais simples de movimento periódico é o movimento harmônico, pode ser definido por uma massa quando é suspensa por uma mola e deslocada de sua posição de equilíbrio, ela oscilará em torno desse ponto com um movimento harmônico simples. A Figura 4 ilustra uma massa presa a uma mola, que descreve um movimento senoidal ao longo do tempo, conforme é movimentada para cima e para baixo pelo mecanismo *scotch yoke*.

Figura 4. Sistema massa mola excitado por um conjunto *scotch yoke*



Fonte: RAO, 2008.

A partir do movimento registrado, é possível fazer algumas considerações. Tem-se que o deslocamento x (em mm) da massa é expresso por:

$$x = A \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

Derivando o deslocamento temos a velocidade (em mm/s) da massa:

$$\dot{x} = \frac{dx(t)}{dt} = \omega \cdot A \cdot \text{cos}(\omega t) \quad (2)$$

Por fim, derivando a velocidade temos a aceleração (em mm/s²):

$$\ddot{x} = \frac{d\dot{x}(t)}{dt} = -\omega^2 \cdot A \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (3)$$

Onde:

A = Amplitude (deslocamento máximo obtido pela massa)

$$\omega = 2\pi f, \text{ com } f \text{ sendo a frequência em Hertz (ciclo por segundo)}$$

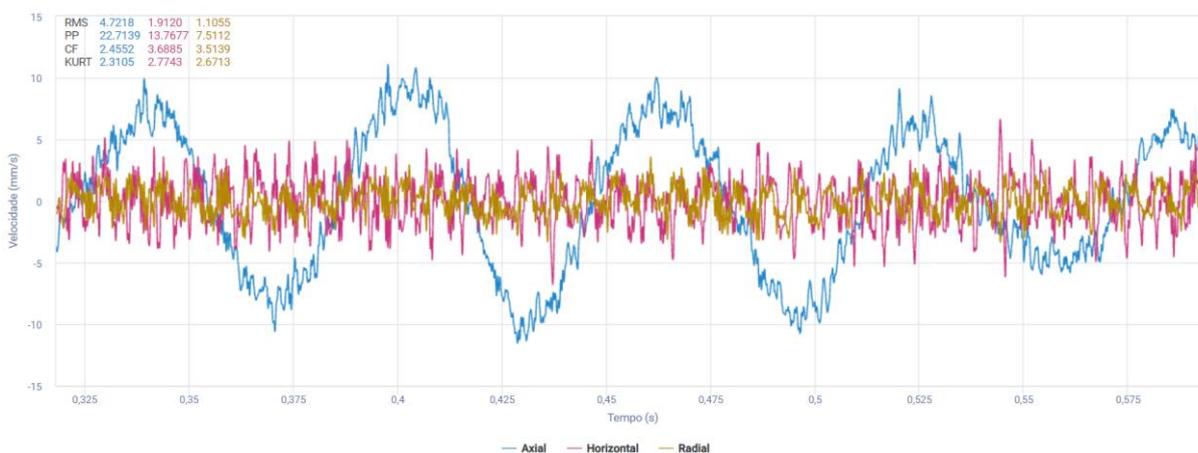
$$t = \text{Tempo em segundos}$$

- **Movimento Randômico:** Movimento que ocorre de maneira aleatória, abrangendo todas as frequências dentro de uma banda específica de frequência, podendo ser denominado como ruído. Este tipo de movimento é caracterizado por ser não repetitivo, como no caso de turbulências em tubulação ou o fenômeno de cavitação em uma bomba hidráulica. Os movimentos randômicos são desafiadores, ou até mesmo impossíveis de serem representados por funções matemáticas. Geralmente, são estudados por meio de suas propriedades médias ou estatísticas.

2.3.1.2 Sinais de vibração

Ao abordar a estrutura dos sinais de vibrações de um corpo, existem diversos tipos e formas de ser observado. Como por exemplo, o formato de onda que mostra o que está acontecendo a cada instante no tempo. Sua aplicação primordial reside na identificação de eventos de curta duração, como impactos, e na determinação de sua taxa de repetição (VISSOCI, 2016). Na Figura 05, verifica-se um gráfico com forma de onda de vibração em um rolamento com falhas pontuais externas, mostrando o velocidade variando no tempo.

Figura 5. Vibração no domínio do tempo



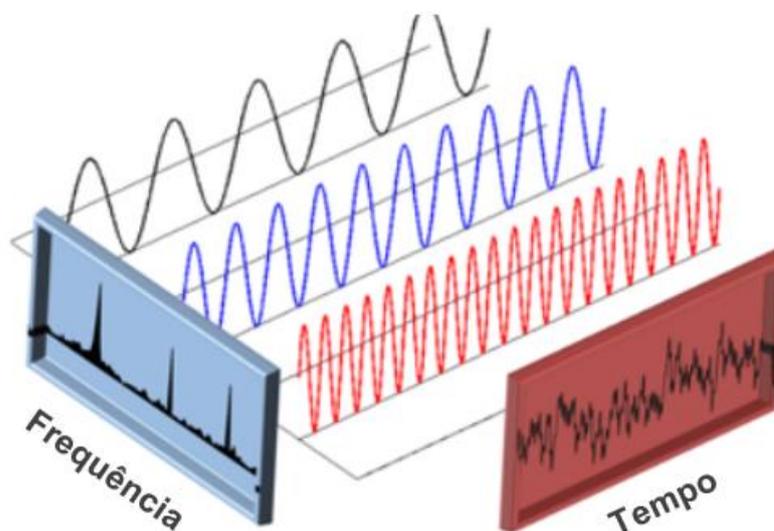
Fonte: AUTOR, 2023.

A análise da forma de onda pode revelar detalhes cruciais das vibrações. Entretanto, muitas vezes, essa análise pode ser complexa e até mesmo inviável,

especialmente quando há muitos componentes no sinal. Diante disso, a exibição no domínio da frequência surge como uma técnica mais eficaz para o monitoramento da condição de máquinas.

A decomposição dos componentes harmônicos do sinal de vibração, visando a exibição no domínio da frequência, é obtida por intermédio da Transformada de Fourier. A possibilidade de calcular numericamente a transformada de Fourier através do eficiente algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT), permitiu transformar sinais discretos no domínio do tempo para o domínio da frequência (GHAZALI, 2021). A Figura 6 ilustra como essa mudança ocorre de forma gráfica.

Figura 6. Análise FFT sinal no domínio da frequência e do tempo

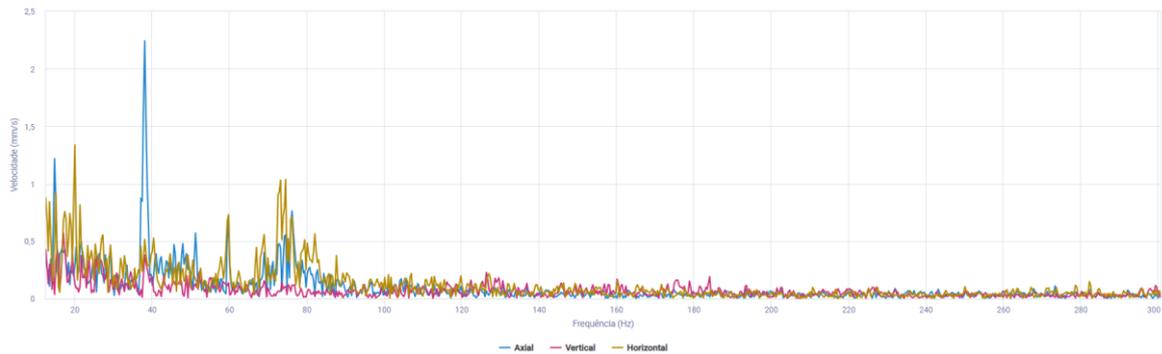


Fonte: ENSUS, 2016.

A necessidade dessa transformação surge, geralmente, devido ao fato de que os gráficos obtidos no domínio do tempo, frequentemente, contêm um excesso de informações, uma vez que são influenciados por diversas amplitudes que se repetem em diferentes períodos de tempo. Ao realizar a mudança para o domínio da frequência, é possível filtrar o sinal, evitando, assim, repetição e superposição das amplitudes.

A análise de Fourier, ou análise espectral, se torna uma das técnicas mais utilizadas no processo da avaliação de vibração. Se existe um princípio de falha, os espectros de FFT fornecem as informações para ajudar a determinar a origem e a causa do problema. Além disso, por meio de tendências, é possível estimar por quanto tempo o problema pode evoluir até se tornar crítico (SKF, 2004).

Figura 7. Exemplo de espectro de vibração

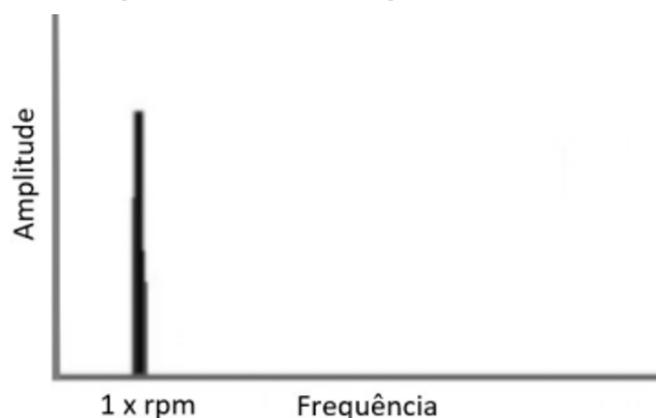


Fonte: AUTOR, 2023.

A presença de frequências dominantes no espectro pode ser indicativa de falhas. Cada tipo de falha se manifesta de maneira distinta nos gráficos de análise, modificando a assinatura espectral da máquina (SIEMANN, 2021). Os principais tipos de falhas verificadas pelo espectro em máquinas rotativas são:

- Desbalanceamento;
- Desalinhamento;
- Eixo empenado;
- Folgas mecânicas;
- Falhas em rolamentos;
- Falhas de origem elétrica;
- Falhas de engrenamentos.

De maneira geral, cada um destes tipos de falhas podem ser observados por gráficos espectrais característicos, onde cada frequência relacionada a rotação da máquina passa um diagnóstico. A Figura 8 demonstra um exemplo de gráfico de espectro de uma máquina desbalanceada que corresponde a uma vez a frequência de rotação do eixo. Isso ocorre pois a massa desbalanceada gera uma força centrífuga e, de uma forma bem simplificada, “lança” o eixo a cada volta que o sistema realiza (SILVA, 2018).

Figura 8. Espectro com falha por desbalanceamento

Fonte: ADAPTADO de SIEMANN, 2021.

2.3.1.3 Tipos de medidas e critérios de vibração

Segundo Vissoci (2016), a medida vibração em uma máquina pode ser verificada em três parâmetros, sendo elas: deslocamento, velocidade e aceleração, demonstradas nas considerações do movimento harmônico no capítulo 2.3.1.1.

A visualização de **deslocamento** refere-se à mudança da posição de um componente em relação a um ponto referencial. A magnitude do deslocamento é chamada amplitude. Esta métrica é muito utilizada na identificação de desbalanceamento, empenamento de eixos, folgas mecânicas e fadigas. Quanto maior a amplitude do sinal de vibração, mais severa será a vibração. O deslocamento é indicado para medições de vibrações em máquinas de baixas frequências, geralmente menores que 10 Hz.

A análise de **velocidade** indica o nível de energia envolvido no movimento, sendo uma das técnicas mais utilizadas na detecção de vibração. Pode ser entendida como a rapidez que um determinado objeto se desloca do ponto de referência ao pico. A medida em velocidade indica problemas em uma faixa de frequência intermediária, entre 10 Hz a 1.500 Hz, como desbalanceamento, desalinhamento, folgas mecânicas e defeitos em rolamento, em situações de falhas avançadas.

Já a **aceleração** é o parâmetro que representa a rapidez com que a velocidade de um corpo varia. Sendo considerada a razão de mudança de velocidade de do ponto de referência ao pico. A aceleração é utilizada para

identificar falhas em altas frequências, em torno de 5.000 Hz, como em redutores de alta velocidade e em rolamentos.

Na avaliação das medidas, é viável examiná-las através do pico ou utilizando o valor RMS (Raiz Média Quadrada). Entre as opções disponíveis, o RMS se destaca ao considerar o histórico no tempo da onda, proporcionando um valor de nível associado à energia presente no componente sob análise. Em outras palavras, possibilita a realização de uma avaliação da potencialidade destrutiva da vibração (PETRULHO, 2020).

Os critérios para aceitação dos níveis de vibração de equipamentos, operando em vazio ou em carga, são definidos através de diversas normas nacionais e internacionais (FERREIRA, 2012). A norma ISO 10816/2013 — *Mechanical vibration, Evaluation of machine vibration by measurements of non-rotating parts 1* — é uma delas e fica responsável por determinar a severidade de vibração em máquinas, através de monitoramento de partes não rotativas. Para a avaliação dos limites de vibração aceitáveis, a norma faz uma distinção entre diferentes classes de equipamento, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1. Classe de equipamentos segundo a ISO 10816-1

Tipo de Classe	Características
Classe I	Máquinas de pequeno porte, partes individuais de máquinas e motores, conectados integralmente a máquina operando em condição normal, como por exemplo motores elétricos até 15 kW.
Classe II	Máquina de médio porte, 15 kW à 75 kW, fixada em fundação simples. E para motores ou máquinas até 300 kW rigidamente montados em fundação especial.
Classe III	Máquina de grande porte, acima de 300 kW. Instaladas em bases rígidas.
Classe IV	Máquina de grande porte, acima de 300 kW. Instaladas em bases flexíveis.

Fonte: ISO 10816, 2013.

A Figura 9 apresenta valores de referência para vibração em valor velocidade RMS, conforme estabelecido pela norma ISO 10816 (2013). Nessa representação, as máquinas são classificadas em diferentes níveis de condição: Bom, satisfatório, insatisfatório e inaceitável, seus respectivos limites variam de acordo com a classe da máquina.

Figura 9. Severidade de vibração ISO 10816 (2013)

Velocidade de vibração	Máquina		Classe I - Máquinas Pequenas	Classe II - Máquinas Médias	Classe III - Máquinas Grandes com base rígida	Classe IV - Máquinas Grandes com base não rígida
	in/s	mm/s				
0.01	0.28					
0.02	0.45					
0.03	0.71					
0.04	1.12			Bom		
0.07	1.80					
0.11	2.80		Satisfatório			
0.17	4.50					
0.28	7.10		Insatisfatório			
0.44	11.2					
0.70	18.0		Inaceitável			
0.71	28.0					
1.10	45.0					

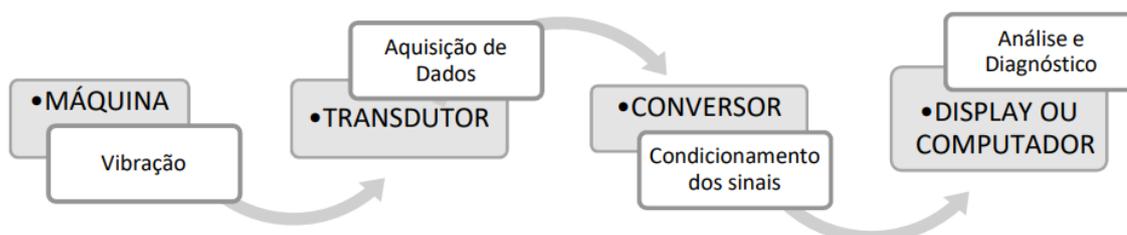
Fonte: ADAPTADO de ISO 10816 (2013).

É compreendido que a avaliação da severidade do nível de vibração mecânica de uma máquina se baseia em padrões nacionais e internacionais estabelecidos. No entanto, é crucial enfatizar que esses padrões não devem ser vistos como verdades incontestáveis, mas sim como diretrizes. Isso ocorre porque os níveis de vibração das máquinas variam conforme as condições de operação e processo a que são submetidas (SILVA, 2018).

2.3.1.4 Fluxo de medição

No processo de medição de vibração (Figura 10) utiliza-se um transdutor, posicionado no equipamento a ser monitorado, para transformar mudanças mecânicas quantitativas (deslocamento, velocidade e aceleração) em uma resposta elétrica (corrente e ou tensão). O sinal dinâmico é amplificado e filtrado através de um conversor de vibrações, sendo registrado posteriormente (SIEMANN, 2021).

Figura 10. Fluxo básico de medição de vibração



Fonte: SIEMANN, 2021.

A coleta de dados de vibração em um equipamento é tão importante quanto a própria análise do espectro de vibração. Cada equipamento possui particularidades que devem ser cuidadosamente consideradas para garantir medições adequadas e resultados confiáveis. Conforme Siemann (2021), as soluções aplicadas para monitoramento de vibração e temperatura em muitas indústrias são por métodos de coletas periódicas e contínuas. O monitoramento periódico envolve a coleta de dados por meio da captação em campo com o técnico responsável, enquanto na contínua, os métodos mais empregadas, atualmente, possuem comunicação via cabo, que apresentam um custo elevado de implementação e manutenção (TELLES, 2022).

2.3.2 Análise de temperatura

A temperatura é um dos parâmetros de mais fácil compreensão. O acompanhamento de sua variação permite gerar diagnósticos precoces de possíveis falhas em componentes mecânicos e elétricos, como por exemplo: (KARDEC e NASCIF, 2009)

- Vazamentos de óleo;
- Em mancais, a elevação de temperatura podem ser resultados de desgaste ou problemas de lubrificação;
- Desbalanceamento em mancais;
- Problemas no isolamento térmico.

Esse tipo de inspeção, pode ser realizado de duas maneiras: objetiva e contínua:

- Quando se trata da objetiva, são utilizados sistemas de infravermelho, que, ao detectar a radiação infravermelha emitida naturalmente pelos corpos, geram imagens térmicas que proporcionam informações como medição de temperatura ou padrões diferenciais de distribuição de calor.
- No que se refere à contínua, esta pode ser realizada via coleta de sensores que realizam a coleta de temperatura, geralmente por condução térmica, e enviam os dados relativos ao valor de temperatura no ponto posicionado.

2.4 Indústria 4.0

O processo de industrialização iniciou-se no final do século XVIII, com a introdução de equipamentos mecânicos na fabricação, marcando o advento da primeira revolução industrial. Esta denominação vem devido ao modo revolucionário de fabricação dos bens por meio de máquinas mecanizadas (BARBOSA e AROCA, 2017).

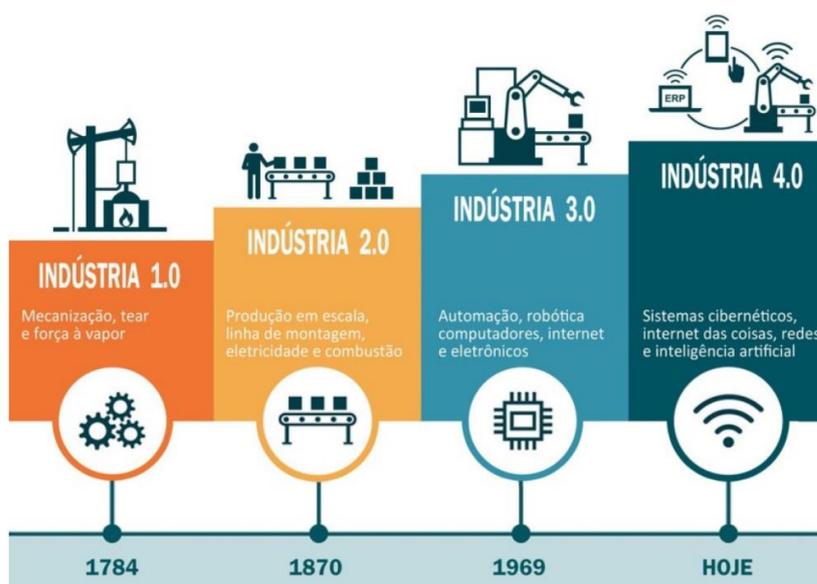
A segunda revolução industrial teve início na virada do século XX, caracterizada pelo uso da energia elétrica, produção em massa de bens e divisão do trabalho. Posteriormente, essa fase foi sucedida pela terceira revolução industrial, que teve início na década de 1970. Essa continua a influenciar a atualidade, incorporando dispositivos eletrônicos de controle, computação e tecnologia da informação para aprimorar a automação dos processos de fabricação (BARBOSA e AROCA, 2017).

O desenvolvimento progressivo das tecnologias eletrônicas introduzidas na terceira revolução pavimentou o caminho para a evolução e as demandas de modernização, visando conectar, cada vez mais, organizações, processos produtivos, máquinas, pessoas, objetos e logística. Neste cenário, impulsionado pela busca mundial por excelência na manufatura, o termo Indústria 4.0 surgiu durante a feira de Hannover em 2011, marcando uma fase inovadora na integração de sistemas industriais de alta performance (ESPINDULA, 2021).

A incorporação da digitalização à atividade industrial resultou no conceito de indústria 4.0, em referência como a 4ª revolução industrial, caracterizada pela integração e controle da produção a partir de sensores e equipamentos conectados em rede e da fusão do mundo real com o virtual, criando os chamados sistemas ciberfísicos e viabilizando o emprego da inteligência artificial (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2016, p. 11).

A indústria 4.0, propõe a integração efetiva das estruturas físicas, virtuais e biológicas, construindo uma rede de inovação, interação e produção cada vez mais rápida e inteligente (MAURA, 2019). A Figura 11 apresenta os quatro tipos de indústrias relacionadas as suas respectivas revoluções industriais.

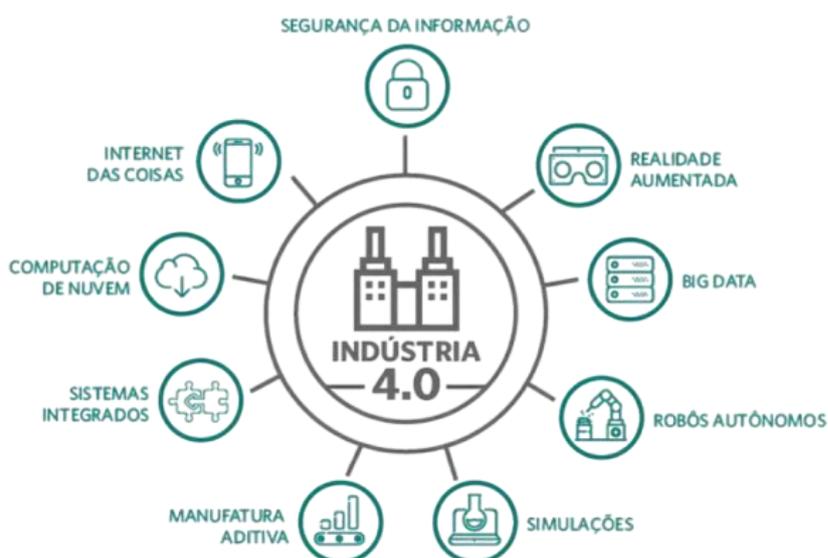
Figura 11. Evolução dos quatro tipos de indústria



Fonte: ALTUS, 2019.

Esta evolução permitiu a incorporação de novas tecnologias de monitoramento e análise de processos de manutenção, como: sensores e dispositivos inteligentes; sistema computadorizado de gerenciamento de informação; ferramentas de diagnósticos e prognósticos; computação em nuvem; simulação e modelagem; realidade aumentada (LI e WANG, 2016). Essas tecnologias, alinhadas com os pilares da indústria 4.0 (Figura 12), tornam-se indispensáveis para próxima geração da manutenção industrial.

Figura 12. Pilares da indústria 4.0



Fonte: Aptado de SMADM, 2019.

Quando se menciona a presença da internet na indústria, surge a ideia de um cenário no qual todos os equipamentos e máquinas estão interligados em redes, compartilhando informações de maneira integrada. Esse conceito é derivado de um dos pilares denominado Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*).

O IoT diz respeito à integração de objetos físicos e virtuais em redes conectadas à Internet, permitindo que os objetos coletem, troquem e armazenem dados que serão processados e analisados, gerando informações e serviços em grande escala, permitindo a interação entre objetos para as tomadas de decisões (HERMANN, et al., 2016).

2.4.1 Sensores de monitoramento online

A gestão de manutenção, alinhada aos princípios da Indústria 4.0, evolui em conjunto com o progresso tecnológico. Diversas tecnologias podem ser implementadas para aprimorar o monitoramento de ativos, impulsionando a eficácia da manutenção preditiva.

Uma das técnicas, consiste no monitoramento online em tempo real, realizado por meio de um conjunto de sensores inteligentes. Essa rede é direcionada para acompanhar parâmetros como vibração, temperatura, pressão, corrente, tensão, entre outros (ANDREY, 2018).

O monitoramento atua como uma ponte, conectando a interface de análise a um sistema de interação entre sensores e atuadores. A comunicação entre 'equipamento - processo - ambiente - humano' ocorre por meio da rede IoT. Essa rede recebe, processa e transmite dados, permitindo a coleta remota de informações, monitorando, assim, processos de fabricação para tomada programada de decisões e diagnóstico remoto de falhas (GAO, 2012).

2.5 Método de criterização de ativos

A criticidade de ativos representa um método de distinção dos equipamentos com base em sua relevância para o sistema produtivo. Ribeiro (2009) afirma que a criticidade determina o quanto um equipamento pode ser fundamental dentro do contexto operacional de fabricação, onde uma falha ou baixo desempenho podem

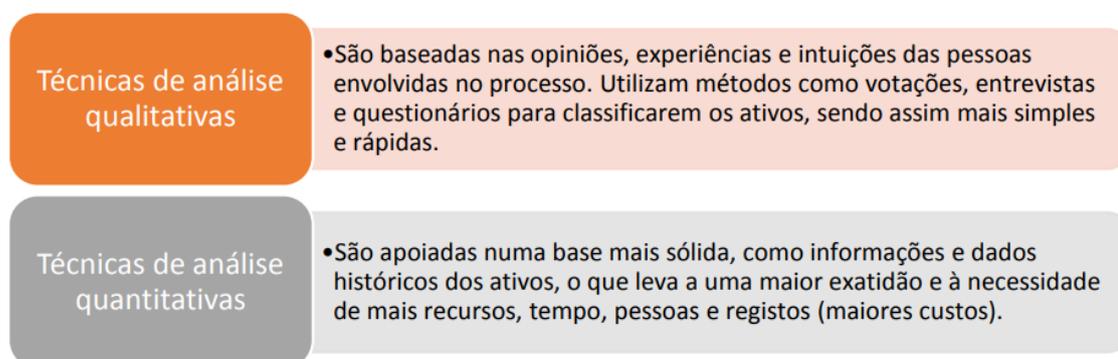
resultar em consequências significativas, tais como: acidentes de trabalho ou ambiental, impactos econômicos e operacionais.

Sendo assim, a análise de criticidade permite determinar quais os locais com um maior impacto no processo produtivo, com véis de aumentar a confiabilidade desses equipamentos. A correta avaliação de criticidade dos equipamentos tem como principais objetivos:

- Estruturar o tipo de manutenção a ser aplicado (plano de manutenção);
- Priorizar ações de manutenção nos equipamentos (ações corretivas ou melhoria);
- Gestão da informação do equipamento;
- Otimizar custos de manutenção (onde alocar os recursos/identificação de oportunidades);
- Apoio a estratégias da empresa (justificar investimentos);
- Necessidade de estoques de materiais/equipamentos reserva;
- Avaliar necessidade de serviços terceiros especializados.

Com o objetivo de definir as criticidades dos ativos, uma das técnicas mais utilizadas é método de classificação ABC, nela as prioridades são estabelecidas da seguinte maneira: ativos categorizados com criticidade A são aqueles que devem ter maiores confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade, seguidos pelos de criticidade B e C, respectivamente (MARQUEZ, 2007). No processo de classificação, tanto métodos qualitativos (baseados na experiência das pessoas) quanto métodos quantitativos (baseados em dados) podem ser empregados, a Figura 13 demonstra o conceito das duas técnicas.

Figura 13. Tipos de técnicas de análise de criticidade de ativos



A seleção entre essas técnicas não deve ser uma escolha exclusiva, mas sim uma abordagem mista que integre o melhor de ambas, unindo a simplicidade do método qualitativo com a precisão na definição de parâmetros proporcionada pelo método quantitativo (TANG, et al., 2017).

O processo de classificação é específico para cada organização, o que significa que, mesmo dentro da mesma indústria, podem ocorrer variações nos processos e itens. Os critérios são fatores de risco, e em sua maioria podem incluir: segurança dos colaboradores; custo da manutenção; impacto ambiental; indisponibilidade operacional; impacto no processo; sobressalentes do equipamento; tempo médio entre falhas (MTBF); tempo médio de reparo (MTTR) e outros.

Um método quantitativo que pode ser utilizado neste processo, é utilizando o “valor de risco”, na qual cada ativo passa pelos critérios e, ao final, obtêm uma pontuação, esta determinará, conforme os valores tabelados de níveis de criticidade, qual a classificação do ativo (A, B ou C). Neste método, o risco pode ser calculado com a multiplicação entre frequência e consequência, conformes as equações 4 e 5, respectivamente. Onde a frequência reflete o número de ocorrências em um dado período de tempo, e a consequência é baseada em quatro fatores, cada um com um valor atribuído que varia de acordo com as empresas, conforme a classificação e escala do impacto.

$$Risco = Frequência \times Consequência \quad (4)$$

$$Consequência = (IO \times FO) + CM + ISM \quad (5)$$

Em que:

IO - Fator de Impacto Operacional

FO - Fator de Flexibilidade Operacional

CM - Fator de Custo de Manutenção

ISM - Fator de Impacto na Segurança e Ambiente

Teles (2019) propõe que, após a classificação dos ativos, a distribuição ideal das quantidades por classe de criticidade é definida da seguinte maneira:

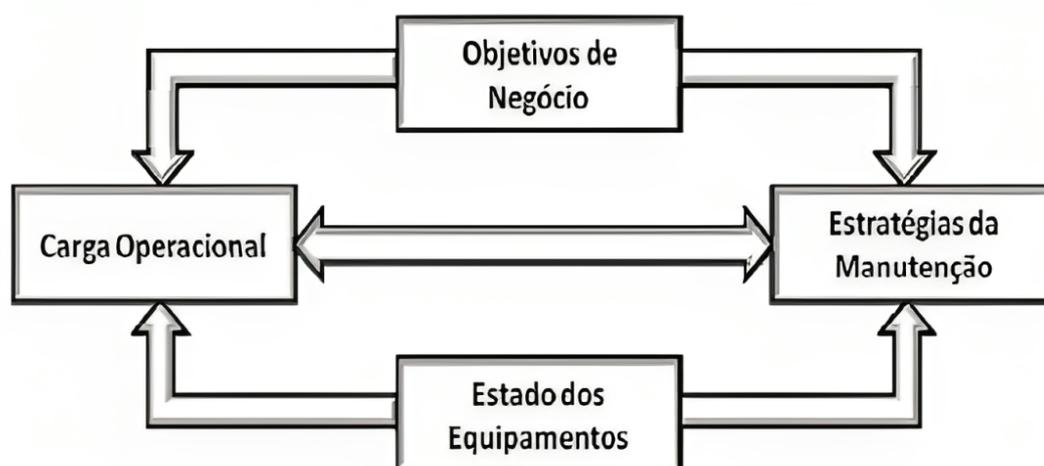
- Classificação A: até 20% dos ativos;
- Classificação B: entre 30% e 40% dos ativos;
- Classificação C: entre 40% e 50% dos ativos.

Quando há uma divergência significativa nos percentuais, especialmente em relação aos ativos críticos de classe A, em comparação com a referência estabelecida, o processo de avaliação de criticidade deve ser revisto. Isso se deve à elevada concentração de recursos e custos investidos nessa categoria de ativos, além da confiabilidade do processo.

2.5.1 Estratégia de manutenção dos ativos com base na criticidade

O papel estratégico da função manutenção tem sido cada vez mais reconhecido pelas organizações. A eficácia da manutenção deve ser tal que assegure índices de disponibilidade que maximizem o aproveitamento das variáveis envolvidas no setor produtivo. Sendo assim, em seu estudo, Macedo (2011) relacionou as estratégias de manutenção com a carga operacional, com base nos objetivos do negócio e os estados dos equipamentos (Figura 14).

Figura 14. Relação da estratégia de manutenção



Fonte: MACEDO, 2011.

Nesse contexto, as organizações que possuem uma classificação dos ativos devem definir a estratégia a ser implementada para cada categoria. Focando nos ativos de forma direcionada, concentrando esforços e recursos nos equipamentos identificados como mais críticos, tendendo a aumentar a disponibilidade das máquinas.

O processo de estratégia representado na Figura 15, representa alguns métodos adotados na indústria em estudo, e podem ser utilizados como modelo para início de gestão de equipamentos.

Figura 15. Estratégias de Manutenção

Prioridade do Equipamento	Tipos de Manutenção	Métodos de Manutenção a serem adotados
A (Alta Criticidade)	Manutenção baseada no tempo e na condição	<ul style="list-style-type: none"> - Planos de Inspeção Sensitiva - Planos de Manutenção Preditiva - Planos de Manutenção Preventiva Proativa e Reativa - Planos de Lubrificação - Manutenção online - Inspeção Operacional
B (Média Criticidade)	Manutenção baseada no tempo	<ul style="list-style-type: none"> - Planos de Lubrificação - Planos de Inspeção Sensitiva - Manutenção Preventiva Proativa e Reativa
C (Baixa Criticidade)	Manutenção baseada no tempo e corretiva	<ul style="list-style-type: none"> - Planos de Lubrificação - Planos de Inspeção Sensitiva

Fonte: AUTOR, 2023.

3 METODOLOGIA

O estudo deste trabalho se propõe a abordar a aplicação de soluções tecnológicas para aprimorar as atividades de manutenção, com foco no acompanhamento do desempenho de equipamentos produtivos. Neste capítulo, serão apresentados métodos para implantação de uma estratégia de manutenção preditiva online, empregando sensores especializados em monitoramento de vibração e temperatura.

3.1 Estratégia para aumento de disponibilidade

O local do estudo é uma planta de fabricação de papel com produção oriunda de matéria-prima composta por fibras celulósicas 100% recicladas. Este processo industrial representa um ambiente complexo, especialmente devido à separação das impurezas e à dependência das áreas para a continuidade operacional, como geração de vapor, vácuo, ar comprimido e tratamento de água. A etapa de separação de impurezas, por exemplo, expõe os ativos a condições severas, removendo itens indesejáveis como areia, partículas de vidro, madeira e metais, mantendo o foco também em maximizar o aproveitamento da fibra do papel. Essas condições adversas, geram desgaste, abrasão, exposição a alta umidade e contaminação, constituindo elementos que contribuem para falhas nos equipamentos, comprometendo a eficiência operacional e a disponibilidade da máquina.

O projeto desenvolveu-se a partir da análise estruturada dos resultados anuais de 2022 da área de manutenção da empresa. Utilizando o método SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*) como ferramenta, foi possível examinar o ambiente interno e externo da área, a fim de criar estratégias de melhoria. A matriz SWOT (Figura 16) permite organizar por ordem de relevância as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças relacionadas a uma empresa, área ou projeto (SILVA, 2009).

Figura 16. Representação esquemática de uma análise SWOT



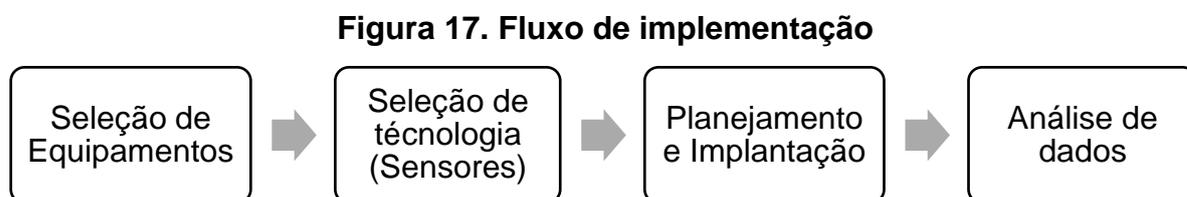
Fonte: SILVA, 2009.

Nas fraquezas internas, observou-se que as falhas mecânicas em equipamentos rotativos impactavam negativamente os resultados de manutenção, resultando em quebras inesperadas, que muitas vezes, poderiam ser evitadas com um acompanhamento mais frequente para a manutenção no momento ideal.

Buscando atuar nas fraquezas, identificou-se como oportunidade estudar soluções capazes de antecipar as quebras mecânicas em equipamentos rotativos, alinhando essa iniciativa ao retorno financeiro resultante da sua implementação. Nesse contexto, o projeto envolveu a área de confiabilidade e manutenção preditiva da empresa, que, inicialmente, revisou os métodos já implantados para identificar pontos de melhoria no processo, incluindo a análise das periodicidades de coletas em campo, alterações de rotas sensíveis e ferramentas utilizadas pela preditiva. Adicionalmente, foram realizados levantamentos de métodos implantados no mesmo ramo de negócio, identificando as melhores práticas a partir do cenário externo.

Na frente de trabalho, identificou-se como uma possibilidade a exploração de recursos da Indústria 4.0 para aprimorar o processo de manutenção preditiva, enfocando o monitoramento remoto de parâmetros de vibração e temperatura. A escolha desses parâmetros para monitoramento se deu devido à constatação de que a maioria das falhas de natureza mecânica ocorria em equipamentos rotativos, que possuem partes móveis geradoras de atrito, que resultam em vibrações. Com

base nisso, definiu-se a sequência da Figura 17 para a implementação, considerando diversos fatores inerentes ao processo.



Fonte: AUTOR, 2023.

3.2 Seleção de equipamentos

Para iniciar esta etapa de trabalho, é de extrema importância identificar os equipamentos críticos para o processo produtivo. Esses equipamentos devem ser estudados para compreender os benefícios esperados ao investir em tecnologia de monitoramento online, tais como redução de paradas não planejadas e aumento da vida útil (BOND, 2017).

Caso a criterização de ativos não estejam atualizadas, ou de acordo com o cenário atual da planta, é necessário visitar a classificação ABC. No processo de implantação da empresa em questão, foi necessário revisar as classificações dos ativos da unidade.

Com um total de 5300 equipamentos cadastrados na planta, foi necessário, primeiramente, definir qual área do processo é a mais crítica, servindo como base na seleção do tipo e quantidade de sensores para implementação. Conforme Barbosa (2022), em seu estudo realizado numa planta de fabricação de papel a partir de fibras recicladas, foi constatado que a máquina de papel é a área mais crítica do processo de fabricação de papel, dentre as áreas da central de aparas e utilidades.

Durante a revisão da classificação para a área mais crítica, foram analisados os últimos registros preenchidos na planilha da empresa, que continha a classificação anterior. Nesse caso, verificou-se se os critérios se mantiveram conforme marcados na ocasião para cada equipamento. Os processos de classificação envolveram aspectos como perda de produção, custo de manutenção, impacto em segurança e meio ambiente (Probabilidade X Consequência), MTBF e efeito na máquina de papel. Os critérios, pesos e pontuações podem ser consultados na Tabela 2.

Tabela 2. Fatores e critérios para classificação ABC

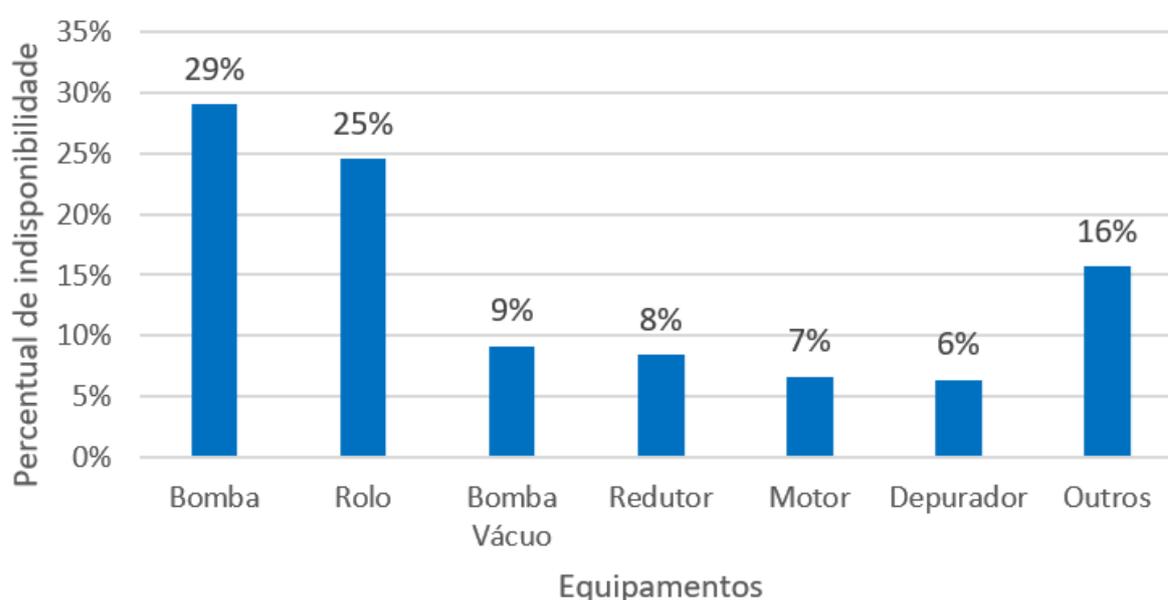
Fatores	Critérios	Pontos	Peso
Perda de Produção	Não há perda	0	40
	< 2 horas	1	
	2 - 8 horas	2	
	8 - 24 horas	4	
	> 24 horas	8	
Custo de Manutenção	< 1000 R\$	0	30
	1001 - 10 000 R\$	1	
	10 000 - 20 000 R\$	2	
	20 000 - 50 000 R\$	4	
	> 50 000 R\$	8	
Impacto em Segurança e Meio ambiente (Probabilidade X Consequencia)	Improvável Sem consequencias	1	10
	Improvável Leve	2	
	Possível Sem consequencias	2	
	Improvável Sério	4	
	Possível Leve	4	
	Provável Sem consequencias	4	
	Possível Sério	8	
	Provável Leve	8	
Provável Sério	16		
MTBF	< 0,25 anos	32	30
	de 0,25 - 2 anos	16	
	de 2 - 5 anos	8	
	de 5 - 10 anos	4	
	de 10 - 20 anos	2	
	> 20 anos	1	
Efeito na Máquina de Papel	Sem efeito na MP	0	30
	Parada da MP - Depois de 8h ou Efeito na qualidade/velocidade - Depois de 4h ou Efeito no custo de produção - Depois de 2h	2	
	Parada da MP - Depois de 4h ou Efeito na qualidade/velocidade - Depois de 2h ou Efeito no custo de produção - Imediato	4	
	Parada da MP - Depois de 2h ou Efeito na qualidade/velocidade - Imediato ou Efeito no custo de produção - Imediato	8	
	Parada da MP - Imediato	16	

Fonte: Acervo da empresa, 2023.

Seguindo as diretrizes da empresa, conforme detalhado no subtópico 2.5.1 que abrangem as estratégias de manutenção, foi estabelecido que todos os ativos classificados como críticos “A” devem ter a manutenção online (monitoramento). Para determinar quais equipamentos serão prioritários na instalação dos sensores,

realizou-se uma análise com base nos critérios de disponibilidade e MTBF, considerando quais equipamentos, áreas ou conjuntos mais impactaram no tempo de máquina parada ao longo de um período de 1 ano. Conforme apontado por Junior (2020), a escolha além dos itens mais críticos destacados na planilha de classificação ABC, é de extrema importância envolver o fator de disponibilidade de manutenção, este abrangendo um histórico recente de quebras por um grupo, como redutores, bombas e motores.

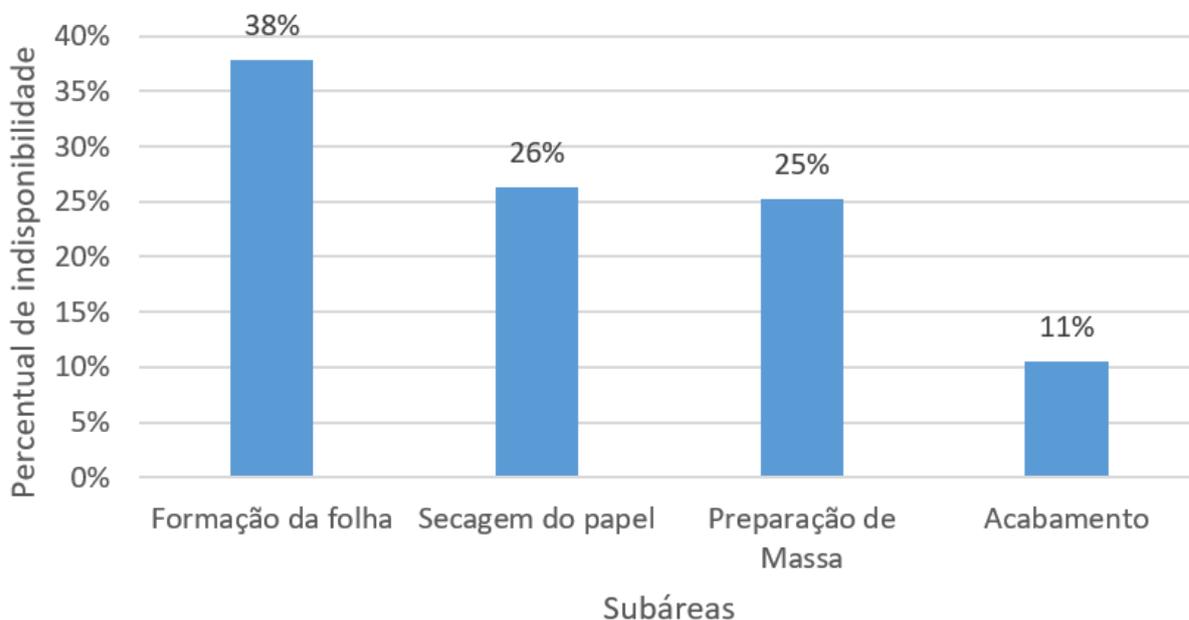
Figura 18. Gráfico percentual de indisponibilidade por equipamentos na máquina de papel em 2022



Fonte: AUTOR, 2023.

Ao realizar uma análise por área (Figura 19) e identificar os equipamentos que exercem maior impacto no fluxo do processo, bem como aqueles capazes de provocar interrupções imediatas, selecionou-se, com base na classificação ABC, os ativos que serão monitorados prioritariamente.

Figura 19. Gráfico percentual de indisponibilidade por subárea na máquina de papel em 2022



Fonte: AUTOR, 2023.

Diante desse contexto, os principais equipamentos examinados na indústria de papel foram identificados como bombas, rolos bombas de vácuo e redutores. A partir dessa análise, tornou-se possível compreender as necessidades para cada um destes equipamentos, visando monitorar suas variáveis. Entre os equipamentos sob monitoramento encontram-se motores, bombas, mancais de rolos, redutores, depuradores e refinadores.

3.3 Seleção de tecnologia (sensores)

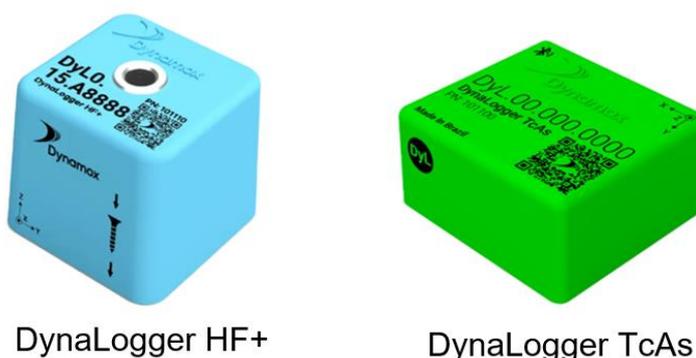
Visando o monitoramento contínuo dos ativos críticos, foram selecionados critérios para escolha da tecnologia mais adequada, os quais foram moldados conforme as necessidades específicas da empresa em análise. Na seleção, destacou-se como uma alternativa inovadora e de alto potencial os sensores de vibração e temperatura com protocolo de comunicação via Bluetooth e internet móvel. Este tipo de medidor dispensa cabeamento e é fixado na máquina, seja por cola ou parafuso, oferecendo praticidade na instalação e eficiência na comunicação.

Diante do objetivo de agregar as vantagens com o melhor custo-benefício para a unidade, avaliou-se as especificidades dos sensores levando em consideração critérios alinhados às exigências da aplicação. As características para

a seleção foram avaliadas e estão disponíveis para consulta na Tabela 5, presente no apêndice.

Conforme os critérios e os pesos aplicados para necessidade dos equipamentos, optou-se por implementar a solução da empresa Dynamox, que detém de hardware e software para monitoramento online de ativos industriais, utilizando como base os sensores sem fio DynaLoggers. Esta solução engloba sensores triaxiais que ficam fixos no equipamento, gerando dados que são enviados para um coletor externo (*gateway* ou aplicativo de celular) e podem ser observados com os dados tratados via plataforma web e/ou aplicativo de celular (DYNAMOX, 2023). A empresa detém de quatro modelos de sensores, dos quais foram selecionados os DynaLogger HF+ e TcAs (Figura 20).

Figura 20. Modelo de sensores aplicados



Fonte: DYNAMOX, 2023.

Esses sensores são aplicados para monitoramento de máquinas rotativas em conformidade com a norma ISO 20816-1: *Mechanical vibration* (2016), que fornece requisitos e diretrizes para a medição e avaliação da vibração em peças rotativas e não rotativas. O sensor HF+ devido à sua elevada taxa de frequência é indicado para detectar defeitos em rolamento em estágio inicial, em ativos de alta e baixa velocidade. O sensor TcAs com faixa de frequência até 2,5 kHz são ideais para detectar defeitos comuns relacionados a eixos e rotores como desalinhamento, desbalanceamento, folga e cavitação, defeitos nas espiras de rotor e estator de motores elétricos, além de falhas de rolamento (DYNAMOX, 2023). As especificações técnicas do sensor podem ser verificadas na Tabela 3.

Tabela 3. Características dos sensores selecionados

Características	HF+	TcAs
Vibração	Acelerômetro MEMSTriaxial com bandas de frequência 2 Hz a 13 kHz	Acelerômetro MEMSTriaxial com bandas de frequência 3 Hz a 2,5 kHz
Faixa de amplitude	Até ± 16 g	Até ± 16 g
Temperatura de operação	$-10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 84^{\circ}\text{C}$ com resolução de $0,01^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 84^{\circ}\text{C}$ com resolução de $0,01^{\circ}\text{C}$
Material	Corpo de Lexan e base de aço inox	Corpo de Lexan e base de aço alumínio
Fixação	Colado ou Parafusado	Colado
Grau de Proteção	IP66/IP68/IP69	IP66/IP68/IP69
Bateria	Autonomia 3 a 5 anos	Autonomia 3 a 5 anos
Comunicação	Bluetooth 5.3 / 2400 – 2483,5 MHz com alcance até 100 metros	Bluetooth 5.3 / 2400 – 2483,5 MHz com alcance até 100 metros
Memória	51200 amostras	51200 amostras

Fonte: DYNAMOX, 2023.

A Figura 21 representa o fluxo do processo de monitoramento, evidenciando duas abordagens distintas para a coleta de dados, que pode ser efetuada manualmente por meio de um aplicativo de celular ou de forma automatizada por intermédio do *gateway* do fornecedor, chamado de DynaGateway (Figura 22).

Figura 21. Fluxo de dados coletados



Fonte: ADAPTADO de DYNAMOX, 2023.

Figura 22. Gateway instalado no projeto

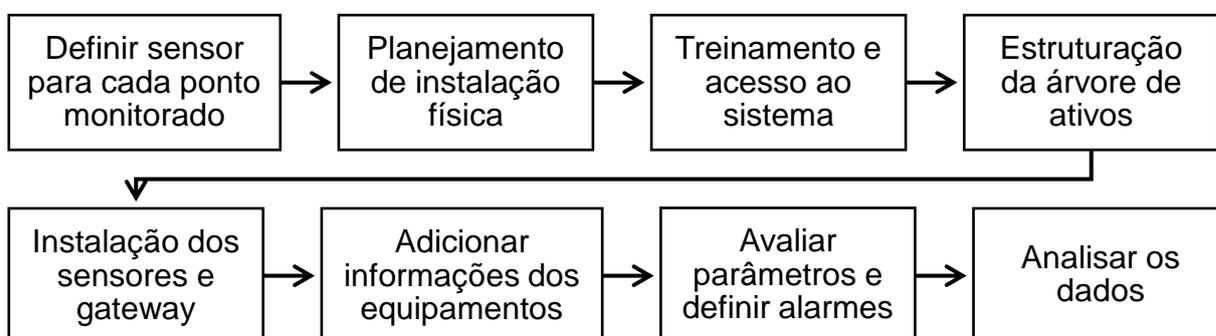


Fonte: ADAPTADO de DYNAMOX, 2023.

3.4 Planejamento e implantação

O processo da manutenção preditiva online seguiu uma sequência estruturada para assegurar uma transição suave e eficiente. Inicialmente, foi conduzida uma Prova de Conceito (PoC) para avaliar todos os critérios estabelecidos. Após o período de teste, a solução foi validada. Segue abaixo na Figura 23, o fluxo e as definições que orientam desde a seleção dos tipos dos sensores para cada equipamentos até a análise de dados em tempo real.

Figura 23. Fluxograma de implementação



Fonte: AUTOR, 2023.

3.4.1 Definir sensor para cada ponto monitorado

Para cada ponto monitorado, é essencial definir o sensor apropriado com base nas exigências específicas de monitoramento, na velocidade de operação e na frequência em que as falhas são identificadas. Nesta etapa, a escolha do DynaLogger adequado é crucial, com objetivo de otimizar o custo-benefício para cada aplicação.

Recomenda-se avaliar qual sensor atende às condições de monitoramento do ativo, seja para necessidade de visualizar as falhas em altas frequências (estágio inicial) ou para aplicações com velocidades próximas a 0,2 Hz, onde será necessário um tempo maior de coleta para avaliar as condições de vibração por completo.

Deve-se assegurar que os instrumentos operem com precisão nas faixas de frequência e velocidade pertinente, considerando também as condições de instalação, como temperatura (até 84°C), modo de fixação, acabamento superficial, e em casos de atmosfera explosiva, é necessário verificar as possíveis restrições (ISO 20816-1, 2016).

3.4.2 Planejamento de instalação física

Esta etapa consiste em detalhar o cronograma para implementação com considerações sobre os materiais, recursos e mão de obra disponíveis. Ao contemplar a conexão dos sensores com a rede através do *gateway*, deve-se realizar uma verificação prévia das posições dos equipamentos. Isso permitirá uma estimativa da quantidade ideal de *gateways* para a coleta eficiente dos dados dos sensores.

Um ponto que deve ser levado em consideração no cronograma é a necessidade de realizar as atividades com os ativos fora de operação e, sempre que possível, bloqueados contra acionamentos indesejados, priorizando a segurança durante a instalação. Na empresa em estudo, o processo de implantação foi de aproximadamente dois meses para 100% dos ativos selecionados.

3.4.3 Treinamento e acesso ao sistema

Deve ser realizado uma capacitação para os colaboradores que irão atuar com o sistema, com o intuito de familiarizá-los com os tópicos cruciais, tais como instalação, configuração do site, criação da estrutura hierárquica, parametrização e análises disponíveis na plataforma. Este treinamento é relevante para as equipes de inspeção e engenharia de confiabilidade, como foi realizado na empresa em estudo.

Quanto ao acesso ao sistema, segue-se uma lógica semelhante à dos colaboradores treinados. No entanto, é válido destacar que as pessoas encarregadas do cadastro e de modificação de itens terão um nível de acesso diferenciado em comparação com aqueles que simplesmente receberão alertas ou verificarão ocasionalmente o estado de saúde dos ativos.

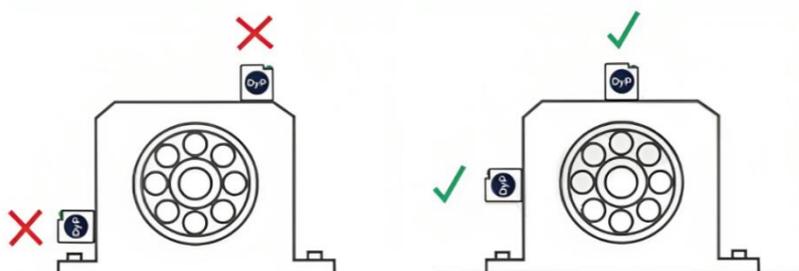
3.4.4 Estruturação da árvore de ativos

Antes de posicionar os sensores em campo, é importante garantir que a estrutura da árvore de ativos esteja devidamente criada, com os pontos de monitoramento previamente padronizados e prontos para a associação com os sensores. De preferência, essa árvore deve possuir uma estrutura hierárquica alinhada ao processo produtivo, proporcionando uma visão clara das áreas e seu estado de saúde estar com maior possibilidade de falhas, facilitando o planejamento e execução das correções necessárias. Um bom trabalho executado nessa etapa facilita o trabalho em campo e garante que os pontos sejam cadastrados na estrutura correta.

3.4.5 Instalação dos sensores e gateway

Nesta etapa, é fundamental compreender os locais de medições ideais para cada equipamento. Essa avaliação pode ser guiada pela norma ISO 20816-1, que recomenda realizar as medições nas partes rígidas e não rotativas na direção axial, radial ou tangencial. Dado que os DynaLogger realizam leituras em três eixos ortogonais entre si, ele pode ser instalado em qualquer direção angular. Todavia, é recomendado que um de seus eixos (X, Y, Z) esteja alinhado com a direção do eixo da máquina, como na Figura 24 (DYNAMOX, 2023).

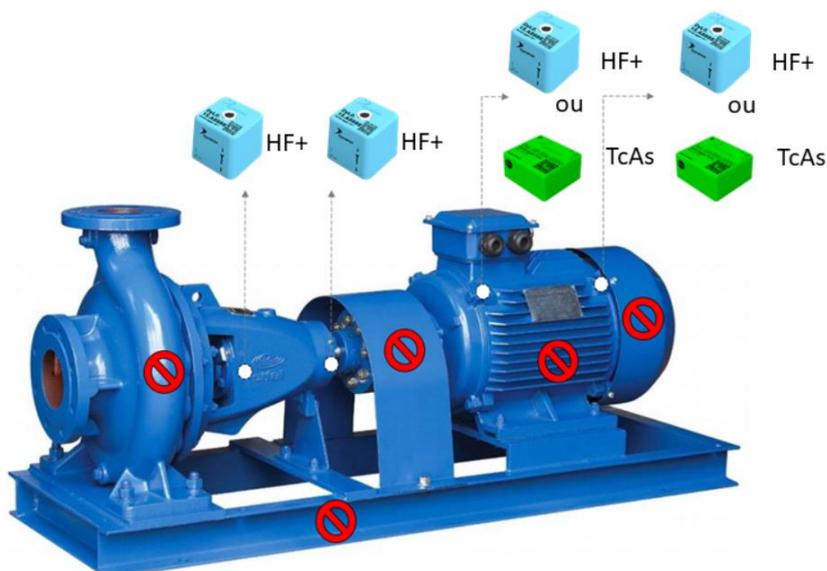
Figura 24. Exemplificando posicionamento do sensor



Fonte: Adptado de DYNAMOX, 2023.

Da solução aplicada, a fixação do sensor à máquina pode ser realizada de duas maneiras: por intermédio de parafuso ou cola. A escolha e aplicação desses métodos exigem cuidados, pois o método de fixação é um dos fatores mais críticos para medidas precisas de vibração, como destacado pela norma ISO 20816-1 (2016). Uma fixação rígida é essencial para evitar leituras incorretas de dados. As Figuras 25 e 26 exemplificam respectivamente a instalação dos sensores num conjunto de bombeamento e refinador (motor, redutor e refinador).

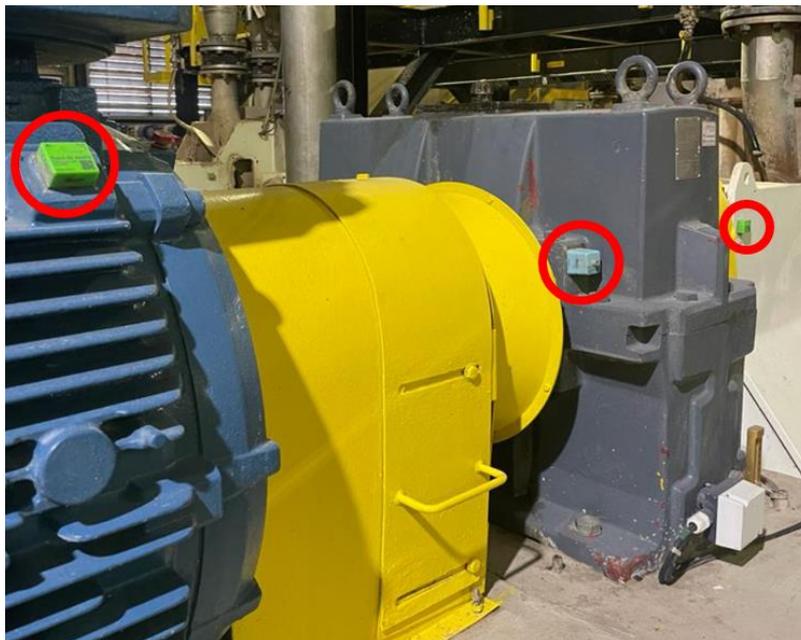
Figura 25. Posicionamento do sensor numa bomba centrífuga e motor



Fonte: DYNAMOX, 2023.

Os pontos demonstrado pelo símbolo proibido não são ideais para realizar a fixação dos sensores, pois em operação, estes não são rígidos os suficientes e ficam distantes dos conjuntos rotativos na qual desejam-se monitorar. Alguns podem demonstrar faltas leituras, como na carcaça de uma bomba que pode variar conforme o comportamento do fluído em deslocamento.

Figura 26. Sensores instalados no conjunto de refinador



Fonte: AUTOR, 2023.

Durante a instalação do *gateway*, é importante verificar seu posicionamento ideal, visando otimizar a conexão com o maior número possível de sensores. Portanto, é recomendável instalá-lo em um local centralizado, livre de interferências que possam prejudicar o sinal, tanto para a conexão *Bluetooth* quanto para a transmissão dos dados para a plataforma *web*. É aconselhável realizar a instalação do *gateway* após todos os sensores estarem devidamente posicionados. Isso permite avaliar onde pode ser estabelecido o máximo de conexões de forma eficiente.

3.4.6 Adicionar informações dos equipamentos

Na aplicação *Dynamox*, deve ser realizado o preenchimento obrigatório dos dados técnicos dos ativos monitorados, como tipo de equipamento, rotação e orientação dos eixos, nível de operação, faixa dinâmica, características do monitoramento espectral e intervalos de medições. Além disso, existem os campos de preenchimentos opcionais tais como alertas, rolamentos e preferências de visualização.

Referente a coleta através do *gateway*, devem ser associados cada equipamento ao dispositivo de melhor conexão, sendo configurado sua taxa de

aquisição dos dados, podendo coletar e enviar informações dos sensores entre 1 até 24 horas. Lembrando que quanto maior a taxa de aquisição, mais dados serão enviados de uma única vez, impactando no seu armazenamento (8 GigaBytes).

3.4.7 Avaliar parâmetros e definir alarmes

No início da aplicação deve ser analisado individualmente os dados enviados pelos equipamentos por meio da plataforma para garantir que os sensores estejam respondendo de maneira adequada à aplicação. Nesse estágio, já é possível monitorar o estado de saúde dos ativos.

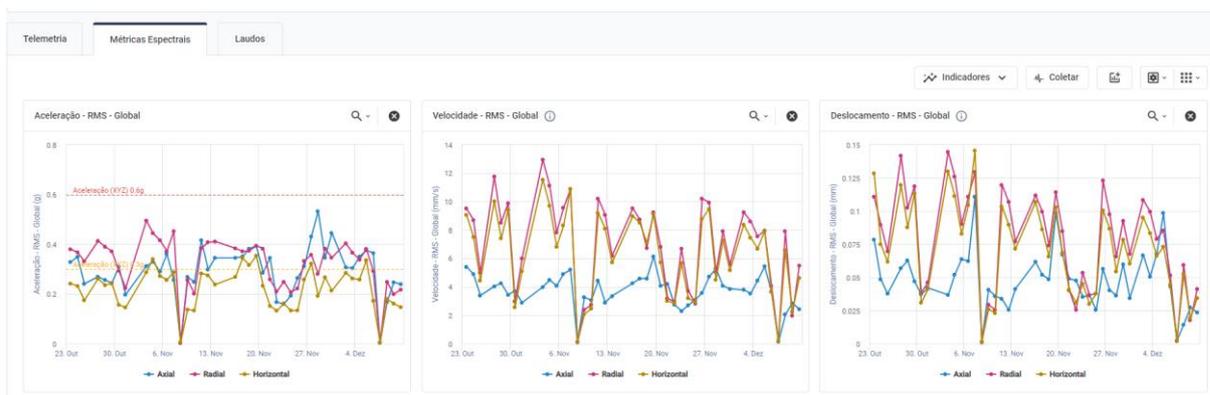
A definição de alarmes desempenha um papel fundamental, para uma melhor gestão a vista e questões emergenciais, contribuindo significativamente para a avaliação contínua do desempenho do equipamento. Um dimensionamento correto dos alarmes permite a implementação de ações precisas na manutenção, fornecendo em tempo real possíveis anomalias nos equipamentos.

Os critérios para a definição dos alarmes foram estabelecidos com base nas premissas da ISO 10816 (2013), mencionada no capítulo 2.3.1.3, considerando valores de alarme para níveis inicial e crítico em cada equipamento monitorado. Nessa etapa, é essencial consultar sistemas de manutenção preditiva existentes, quando aplicável, aproveitando os históricos de dados da máquina. No caso da empresa em estudo, foram combinados os conceitos das normas com os históricos de medições *offline* dos equipamentos, verificando os valores médios de RMS ao longo do tempo de coleta. Essa análise permitiu a definição dos valores de alerta, levando em consideração as condições específicas de cada equipamento.

Na plataforma Dynamox, os alertas podem ser configurados em dois níveis (A1 e A2). Caso os valores atinjam esses limites, a plataforma envia mensagens via email para informar sobre a condição do ativo (Figura 27). Isso facilita as análises iniciais e a identificação da necessidade de intervenção ou a implementação de medidas paliativas, contribuindo para uma abordagem proativa na manutenção.

Outro elemento de análise de ativo é a análise espectral, na qual os gráficos apresentam os dados nos domínios de aceleração, velocidade e deslocamento (Figura 30), apresentando também gráficos de tendências espectrais proporcionando uma compreensão mais aprofundada das variações ao longo do tempo.

Figura 30. Gráfico métricas espectrais



Fonte: AUTOR, 2023.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

As discussões a seguir exploram os detalhes dos resultados obtidos, destacando a eficácia das estratégias implementadas e implicações práticas na manutenção preditiva em uma indústria de papel reciclado.

4.1 Gestão de falhas

Após a configuração dos equipamentos e a calibração de seus alarmes, o sistema em nuvem assume a responsabilidade pela gestão e evolução das falhas dos equipamentos, enviando notificações de casos críticos por e-mail. Esse processo permite a implementação de ações imediatas para prevenir quebras e correções necessárias. Dentro desse tipo de alerta há ainda duas subdivisões: alarmes de monitoramento contínuo e alarmes de monitoramento espectral.

Um exemplo de intervenção a partir de um alerta crítico é apresentado na Figura 31. A identificação dessa situação ocorreu por meio do recebimento de um alerta por e-mail em 24 de novembro de 2023, no qual os sensores detectaram uma variação significativa na temperatura e vibração em uma bomba de alimentação de massa. Diante dessa alteração abrupta, a equipe de inspeção dirigiu-se ao equipamento para avaliar as condições do processo e do próprio equipamento.

Figura 31. Gráfico da evolução de temperatura na bomba



Fonte: AUTOR, 2023.

Durante a inspeção no local, evidenciou-se, por meio da técnica de estroboscopia — técnica visual que utiliza uma fonte de luz intermitente para criar a ilusão de parar ou retardar o movimento de um objeto — que o elemento elástico estava danificado, conforme ilustrado na Figura 32. Diante desse cenário, foi realizado um preparativo para lidar com a situação antes que evoluísse para uma falha completa, prevenindo danos adicionais. Com todos os recursos e liberações necessárias, a equipe estava pronta para intervir de maneira que não prejudicasse o andamento do processo. Ao evitar uma parada não programada, a equipe conseguiu minimizar a indisponibilidade da máquina em pelo menos duas horas.

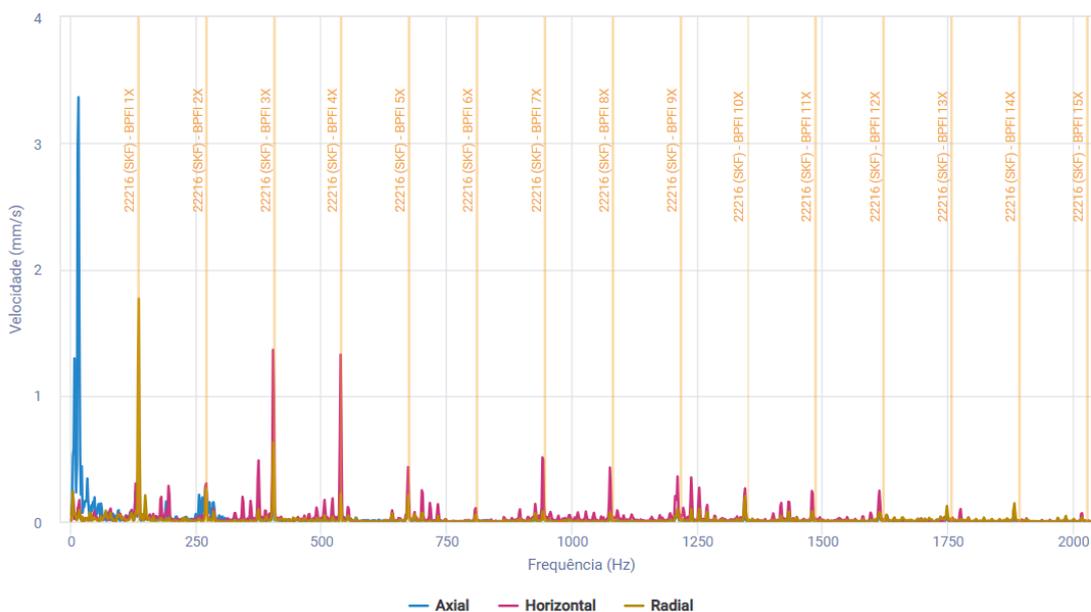
Figura 32. Bomba com anomalia no elemento elástico



Fonte: AUTOR, 2023.

Outro exemplo notável, que tem desempenhado um papel na confiabilidade e na redução de eventos de falha em rolamentos nos rolos da máquina de papel é o acompanhamento espectral. Na Figura 33, um aumento no valor do BPF_I foi o ponto de partida para uma análise mais aprofundada das vibrações no domínio da frequência. O gráfico revela distintos picos característicos de velocidade nas três direções (axial, horizontal e vertical). Ao aplicar na análise as frequências características de falha de rolamento, foi possível verificar que os picos coincidiram com as falhas da pista interna de rolamento (BPF_I — *Ball Pass Frequency Inner*), destacado nas linhas amarelos na vertical.

Figura 33. Gráfico espectral evidenciando a falha de pista interna BPF1



Fonte: AUTOR, 2023.

O evento foi identificado com quase dois meses de antecedência e o monitoramento contínuo possibilitou acompanhar a evolução dessa falha (Figura 34), permitindo a programação de uma intervenção durante a parada programada da máquina. Os resultados após intervenção, mostram como deve ser regido o estado normal de vibração em velocidade RMS do equipamento.

Figura 34. Gráfico de velocidade RMS do equipamento



Fonte: AUTOR, 2023.

Figura 35. Rolo em monitoramento

a) Rolo em monitoramento

b) Estado da pista interna do rolamento

Fonte: AUTOR, 2023.

Na Figura 35 é possível observar o sensor fixado no rolo em monitoramento e o estado da pista interna do rolamento com desgaste acentuado.

4.2 Ganhos na manutenção preditiva

4.2.1 Segurança

A implementação do monitoramento *online* proporcionou melhorias significativas na estrutura de manutenção preditiva da unidade. Um dos retornos notáveis diz respeito à inspeção em máquinas sujeitas às restrições da Norma Regulamentadora No. 12 (NR-12), que anteriormente não dispunha métodos de monitoramento devido aos riscos associados ao acesso durante a operação. E outros associados a locais com trabalho em altura, eliminando por completo o risco de queda durante atuação da coleta.

4.2.2 Otimização do tempo

Durante um período de seis meses, acompanhou-se os ativos, comparando os métodos de coletas para analisar a eficácia de ambos. Ao constatar resultados similares entre os dados coletados *online* e *offline* no momento da coleta, decidiu-se que os ativos monitorados pela solução não precisariam mais de acompanhamento de coleta *offline*. Essa otimização proporcionou um ganho de tempo mensal de até

16 horas para os técnicos de preditiva, especialmente em locais de trabalho em altura, onde as atividades exigem maior atenção e cuidados para o acesso. Esses ganhos permitiram que a equipe se concentrasse em análises mais aprofundadas e propostas de melhorias. Um exemplo de um local de difícil acesso é demonstrado na Figura 36, na qual o inspetor tem que realizar a coleta com dispositivo num redutor localizado acima de 2 metros de altura do piso.

Figura 36. Coleta de dados manual num redutor monitorado online



Fonte: AUTOR, 2023.

4.2.3 Aumento da Confiabilidade na tomada de descuições

O acesso em tempo real aos dados *online* elimina a necessidade de esperar por inspeções periódicas, proporcionando uma maior quantidade de dados como fonte. Isso resulta em uma redução significativa no tempo de resposta para detecção e resposta a problemas, permitindo uma intervenção rápida e eficiente. Essa agilidade na resposta é crucial para evitar o agravamento de falhas e minimizar o impacto nas operações.

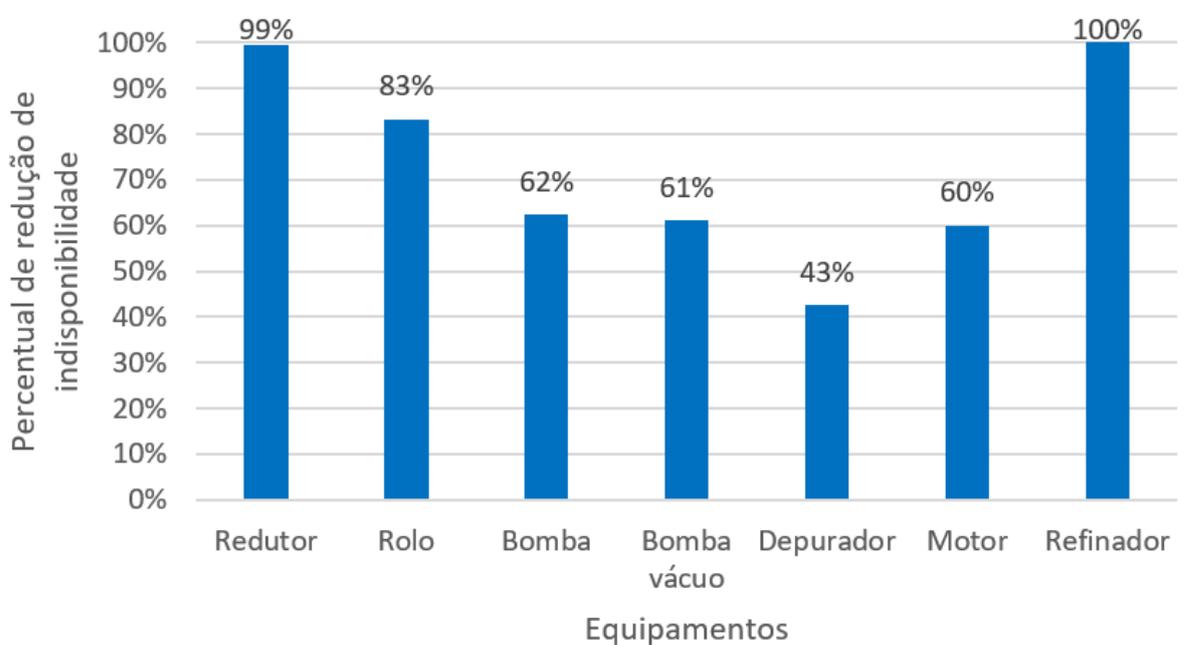
4.3 Validação dos resultados

Como resultado da aplicação, foi desenvolvido, um relatório de acompanhamento de falhas e riscos da unidade, contendo uma coluna que indica o

método preditivo utilizado para identificação de cada falha. Esse relatório de estado de saúde dos ativos passou a ser acompanhado semanalmente pela equipe de manutenção e áreas fabris, proporcionando uma compreensão clara do estado dos ativos e das intervenções necessárias.

Ao término do primeiro ano de implementação, em 2023, observou-se um significativa redução de 78% na indisponibilidade nos 54 ativos monitorados, em comparação com o ano de 2022. A Figura 37 ilustra a diminuição percentual por conjunto de equipamento, destacando que o maior ganho em termos temporais ocorreu no componente "rolo", que apesar da redução positiva de 83% em comparação com o ano de 2022, esse componente teve o maior impacto em horas de máquina parada evitadas.

Figura 37. Gráfico de redução percentual de indisponibilidade 2022x2023



Fonte: AUTOR, 2023.

No que diz respeito à indisponibilidade geral da máquina, em comparação com o ano anterior à implementação, observou-se uma redução estimada de 18% no tempo total de paradas por motivo de manutenção, resultado das 28 falhas evitadas nos ativos monitorados (Figura 38).

Figura 38. Quantidade de falhas evitadas a partir dos dados dos sensores

Fonte: AUTOR, 2023.

De modo geral, a implementação da solução da Indústria 4.0 proporcionou um acompanhamento mais abrangente dos ativos, contribuindo para o desempenho global alcançado em 2023. A Tabela 4 apresenta os principais dados do primeiro ano de aplicação na empresa em estudo.

Tabela 4. Dados da implementação

Locais Monitorados	Laudos Gerados	Falhas Evitadas	Melhoria na indisponibilidade (2022 x 2023)
54	184	28	18 %

Fonte: AUTOR, 2023.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo se fundamentou na aplicação de tecnologias associadas à Indústria 4.0 para o monitoramento de ativos, desempenhando uma função significativa na estratégia de manutenção preditiva em uma indústria de papel.

Ao analisar os desdobramentos da implementação da preditiva online, destacam-se vantagens em antever as falhas conforme o estado dos ativos. Com os dados coletados em tempo real pelos sensores de vibração e temperatura, tornou-se possível identificar padrões comportamentais, detectar variações significativas e antecipar potenciais quebras.

Com a introdução do sistema em nuvem e o histórico dos dados, a supervisão dos ativos foi aprimorada por meio de indicadores da plataforma que exibem a saúde dos ativos e padrões previstos para o comportamento das máquinas. Estes dados contribuem com relatório de acompanhamento de falhas e riscos desenvolvido pela manutenção da unidade.

Conclui-se que a solução aplicada contribuiu na estratégia de manutenção do negócio, resultando em retorno financeiro ao longo do ano de aplicação, justificando o custo de implantação, evidenciado pela redução anual de indisponibilidade da máquina, estimada em até 18%. Ao incorporar tecnologias inovadoras e estratégias de manutenção preditiva, este estudo não apenas contribui para o avanço da indústria de papel reciclado, mas também destaca o potencial transformador da indústria 4.0 na abordagem preditiva de gestão de ativos industriais.

Como trabalhos futuros, há planos para expandir o monitoramento e explorar alternativas para monitorar equipamentos com temperatura superiores a 85°C, como os cilindros e rolos da área da secagem da máquina de papel. Além disso, integrar os dados dos sensores com métodos de aprendizado de máquina, da indústria 4.0, visando que o ativo antecipe e informe as condições futuras de falhas conforme seu histórico de coleta e variação.

REFERENCIAS

ABRAMAN – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO. **Documento Nacional: A situação da manutenção no Brasil 2022**. 2022.

ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Gestão da Manutenção: Aplicada as áreas Industrial, Predial e Elétrica**. São Paulo: Saraiva, 2017.

ALTUS. **Conheça os nove pilares da indústria 4.0 e sua relevância para a atividade industrial**. In: Altus. [S.l.], 9 jan. 2019. Disponível em: <https://www.altus.com.br/post/212/conheca-os-nove-pilares-daindustria-4-0-e-sua-relevancia-para-a-atividade-industrial>. Acesso em: 23 dez. 2023.

AMOROSO, Carine Rosa Malena Garcia. **Sustentabilidade na reciclagem e no uso da água em indústria de produção de papel por meio da simulação computacional**. 2020. Trabalho Final De Curso (Graduação em Engenharia de Produção). Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2020.

ANDREY, I. et al. **Smart management of technologies: predictive maintenance of industrial equipment using wireless sensor networks**. Entrepreneurship and Sustainability Issues, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

BARBOSA, GF, AROCA, RV. **An IoT-Based Solution for Control and Monitoring of Additive Manufacturing Processes**. 2017. J Powder Metall Min 6: 158. doi:10.4172/2168-9806.1000158. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317023344_An_IoT-Based_Solution_for_Control_and_Monitoring_of_Additive_Manufacturing_Processes . Acesso em: 22 dez. 2023.

BARBOSA, Wesllen Morais Aleixo. **Estruturação da manutenção para uma planta de fabricação de papel**. 2022. Trabalho de conclusão Curso (Graduação em Engenharia mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/47834/1/TCC%20Wesllen%20Morais%20Aleixo%20Barbosa.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2023

BOND, Jackson. **IOT ENABLES: PREDICTIVE MAINTENANCE**. 2017. 9 p. Artigo (CHIEF PRODUCT OFFICER)- SN, [S.l.], 2017. Disponível em: <https://generisgp.com/wp-content/uploads/2018/02/IoT-Enables-Predictive-Maintenance.pdf> . Acesso em: 26 dez. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Desafios para a indústria 4.0 no Brasil**. Brasília: CNI, 2016. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2016/8/desafios-para-industria-40-nobrasil/>. Acessado em: 22 de dez 2023.

DYNAMOX. **Solução Dynamox**. 2023 Disponível em: <https://dynamox.net/blog/solucao-dynapredict-uma-familia-de-sensores>. Acesso em: 28 dez 2023

ENSUS. **Análise de Vibração – Tipos de Sinais, Transformada de Fourier e PSD**. 2016. Disponível em: <https://ensus.com.br/analise-de-vibracao-tipos-de-sinais-transformada-de-fourier-e-psd/>. Acesso em: 16 dez 2023.

ESPINDULA, L.G. **Manutenção preditiva e a indústria 4.0 um estudo de caso da implementação de um sistema de monitoramento on-line de ativos**. Trabalho de conclusão Curso (Graduação em Engenharia mecânica) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia-GO, 2021. Disponível em: <http://repositorio.aee.edu.br/jspui/handle/aee/18342>. Acesso em: 05 dez. 2023

FERREIRA, S. J. S. **Diagnóstico de máquinas elétricas pela análise de vibração**. Instituto superior de engenharia do Porto, 2012.

FILHO, G. B. A organização, **O planejamento e o controle da manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2008.

GAO, Q.W. **Research and application of risk and condition based maintenance task optimization technology in an oil transferstation**. J. Loss Prev. Process Ind., vol. 25, no. 6, pp. 1018–1027, 2012.

GHAZALI, M. H. M.; RAHIMAN, W. **Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review**. *Shock and Vibration*, Hindawi, 2021.

GIRDHAR, P., SCHEFFER, C. **Machinery vibration analysis & predictive maintenance**. Burlington: Elsevier, 2004.

GREGÓRIO, Gabriela; SILVEIRA, Aline. **Manutenção industrial**. 1. ed. São Paulo: Ed. Sagah educação S.A., 2018.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. **Design principles for industrie 4.0 scenarios**. 2016. Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>. Acesso em: 20 dez. 2023

IBÁ- Indústria Brasileira de árvores. **Relatório anual 2021**. 2021. Disponível em: <https://iba.org/publicacoes>. Acesso em: 14 dez. 2023

INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10816-1: Mechanical vibration - evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts-part 1**. General guidelines. Suíça, 2013.

INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 20816-1. Mechanical Vibration – Measurement and evaluation of machine vibration – Part 1**. General guidelines. Suíça, 2016.

JUNIOR, Gilmar Antonio Adada. **Aumento de disponibilidade de máquina ondulateira com manutenção preditiva através de sensores inteligentes, computação em nuvem e conceitos da indústria 4.0**. 2020. 23 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Indústria 4.0) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2020. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/25947/1/umentodisponibilidademaquinaonduladeira.pdf>. Acesso: 27/12/2023

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ed. Qualitymark, 2009.

LI, Zhe; WANG, Kesheng. **Industry 4.0 – Potentials for Predictive Maintenance**. 2016. 5 p. Article (Academic Engineering)- University of Science and Technology Trondheim, 94 Norway, China, 2016. 1. Disponível em: <https://www.atlantispress.com/proceedings/iwama-16/25862217>. Acesso em: 14 dez. 2023.

MACEDO, Marco Antonio Subtil. **Contribuição metodológica para a determinação da Criticidade de equipamentos na gestão da manutenção**. Dissertação para obtenção de título em Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. 2011. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3723>. Acesso em 22 dez. 2023

MARQUEZ, A. C. **The maintenance management framework**. Models and methods for complex systems maintenance. Piscataway: Springer, 2007.

MAURA, Sandra. **Os caminhos para a transformação das empresas no futuro**. In: Indústria 4.0. [S.l.], 12 out. 2019. Disponível em: <https://www.industria40.ind.br/artigo/18906-industria-40-os-caminhospara-a-transformacao-das-empresas-para-o-futuro>. Acesso em: 18 dez. 2023.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>, Acesso em 14 dez. 2023.

PETRULHO, Alex Sandro. **Análise de falha: rosca-de-descarga**. 2020. 54f. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica - Faculdade de Americana – FAM, Americana, 2020.

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.

RAO, Singiresu. **Vibrações Mecânicas**. Editora Pearson Prentice Hall, 2008.

RIBEIRO, G. C. **A importância dos critérios de sustentabilidade na definição da criticidade dos equipamentos analisados sob a ótica de RCM2**, em: II Seminário Internacional Mantenimiento en Sistemas Eléctricos – SIMSE 2009. Bogotá, Colombia, 29 de setembro a 02 de outubro de 2009.

SELEME, Robson. **Manutenção industrial: mantendo a fábrica em funcionamento**. Editora Intersaberes, 2015.

SIEMANN, Gustavo Mello. **Análise de vibração: estudo da técnica e aplicação prática na indústria siderúrgica**. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.

SILVA, J.A. **Gestão da Manutenção em Máquinas, Equipamentos e Instrumentos de Medição**. Trabalho de Conclusão de Curso Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade Pitágoras, Uberlândia, 2018.

SILVA, Luciano Luz. **Análise SWOT**. 2009. Disponível em: <https://agenda-digital.blogspot.com/2009/07/matriz-de-analise-de-swot.html> . Acesso em 23 dez 2023.

SILVA, R. M. K. **Bancada didática para manutenção preditiva utilizando análise de vibrações**. 2018. 49 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2018.

SKF Reliability Systems. **Tecnologia de vibrações**. 2. ed. Jundiaí: SKF do Brasil, 2004. 90 p. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/apostila-de-curso-de-analise-de-vibracao-skf/5122105/>. Acesso em: 19 dez. 2023.

SMADM. **Conheça os 10 pilares da Indústria 4.0**. In: LWT Sistemas. [S.l.] 2018. Disponível em: <https://www.lwtsistemas.com.br/2018/06/04/10-pilares-da-industria-4-0/>. Acesso em: 19 dez. 2023.

SOEIRO, N. S. **Curso de fundamental de vibração e balanceamento de rotores**. Belém, PA: Instituto de Tecnologia – ITEC, 2008. 125 p.2. Disponível em: <https://docplayer.com.br/53570481-Curso-de-fundamentos-de-vibracoes-e-balanceamento-de-rotores.html>. Acesso em: 19 dez. 2023.

TANG, Yang, Q. Liu, J. Jing, Y. Yang, and Z. Zou, **A framework for identification of maintenance significant items in reliability centered maintenance**, vol. 118, pp. 1295-1303, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544216316097>. Acesso em: 22 dez. 2023.

TELES, J. **Bíblia do RCM: O guia completo e definitivo da manutenção centrada na confiabilidade na indústria 4.0**. Brasília: ENGETELES Editora, 2019.

TELLES, Geovani Lima. **Monitoramento preditivo online de ativos industriais com uso de sensores via bluetooth: estudo de caso na indústria de mineração**. 2022. 62f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle de Automação) - Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Serra, Serra, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/2618>, Acesso em: 05 dez. 2023

VISSOCI, Junior Rodney Luis da. **Confiabilidade em Equipamentos Rotativos Baseado em Monitoramento de Condição**. 2016. 91 p. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

APÊNCIDE

Tabela 5. Critérios e características para seleção de tecnologia de monitoramento online

Critérios Avaliados	Caractérisicas
Acelerômetro	Faixa de frequência
	Sensibilidade
	Amplitude máxima de aceleração
Temperatura	Faixa de temperatura
	Resolução
Caractérisicas Físicas	Massa
	Dimensões
	Fixação
Certificações	Atmosfera Explosiva
	Grau de Proteção
Bateria	Autonomia
	Recarregavel
	Troca
Gateway	Distância Sensor Gateway
	Grau de Proteção
	Temperatura de Trabalho
	Quantidade de Sensor por Gateway
Protocolos Gateway	Conectividade Internet
	OPC/Modbus
Plataforma	Tratamento de dados
	Facilidade de análise
	Envio de alarmes
	Aprendizado de Máquina
Serviço	Atendimento
	Suporte
Custo	Plataforma
	Gateway
	Sensor
	Aprendizado de Máquina

Fonte: Acervo da Empresa, 2023.