UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

KLEBER VIEIRA DA SILVA

UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA MANUTENÇÃO: estudo de caso em uma linha de envase de bebidas

RECIFE
2023

KLEBER VIEIRA DA SILVA

UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA MANUTENÇÃO: estudo de caso em uma linha de envase de bebidas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientadora: Profa. Dra. Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte

RECIFE

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Kleber Vieira da .
Utilização de tecnologias da indústria 4.0 para manutenção: estudo de caso em uma linha de envase de bebidas / Kleber Vieira da Silva. - Recife, 2023.
72p. : il., tab.

Orientador(a): Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2023.

1. Manutenção preditiva. 2. Indústria 4.0. 3. IoT. I. Duarte, Dayse Cavalcanti de Lemos. (Orientação). II. Título.

670 CDD (22.ed.)

KLEBER VIEIRA DA SILVA

UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA MANUTENÇÃO: estudo de caso em uma linha de envase de bebidas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 30/11/2023

BANCA EXAMINADORA

_____

Profa. Dra. Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof. Dr. Antônio Marques da Costa Soares Jr (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof. Dr. Tiago Leite Rolim (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado o dom da vida e me guiado através de seus desígnios.

Á minha mãe, por ter me educado, protegido e disponibilizado recursos durante todo o caminho de meu desenvolvimento como pessoa, cultivando meu amor pela leitura desde cedo.

Aos meus avós, que através de trabalho e sacrifico, conseguiram prover aos seus filhos e netos melhores vidas e perspectivas de futuro.

Á Julianna, minha namorada, pelo amor, companheirismo e por acreditar mais em mim, do que eu mesmo.

Aos amigos que cultivei ao longo da vida, por tornarem minha jornada mais leve e divertida.

Aos professores, compreensivos e solícitos, por compartilharem seu conhecimento apoiando o meu desenvolvimento.

Por fim, aos companheiros de trabalho, cujo apoio foi fundamental para a minha adaptação no meio industrial e amadurecimento como profissional.

RESUMO

O presente estudo apresenta as diretrizes para a implementação de um sistema de monitoramento remoto no contexto da manutenção preditiva na indústria 4.0, tendo por objetivo identificar falhas incipientes. As ferramentas atuais de monitoramento de cunho quantitativo, existentes na indústria, têm predominantemente, caráter periódico não-contínuo, o que não favorece a identificação das falhas em sua fase incipiente. Uma alternativa é a utilização de sensores de monitoramento contínuo e remoto, como ferramentas para identificação das falhas. A utilização de tecnologias como IoT, Big Data e Nuvem permitem a implementação desse tipo de monitoramento. As diretrizes acima mencionadas foram implementadas na operação de uma linha de envase no contexto de uma cervejaria. No período de seis meses, os resultados mostraram que o uso destes sensores permitiu um aumento na disponibilidade dos ativos da linha, contribuindo para obtenção de dados que permitem a estruturação das métricas do sistema de manutenção preditiva 4.0.

Palavras-chave: manutenção preditiva; indústria 4.0; IoT.

ABSTRACT

This study presents guidelines for the implementation of a remote monitoring system within the context of predictive maintenance in the Industry 4.0, with the aim of identifying incipient failures. Current quantitative monitoring tools in the industry predominantly operate on a non-continuous periodic basis, which hinders the early detection of failures. In this study, continuous and remote monitoring sensors were employed as tools for identifying these failures. The continuous and remote monitoring was implemented using Internet of Things (IoT), Big Data, and Cloud technologies. The aforementioned guidelines were applied to the operation of a bottling line in a brewery context. Over a six-month period, the results demonstrated that the use of these sensors increased asset availability on the production line, contributing to the collection of data necessary for structuring the metrics of the predictive maintenance 4.0 system.

Keywords: predictive maintenance; industry 4.0; IoT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Resultado x Tipo de Manutenção	20
Figura 2 –	Curva da banheira	23
Figura 3 –	Curva PF	24
Figura 4 –	Hierarquia de indicadores	29
Figura 5 –	Amadurecimento da manutenção	36
Figura 6 –	Sistemas de gestão	37
Figura 7 –	Revoluções Industriais	38
Figura 8 –	Indústria 4.0	44
Figura 9 –	Monitoração Subjetiva	46
Figura 10 –	Acelerômetro	47
Figura 11 –	Análise por Termografia	49
Figura 12 –	Fluxograma da metodologia	51
Figura 13 –	Manutenção 4.0	55
Figura 14 –	Motor monitorado por sensor online	56
Figura 15 –	Gateway IoT	57
Figura 16 –	Tela do portal de monitoramento	58
Figura 17 –	Etapas do monitoramento	58
Figura 18 –	Dados brutos	59
Figura 19 –	Fluxograma da linha	61
Figura 20 –	Organograma da linha	63
Figura 21 –	Acompanhamento preditivo	65
Figura 22 –	Disponibilidade dos ativos	65
Figura 23 –	Eficiência de planejamento Mês X Mês	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Evolução da manutenção	15
Quadro 2 -	Sistema NPR	26
Quadro 3 -	Exemplo de FMEA	26
Quadro 4 -	Análise RCFA	27
Quadro 5 -	Indicadores de manutenção	31
Quadro 6 -	Classificação ABC	50
Quadro 7 -	Parâmetros de temperatura	52
Quadro 8 -	Classes de operação segundo NBR10082	53
Quadro 9 -	Equipamentos monitorados	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBM	Condition Based Monitoring
CPS	Cyber-Physical Systems
Curva PF	Curva de Potencial de falha
ERP	Enterprise Resource Planning
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
IoT	Internet Of Things
MES	Manufacturing Execution Systems
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
NPR	Número de Prioridade de Risco
PHM	Prognostics and Health Management
RCM	Reliability Centered Maintenance
RCFA	Root Cause Failure Analysis
TPM	Total Productive Maintenance
WCM	World Class Manufacturing

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**12**
1.1	Objetivos	13
2	**CONCEITO E EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO**	**13**
2.1	A Evolução da Manutenção	16
2.2	O conceito de manutenção	16
2.2.1	*Manutenção Corretiva*	*17*
2.2.2	*Manutenção Preventiva*	*18*
2.2.3	*Manutenção Preditiva*	*19*
2.2.4	*Engenharia de Manutenção*	21
3	**A ANATOMIA DA FALHA**	**22**
3.1	Taxa de falhas	24
3.2	Sistema de tratamento de Falhas	25
3.2.1	*Análise FMEA*	*27*
3.2.2	*Análise RCFA*	*29*
4	**MÉTRICAS DE MANUTENÇÃO**	**33**
4.1	Confiabilidade	33
4.2	Disponibilidade	34
4.3	Manutenibilidade	34
4.4	Sistemas de gestão	35
5	**INDÚSTRIA 4.0**	**37**
5.1	Conceito	37
5.1.1	*IoT*	*38*
5.1.2	*Sistemas Ciber Físicos (CPS)*	*39*
5.1.3	*Big Data*	*39*
5.1.4	*Computação em Nuvem*	*40*
5.1.5	*Inteligência Artificial*	*41*
5.2	A indústria 4.0 e sua relação com a manutenção	41
5.2.1	*Manutenção preditiva na indústria 4.0*	*42*
5.2.2	*Técnicas de monitoramento preditivo*	*43*
5.2.2.1	**Análise de Vibração**	**45**
5.2.2.2	**Análise por Termografia**	**46**

6	**METODOLOGIA**	**48**
6.1	Etapa 1: Levantamento dos ativos críticos	49
6.2	Etapa 2: Descrição do sistema de monitoramento	50
6.3	Etapa 3: Cadastro dos parâmetros	52
6.4	Etapa 4: Monitoramento	54
6.5	Etapa 5: Tratamento dos dados	58
7	**CONTEXTUALIZAÇÃO**	**60**
7.1	Descrição da linha de envase	60
7.2	Descrição do setor de manutenção	61
8	**RESULTADOS E DISCUSSÕES**	**64**
9	**CONCLUSÃO**	**67**
	REFERÊNCIAS	**69**

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da globalização, ocorreu um aumento na demanda de produtos, e a busca por um sistema de melhor desempenho a custos competitivos. Junto a isto, surgiu a necessidade de redução na probabilidade de falhas e aumento na confiabilidade dos ativos (Fogliatto; Ribeiro, 2011). Desta forma, a manutenção tem uma função estratégica, onde não basta apenas reparar o equipamento para ser eficiente, mas sim, manter a função do equipamento disponível para operação e reduzir a probabilidade da falha (Kardec; Nascif, 2009).

Junto a este pensamento, as indústrias estão utilizando cada vez mais conceitos da indústria 4.0 em suas rotinas de manutenção. Onde a integração de tecnologias da informação, permitem alcançar novos patamares de produtividade, flexibilidade e qualidade de gerenciamento (Sacomano, 2018). Técnicas presentes na indústria 4.0 como rastreabilidade, IoT, *Big Data* e Nuvem ajudam na previsão e tratamento das falhas (Almeida; Fabro, 2019). Neste contexto, a manutenção baseada em condição, também chamada de manutenção preditiva, é um meio fundamental, onde o monitoramento online e off-line possibilita um novo enfoque a manutenção, permitindo que as atividades de manutenção sejam realizadas somente na real necessidade, evitando-se intervenções desnecessárias (Costa Neto; Campos, 2021).

Tendo em vista esse fato, este trabalho apresenta um estudo de caso da implementação de sensores de monitoramento remoto e contínuo em uma linha de alta performance de uma fábrica de bebidas, que busca se adequar as demandas da indústria 4.0 e aumentar a disponibilidade de seus ativos.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho será o de otimizar a manutenção preventiva e preditiva de uma linha de envase de bebidas com o auxílio de técnicas presentes na indústria 4.0.

Como objetivos específicos podem-se citar:

- Avaliação da indústria 4.0 nas estratégias de manutenção;
- Coleta de dados a partir da utilização de sensores remotos;
- Tratamento dos dados gerados para tomadas de decisão nos processos de manutenção.

2 CONCEITO E EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO

2.1 A Evolução da Manutenção

Durante os últimos anos, a atividade de manutenção tem passado por frequentes mudanças, isto tudo se dá devido ao aumento da complexidade de projetos, surgimento de novas técnicas de manutenção, novos enfoques organizacionais e a visão da manutenção como uma função estratégica para melhoria dos negócios e aumento da competitividade (Kardec; Nascif, 2009).

Para Kardec e Nascif (2009), podemos dividir a manutenção em quatro gerações. A primeira geração abrange todo o período que veio antes da Segunda Guerra. Neste tempo, a indústria era pouco mecanizada, os equipamentos eram simples e em grande parte superdimensionados. Nesta época, a produção não era uma questão de prioridade e não existia manutenção realizada de forma sistemática. As atividades de manutenção resumiam-se a serviços de limpeza, lubrificação e reparos pós quebra, e priorizava-se que o executante tivesse habilidades para executar estes tipos de reparo. Nesta geração, a manutenção consistia em apenas atividades corretivas não planejadas (Kardec; Nascif, 2009).

Por sua vez, a segunda geração ocorre entre os anos 50 e 70, logo após a Segunda Guerra. Neste período, ocorreu um aumento significativo da demanda por todo tipo de produto, acarretando um aumento da mecanização e complexidade das instalações industriais. Foi evidenciado a necessidade de maior disponibilidade e confiabilidade para otimizar a produção, tornando assim o conceito de manutenção preventiva como forma predominante de estratégia de manutenção, consistindo em manutenção a intervalos fixos, que iriam prevenir a falha nos ativos (Kardec; Nascif, 2009).

A terceira geração tem início a partir da década de 70. Ela é evidenciada pela utilização de metodologias de manutenção preditiva, ou seja, de monitoramento contínuo do ativo, que garantem uma maior confiabilidade para os equipamentos da organização. Tal estratégia é necessária devido à evolução das indústrias aliadas à complexidade de seus processos. Onde a ocorrência de uma parada de produção, implica em um grande impacto, tanto em custos quanto em qualidade do produto entregue. Conforme as organizações evoluíram para maior complexidade, as falhas também seguiram essa tendência, tornando-se mais intrincadas de serem

identificadas e podendo acarretar consequências significativas em termos de segurança e meio ambiente (Kardec; Nascif, 2009).

A quarta geração, tem início após os anos 2000, ela tem como principal foco a disponibilidade como medida de performance da manutenção, aliada a confiabilidade dos equipamentos como fator de busca pela manutenção. Nesta geração, a Engenharia de Manutenção torna-se a estratégia de manutenção chave para garantir a disponibilidade, manutenibilidade e confiabilidade. Esta estratégia tem por objetivo intervir o mínimo possível na planta, e são priorizadas técnicas de manutenção preditiva e monitoramento de condição dos equipamentos. Ocorre assim, uma tendência de redução na utilização de técnicas de manutenção preventiva assim como as de manutenção corretiva não planejada, sendo esta última um indicador de ineficácia da manutenção (Kardec; Nascif, 2009).

Quadro 1- Evolução da manutenção

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO				
Ano	Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração
	1940 1950	1960 1970	1980 1990	2000 2010
Aumento das expectativas em relação à manutenção	• Conserto após a falha	• Disponibilidade crescente • Maior vida útil do equipamento	• Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Melhor relação custo benefício • Preservação do meio ambiente	• Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Preservação do meio ambiente • Segurança • Influir nos resultados • Gerenciar os ativos
Visão quando à falha do equipamento	• Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham	• Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira	• Existência de padrões de falhas	• Reduzir drasticamente falhas prematuras
Mudança nas técnicas de manutenção	• Habilidades voltadas para o reparo	• Planejamento manual de manutenção • Computadores grandes e lentos • Manutenção preventiva (por tempo)	• Monitoramento da condição • Manutenção preditiva • Análise de risco • Computadores pequenos e rápidos • Software potentes • Grupos de trabalho multidisciplinares • Projetos voltados para a confiabilidade • Contratação por mão de obra e serviços	• Aumento da manutenção preditiva e monitoramento de condição • Minimização nas manutenções preventiva e corretiva não planejada • Análise de falhas • Técnicas de confiabilidade • Manutenibilidade • Engenharia de manutenção • Projetos voltados para confiabilidade manutenibilidade e custo do clico de vida • Contratação por resultados

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009)

2.2 O conceito de manutenção

A manutenção pode ser definida como a combinação de ações técnicas e administrativas, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado que possa desempenhar uma função requerida (Associação Brasileira de Normas Técnicas,1994). Segundo Moubray (2005) a manutenção assegura que os ativos físicos continuem a fazer o que seus usuários querem que ele faça.

Em um sentido mais amplo, podemos definir que o objetivo da manutenção não é somente o de manter e restaurar as condições físicas do equipamento, mas também de manter suas capacidades funcionais (Kardec; Nascif, 2009).

As atividades de manutenção, além de retomar o equipamento às suas condições originais, também devem envolver a modificação dessas condições em prol da introdução de melhorias, para evitar ou diminuir a recorrência de falhas, reduzir custos e aumentar a produtividade (Xenos, 1998).

Vários autores abordam diversos tipos de manutenção, contudo, podemos definir as mais relevantes como sendo:

- Manutenção Corretiva
- Manutenção Preventiva
- Manutenção Preditiva
- Engenharia de Manutenção

2.2.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é a intervenção necessária, logo após a falha, para evitar maiores danos aos instrumentos de produção, segurança do trabalhador ou ambiental. Ela possui caráter aleatório (Viana, 2002).

A manutenção corretiva é mais barata do que prevenir uma falha, contudo, pode causar grande prejuízo relacionado a perdas de interrupção da produção. (XENOS, 1998). Desta forma, quando atuamos em um equipamento que apresenta um defeito ou desempenho diferente daquele esperado, estamos fazendo a manutenção corretiva (Kardec; Nascif, 2009).

Podemos classificar a manutenção corretiva em dois tipos:

- Manutenção corretiva planejada
- Manutenção corretiva não planejada

A manutenção corretiva planejada é advinda de uma tomada de decisão gerencial, neste tipo de manutenção o equipamento trabalha até a sua quebra. Está estratégia de manutenção deve ser embasada em planejamento para quando a falha ocorrer, repor o componente o mais rapidamente possível, dispondo de algum subconjunto reserva ou kits de reparo rápido (Kardec; Nascif, 2009).

Por sua vez, a manutenção corretiva não planejada é caracterizada pela atuação do time de manutenção quando em um evento já ocorrido, seja a falha propriamente dita ou um desempenho do equipamento, menor que o esperado. Este tipo de manutenção, implica altos custos, pois a quebra inesperada acarreta perdas de produtividade e qualidade, além de elevar os custos indiretos de manutenção (Kardec; Nascif, 2009).

Quando a empresa, tem a maior parte de sua manutenção neste tipo de classificação, isso indica uma falha estratégica, e que o departamento de manutenção é comandado pelos equipamentos, e não está adequado às necessidades de competitividade atuais (Kardec, Nascif; 2009).

2.2.2 Manutenção Preventiva

De acordo com a NBR 5462 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994), a manutenção preventiva é aquela efetuada em intervalo predeterminado, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou degradação de funcionamento de um item. Já segundo Viana (2002) ela pode ser classificada como todo o serviço de manutenção realizado em máquinas que não estejam em falha, estando as mesmas em condições operacionais ou em estado de zero defeito.

A manutenção preventiva deve ser a atividade principal de manutenção em qualquer empresa. Ela envolve tarefas que são sistemáticas, tais como inspeções, reformas e trocas de peças. Esta forma de manutenção é mais cara que a corretiva, devido às peças terem que ser substituídas e os componentes reformados antes de atingirem seus limites de vida (Xenos,1998).

A manutenção preventiva será mais conveniente quanto maior for a facilidade na reposição, maiores forem os custos de falha, quanto mais as falhas prejudicarem a produção e quanto maiores forem as implicações das falhas na segurança pessoal e operacional (Kardec; Nascif, 2009).

As técnicas de manutenção preventiva são definidas a partir da análise dos técnicos de manutenção, e este embasamento reduz de forma drástica o fator improvisação. Isto acarreta um aumento no índice de qualidade do serviço se comparado com um ambiente alicerçado em apenas corretivas (Viana, 2002).

Contudo, como nem sempre os fabricantes fornecem dados precisos para aplicação nos planos de manutenção preventiva, como também as condições operacionais e ambientais influírem de modo significativo na expectativa de degradação dos equipamentos, a definição de periodicidade e substituição deve ser estipulada de forma distinta para cada planta ou instalações operando em condições similares (Kardec; Nascif, 2009).

Um dos aspectos negativos associados a essa estratégia de manutenção é a introdução de defeitos não existentes no equipamento devido a intervenções desnecessárias, falhas humanas e falhas nos próprios procedimentos de manutenção (Kardec; Nascif, 2009).

2.2.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva, tem como objetivo determinar o tempo correto da necessidade da necessidade de intervenção por parte do time de manutenção. Com isso, é possível evitar desmontagens para inspeções, e utilizar o componente até o máximo de sua vida útil (Viana, 2002). Segundo a NBR 5462 (Associação Brasileira de Normas Técnicas,1994), é a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a corretiva.

Esta estratégia de manutenção tem como objetivo prevenir falhas nos equipamentos através do acompanhamento de parâmetros diversos, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível. Sendo assim, a manutenção preditiva prioriza a disponibilidade à medida que não promove a intervenção nos equipamentos ou sistemas, pois as medições e verificações são efetuadas durante o funcionamento do equipamento (Kardec; Nascif, 2009).

Algumas vantagens desse tipo de estratégia são a redução de acidentes por falhas catastróficas em equipamentos, assim como a ocorrência de falhas não esperadas torna-se extremamente reduzida. Isto proporciona um aumento da

segurança tanto do pessoal quanto da instalação, redução de paradas inesperadas de produção e minimização dos prejuízos. Contudo, é necessário não apenas medir, mas também analisar os resultados e formular diagnósticos (Kardec; Nascif, 2009).

São diversas as técnicas utilizadas para esse tipo de estratégia, porém se sobressaem algumas, tais como as de ensaio por ultrassom, análise de vibrações, análise de lubrificantes e termografia (Viana, 2002).

2.2.4 Engenharia de Manutenção

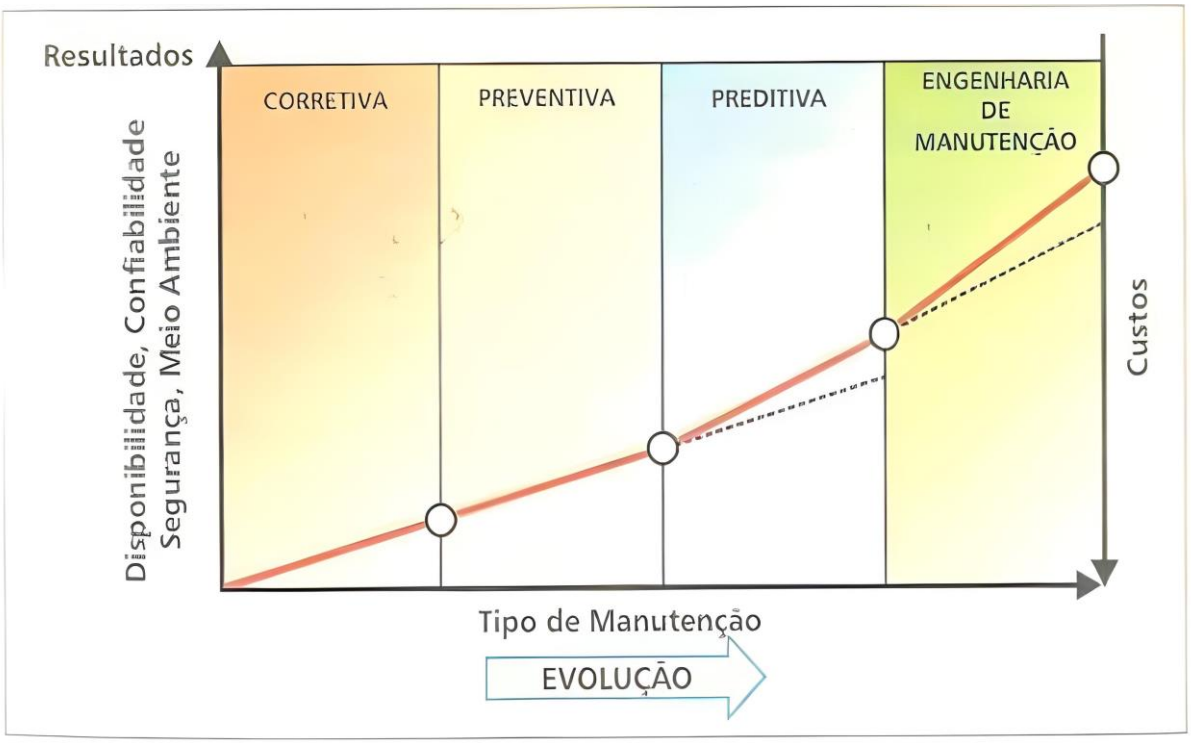
De acordo com Kardec e Nascif (2009), a engenharia de manutenção é uma quebra de paradigma. Tem como objetivo a consolidação da rotina e implementação de melhorias. Para isso, visa assegurar a disponibilidade contínua, a confiabilidade e o desempenho adequado dos ativos ao longo de seu ciclo de vida útil.

A fim de que uma organização incorpore de maneira eficaz os princípios da engenharia de manutenção, é imprescindível não somente adotar a vigilância preditiva para seus equipamentos, mas também estabelecer uma sólida base de dados e informações relacionadas à manutenção. Essa base, por sua vez, servirá como alicerce para conduzir análises e investigações que viabilizem a proposição de aprimoramentos a serem implementados no futuro (Kardec; Nascif, 2009).

Com a introdução de tecnologias digitais nos sistemas de produção, surgiu uma proliferação de conceitos para a manutenção, como e-maintenance, manutenção 4.0, engenharia de manutenção, manutenção inteligente, entre outros. (Costa Neto; Campos, 2021). Embora exista proliferação de conceitos, elas possuem um mesmo objetivo, que é o uso de ferramentas da indústria 4.0 como forma de auxílio e melhoria nos processos de manutenção.

Quando uma organização coleta os dados e está utilizando os mesmos para estudos e proposição de melhorias, que são parte de um sistema de acompanhamento preditivo, então estará praticando a engenharia de manutenção (Kardec; Nascif, 2009).

Figura 1 - Resultado x Tipo de Manutenção



Fonte: Kardec e Nascif (2009)

3 A ANATOMIA DA FALHA

A falha pode ser definida como o término da capacidade de um determinado item desempenhar a função requerida (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994). Ou seja, ela pode ser definida como a incapacidade de satisfazer a um padrão de desempenho previsto (Kardec; Nascif, 2009). Em complemento, esta definição engloba falhas parciais, onde o item ainda funciona, no entanto, o mesmo não consegue sustentar níveis aceitáveis de qualidade e precisão (Moubray, 2000).

A causa da falha, pode ser desde um, até vários fatores, tais quais: falha de projeto, falha de fabricação, falha de instalação, falha de manuseio, falhas na manutenção. Junto a cada tipo de falha, existirá sempre algum mecanismo. Seja ele físico, químico ou outro tipo de processo que leve até a ocorrência da falha (Márquez, 2007).

Dependendo das funções exigidas do equipamento, as condições intermediárias de funcionamento, podem ou não ser vistas como falha. De forma que, as falhas devem estar sempre associadas a parâmetros mensuráveis ou indicações claras, para que não haja ambiguidade (Xenos, 1998).

Por exemplo, se em determinada indústria é esperado que um equipamento produza 40.000 unidades de produto por hora, e o mesmo possua uma capacidade plena de produzir até 60.000 unidades, caso haja uma falha que diminua a eficiência original para 50.000 unidades, ainda assim, por mais que seja um defeito, ela não diminuiu a eficiência que já era esperada do equipamento para aquela empresa.

Segundo Xenos (1998), podemos categorizar as causas das falhas em três grandes categorias: falta de resistência, uso inadequado e manutenção inadequada. A primeira, diz respeito às características do próprio equipamento, que resulta em deficiências de projeto, erros na especificação de materiais, deficiências nos processos de fabricação e montagem.

O uso inadequado, é causado pela aplicação de esforços que estão fora da capacidade do equipamento, gerando erros durante sua operação. Por fim, quando falamos em manutenção inadequada, refere-se aos erros que ocorrem durante as atividades de manutenção preventiva. Tais erros podem ser o não cumprimento das ações preventivas necessárias ou que as mesmas estão sendo insuficientes para sanar os problemas (Xenos, 1998).

Existem diferentes tipos de consequências das falhas que podem ocorrer em uma empresa, sendo uma delas as falhas ocultas. Falhas ocultas podem expor a empresa a múltiplas falhas com consequências sérias, incluindo impactos catastróficos. Essas falhas podem ter implicações na segurança, resultando em ferimentos ou mortes, e também podem violar padrões ambientais. Além disso, as falhas podem afetar a produção, influenciando a quantidade, qualidade do produto, serviço ao cliente e custos operacionais. Por outro lado, as falhas evidentes, classificadas como não operacionais, envolvem apenas o custo direto do reparo, não afetando a segurança ou a produção (Moubray, 2000).

Para cada estado de falha, existem eventos que são mais prováveis de serem causadores da mesma; Tais eventos, são chamados de modos de falha. Eles incluem aqueles que ocorreram no mesmo equipamento ou em outro igual operando em condições similares, as falhas que estão sendo prevenidas por um regime de manutenção existente, e as falhas que não ocorreram ainda, mas que são uma possibilidade (Moubray, 2000).

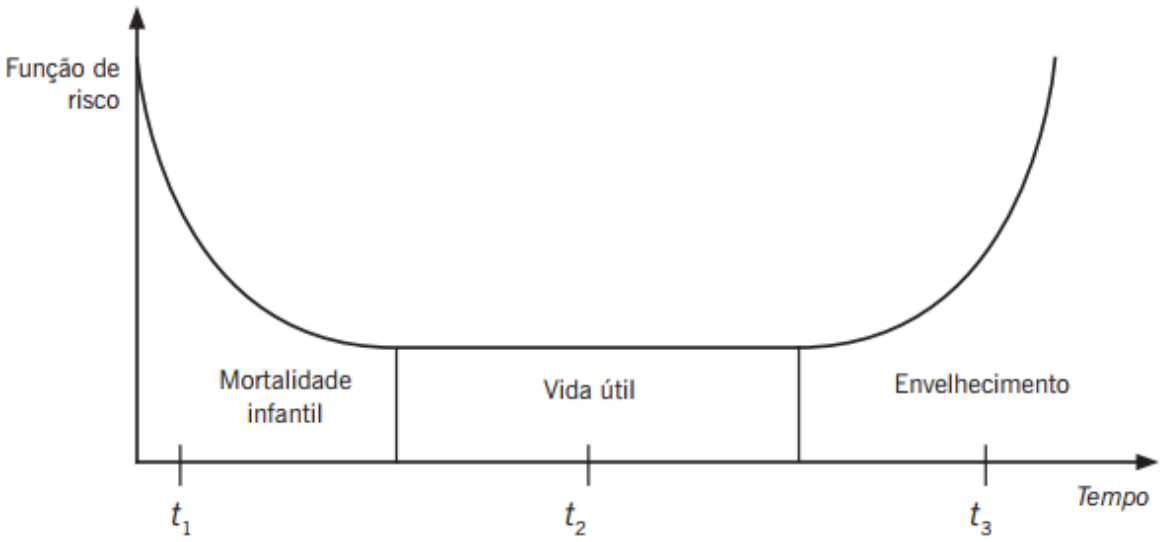
3.1 Taxa de falhas

O número de falhas por unidade de tempo é definido como taxa de falha. Segundo Moubray (2000). Podemos representar ela da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{\text{Número de Falhas}}{\text{Número de horas de operação}}.$$

A frequência de ocorrência de falhas para um equipamento pode ser definida de três maneiras distintas. A frequência pode ser constante, crescente ou decrescente. As de frequência constante, são caracterizadas por serem causadas por eventos aleatórios. Quando as falhas são crescentes, elas são advindas de esforços mecânicos, tais como fadiga e desgaste dos materiais. Por fim, as de frequência decrescente, são aquelas advindas de equipamentos que aumentaram a confiabilidade com o tempo, como no caso de terem passado por melhorias (Xenos,1998). A junção destes três modelos de falha dá origem ao modelo de falhas conhecido como curva da banheira, mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Curva da banheira



Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2009)

Segundo Xenos (1998) ela possui três períodos distintos:

- Mortalidade Infantil: Grande número de falhas nos componentes, oriundas de erros de projeto, fabricação ou instalação incorreta.
- Vida útil: A falha ocorre devido a fatores pouco controláveis, tais quais fadiga, corrosão e demais esforços mecânicos provenientes da interação do equipamento com o meio em que se encontra.
- Envelhecimento: Aumento da taxa de falhas, devido ao desgaste natural que será tanto maior quanto mais passar o tempo

Durante muito tempo, esta curva foi considerada como um padrão para o comportamento de equipamentos (Kardec; Nascif, 2009). Hoje em dia, estudos mais avançados contradizem esta crença. A menos que exista um modo de falha predominantemente relacionado à idade, limites de idade têm pouca influência no aumento da confiabilidade dos sistemas (Moubray, 2000).

A taxa de mortalidade infantil será tanto maior quanto pior for o trabalho desenvolvido nas fases que antecedem a entrada em operação do equipamento (Kardec; Nascif, 2009). Estas falhas podem ser evitadas o quão mais cedo for iniciado o treinamento dos operadores e técnicos de manutenção (Xenos,1998).

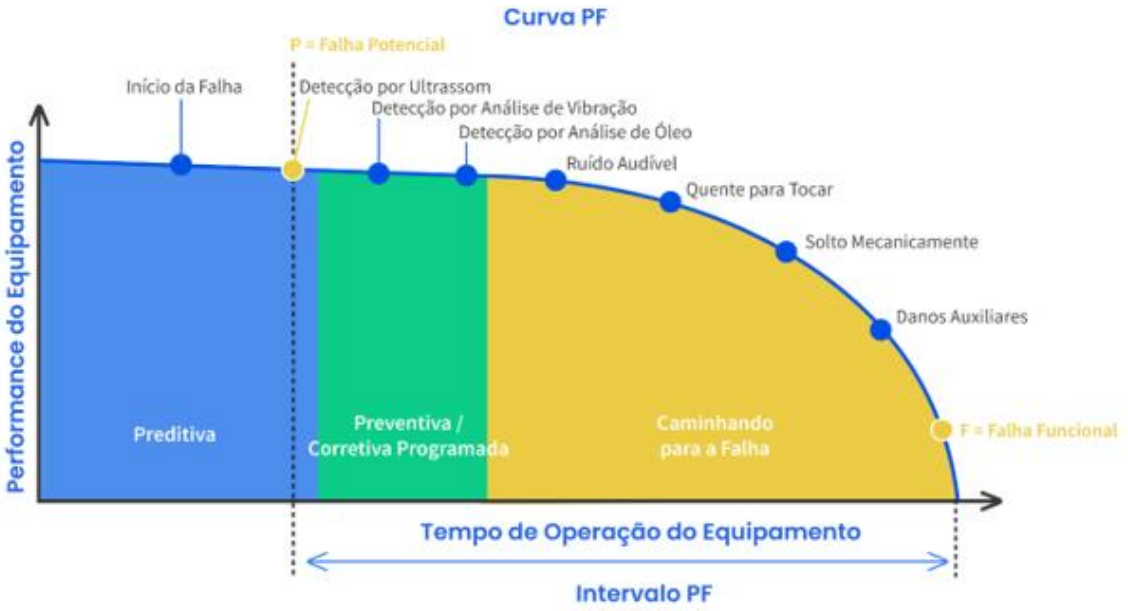
De fato, as tarefas de manutenção proativas, podem gerar um aumento nas taxas totais de falha, aumentando a mortalidade infantil em sistemas estáveis. Neste caso, é mais viável incorporarmos técnicas de manutenção por condição do

equipamento, evitando assim, a incidência precoce de mortalidade infantil nos sistemas (Moubray, 2000).

A curva P-F da Figura 3, exemplifica a vantagem do uso de algumas técnicas de manutenção, em que quando a falha se torna perceptível logo em seu início, implica em uma menor tendência de quebra do equipamento (Baldissarelli; Fabro, 2019).

Na curva é possível ver que estratégias que prezam pela detecção da falha, através de técnicas e análises se sobressaem em relação a aspectos subjetivos, como toques e ruídos.

Figura 3 - Curva PF



Fonte: Cyrino (2023)

3.2 Sistema de tratamento de Falhas

É necessário que as empresas desenvolvam um sistema para evitar a reincidência de falhas, que consiga identificar e bloquear as causas fundamentais, tornando possível a criação de contramedidas para evitar a recorrência das mesmas (Xenos, 1998).

Cabe a cada empresa elaborar um sistema de tratamento de falhas que mais se adeque ao seu contexto operacional. Por exemplo, podem utilizar sistemas já existentes, como a análise FMEA, RCFA e ferramentas como os do cinco Porquês, entre tantas outras. Desde que se consiga registrar e catalogar o tipo de falha.

3.2.1 Análise FMEA

FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) é um tipo de abordagem que permite identificar e priorizar falhas potenciais em equipamentos, sistemas e processos. Ele hierarquiza as falhas potenciais e fornece recomendações para ações preventivas (Kardec; Nascif, 2009).

Esta análise permite que a tomada de decisão seja feita de forma antecipada, identificando e priorizando ações que impeçam o surgimento destes modos de falha (Viana, 2002).

Essa ferramenta é amplamente utilizada em diversos setores da indústria, como engenharia, manufatura, saúde, automotivo, entre outros.

A análise FMEA é geralmente realizada em três etapas principais:

- Identificação de falhas: Nesta etapa, a equipe responsável pelo FMEA se reúne e lista todos os possíveis modos de falha que podem ocorrer no processo ou sistema sendo analisado. Uma falha é definida como qualquer desvio ou não conformidade em relação ao funcionamento esperado.
- Avaliação de efeitos: Para cada modo de falha identificado, a equipe analisa os possíveis efeitos que essa falha pode causar no produto ou processo. Os efeitos podem variar em gravidade, desde leves inconvenientes até consequências graves, como danos à segurança do usuário ou perdas financeiras.
- Priorização de ações: Com base nas análises de falhas e efeitos, a equipe atribui um índice de prioridade para cada modo de falha. Esse índice é calculado multiplicando três fatores: a severidade dos efeitos, a probabilidade de ocorrência da falha e a probabilidade de detecção precoce da falha antes que ela cause problemas.

Utiliza-se o sistema de número de prioridade de risco (NPR), onde adota-se uma escala de 1 a 10, onde 10 é a falha mais grave, da mesma forma essa escala é aplicada para a frequência e detectabilidade (Kardec; Nascif, 2009). Para determinar os pesos das parcelas, existem algumas recomendações que podemos ver descritas no Quadro 2.

Quadro 2 - Sistema NPR

Componente do NPR	Classificação	Peso
Frequência da ocorrência da falha F	Improvável	1
	Muito pequena	2 a 3
	Pequena	4 a 6
	Média	7 a 8
	Alta	9 a 10
Gravidade da Falha G	Apenas perceptível	1
	Pouca importância	2 a 3
	Moderadamente grave	4 a 6
	Grave	7 a 8
	Extremamente Grave	9 a 10
Detectabilidade D	Alta	1
	Moderada	2 a 5
	Pequena	6 a 8
	Muito pequena	9
	Improvável	10
ÍNDICE DE RISCO NPR	Baixo	1 a 50
	Médio	50 a 100
	Alto	100 a 200
	Muito alto	200 a 1.000

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009)

No Quadro 3, vemos um exemplo da aplicação deste método em equipamentos de uma linha de envase de cervejas:

Quadro 3 - Exemplo de FMEA

Equipamento	Modo de Falha	Efeitos	Gravidade	Probabilidade de Ocorrência	Probabilidade de Detecção	NPR	Ações Preventivas
Rotuladora	Ruptura da etiqueta	Erro no rótulo da cerveja, vazamentos	8	4	7	224	Verificar regularmente a condição das etiquetas e substituir aquelas que parecem danificadas.
Enchedora	Vazamento de líquido	Contaminação, desperdício, risco à saúde	10	3	5	150	Realizar inspeções visuais frequentes das válvulas de enchimento e substituir peças desgastadas.
Empacotadora	Desalinhamento do sistema	Empacotamento inadequado, má aparência	7	4	5	140	Implementar um sistema de alinhamento automático na empacotadora.

Fonte: o autor (2023)

Ao final do processo de análise FMEA, os modos de falha com os maiores índices de prioridade (NPR) são tratados com maior atenção e recursos. Isso significa

que a equipe se concentra em implementar ações preventivas ou corretivas para minimizar ou eliminar essas falhas de alto risco (Kardec; Nascif, 2009).

3.2.2 Análise RCFA

A análise RCFA (*Root Cause Failure Analysis*) trata-se de um método ordenado de buscar as causas de um problema e determinar ações apropriadas para evitar sua reincidência. (Kardec; Nascif, 2009). Nela é feito uma análise investigativa sobre os fatos em torno do problema, que são discutidos e analisados, para posteriormente buscar a melhor alternativa de solução (Oliveira; Lima, 2013).

Esta análise além de ser um método rigoroso de investigação, é relativamente fácil, quando comparado com outros métodos de investigação de falhas. A Análise RCFA, baseia-se em responder o porquê da falha, até que esse questionamento não faça sentido (Kardec, Nascif, 2009). O Quadro 4, mostra um exemplo de sua aplicação.

Quadro 4 - Análise RCFA

Perguntas	Respostas
Por que houve um parada no envase de cerveja long neck?	Houve uma interrupção no processo de envase.
Por que houve uma interrupção no processo de envase?	A empacotadora parou de funcionar subitamente.
Por que a empacotadora parou de funcionar subitamente?	Houve um curto-circuito no sistema elétrico da empacotadora.
Por que ocorreu um curto-circuito no sistema elétrico?	Um fio desgastado entrou em contato com uma superfície metálica.
Por que o fio estava desgastado?	O desgaste ocorreu devido ao movimento constante da máquina.
Por que o movimento constante causou desgaste no fio?	Falta de manutenção preventiva e inspeções regulares no sistema elétrico.
Por que a manutenção preventiva foi negligenciada?	Não havia um programa de manutenção preventiva estabelecido.
Por que não havia um programa de manutenção preventiva?	A falta de um plano de manutenção estava fora do escopo das responsabilidades da equipe de produção.
Por que estava fora do escopo da equipe de produção?	Devido a falta de comunicação e coordenação entre os departamentos de produção e manutenção.

Fonte: o autor (2023)

Os cinco porquês, consistem em uma técnica de resolução simples de problemas, que ajuda a chegar a análise da causa raiz de forma rápida (Soares; Brito, 2014). Embora tenha o nome de cinco porquês, o número não importa, desde que se consiga chegar a causa raiz após a repetição de vários “por quê”, sua vantagem é não ser uma técnica complexa (Fonseca; Miyake, 2006).

4 MÉTRICAS DE MANUTENÇÃO

Indicadores de desempenho tem como tarefa serem ferramentas que ajudam os líderes a direcionarem a organização em prol de seus objetivos. Essas métricas, permitem que a organização se concentre em itens prioritários e não desperdicem recursos em tarefas que não agregam valor (Wireman, 1998).

Segundo Wireman (1998), as empresas possuem diferentes padrões de estrutura organizacional com o objetivo de gerenciar a manutenção, porém, a maioria das empresas falhas, por não possuírem métricas adequadas e sistemas de controle para a manutenção.

Porém, não basta apenas recolher todos e quaisquer dados de uma organização. As métricas devem ser criadas de acordo com os objetivos e metas que a organização visa alcançar. Um indicador que não mede algo, que não esta atrelado a uma meta e que não vá de encontro com os objetivos da organização, não faz sentido (Gonçalves, 2020).

Segundo Wireman (1998), A hierarquia de indicadores de desempenho, representada na pirâmide da Figura 4, inicia com métricas corporativas que delineiam a direção estratégica da empresa, atendendo às expectativas de acionistas. É crucial que os indicadores subsequentes estejam alinhados, orientando cada nível organizacional para apoiar eficazmente essa direção. A ausência de integração entre essas métricas compromete a eficiência global da empresa, colocando-a em desvantagem competitiva diante de concorrentes mais focados.

Figura 4 - Hierarquia de indicadores

Fonte: o autor (2023)

Os indicadores de manutenção, tem como objetivo representar aspectos importantes dos processos fabris. Os mesmos não devem ser apenas utilizados para o acompanhamento das tarefas de manutenção, mas também no que permeia a rotina diária. Vale ressaltar que para algumas organizações um determinado indicador se aplica de forma satisfatória, enquanto para outras, pode não ser esse o caso, e tudo trata-se de uma questão de análise (Viana, 2002).

Segundo Wireman (1998), para desenvolver indicadores de manutenção temos que seguir a mesma ordem da sua pirâmide de hierarquia dos indicadores. O mesmo se aplica ao setor de manutenção, onde, no Quadro 5, podemos ver alguns indicadores e seus respectivos níveis hierárquicos

Quadro 5 - Indicadores de manutenção

Nível do indicador	Indicador	Definição
Corporativo	Custo total para produção	Este indicador compila todos os custos necessários para produzir um produto
	Custo total de ocupação	Este indicador compila todo os custos de se ocupar uma instalação. Basicamente os custos de funcionamento
	Retorno de ativos fixos	Compara o lucro obtido com o valor de ativos da empresa
Financeiro	Custo de manutenção por unidade produzida	Ele divide os custos de manutenção pelo volume de produção
	Valor do ativo mantido por funcionário da manutenção	Sendo o custo do ativo geralmente fixo, caso haja uma diminuição do valor do ativo, então este indicador deve mostrar qual área da manutenção causou isto
	Custos do contratado por custos totais de manutenção	Caso os custos permaneçam estáveis, logo o uso do contratado é válido. Caso suba ou decresça, então os indicadores de eficiência devem destacar o motivo
Eficiência	Horas de trabalho gastas com emergência pelo total de horas trabalhadas	É um indicador que mostra se a estratégia preventiva vem sendo eficaz
	Paradas totais devido a erros de manutenção pelo total de horas paradas	Indicador criado para avaliar o nível técnico dos colaboradores da manutenção, caso apresente um valor significativo, é necessário treinar e capacitar mais o time
	Custos totais de manutenção pelo total de custos antes de programa preditivo	A diminuição de custos de manutenção válida a eficácia de técnicas de monitoramento preditivo. Caso contrário,a companhia deve rever suas estratégias
Tático	Total de atividades de manutenção cumpridas pelo total de atividades de manutenção programada	Este indicador válida a eficácia das atividades de manutenção preventiva
	Total de horas de atividades preventivas feitas por operadores pelo total de horas de atividades preventivas	Este indicador tem por objetivo mostrar o envolvimento do time operacional com atividades de manutenção
Funcional	Custo estimado do plano de manutenção pelo custo real do plano de manutenção	Indicador para verificar se o custo das atividades preventivas na prática é o mesmo que o estimado
	Total de horas em atividades de manutenção preditivas pelo total de horas de atividades de manutenção	Indicador para verificar a eficácia do modelo de manutenção preditiva frente as outras estratégias de manutenção

Fonte: Adaptado de Wireman (1998)

Vale ressaltar que o Quadro 5 apenas fornece um vislumbre de alguns possíveis indicadores. Sendo cabível a cada organização, procurar definir métricas que melhor transpareçam aos objetivos da sua organização.

No que tange a estes indicadores, se tivermos a maior parte deles apontando para quebras, alto tempo gasto em atividades não planejadas e emergências, então estaremos no estágio reativo da manutenção, marcado principalmente por muitas corretivas. É papel da companhia, mudar este cenário, e implementar um cenário proativo de manutenção, com atividades preventivas e preditivas, junto com o estabelecimento de um sistema de gestão, seja ele o RCM, TPM ou WCM. Buscando otimizar sua infraestrutura e suas métricas, para que possam fornecer um maior amadurecimento de seu setor de manutenção.

Figura 5 - Amadurecimento da manutenção

Fonte: o autor (2023)

Além destes, no cotidiano das rotinas de manutenção, os termos Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade são indicadores bastante comuns, que visam assegurar a missão da manutenção que é definida por Kardec e Nascif (2009, p. 23) como: “garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custo adequado”. Estas métricas serão mostradas a seguir.

4.1 Confiabilidade

A confiabilidade é definida como a capacidade de um item desempenhar a função que se espera do mesmo, sob condições especificadas ao longo de um intervalo de tempo predeterminado (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994).

Para Kardec e Nascif (2009), a confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições definidas de uso durante um intervalo de tempo estabelecido.

A confiabilidade é uma probabilidade estatística de não ocorrer a falha, de algum tipo durante um período especifico de operação, ou seja, no desempenho de sua função requerida sob ás condições operacionais ao qual o equipamento está submetido. A confiabilidade varia com o tempo e equipamentos idênticos, com diferentes condições operacionais, também terão diferentes níveis de confiabilidade (Kardec; Nascif, 2009).

Segundo Kardec e Nascif (2009), a confiabilidade pode ser definida como:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Onde:

R(t) = confiabilidade a qualquer tempo t

e = base dos logaritmos neperianos. (e = 2,718)

λ = taxa de falhas.

t = tempo previsto de operação.

Quanto maior o número de falhas, menor será a confiabilidade do item, e quão maior for a confiabilidade, melhor será para a companhia, pois terá menor custo de produção e maior satisfação do seu cliente interno e externo (Kardec; Nascif, 2009).

4.2 Disponibilidade

A disponibilidade pode ser definida como a capacidade de um item, desempenhar a sua função requerida em um determinado intervalo de tempo, mediante intervenções de manutenção. O conceito de disponibilidade pode variar de acordo com a capacidade de reparo de uma organização (Fogliatto; Ribeiro, 2011).

Para garantir a disponibilidade é necessário que os recursos externos estejam disponíveis, devendo-se levar em consideração aspectos combinados de confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção (Kardec; Nascif, 2009).

Para calcularmos a disponibilidade de determinado equipamento, precisamos antes de dois outros indicadores, que são o de tempo médio entre falhas e o de tempo médio de reparo. Onde, o tempo médio entre as falhas (TMEF ou MTBF) é a média aritmética entre o fim da falha e início de outra, considerando o tempo de funcionamento. Enquanto o tempo médio de reparo (TMPR ou MTTR) é a média aritmética do tempo de reparo de um sistema (Almeida; Fabro, 2019).

Sendo cada um representado da seguinte forma:

$$TMEF = \frac{TOPT}{nf}$$

$$TMPR = \frac{TTM}{nr}$$

$$DISP = \frac{TMEF}{TMEF + TMPR}$$

Onde:

TMEF = tempo médio entre as falhas

TOPT = tempo total operando

nf = número de falhas

TMPR = tempo médio de reparo

TTM = tempo total de manutenção

nr = número de reparos

DISP = Disponibilidade

4.3 Manutenibilidade

Manutenibilidade é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, quando é submetido à manutenção sob condições predeterminadas, utilizando para isso procedimentos e recursos padronizados. Este fator é essencial para garantir a disponibilidade dos ativos de uma unidade (Fogliatto; Ribeiro, 2011).

Segundo Kardec e Nascif (2009), ela pode ser conceituada como sendo a característica de um equipamento ou instalação permitir um maior ou menor grau de facilidade nos serviços de manutenção.

A Manutenibiliade atua diretamente em indicadores de eficiência operacional, pois engloba características de projeto, planejamento da manutenção, assertividade da estratégia de engenharia de manutenção e capacitação da mão de obra de execução. Vale ressaltar que a característica inicial do projeto tem impacto direto na manutenibilidade, e é recomendado a presença de especialistas da área de manutenção para que questões como essa sejam previstas desde o nascimento do projeto, pois assim, permite que o custo do ciclo de vida do ativo seja mais adequado às necessidades de instalação (Kardec; Nascif, 2009).

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

Onde:

M(t) = Função manutenibilidade, que representa a probabilidade de que o reparo comece no tempo t=0 e esteja concluída no tempo t

e = base dos logaritmos neperianos. (e = 2,718)

μ= taxa de reparos em relação ao número ao total de horas de reparo do equipamento

t= tempo previsto de reparo

4.4 Sistemas de gestão

Para gerenciar estes indicadores, é necessário que a companhia possua um sólido sistema de informação. Na manutenção, o armazenamento destes dados deve ser algo comum, e este sistema deve registrar todas as informações dos equipamentos e formar um histórico de manutenções (Gonçalves, 2020).

Para sanar esta necessidade, surgiram os sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*), que se trata de uma estrutura de software que facilita o fluxo de informações de todas as atividades de uma companhia, tais como compras, manutenção, recursos humanos, entre outros (Viana, 2002).

Sistemas deste tipo, aplicados na manutenção, permitem identificar claramente quais serviços serão feitos, quando serão feitos, e os recursos e custos atrelados a

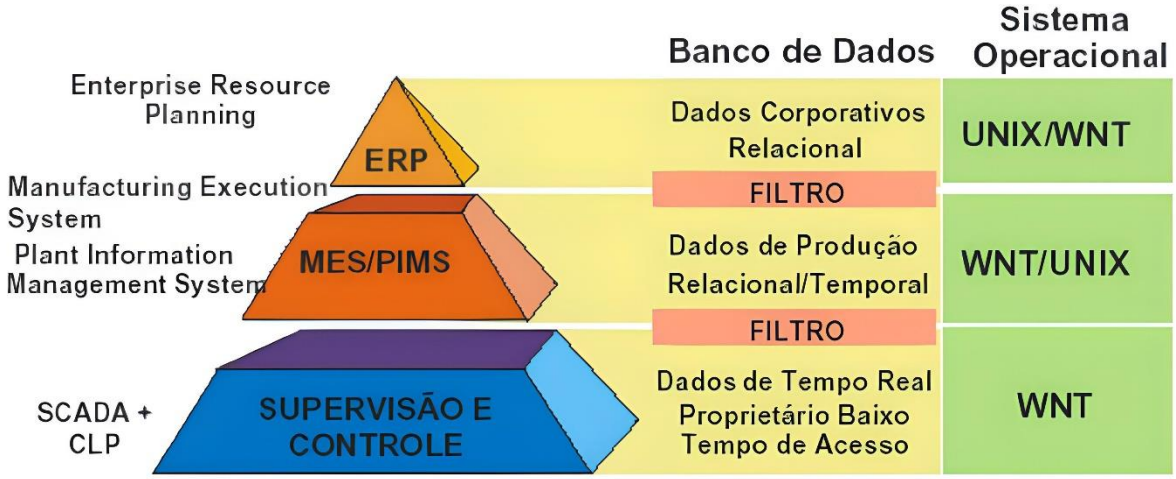
cada atividade. Permitindo que seja gerado um histórico de dados, que auxiliam na priorização das atividades a serem realizadas (Kardec; Nascif, 2009).

Segundo Borlido (2017), com o advento da Indústria 4.0, ocorreu a criação do sistema MES (*Manufacturing Execution System*), que diferente dos sistemas ERP que visam mais a planificação dos dados, o sistema do tipo MES permite uma real integração das informações. Este tipo de sistema permite:

- Ligar/Desligar máquinas
- Coordenação do inventário com a linha de produção
- Calendarização de intervenções de manutenção
- Integração do ERP com o chão de fabrica
- Monitoramento da produção (paradas, ritmo produtivo, retrabalho)
- Controle de indicadores de manutenção (MTBF, MTTR)
- Armazenamento de informações de produção
- Armazenamento e divulgação de dados de qualidade (não conformidades, instruções)

A tarefa principal do MES é organizar uma infinidade de informações e priorizá-las, otimizando as mesmas a partir do uso de algoritmos (Borlido, 2017). Na Figura 6, é possível ver um exemplo das diferenças entre o sistema ERP e o MES.

Figura 6 - Sistemas de gestão



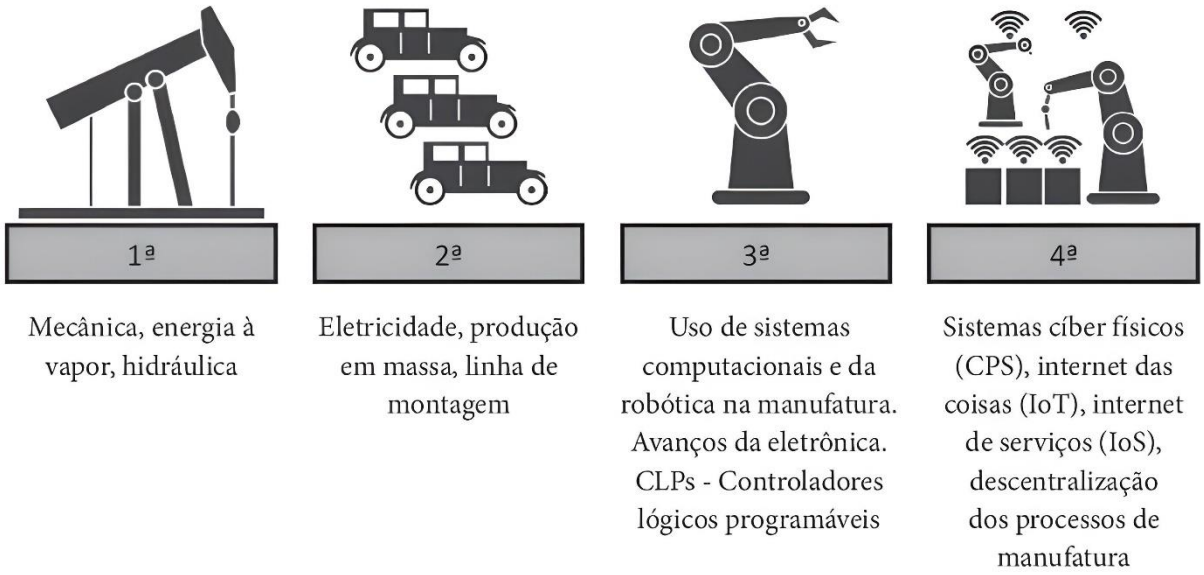
Fonte: Souza e Oliveira (2003)

5 INDÚSTRIA 4.0

5.1 Conceito

O termo indústria 4.0 foi criado em uma feira Industrial que ocorreu na cidade de Hanover, na Alemanha. Este termo foi adotado por outras nações industrializadas dentro da União Europeia, e posteriormente se popularizou para outros países. O nome indústria 4.0 refere-se à quarta revolução industrial, sendo que as três primeiras revoluções se deram com o advento da mecanização, eletricidade e TI (GILCHRIST, 2016). A Figura 7, exemplifica as revoluções.

Figura 7 - Revoluções Industriais



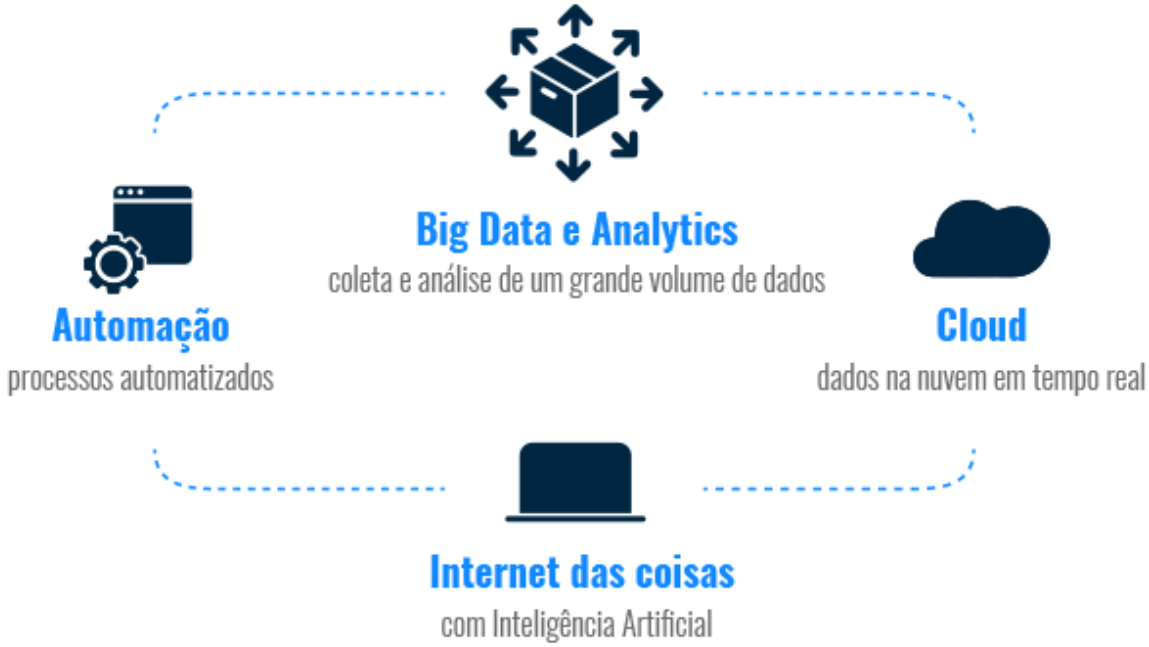
Fonte: Sacomano *et al*. (2018)

A indústria 4.0 é definida em termos gerais, como um sistema produtivo, integrado por computadores e dispositivos móveis que conectados à internet ou intranet, possibilitam a programação, gerenciamento, controle, cooperação e interação com o sistema produtivo de qualquer lugar do mundo, desde que haja acesso à rede. Almejando otimizar o sistema produtivo e toda rede de valor da organização (Sacomano, 2018).

A principal vantagem desse modelo de sistema é a capacidade de operação em tempo real que é oferecido a partir da obtenção, registro e tratamento de dados. Aliado a ganhos na segurança, redução de erros, minimização de custos e transparência nos negócios (Borlido, 2017).

Por ser um conceito ainda em formação, existem muitas classificações que podem fazer parte deste contexto. Contudo, segundo Coelho (2016) existem elementos formadores da Indústria 4.0 que são a base fundamental sobre o qual ela é alicerçada: Internet das coisas (Iot), sistemas ciber físicos, e a big data. Somam-se também as técnicas de computação em nuvem e de inteligência artificial com uso de machine learning para deixar essa definição mais robusta. Algumas dessas técnicas podem ser vistas na Figura 8.

Figura 8 - Indústria 4.0



Fonte: Compass (2018)

5.1.1 IoT

Uma das principais pontes que permitem essa integração entre sistemas físicos e digitais, é a internet das coisas (IoT). Define-se como a relação entre as coisas e as pessoas que se torna possível através do uso de plataformas digitais e tecnologias conectadas (Schwab; 2016).

A IoT oferece uma maneira de obter maior visibilidade e compreensão dos ativos da companhia através do uso de sensores em máquinas, softwares, computação em nuvem e armazenamento de dados. Ela proporciona um método de transformar os processos operacionais dos negócios a partir da análise avançada de grandes conjuntos de dados. Os benefícios são alcançados a partir de ganhos de

eficiência operacional e produtividade acelerada, resultando em redução do tempo de inoperância, eficiência otimizada e, portanto, lucros (Gilchrist, 2016).

Utilizando-se a IoT, os objetos, as coisas, conseguem comunicar-se entre si. Desta forma, um sensor pode identificar peças ao longo de uma linha de montagem e informar ao almoxarifado quantos componentes serão necessários na estação seguinte. Um sensor pode informar quantos veículos trafegam em determinado trecho da rodovia. Quando os objetos conectados possuem capacidade de processamento, definimos eles como “inteligentes” (Sacomano, 2018).

5.1.2 Sistemas Ciber Físicos (CPS)

Os Sistemas ciber físicos, ou abreviadamente CPS são sistemas mecatrônicos compostos por sensores e atuadores, controlados por softwares, que a partir do monitoramento de dados, supervisionam e controlam processos industriais mecânicos, químicos ou elétricos, no campo físico. Estes dados são recolhidos e comunicados em tempo real no ambiente virtual, que os representa em forma de interfaces gráficas amigáveis ao ser humano, como se formasse um gêmeo virtual do mundo físico (Sacomano, 2018).

Os CPS ao permitirem que o mundo digital virtual de computadores e softwares se fundam por meio da interação com o mundo físico analógico. Esse entrelaçamento resulta na emergência de um ecossistema que abrange a Internet das coisas, dados e serviços. Um exemplo prático dessa interação é evidenciado em linhas de produção inteligentes, onde as máquinas executam múltiplos processos de trabalho ao se comunicar com componentes e até mesmo os produtos em fabricação (Gilchrist, 2016).

5.1.3 Big Data

É chamado de *Big Data* a massa de dados geradas por todo o sistema, seja ele produtivo, comercial, marketing e outros, que precisa ser bem analisada, pois há riquezas de detalhes que podem aumentar o sucesso de qualquer negócio, quando bem utilizados (Sacomano, 2018).

A Big Data fornece análises históricas, preditivas e prescritivas que fornecem elementos sobre o que está de fato acontecendo dentro de uma máquina ou processo,

servindo como uma ferramenta impulsionadora e facilitadora para o IoT (Borlido, 2017).

O termo Big Data, refere-se a dados que são grandes demais para serem gerenciados pelos meios tradicionais, essas grandes estruturas de dados podem ser e geralmente são compostas por uma combinação de dados estruturados e não estruturados de uma variedade de fontes, como texto, formulários, blogs da web, comentários, vídeos, fotografias, telemetria, trilhas de GPS, bate-papos de mensagens instantâneas e assim por diante O problema com essas diversas estruturas de dados é que elas são muito difíceis de incorporar ou analisar numa base de dados estrutural tradicional. As empresas, no entanto, precisam analisar dados de todas as fontes para se beneficiarem do IoT (Gilchrist, 2016).

.

5.1.4 Computação em Nuvem

A Computação em Nuvem, permite que todos os sistemas computacionais de uma organização, possam ser compartilhados, proporcionando uma vastidão de recursos dinâmicos. Ela permite a implementação do conceito de virtualização, fazendo com que inúmeros computadores interligados, formam um poderoso supercomputador virtual (Taurion, 2009).

A computação em nuvem é primordial para que as informações e dados possam ser acessados, de forma simples, em qualquer lugar do mundo em que haja internet, para o controle multifocal do processo produtivo (Sacomano, 2018).

Possuir gigabytes de espaço gratuito, segurança dos dados armazenados e sincronização automática de ficheiros são as principais vantagens desse tipo de serviço. Ao invés de um armazenamento local, que implicaria em um alto número de armazenamento em discos, por exemplo, a informação fica guardada em servidores em que o acesso pode ser feito a qualquer momento a partir de um computador ou smartphone (Borlido, 2017).

O grande conjunto de dados advindos da big data, significa que o compartilhamento de dados não é apenas desejável, mas sim, imperativo, para que seja possível aproveitar todas as oportunidades geradas. No entanto, poucas fábricas teriam capacidade de armazenar e analisar os dados gerados. Felizmente, servidores de serviços em nuvem podem criar locais adequados e privados para armazenamento e processamento dos dados (Gilchrist, 2016).

5.1.5 Inteligência Artificial

É a área da ciência que estuda a criação de máquinas inteligentes, que agem de forma autônoma, possuindo habilidades de aprendizagem, planejamento e resolução de problemas. A inteligência artificial deve servir de base para a integração de forma harmônica de todos os sistemas da indústria inteligente (Sacomano *et al.,* 2018).

O conceito de Machine Learning é um termo que representa o conceito de aprendizagem de máquinas, ou seja, a habilidade de aprender sem ser necessariamente programada. Este processamento de aprendizado tem como objetivo gerar modelos preditivos a partir de dados históricos, criando modelos treinados através de algoritmos com quantidade massiva de dados. Alcançando resultados de alta eficiência (Souza *et al.,* 2022).

5.2 A indústria 4.0 e sua relação com a manutenção

As combinações de algumas técnicas presentes na indústria 4.0 auxiliam na previsão de falhas e no tratamento das mesmas. As técnicas que mais auxiliam a manutenção são: Rastreabilidade, IoT, *Big Data* e computação em nuvem (Almeida; Fabro, 2019).

Com o uso das ferramentas da indústria 4.0, a manutenção vem destravando os principais gargalos para o seu desenvolvimento, que é a necessidade de coleta e disponibilização de dados reais, além da acurácia dos mesmos no que tange a tomada de decisões, predição e atualização das informações (Faria; Quelhas, 2021).

No conceito de indústria 4.0, é encontrada a adoção da estratégia de monitoramento baseado na condição, conhecida como CBM (*Condition Base Monitoring*), que é uma estratégia de tomada de decisão a partir da observação do sistema dentro de uma indústria ou componente. Nesta abordagem as decisões são tomadas a partir do monitoramento das condições do sistema a partir do emprego de diversas técnicas. O monitoramento pode ser feito a partir de dados coletados do ciberespaço, combinado com modelos prognósticos, baseados nos conceitos de Prognóstico e gestão da Saúde (PHM) (Faria; Quelhas, 2021).

O conceito de PHM trata-se de uma estratégia de manutenção emergente que utiliza o monitoramento de condições de sistemas por meio de sensores IoT instalados

em máquinas para diagnosticar suas falhas ou estimar sua vida útil restante (Polverino *et al*., 2023).

Para Oliveira *et al.* (2020). Um sistema de monitoramento baseado em condição pode ser dividido em três etapas principais: Aquisição de dados, processamento de dados e tomada de decisão da manutenção.

A etapa de aquisição de dados é a utilização de sensores para monitorar valores e mudanças que possam revelar falhas nos equipamentos antes que elas se tornem trágicas. Escolhidos os sensores adequados para o monitoramento, é feita uma filtragem e identificação dos dados providos.

O processamento de dados é a etapa de análises dos dados, e comparado os mesmos com as características de funcionamento do equipamento, para que seja possível avaliar a saúde da máquina baseada em dados históricos.

Por fim, a última etapa é a de tomada de decisão, que em posse dos dados obtidos irá definir se a atividade de manutenção será ou não realizada.

5.2.1 Manutenção preditiva na indústria 4.0

Segundo Hashemian e Bean (2011), a manutenção preditiva na indústria 4.0, pode ser dividida em três tipos de técnicas: a de manutenção com sensores já existentes, a de manutenção baseada em sinais de teste e a de manutenção baseada em sensores online.

A primeira técnica consiste em informações extraídas de sensores já existentes em processos, como sensores de pressão, termopares, resistência, entre outros. Que medem dados como pressão, temperatura, vazão. Estes sensores, além de informar as variáveis que controlam em seus processos, também podem ser utilizados para verificar a resposta à calibração, como também identificar anomalias como vazamentos, trincas e obstruções que estão afetando o processo.

A segunda técnica consiste em medições ativas, como testes de resistência de isolamento, indutância, medições de capacitância e resistência, entre outros. Tais métodos são usados para detectar defeitos como trincas, corrosão e desgaste para a manutenção preditiva de cabos, motores, sensores e outros equipamentos.

Por fim, a terceira técnica é a utilização de monitoramento por sensores online. Tais quais acelerômetros para medir a vibração e sensores de ultrassom para detectar vazamentos. Esta é a categoria que iremos abordar mais a fundo.

Para otimizar o uso de sensores são utilizados gateway IoT, eles são equipamentos que atuam como uma ponte que conecta os sinais detectados pelos sensores ao domínio da rede. Geralmente estes gateways, utilizam um protocolo de comunicação de curta distância para adquirir informações dos sensores wireless, e utilizam redes 3G, satélites ou outras interfaces de rede para enviar os pacotes de informações através da internet (Chen*;* Jia; Li, 2011).

Tecnologias como IoT, nuvem e *big data* são os responsáveis pela coleta, transmissão e armazenamento de dados, porém, tecnologias de inteligência artificial como *machine learning, deep learning* possibilitam um melhor uso desses dados, com sistemas tendo autopercepção, autopredição e autoadaptação, permitindo que o foco das operações de manutenção e qualidade possam ser mais abrangentes (Faria; Quelhas, 2021).

5.2.2 Técnicas de monitoramento preditivo

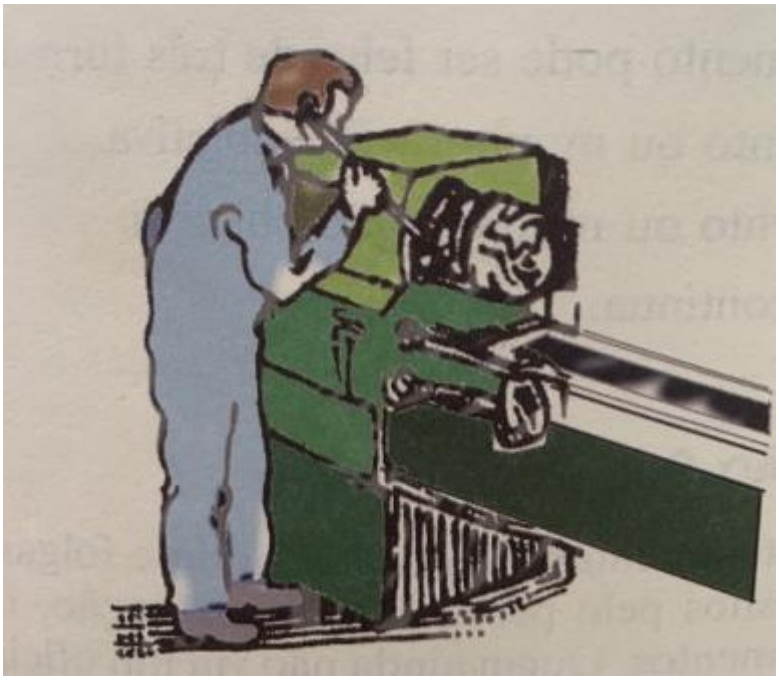
A manutenção preditiva é responsável por indicar a necessidade de intervenção com base no estado do equipamento. Este estado é avaliado a partir de medição, acompanhamento ou monitoramento de parâmetros (Kardec; Nascif, 2009).

Segundo Kardec e Nascif (2009), o acompanhamento pode ser realizado de três formas:

- Monitoração subjetiva
- Monitoração objetiva
- Monitoração contínua

A monitoração subjetiva é aquela que se utiliza dos sentidos dos mantenedores, como visão, audição, tato e olfato, conforme é mostrado na Figura 9. Esses monitoramentos fazem parte da monitoração da condição do equipamento, e serão cada vez mais confiáveis quanto mais experientes forem os profissionais de manutenção. Entretanto, por ter um caráter extremamente subjetivo, não deve ser o único fator decisivo para uma intervenção de manutenção (Kardec; Nascif, 2009).

Figura 9 - Monitoração Subjetiva



Fonte: Kardec e Nascif (2009)

A monitoração objetiva ocorre quando o acompanhamento é feito com base em medições utilizando equipamentos ou instrumentos. É necessário que o time seja treinado e habilitado para o uso dessas ferramentas, que as mesmas estejam calibradas e que haja pessoas que possam interpretar os dados auferidos. Esse monitoramento é objetivo por fornecer valores para os parâmetros que devem ser acompanhados (Kardec; Nascif, 2009).

Por sua vez, a monitoração contínua também é um acompanhamento objetivo, como o próprio nome já cita, diferente do tipo objetivo que tem medições intermitentes, esta é contínua. Inicialmente foi empregada em ativos que o tempo entre falhas era muito curto ou em equipamentos críticos para os processos. É possível monitorar variáveis típicas de processos como densidade, vazão, pressão. Além disso, também permite monitorar variáveis relacionadas aos equipamentos como vibração, temperatura de mancais e motores, entre outros (Kardec; Nascif, 2009).

Ela independe de pessoas, pode transmitir dados em tempo real, consegue ser configurada de acordo com o cliente. Aumentando a chance de detecção de fenômenos que só são possíveis de serem percebidos devido ao monitoramento contínuo (Kardec; Nascif,2009).

5.2.2.1 Análise de Vibração

A análise de vibração é utilizada para determinar as condições operacionais e mecânicas do equipamento. A maior vantagem desse tipo de análise é que ela consegue detectar problemas incipientes antes que eles venham a resultar em uma falha e ocasionar uma parada não planejada. Este tipo de análise pode ser realizado a partir de um monitoramento contínuo ou em intervalos regulares (Scheffer; Girdhar, 2004).

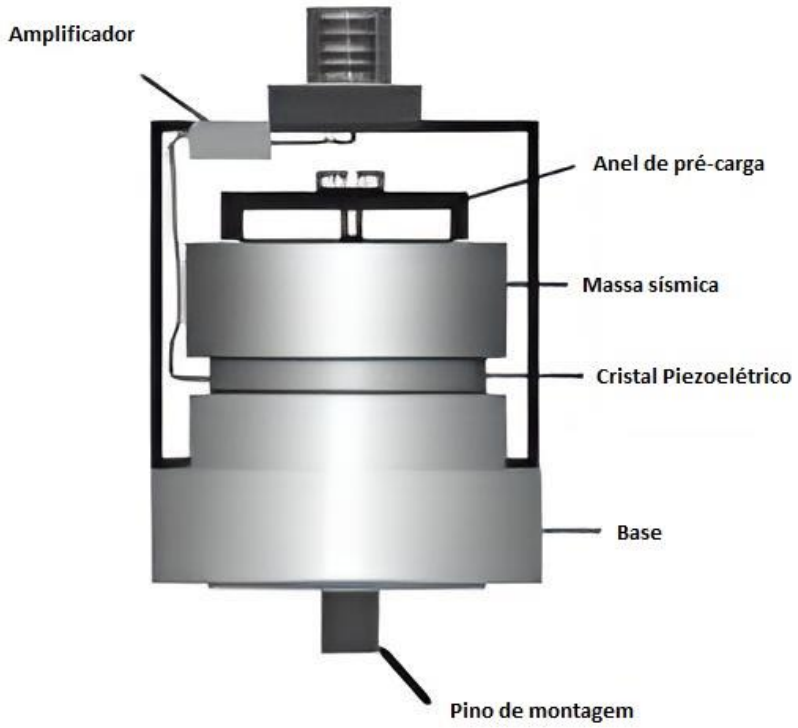
O acompanhamento por análise de vibração está entre um dos principais métodos de predição na indústria. A vibração está presente em qualquer sistema à medida que este responde a uma excitação (Kardec; Nascif,2009).

Um equipamento geralmente vibra em várias frequências e amplitudes correspondentes, porém, uma vibração severa tem como efeitos o desgaste e a fadiga, que levam a quebras do maquinário (Viana, 2020).

O processo de monitoramento consiste na capacidade de identificar e analisar os padrões de vibração. Os sinais captados correspondem a acelerações, velocidades ou deslocamentos e que ao serem processados e armazenados, permitem analisar as frequências dos ativos de interesse e o seu comportamento (Popescu; Aiordachioaie; Culea-Florescu, 2022).

A maioria das medições de vibração, atualmente é feita através da medição da aceleração, utilizando um sensor chamado de acelerômetro (Figura 10). Ele consiste em um sistema massa mola e o tipo mais comum e o piezoelétrico, que é constituído por um ou mais cristais piezoelétricos pré-tensionados por uma massa e montados em uma carcaça. Estes cristais produzem sinais elétricos quando são pressionados e quando o acelerômetro está em funcionamento, a vibração da máquina à qual o mesmo está fixado provoca uma excitação, onde a massa exerce uma força nos cristais que por sua vez geram pulsos elétricos proporcionais à aceleração (Kardec; Nascif, 2009).

Figura 10 - Acelerômetro



Fonte: Scheffer e Girdhar (2004)

5.2.2.2 Análise por Termografia

Um dos parâmetros de mais fácil compreensão é o acompanhamento da variação de temperatura dos ativos. Tal acompanhamento permite constatar alterações na condição dos equipamentos, componentes e do próprio processo. O acompanhamento da temperatura em equipamentos elétricos é uma forma de localizar e acompanhar defeitos incipientes (Kardec; Nascif, 2009).

A termografia é uma técnica que se utiliza de instrumentos sensíveis a radiação infravermelha (Figura 11) para que seja possível medir a variação da temperatura emitida em diferentes superfícies, sem que, necessariamente, haja a necessidade de contato (Toazza; Sellito, 2015).

Estas medições utilizam-se de sensores que detectam a variação na radiação eletromagnética naturalmente emitida pelos corpos em função de sua temperatura absoluta (Alves; Ferreira, 2019).

A termografia é uma técnica de grande utilidade presente em qualquer programa de manutenção preditiva, visto que permite a realização de medições sem contato físico, e permite a verificação de equipamentos em pleno funcionamento (Viana, 2020).

Figura 11 - Análise por Termografia

Fonte: Isar (2019)

6 METODOLOGIA

A pesquisa científica é caracterizada por critérios essenciais, incluindo abordagem, natureza, objetivos e procedimentos técnicos. Este estudo adota uma abordagem quantitativa, enfocando a análise de métricas estáticas e o uso de métodos estatísticos para obter conclusões (Matias-Pereira, 2016).

Quanto à natureza da pesquisa, ela é aplicada, pois visa gerar conhecimento para resolver problemas reais usando procedimentos científicos (Lakatos *et al.,* 2021).

A pesquisa possui objetivos descritivos, visto que busca descrever características de um fenômeno, através da análise, coleta e interpretação de dados com o estabelecimento de relações entre variáveis (Gil, 2010).

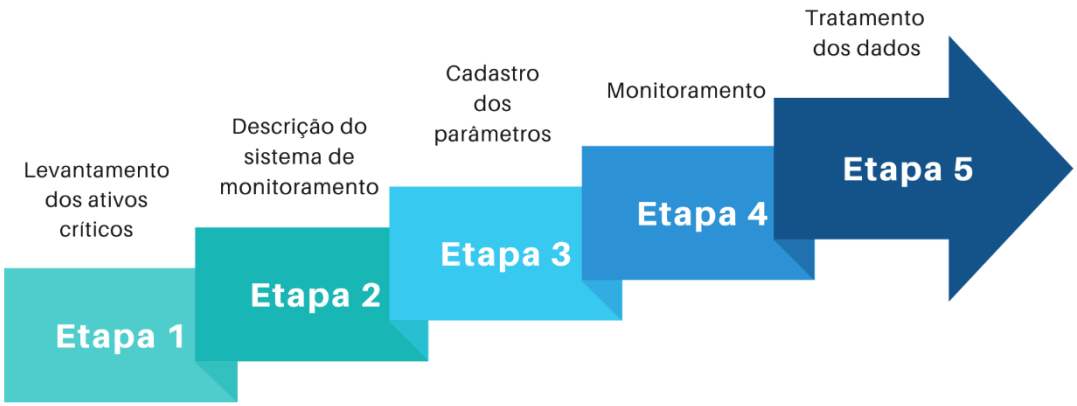
O procedimento adotado é o de estudo de caso, visto que consiste em um estudo aprofundado de um objeto específico, explorando uma situação real embasada em referencial teórico e dados obtidos na própria experiência descrita.

A população-alvo deste estudo é composta por indústrias do setor de bebidas que estão em fase de implementarem sistemas de monitoramento online de ativos.

A metodologia deste estudo, foi realizada em 5 etapas, como se pode ver na Figura 12. A primeira etapa consiste no levantamento dos ativos considerados críticos na linha de envase, na etapa seguinte, é feita a escolha do sistema de monitoramento e descrição de suas funcionalidades. Na etapa 3, são definidos parâmetros e faixas de monitoramento para estes ativos, a partir do uso de normas regulamentadoras. Na etapa 4, é demonstrado o uso da plataforma de monitoramento contínuo, por fim na etapa 5, os dados reunidos são compilados e tratados para refletir o ganho nos indicadores de gestão da manutenção.

Este método foi definido por meio interações entre o time de mantenedores da linha e os técnicos terceirizados da empresa responsável pela implementação dos sensores, de forma que fosse possível realizar estas atividades, sem que impactasse a produção da linha. O time de confiabilidade da fábrica também se fez presente, auxiliando a equipe da linha quando havia algum tipo de dúvida sobre cada etapa.

Figura 12 - Fluxograma da metodologia



Fonte: o autor (2023)

6.1 Etapa 1: Levantamento dos ativos críticos

A partir dos cenários apresentados nas fases anteriores, seu nível de criticidade e visando se adequar ao cenário atual da indústria 4.0, foi definido que um monitoramento contínuo e remoto, seria o mais eficaz para evitar a incidência de falhas inesperadas, e aumentar a disponibilidade dos sistemas produtivos.

Contudo, para que sua implementação fosse feita, primeiramente seria necessário fazer uma análise dos equipamentos e seus respectivos subconjuntos quanto ao nível de criticidade de cada um. Para isso, foi realizada uma análise de criticidade classificando os mesmos em uma escala ABC. Sendo os equipamentos A os mais críticos e com maior risco de perda, os equipamentos B os de criticidade intermediária e C os de criticidade baixa.

A classificação ABC, utiliza-se um algoritmo de decisão, onde é avaliado o impacto da indisponibilidade do ativo, com base em critérios que definem a classificação final em “A”, “B”, “C”. Cada critério, pode variar de acordo com a organização (Viana, 2020).

Um exemplo para a definição pode ser visto no Quadro 6.

Quadro 6 - Classificação ABC

Área	N°	Categoria	Critérios	índice de criticidade
Manufatura	1	Carga da Máquina	3 turnos de operação	4
			2 turnos de operação	2
			1 turno de operação	1
	2	Substituição da máquina	Impossível	4
			Possível	1
	3	Influência da parada de produção	Percebido no clliente (lojista)	4
			FMEA considerado crítico	4
			Percebido no cliente externo	2
			Percebido no cliente interno	1
Qualidade	4	Influência na qualidade final	Reclamações de clientes	3
			não conformidades internas	2
			não influência na qualidade final	1
Manutenção	5	Tempo de parada para reparo	> 8 horas	4
			entre 2 e 8 horas	2
			< 2 horas	1
	6	Tempo para reposição peças	> 48 horas	4
			entre 24 e 48 horas	2
			<24 horas	1
	7	Custos de manutenção anual	≥ R$: 30.000	4
			≥ R$10,000 <R$ 30.000	2
			≤ R$ 10.000	1
Meio Ambiente	8	Influência no meio ambiente	Impacto que atinge a vizinhança	5
			Impacto no local de trabalho	2
			Baixo impacto	1
Segurança	9	Influência na segurança	Alto risco de acidente	5
			Médio risco de acidente	4
			Baixo risco de acidente	2
			Nenhum risco de acidente	1

Fonte: o autor (2023)

Realizada esta primeira triagem, segue o momento de identificar qual o melhor sistema de monitoramento de sensores.

6.2 Etapa 2: Descrição do sistema de monitoramento

A Empresa X, responsável pelo monitoramento preditivo da empresa, também possui sensores de monitoramento IoT, que foram utilizados como formas de implementar o monitoramento contínuo.

Figura 13 - Manutenção 4.0

Fonte: Vitau Automation (2023)

A aquisição de dados se dá por meio de sensores que possuem medição triaxial nos eixos X, Y, Z por meio de um acelerômetro, possuindo horímetro, medição de temperatura, medição de vibração e proteção IP69K, que permite maior durabilidade no ambiente fabril. A forma de comunicação é por meio de conectividade por meio da tecnologia *Bluetooth Low Energy,* que minimiza o consumo de energia das baterias dos sensores.

O maior benefício deste tipo de monitoramento está nas máquinas rotativas, devido a evolução de técnicas de monitoramento preditivo, que permitem monitoramento da condição mecânica, onde alterações na vibração conseguem mostrar falhas como desbalanceamento e desalinhamento.

Os sensores instalados, coletam dados de vibração a cada hora, e de temperatura a cada 10 minutos. Estes dados são enviados até um *Gateway* IoT, que armazena e processa os dados de diferentes sensores para posteriormente enviar as informações, de cada, separadamente para o armazenamento em nuvem. O Gateway possui uma capacidade de recepção de dados de cerca de 20 sensores, que é um número mais que suficiente para os equipamentos críticos da linha.

Os dados que foram coletados e enviados até a Nuvem, alimentam um banco de dados em que a Empresa X, onde é possível monitorar a saúde dos ativos por meio

de *Dashboards.* Além disso, este sistema utiliza inteligência artificial, que consegue por meio da base de dados cadastradas observar alterações dos parâmetros de operação dos equipamentos e fornece relatórios de diagnóstico e prognóstico do sistema. Elencando os tipos de falhas encontradas e recomenda ações para sanar as mesmas.

Estes dados, auxiliam o time de manutenção na tomada de decisões, visando aumentar a disponibilidade dos ativos da linha ao prevenir possíveis falhas, que seriam ocultas devido a um monitoramento objetivo, que não é tão preciso quanto um contínuo.

6.3 Etapa 3: Cadastro dos parâmetros

Foram definidos parâmetros de operação para os equipamentos e definidos alarmes para o mesmo de acordo com recomendações do fabricante. Foram definidas faixas de operação nas seguintes condições: Normal, alerta e crítico.

Para o controle de temperatura, foi criada uma faixa de referência baseada no histórico de falhas dos equipamentos, além das recomendações do fabricante. Acima de 60ºC era faixa de alerta, e para valores acima de 75ºC era considerado faixa crítica.

Quadro 7 - Parâmetros de temperatura

Temperatura	Operação
T<60°C	Normal
60°C < T ≤ 75°C	Alerta
T> 75°C	Crítico

.

Fonte: o autor (2023)

Por sua vez, a análise de vibração foi realizada baseada no critério de velocidade eficaz de vibração RMS, que o potencial dano associado ao movimento vibratório. De acordo com a NBR 10082 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011) a faixa de severidade de vibração pode ser descrita de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Faixa de severidade de vibração

Intervalo de velocidade RMS (mm/s)	Faixa
0,071 a 0,112	0,11
0,112 a 0,18	0,18
0,18 a 0,28	0,28
0,28 a 0,45	0,45
0,45 a 0,71	0,71
0,71 a 1,12	1,12
1,12 a 1,8	1,8
1,8 a 2,8	2,8
2,8 a 4,5	4,5
4,5 a 7,1	7,1
7,1 a 11,2	11,2
11,2 a 18	18
18 a 28	28
28 a 45	45
45 a 71	71

Fonte: Adaptado da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011)

A NBR 10082 classifica os níveis de vibração em classes de operação que podem ser vistas no Quadro 8.

Quadro 8 - Classes de operação segundo NBR10082

Classe	Descrição
Classe I	Máquinas pequenas de potência até 15kW com acionamento por motor elétrico
Classe II	Máquinas médias com potência entre 15 e 75kW morotes montados rigidamente com potência de até 300kW
Classe III	Máquinas motrizes com potência maior que 75kW com massa rotativa montada em fundação rígida e pesada
Classe IV	Máquinas do tipo classe 3 montadas sob fundações relativamente flexíveis

Fonte: Adaptado da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011)

Que por fim, classifica as máquinas por nível de severidade, vide Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação por nível de severidade

Valor de Faixa	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0,28	A	A	A	A
0,45	A	A	A	A
0,71	A	A	A	A
1,12	B	A	A	A
1,8	B	B	A	A
2,8	C	B	B	A
4,5	C	C	B	B
7,1	D	C	C	B
11,2	D	D	C	C
18	D	D	D	C
28	D	D	D	D
45	D	D	D	D
71	D	D	D	D

Fonte: Adaptado da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011)

Em que cada nível de vibração pode ser descrito como:

- Nível A: A máquina apresenta boas condições de operação, operando de forma excelente.
- Nível B: Máquina opera em condições aceitáveis para a produção
- Nível C: Máquina apresenta condições não aceitáveis de operação, sendo necessário intervenção
- Nível D: Máquina com péssimas condições de operação, sendo necessário atuar de forma corretiva.

6.4 Etapa 4: Monitoramento

O monitoramento na linha foi focado nos seguintes ativos descritos no Quadro 10:

Quadro 9 - Equipamentos monitorados

Equipamento	Subconjunto	Classificação
Enchedora	Motor da bomba de vácuo	A
	Motor da bomba de envio de produto	A
Empacotadora 1	Motor da mesa de transferência	A
Empacotadora 2	Motor elétrico do soprador	A
	Motor de elevação de filme	A
Rotuladora 1	Motor do redutor principal	A
Rotuladora 2	Motor do redutor principal	A
Pasteurizador	Motor elétrico da bomba	A
	Motor do redutor principal	A

Fonte: o autor (2023)

Estes equipamentos foram considerados críticos A, após a análise de criticidade ABC demonstrada no Quadro 6. Embora os demais equipamentos também sejam críticos para o processo de produção, estes que foram selecionados são críticos devido a sua complexidade de reparo, ou falta de subconjuntos e peças de reposição que possam ser colocados em operação o mais rápido possível.

Figura 14 - Motor monitorado por sensor online

Fonte: o autor (2023)

Os sensores foram instalados em equipamentos rotativos, no caso, os principais motores das máquinas, cuja falha ocasiona maiores custos produtivos.

Os sensores, ao coletarem os dados, comunicam-se por meio de Bluetooth com o *Gateway* IoT, que armazena esses dados,e os carrega para a nuvem. Em caso de falha de conectividade do Gateway com a internet, os dados ficam salvos e armazenados até que haja restabelecimento de conexão.

Figura 15 - Gateway IoT

Fonte: Souza *et al.* (2022)

As informações, por sua vez, são processadas e carregadas em um portal de visualização, que permite ao usuário acessar um *dashboard* da saúde dos ativos e extrair relatórios de monitoramento preditivo, como pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 -Tela do portal de monitoramento

Fonte: Rodrigues *et al.* (2023)

Os técnicos da linha de produção, cada um sendo dono de um grupo de equipamentos, eram responsáveis pela verificação da integridade e saúde dos mesmos, além de relatar anomalias ao supervisor de manutenção, que tomava a decisão de quando atuar preventivamente.

O status da saúde dos equipamentos era supervisionado por meio da utilização de do *Dashboard Online* que a Empresa X fornecia ao time de manutenção. Além disso, o setor de confiabilidade agrupava todos os alertas gerados em uma plataforma de BI, onde possibilita ao técnico filtrar e ver as falhas que devem ser monitoradas.

As etapas de como ocorre o monitoramento dos ativos, pode ser resumido pelas etapas descritas na Figura 17:

Figura 17 - Etapas do monitoramento

Fonte: o autor (2023)

6.4 Etapa 5: Tratamento dos dados

Os dados foram coletados por meio da implantação de sensores inteligentes na linha selecionada. Esses sensores foram configurados para coletar informações relevantes sobre ativos críticos, como máquinas de envase e equipamentos de produção. Os dados foram registrados automaticamente em intervalos regulares e armazenados em um *Gateway IoT*, que posteriormente enviava os mesmos para um banco de dados seguro, armazenado na Nuvem.

Antes da análise, os dados brutos, na Figura 18 foram submetidos a um processo de limpeza para remover possíveis erros de registro, com o auxílio de um *software ERP* para manutenção, que possibilita que os mantenedores possam extrair os dados do sistema de monitoramento e correlacionar os mesmos com os dados de produção que ficam disponíveis em um sistema *MES*. Sendo possível, desta forma, apenas extrair os dados que foram gerados durante o processo produtivo em que os equipamentos operavam, descartando, por exemplo, falhas registradas em momentos

de linha parada, falhas de registro, alarmes falsos, erros devido ao esgotamento das baterias, entre outros.

Figura 18 - Dados brutos

Area	Sector	Machine	Component	Sensor #	Sample da	Battery le	BLE signal	Node	Temperat	Status
PACKAGING	05410-PACKAGING: (	PASTEURIZADOR	MOTOR ELÉTRICO [	35973	2023-09-2	100	64	6299	42.07 ºC /	Normal
PACKAGING	05410-PACKAGING: (	PASTEURIZADOR	MOTOR ELÉTRICO [	35973	2023-09-2	100	64	6299	42.07 ºC /	Normal
PACKAGING	05410-PACKAGING: (	PASTEURIZADOR	MOTOR ELÉTRICO [	35973	2023-09-2	100	64	6299	42.07 ºC /	Normal
PACKAGING	05410-PACKAGING: (	ROTULADORA 01	REDUTOR PRINCIP/	37527	2023-09-2	100	15	6384	40.7 ºC / 1	Normal
PACKAGING	05410-PACKAGING: (	ROTULADORA 01	REDUTOR PRINCIP/	37527	2023-09-2	100	15	6384	40.7 ºC / 1	Normal
PACKAGING	05410-PACKAGING: (	ENCHEDORA KRONES VKPV	MOTOR DA BOMBA	38806	2023-09-2	100	24	6367	51.02 ºC /	Normal
PACKAGING	05410-PACKAGING: (	ENCHEDORA KRONES VKPV	MOTOR DA BOMBA	38806	2023-09-2	100	24	6367	51.02 ºC /	Normal
PACKAGING	05410-PACKAGING: (	ENCHEDORA KRONES VKPV	MOTOR DA BOMBA	38806	2023-09-2	100	24	6367	51.02 ºC /	Normal

Fonte: o autor (2023)

Em seguida, correlacionasse os mesmos com os indicadores de desempenho da linha, como disponibilidade dos ativos, eficiência de planejamento, número de falhas, entre outros. Estes indicadores ficam a critério do supervisor de manutenção, que após analisá-los consegue verificar o resultado de suas de decisões.

7 CONTEXTUALIZAÇÃO

7.1 Descrição da linha de envase

Uma linha de envase de bebidas é a área responsável pelos ajustes finais de preparo do produto que será posteriormente posto no mercado. Após passar por esse setor, o produto é estocado, transportado e levado até o consumidor final.

A linha estudada, trata-se de uma linha de envasamento de garrafas do tipo *long neck*, que são embalagens não retornáveis de bebidas, que tem volume variando de 275ml até 350ml, dependendo do produto a ser envasado. O fluxograma da linha pode ser entendido a partir da Figura 19.

O fluxo funciona da seguinte forma: A entrada de garrafas na linha se dá a partir da despaletizadora, máquina esta que recebe as garrafas envelopadas e empilhadas em camadas. O trabalho da mesma, é retirar as garrafas camada a camada e abastecer a linha de produção.

Após a Despaletizadora, as garrafas são transportadas através de esteiras transportadoras até o Inspetor eletrônico, equipamento que checa a integridade da garrafa e se a mesma possui alguma contaminação ou falha, que possa vir a afetar o consumidor final.

Após isso, as garrafas vão até a enchedora, onde passam por um processo de limpeza com um jato de água de alta pressão, chamada de rinsagem, vão para a cúpula de enchimento, onde recebem o líquido, e por fim, passam pelo arrolhador, que tem como função vedar as garrafas com suas respectivas tampas.

Após passarem pela Enchedora, as garrafas são transportadas até o Pasteurizador, para passarem pelo processo de pasteurização, que garante maior longevidade para a bebida e também elimina microrganismos que seriam prejudiciais à bebida.

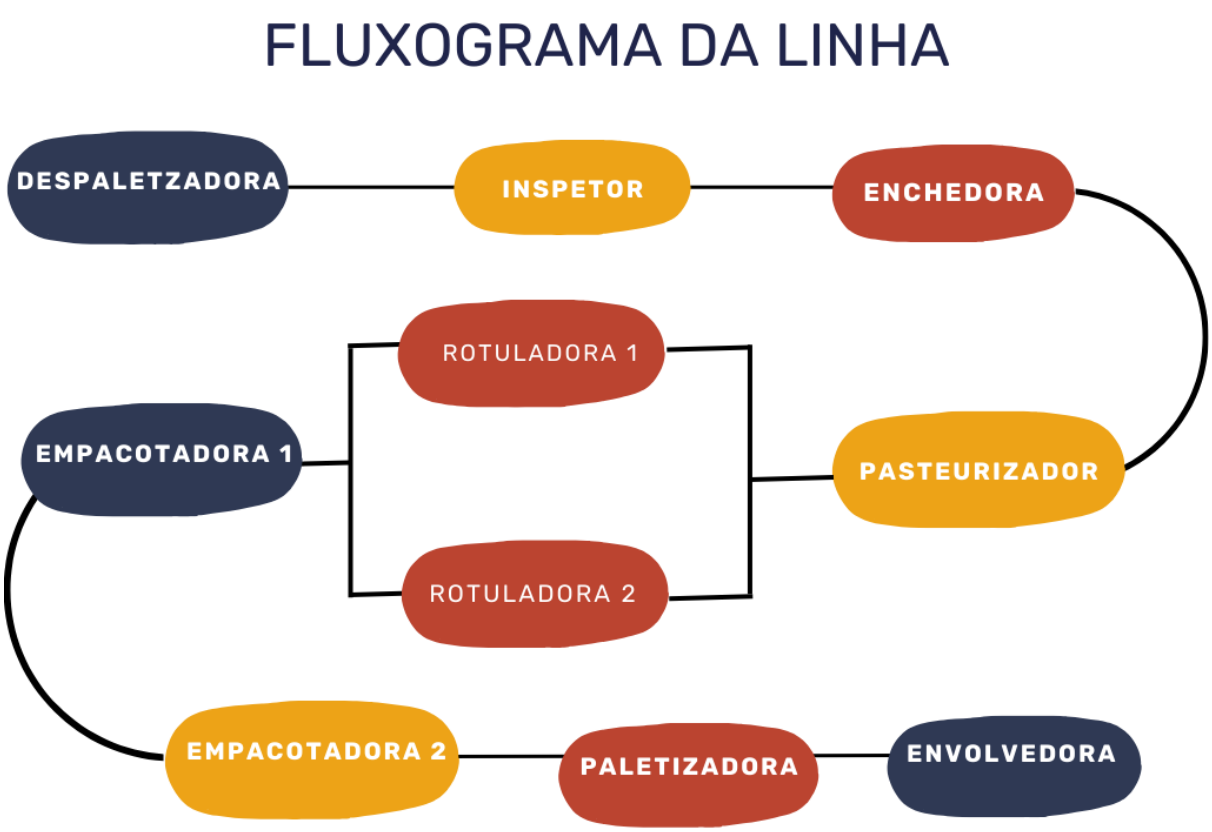
Após a pasteurização, as garrafas são transportadas para as rotuladoras, máquinas rotativas, responsáveis pela colocação dos rótulos das bebidas e também datação de informações de interesse, como validade do produto.

Em seguida, o produto é transportado para a empacotadora 1, onde é empacotado, por meio do uso de papéis cartão, em caixas contendo 6 unidades cada. Após isso, as caixas seguem para a empacotadora 2. Nesta etapa, as caixas formam um grupo de 4 unidades, que são cobertas por um filme plástico, e passam por um

rápido tratamento de temperatura no formo, para que o plástico se contraia e possa formar um pacote contendo 4 caixas de produtos.

Por fim, estes pacotes, são transportados até a paletizadora. Equipamento este que agrupa os pacotes e os distribui em camadas e os envia até a Envolvedora, onde um braço robótico fica responsável por envelopar o palete de bebidas para que o mesmo possa ser transportado até o armazém para depois ser distribuído para o consumidor final.

Figura 19 - Fluxograma da linha



Fonte: o autor (2023)

7.2 Descrição do setor de manutenção

O setor de manutenção da linha é liderado pelo supervisor de manutenção, que conta ainda com o apoio de um analista de planejamento para o auxiliar quanto à gestão e planejamento da manutenção. Além dele, o setor e composto por três técnicos de mecânica, três técnicos eletricistas e um técnico de automação, conforme pode ser visto na Figura 20.

O time de manutenção, atua junto com o time operacional, que é gerido pelo supervisor de produção, supervisor este que lidera os operadores e também os técnicos GPA (Grupo de Pronto Atendimento), focado em corretivas para rápido restabelecimento da linha. Ambos os times são coordenados pelo coordenador da linha de produção.

O setor de manutenção, por sua vez, embora seja autônomo, parte de sua estratégia é definida pelo setor de confiabilidade da companhia. O setor de confiabilidade, por sua vez, é a área de inteligência da manutenção que tem dentro da fábrica, coordenando as estratégias de manutenção num nível maior através da definição de métricas chaves de manutenção.

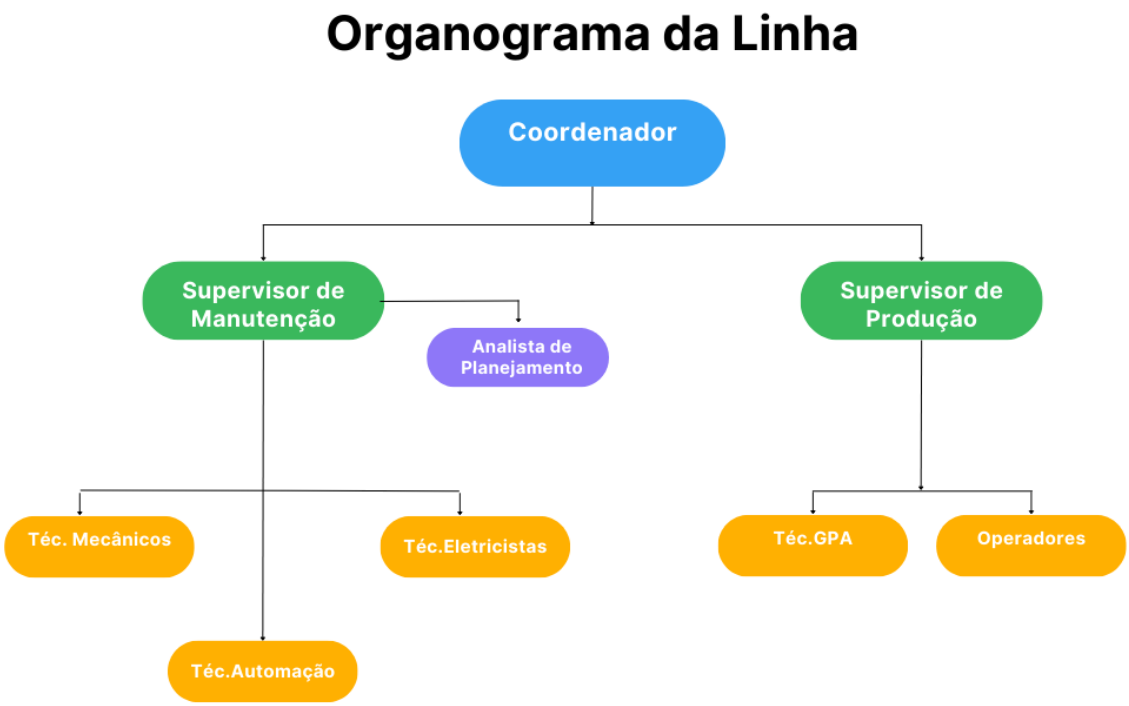
A estratégia de manutenção adotada pelo time de mantenedores na linha é a de manutenção preventiva, aliado a atividades de manutenção preditiva, feita por uma empresa terceirizada.

Todos os ativos possuem planos de manutenção aplicados e monitoramento do tipo objetivo, para definir o melhor intervalo para atuação das atividades preventivas.

As atividades de manutenção à priori, seguem os seus planos de manutenção, havendo a necessidade de algumas intervenções preventivas, com métricas como ciclos, ou acionamentos, enquanto outros planos são apenas para aferição de métricas objetivas de monitoramento.

A empresa X, terceirizada que atua no setor de monitoramento preditivo, auxilia o time de manutenção, ao realizar análise e coleta periódica de dados através de técnicas de monitoramento preditivo como vibração, termografia, ultrassom e análise de óleo.

Figura 20 - Organograma da linha



Fonte: o autor (2023)

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

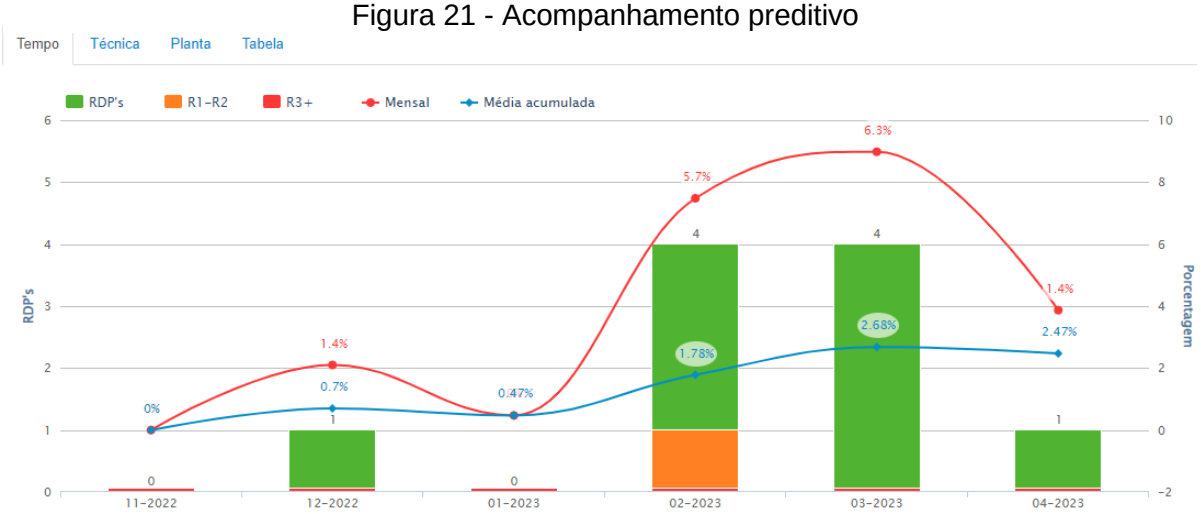
Os dados gerados pelos sensores ficam disponível em uma plataforma de monitoramento online, que permite visualizar os mesmos em tempo real. Além disto, este sistema também é integrado ao software ERP que a companhia utiliza para gestão da manutenção. Desta forma, é possível captar os dados, compará-los com métricas anteriores ao sistema de monitoramento online e planejar a atuação do time de manutenção. Ou seja, os sensores tornaram-se mais uma ferramenta que passa a integrar um ecossistema robusto de monitoramento da condição do ativo da companhia.

Os sensores, também estão sujeitos a falhas, como erros no sinal, falhas no sistema de alimentação (baterias) e dados falsos. Estes cenários, foram retirados deste estudo, deixando apenas os dados tratados e confiáveis de falhas efetivas.

Logo após a instalação dos sensores de monitoramento remoto, foi visto um salto no nível de detecção de falhas. Nos três meses anteriores, a taxa de falhas detectadas era de cerca de 2%, já nos 3 meses posteriores à implementação, houve um aumento na taxa de falhas detectadas, saltando para cerca de 6% de falhas, e com ao menos uma detecção a cada mês.

Tal feito é explicado pelo fato de anteriormente, o monitoramento ser objetivo, onde o técnico da Empresa X, era responsável por seguir um roteiro e captar dados de vibração e temperatura naquele momento. Ao trocarmos por um monitoramento contínuo, os sensores de captação de alta frequência, conseguem captar falhas que seriam ocultas, e prejudiciais ao fluxo de produção da linha.

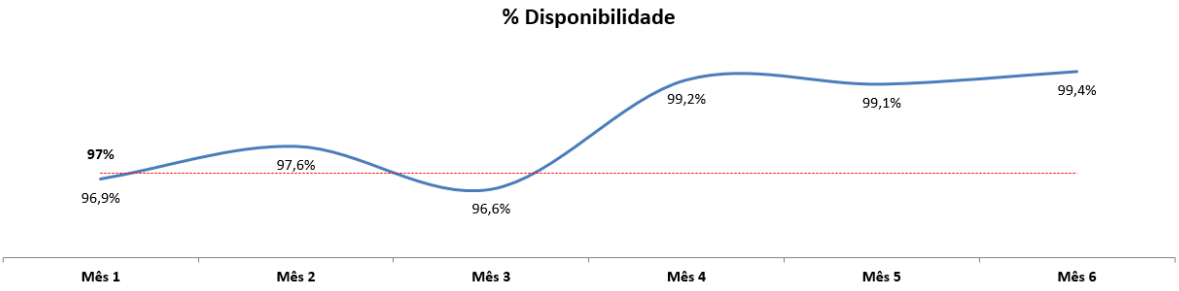
Figura 21 - Acompanhamento preditivo



Fonte: o autor (2023)

O aumento da captação de possíveis falhas, foi acompanhado pelo aumento da disponibilidade de operação das linhas nos meses seguintes. Nos três meses anteriores, a disponibilidade dos equipamentos da linha era de cerca de 97%, afetada principalmente por problemas de manutenção e operacionalidade. Após a implementação dos sensores de monitoramento online, junto com uma atividade mais proativa do time de preventiva, a disponibilidade conseguiu chegar a 99%, um aumento de cerca de 2% no contexto operacional.

Figura 22 - Disponibilidade dos ativos



Fonte: o autor (2023)

O incremento de 2% na disponibilidade dos ativos, implica que os mesmos, terão um incremento de tempo maior para desempenhar a sua função requerida. A linha do estudo, atua em três turnos de operação, de domingo a domingo, parando apenas para atividades de limpeza, assepsia, *setup* de produtos e manutenção. As atividades de manutenção, por sua vez, ocorrem a cada 15 dias.

Em média, a linha opera durante 23 horas, com a capacidade de envasar 60.000 garrafas por hora, isso se os equipamentos operassem com 100% de

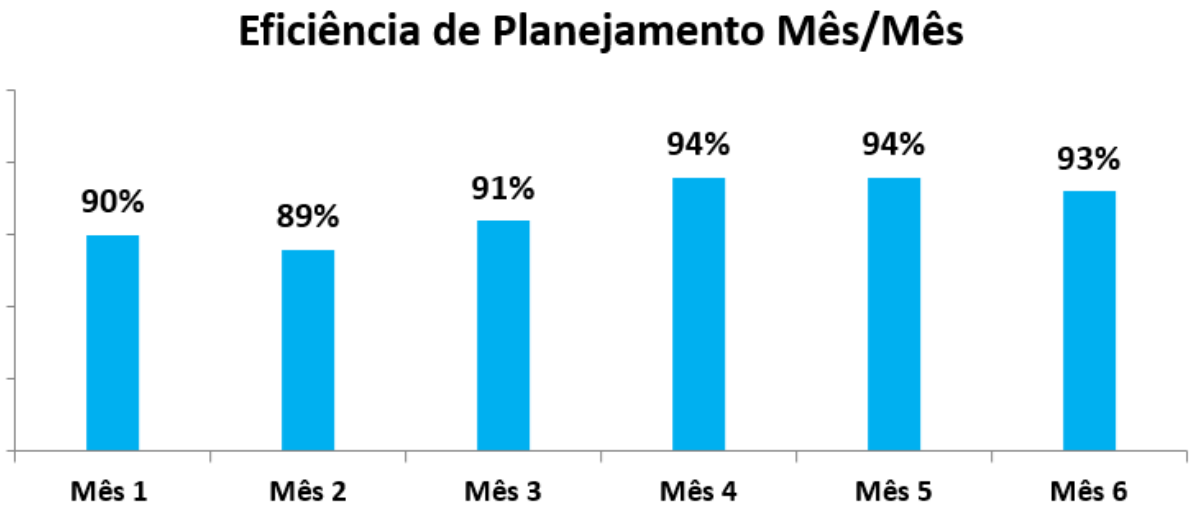
disponibilidade. No caso estudado, o aumento de 2%, ocasionou o ganho de mais 1.200 garrafas por hora, que seguindo a média de operação da linha, no fim do mês, teríamos um ganho de mais de 800.000 garrafas envasadas. Tornando-se um excelente impacto positivo para a produção e lucro da companhia.

O custo de compra dos sensores foi por meio de um contrato de 5 anos, podendo ser renovado, em caso de interesse das partes. O valor total deste contrato foi de R$ 228.800.

Caso correlacionemos os ganhos que tivemos em disponibilidade, com os custos de contratação, vemos que o investimento se paga. Por exemplo, se em um mês a companhia lucrar um valor ínfimo com a bebida, digamos que cerca de R$ 2,00 por garrafa, multiplicando esse valor por 800.000 garrafas, teremos um lucro de R$ 1.600,000 (Um milhão e 600 mil reais). Valor este mais do que o suficiente para manter as atividades dos próximos 5 anos.

Correlacionado ao aumento de Disponibilidade da linha, também vem o aumento da eficiência do planejamento do time de manutenção. Isso é devido a diminuição de intervenções corretivas nos equipamentos, graças ao monitoramento contínuo, permitindo aos técnicos atuarem aonde realmente são mais necessários.

Figura 23 - Eficiência de planejamento Mês X Mês



Fonte: o autor (2023)

9 CONCLUSÃO

O estudo deste trabalho iniciou-se como forma de verificar a utilização de tecnologias da indústria 4.0 para manutenção. Diante disto, a pesquisa teve como objetivo geral, otimizar a manutenção preventiva e preditiva de uma linha de envase de bebidas com o auxílio de técnicas presentes na indústria 4.0. Constata-se que o objetivo geral e os objetivos específicos foram atingidos, pois efetivamente o trabalho conseguiu demonstrar a partir de um estudo de caso, que o sensoriamento remoto e contínuo, otimiza a confiabilidade dos ativos graças a disponibilização de dados coletados em tempo real, o que permite a identificação da falha em seu estado incipiente e com reflexos no custo de manutenção.

Além disto, a utilização de sensores de monitoramento remoto e contínuo, os quais foram implementados em uma linha de envase de uma cervejaria, permitiu uma melhora na disponibilidade dos equipamentos, por meio de um tratamento precoce de falhas ocultas.

Os dados obtidos, foram coletados por meio dos sensores, e comparados com dados anteriores ao período de sua aplicação, por meio de um sistema de planejamento de recursos empresariais (ERP) existente na companhia. Estes dados foram armazenados utilizando os softwares *Microsoft Excel* e *Microsoft PowerBi*, onde foram filtrados e tratados, o que permitiu a identificação da falha no seu estado latente, possibilitando a estruturação de melhores indicadores de manutenção.

Ao fim do estudo, podemos concluir que dados de falhas precisos e confiáveis contribuem para estruturar um sistema de métricas proativas de manutenção.

As ferramentas aplicadas de monitoramento remoto e contínuo, podem ser replicadas por empresas que possuam processos automatizados e estejam em fase de transição para a indústria 4.0. Este trabalho também poderá servir de base para estudos mais aprofundados acerca deste tema visto a ampla gama de setores que podem se beneficiar desta estratégia.

O trabalho possui algumas limitações, pode-se citar o pequeno espaço amostral, em que apenas um setor de uma indústria de bebidas foi estudado. Além disto, o tempo de captação da amostra foi de um período reduzido, abrangendo apenas seis meses.

Como recomendações para futuros trabalhos, sugere-se a ampliação do espaço amostral, com aplicação em outros tipos e setores da indústria. Além de uma ampliação do período de monitoramento contínuo e remoto. Junto a isto, um estudo sobre os impactos financeiros causados por esse tipo de monitoramento na indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Bruno Guerra; FABRO, Elton. Indústria 4.0 como ferramenta na engenharia de manutenção com base na metodologia TPM. **Revista Scientia Cum Industria**, v. 7, n. 2, p. 23-39, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e mantenabilidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 1994. 37 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10082**: Ensaio não destrutivo - Análise de vibrações - Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 rpm a 15000 rpm. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, 2011.

BALDISSARELLI, Luciano; FABRO, Elton. Manutenção Preditiva na indústria 4.0. **Scientia cum industria**, v. 7, n. 2, p. 12-22, 2019.

BORLIDO, David José Araújo. **Indústria 4.0**: aplicação a sistemas de manutenção. 2017.Tese (Mestrado em em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Porto, 2017. Disponível em: https://repositorio-berto.up.pt/bitstream/10216/102740/2/181981.pdf. Acesso em: 23 jan. 2024.

CHEN, Hao; JIA, Xueqin; LI, Heng. **A brief introduction to IoT gateway**. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION TECHNOLOGY AND APPLICATION. 2011. p. 610-613.

COELHO, Pedro Miguel Nogueira. **Rumo à indústria 4.0**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia e gestão Industrial) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016. Disponível em: https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/36992/1/Tese%20Pedro%20Coelho%20Rumo%20%C3%A0%20Industria%204.0.pdf. Acesso em: 23 jan. 2024.

COMPASS. **Entenda como funciona uma fábrica inteligente na indústria 4.0**. 2018. Disponível em: https://blog.compass.uol/tech/entenda-como-funciona-uma-fabrica-inteligente-na-industria-4-0/. Acesso em: 18 set. 2023.

COSTA NETO, Luiz Gonzaga da; CAMPOS, Fernando Celso de. **O Novo Enfoque da Manutenção Preventiva das Máquinas e Equipamentos dos Processos Industriais**. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 16. 2021.

CYRINO, Luís. **Curva PF:** como usar na manutenção. 2023. Disponível em: https://tractian.com/blog/curva-pf. Acesso em: 12 set. 2023.

FARIA, Viviane Pereira de; QUELHAS, Osvaldo Luíz Gonçalves. **Manutenção 4.0:** uma revisão da literatura da base Scopus. *In:* CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL. 21. Anais [...] Universidade Federal Fluminense, 2021.

FERREIRA, Alex Franco; ALVES, Israel Cesar Rodrigues. A importância da medição da temperatura em conexões a serem substituídas ou reparadas em redes de média tensão por equipe de manutenção de rede aérea energizada (Linha Viva). **Revista Eletrônica TECCEN**, v. 12, n. 2, p. 59-67, 2019.

FONSECA, A. V da; MIYAKE, Dario Ikuo. **Uma análise sobre o Ciclo PDCA como um método para solução de problemas da qualidade***. In:* ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 26. p. 1-9, 2006.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GILCHRIST, Alasdair. **Industry 4.0:** the industrial internet of things. [*S. l.*]: Apress, 2016.

GONÇALVES, Hélder Ricardo Domingues. **Gestão da manutenção na indústria 4.0**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Disponível em: https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/34667. Acesso em: 23 jan. 2024.

HASHEMIAN, Hashem M. State-of-the-art predictive maintenance techniques. **IEEE Transactions on Instrumentation and measurement**, v. 60, n. 1, p. 226-236, 2010.

ISAR. **Termografia:** 5 razões para você contratar um serviço de análise termográfica. 2019. Disponível em: https://www.isar.com.br/blog/isolamento-termico/termografia-5-razoes-para-contratar-analise-termografica. Acesso em: 25 ago. 2023

JUNG, Deokwoo; ZHANG, Zhenjie; WINSLETT, Marianne. **Vibration analysis for IoT enabled predictive maintenance**. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATA ENGINEERING. 33. IEEE, 2017. p. 1271-1282.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção**: função estratégica. 3.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, p. 384, 2009.

LAKATOS, Eva; MARCONI, Marina. **Metodologia do Trabalho Científico**. 9 ed. SãoPaulo: Atlas Ltda., 2021.

MÁRQUEZ, Adolfo Crespo. **The maintenance management framework:** models and methods for complex systems maintenance. [*S. l.*]: Springer Science & Business Media, 2007.

MARTINS, Flavia Justina; FABRO, Elton. Uso do sensor inteligente na manutenção preditiva do motor de uma extrusora. **Scientia cum Industria**, v. 8, n. 2, p. 1-9, 2020.

MATIAS-PEREIRA, José. **Manual de Metodologia da Pesquisa Científica**. 4 ed. SãoPaulo: Atlas Ltda., 2016.

MOUBRAY, J. **Manutenção Centrada em Confiabilidade (Reliability-Centered Maintenance-RCM).** São Paulo: Aladon, 2000.

OLIVEIRA, Francisco de Paula; LIMA, Carlos Roberto Camello. Análise da função manutenção como estratégia empresarial: estrutura, ferramentas e impacto das decisões. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 17, n. 34, p. 65-76, 2014.

POLVERINO, Lorenzo *et al.* Machine learning for prognostics and health management of industrial mechanical systems and equipment: A systematic literature review. **International Journal of Engineering Business Management,** v. 15, 2023.

POPESCU, Theodor D.; AIORDACHIOAIE, Dorel; CULEA-FLORESCU, Anisia. Basic tools for vibration analysis with applications to predictive maintenance of

rotating machines: an overview. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-17, 2022.

RIBEIRO, José; FOGLIATTO, Flávio. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Belo Horizonte: Elsevier, 2009.

RODRIGUES, Ana Lígia Vieira *et al.* Estudo de viabilidade para implementação de manutenção preditiva no contexto da indústria 4.0. **Brazilian Journal of Development,** v. 9, n. 8, p. 23133-23154, 2023.

SACOMANO, J. B. *et al.* **Indústria 4.0**. São Paulo: Editora Blucher, 2018.

SCHEFFER, Cornelius; GIRDHAR, Paresh. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. [*S. l*.]: Elsevier, 2004.

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**. [*S. l*.]: Edipro, 2019.

SOARES, S. C.; BRITO, J. N. **Análise da causa raiz da falha de um moinho de pinos utilizado no processo produtivo de uma indústria processadora de amêndoa de cacau**. *In:* ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 24. Anais [...] Curitiba, v. 3, n. 2, p. 365-386, 2014.

SOUZA, Alessandro J de.; OLIVEIRA, Luiz Carlo de. **Gerência dos Processos de Automação**. [*S. l*.]: DCA Redes Industriais, 2003.

SOUZA, Valdir Cardoso de *et al.* Utilização das tecnologias da indústria 4.0 na manutenção preditiva através do monitoramento de equipamentos e instalações. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 7063-7083, 2022.

TAURION, Cezar. **Cloud computing-computação em nuvem**. [*S. l*.]: Brasport, 2009.

TOAZZA, Guilherme Francez; SELLITTO, Miguel Afonso. Estratégia de manutenção preditiva no departamento gráfico de uma empresa do ramo fumageiro. Revista **Produção Online,** v. 15, n. 3, p. 783-806, 2015.

VIANA, Hebert Ricardo Garcia. **Planejamento e Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Ed. Qualitymark, 2006. 167 p

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **Manual de Gestão da Manutenção.** Brasília, Engeteles Editora, 2020

VITAU AUTOMATION. **Plataforma Vitau IoT para a indústria 4.0**. 2022. Disponível em: https://vitauautomation.com/40maintenance.html. Acesso em: 15 set. 2023

WIREMAN, Terry. **Developing performance indicators for managing maintenance.** [*S. l*.]: Industrial Press Inc., 1998.

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