

ASSOCIAÇÃO EDUCATIVA EVANGÉLICA
FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA – FACEG
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS GOMES ESPINDULA

MANUTENÇÃO PREDITIVA E A INDÚSTRIA 4.0
UM ESTUDO DE CASO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
MONITORAMENTO ON-LINE DE ATIVOS

GOIANÉSIA

2021

LUCAS GOMES ESPINDULA

MANUTENÇÃO PREDITIVA E A INDÚSTRIA 4.0
UM ESTUDO DE CASO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
MONITORAMENTO ON-LINE DE ATIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

GOIANÉSIA
2021

FICHA CATALOGRÁFICA

E77m

Espindula, Lucas Gomes.

Manutenção preditiva e a indústria 4.0 um estudo de caso da implementação de um sistema de monitoramento on-line de ativos / Lucas Gomes Espindula – Goianésia: Faculdade Evangélica de Goianésia, 2021 – Faceg, 2021

45 p.; il.

Orientador: Prof. Dr. Cleber Caetano Thomazi.

Monografia de Graduação – Faculdade Evangélica de Goianésia: FACEG, 2021.

1. Custo teórico evitado. 2. Indústria 4.0. 3. Manutenção preditiva.

I. Espindula, Lucas Gomes. II. Manutenção preditiva e a indústria 4.0 um estudo de caso da implementação de um sistema de monitoramento on-line de ativos.

CDU 621

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ESPINDULA, L.G. **Manutenção preditiva e a indústria 4.0 um estudo de caso da implementação de um sistema de monitoramento on-line de ativos.** Trabalho de conclusão Curso (Graduação em Engenharia mecânica) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia-GO, 2021.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME: LUCAS GOMES ESPINDULA

GRAU: BACHAREL

ANO: 2021

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia permissão para reproduzir cópias desta Monografia de Graduação, única e exclusivamente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais de publicação. Nenhuma parte desta Monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada a fonte.



Nome: Lucas Gomes Espindula

CPF: 064.872.691-67

Endereço: Rua RS3, Qd 10 lote 6B, Uruaçu-GO

E-mail: lucas.espindula@outlook.com

LUCAS GOMES ESPINDULA

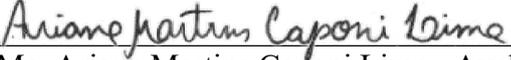
MANUTENÇÃO PREDITIVA E A INDÚSTRIA 4.0
UM ESTUDO DE CASO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
MONITORAMENTO ON-LINE DE ATIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Goianésia, 07 de julho de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cleber Caetano Thomazi - Orientador
Faculdade Evangélica de Goianésia


Prof. Me. Ariane Martins Caponi Lima - Avaliador
Faculdade Evangélica de Goianésia


Prof. Me. Juarez Aparecido Domingos - Avaliador
Faculdade Evangélica de Goianésia

Dedico esse trabalho ao meu querido pai, Leomar Spindola (in memoriam), que não está mais entre nós, mas sempre será o meu motivo de levantar e ser melhor todos os dias.

Agradecimentos

A Deus por sempre me guiar e nunca permitir que eu desaminasse durante as dificuldades encontradas.

Ao orientador Cleber Caetano Thomazi pelo apoio, incentivo, disponibilidade e esclarecimentos de dúvidas, sempre que necessário.

À Instituição e demais professores que auxiliaram para que fosse possível finalizar mais uma etapa acadêmica da minha vida.

À minha namorada Danielly Teixeira por toda a ajuda que foi necessária durante esse período de estudos, pela paciência em momentos que estava focado em atividades acadêmicas e pelo amor demonstrando ao longo dos anos juntos.

À minha amada mãe Malca Rosa, que sempre me incentivou e ajudou sempre que necessário, foi o meu exemplo de esforço, trabalho e dedicação.

Às minhas irmãs e cunhados, Lorena Gomes, Lara Hellen, Luis Ricardo e Wallacy Gregory, que sempre me ajudaram nos momentos de dificuldades e me incentivaram a concluir essa etapa acadêmica.

A todos os meus amigos, especialmente Alexandre Fenelon e Leonardo Ferreira, que sempre estiveram presentes nos momentos de dificuldade e de felicidade durante o nosso período de formação.

RESUMO

Em um ambiente cada vez mais competitivo na indústria, o foco em manutenção se torna algo primordial em grandes companhias. Em grandes ciclos de produção, há a necessidade de busca por novas técnicas baseadas na Indústria 4.0. Nesse cenário, o presente trabalho apresenta os conceitos utilizados na indústria 4.0 e as principais técnicas usadas na manutenção preditiva, bem como um estudo de caso para entender os benefícios e dificuldades da implementação de um sistema de monitoramento on-line de ativos. O estudo de caso foi realizado em uma unidade de negócio de uma empresa multinacional do ramo da mineração, que opera com a extração de minério de ferro, níquel, platina entre outros minerais, na qual, em 2017, foi implantado o software Predix, que, por meio de diagnósticos realizados em tempo real, ajudaria a reduzir custos de manutenção, auxiliando a reduzir paradas não planejadas e levando assim a diminuir o tempo de inatividade do equipamento. Os diagnósticos são baseados em modelos pré-programados, que levam em consideração diferentes variáveis dependendo do ativo a ser monitorado, como temperatura, pressão, velocidade etc. O período estudado compreendeu agosto de 2018 até junho de 2020, observando-se um custo teórico evitado de US\$ 1.123.389,07. Comparando isto à mensalidade do software de US\$ 120.000,00, somados aos recorrentes alarmes falsos, não se enxergou um custo-benefício satisfatório no uso dessa ferramenta. Dessa maneira, sua utilização foi descontinuada por meio de uma decisão gerencial. Demonstrou-se que, apesar dos benefícios trazidos pela utilização dessa ferramenta da indústria 4.0, ainda se encontram muitas barreiras no seu uso, tanto financeiras como operacionais.

Palavras-chave: Custo teórico evitado. Indústria 4.0. Manutenção preditiva.

ABSTRACT

In an increasingly competitive environment in the industry, the focus on maintenance becomes paramount in large companies. In large production cycles, there is a need to search for new techniques based on industry 4.0. In this scenario, this work presents the concepts used in industry 4.0 and the main techniques used in predictive maintenance, as well as it was carried out a case study to understand the benefits and difficulties of implementing an online asset monitoring system. The case study was carried out in business unit of a multinational company in the mining sector, which operates with the extraction of iron ore, nickel, platinum, among other minerals, where, in 2017, the Predix software was implemented, which, through diagnostics performed in real time, it would help to reduce maintenance costs, helping to reduce unplanned downtime and thus leading to reduced equipment downtime. Diagnostics are based on pre-programmed models, which take into account different variables depending on the asset to be monitored, such as temperature, pressure, speed etc. The period studied ranged from August 2018 to June 2020, observing a theoretical avoided cost of US\$ 1,123,389.07. Comparing this to the software monthly fee of US\$ 120,000.00, added to the recurrent false alarms, it was not seen a satisfactory cost-benefit in the use of this tool. Thus, its use was discontinued by a management decision. Therefore, it was demonstrated that, despite the benefits brought using this tool from industry 4.0, there are still many barriers to its use, both financial and operational.

Keywords: Theoretical cost avoided. Industry 4.0. Predictive maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Previsão de investimento em tecnologias digitais para 2018	18
Figura 2 - Relação entre manutenção preditiva e preventiva	20
Figura 3 - Setores de aplicação.....	24
Figura 4 - Exemplo de um alerta gerado.	30
Figura 5 - Legenda do gráfico de um alerta gerado.....	30
Figura 6 - Gráfico de um alerta gerado.....	31
Figura 7 - Variáveis analisadas.....	31
Figura 8 - Gráfico sistema da Empresa X.....	32
Figura 9 – Alerta gerado no dia 19/08/2019.....	33
Figura 10 - Gráfico gerado no dia 19/08/2019.	33
Figura 11 - Variáveis analisadas no dia 19/08/2019.....	34
Figura 12 - Fluxograma para determinar a probabilidade de falha.	35
Figura 13 - Fluxograma para determinar o impacto mecânico.....	36
Figura 14 - Fluxograma para determinar o impacto na produção.	37
Figura 15 - Casos gerados	39
Figura 16 - Casos gerados com ação	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução da Manutenção.	15
Tabela 2 - Exemplo de modelo.....	27
Tabela 3 - Exemplo de limites para alarmes.....	29
Tabela 4 - Probabilidade x Impacto.....	38
Tabela 5 - Grupo de equipamentos.....	38
Tabela 6 – Custo evitado teórico.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CNI – Confederação Nacional da Indústria

CPS - Cyber-Physical Systems (Sistemas Ciber-Físicos)

GE – General Electric

IoS – Internet of services (Internet dos serviços)

IoT - Internet of things (Internet das coisas)

PPT – Preço Por Tonelada

TF – Taxa de Fluxo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVO GERAL	13
2.1	Objetivo Específicos	13
2.2	Justificativa	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Manutenção.....	14
3.2	Industria 4.0	16
3.2.1	Sistemas Ciber-Físicos (Cyber-Physical Systems).....	16
3.2.2	Internet das Coisas (Internet of Things – IoT)	17
3.2.3	Internet dos Serviços (Internet of Services - IoS)	17
3.2.4	Fábricas Inteligentes (Smart Factories)	17
3.2.5	Indústria 4.0 no Brasil	17
3.3	Tipos de manutenção	18
3.3.1	Corretiva não planejada e planejada.....	18
3.4	Preventiva	19
3.5	Detectiva	19
3.6	Preditiva	19
3.7	Engenharia de manutenção	22
3.8	GE Predix.....	22
3.8.1	Origem.....	22
3.9	Utilização	23
4	METODOLOGIA	25
4.1	Definição de uma estrutura conceitual teórica.....	25
4.2	O estudo de caso	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1	Alertas gerados	29
5.2	Custo teórico evitado	34
6	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Em um ambiente cada vez mais competitivo na indústria, o foco em manutenção se torna algo primordial em grandes companhias, buscando sempre trabalhar com alta confiabilidade e disponibilidade de seus equipamentos, prezando pela segurança e saúde humana e minimizando os riscos ambientais.

A busca por técnicas baseadas na indústria 4.0 vem sendo adotada cada vez mais em grandes ciclos de produção, distribuição e comércio ao redor do mundo. Segundo Silva, Santos Filho e Miyagi (2015), a Indústria 4.0 prevê a integração entre humanos e máquinas, mesmo que em posições geográficas distantes, formando grandes redes e fornecendo produtos e serviços de forma autônoma.

De acordo com Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), no futuro, as empresas estabelecerão redes globais que incorporarão suas máquinas, sistemas de armazenamento e instalações de produção na forma dos Sistemas Ciber-Físicos (CPS). Os sistemas incluem máquinas inteligentes, sistemas de armazenamento e instalações de produção capazes de trocar informações de forma autônoma, disparar ações e controlar umas às outras de forma independente. Isso facilita melhorias fundamentais para os processos industriais envolvidos na fabricação, engenharia, uso de materiais e gerenciamento da cadeia de suprimentos e ciclo de vida.

A manutenção preditiva auxiliada por técnicas de última geração, pode monitorar continuamente a condição de máquinas e equipamentos com sistemas on-line que utilizam a ajuda de sensores e software poderosos. Tais sistemas trabalham analisando dados enviados pelos sensores e procuram identificar mudanças nas tendências dos dados, caso haja grande variação nas medições, ações devem ser tomadas. Ao contrário da manutenção reativa, a manutenção preditiva permite que se planeje proativamente o tempo de inatividade do equipamento, minimize as interrupções e economize recursos. Sistemas como GE Predix permitem acessar os dados da máquina a qualquer momento e de qualquer lugar do mundo através da Internet.

Nesse cenário, o presente trabalho apresenta os conceitos utilizados na indústria 4.0, as principais técnicas usadas na manutenção preditiva e um estudo de caso sobre a implementação de um sistema de monitoramento on-line de ativos em uma empresa de mineração, e tem como hipótese se a aplicação de ferramentas de monitoramento online de ativos possui benefícios e dificuldades na operação de uma grande empresa.

2 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como objetivo apresentar amplamente o conceito de indústria 4.0, as técnicas usadas na manutenção preditiva, além de apresentar um estudo de caso para entender os benefícios e dificuldades da implementação de um sistema de monitoramento on-line de ativos.

2.1 Objetivo Específicos

Para se alcançar o objetivo geral, é necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Definir manutenção e os tipos de manutenção.
- Definir o conceito de indústria 4.0.
- Apresentar as principais técnicas utilizadas na manutenção preditiva.
- Apresentar a funcionalidade do sistema GE Predix.
- Identificar as dificuldades e benefícios da implementação do GE Predix na operação de uma empresa de mineração.

2.2 Justificativa

A motivação para a realização do trabalho originou-se de um acompanhamento durante o período de estágio do autor no setor de engenharia de manutenção, no qual se focou em um novo projeto para a implantação de um sistema de monitoramento on-line. Este trabalho é, portanto, justificado, pela necessidade de compreender os benefícios e as dificuldades da implementação deste tipo de sistema na operação de uma empresa multinacional do ramo da mineração.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Manutenção

Desde o início do século XX, a manutenção vem se destacando no setor produtivo, exercendo cada vez mais um papel estratégico e fundamental para uma elevada produtividade, podendo ser um ponto importante para o sucesso e o futuro de uma empresa. O impacto causado por uma manutenção ineficaz acarreta uma possível queda na lucratividade e uma baixa sobrevivência da empresa. Kardec e Nascif (2009).

Manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (ABNT, 1994). Para Kardec e Nascif (2009), a missão da manutenção é garantir a confiabilidade e a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações, de modo a atender a um processo de produção ou de serviço, com segurança, preservação do meio ambiente e custo adequados.

Para Xenos (1998), as atividades de manutenção existem para evitar a degradação dos equipamentos e instalações, causada pelo seu desgaste natural e pelo uso.

Para Almeida (2014), pode-se entender manutenção como o conjunto de cuidados e procedimentos técnicos necessários ao bom funcionamento e ao reparo de máquinas, equipamentos, peças, moldes e ferramentas.

Tomando conhecimento das definições de manutenção, nota-se que ela é um elemento importante para a produtividade de uma empresa. Torna-se cada vez mais necessário repensar os métodos que já existem sobre manutenção e desenvolver novas tecnologias que possam auxiliar as áreas de atuação a conferir maior confiabilidade e disponibilidade para seus equipamentos.

A Tabela 1 mostra a evolução da manutenção ao longo do tempo.

Tabela 1 - Evolução da Manutenção.

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO				
	Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração
Ano				
Aumento das expectativas em relação à manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Conserto após a falha 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade crescente • Maior vida útil do equipamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Melhor relação custo-benefício • Preservação do meio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Preservação do meio ambiente • Segurança • Influir nos resultados • Gerenciar os ativos
Visão quando à falha do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham 	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira 	<ul style="list-style-type: none"> • Existência de 6 padrões de falhas 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões A e F
Mudança nas técnicas de manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Habilidades voltadas para o reparo 	<ul style="list-style-type: none"> • Planejamento manual de manutenção • Computadores grandes e lentos • Manutenção preventiva (por tempo) 	<ul style="list-style-type: none"> • 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 	<ul style="list-style-type: none"> • 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 ciclo de vida • Contratação por resultados

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009).

3.2 Indústria 4.0

Segundo Kardec e Nascif (2009), a partir da década de 30, a evolução da manutenção pode ser dividida em quatro gerações. A primeira que antecede a Segunda Guerra Mundial, quando o grau de mecanização da indústria era baixo, os equipamentos simples e geralmente muito grandes. A segunda geração que ocorreu entre os anos 50 e 70, devido à grande necessidade de produtos foi necessário que os maquinários tivessem um bom funcionamento, ou seja, com poucas falhas. Isto levou à busca por maior disponibilidade e confiabilidade gerando, assim, maior produtividade. A terceira geração, que se desenvolveu a partir da década de 70, introduziu o conceito de manutenção preditiva. Com o desenvolvimento tecnológico foi possível acompanhar, controlar e planejar com mais facilidade os serviços de manutenção.

A quarta geração é marcada por descobertas tecnológicas que emergem em vários campos: inteligência artificial, robótica, big data, nanotecnologia, impressão 3D, biotecnologia, entre outros, buscando reduzir o tempo de parada dos equipamentos, diminuir custos e aumentar a vida útil dos ativos. Essa geração é marcada por permitir que as partes físicas e virtuais da indústria trabalhem em conjunto gerando empresas inteligentes.

O termo Indústria 4.0 surgiu em uma feira de Hannover, na Alemanha em 2011, como um conceito da parte do governo alemão para o desenvolvimento de tecnologias de alta performance para a manufatura do país.

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

Segundo Hermann, Pentek e Otto (2016), existem quatro pilares principais para a indústria 4.0, explanados separadamente a seguir.

3.2.1 Sistemas Ciber-Físicos (*Cyber-Physical Systems*)

São sistemas que permitem a conexão de operações reais com infraestruturas de computação e comunicação automatizada. Em outras palavras, são sistemas que permitem a fusão dos mundos físico e virtual, através de computadores embarcados e redes que controlam os processos físicos gerando respostas instantâneas.

3.2.2 Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*)

É a rede de objetos físicos, sistemas, plataformas e aplicativos com tecnologia embarcada para comunicar, sentir ou interagir com ambientes internos e externos. Permite que as coisas interajam umas com outras e que tomada de decisões sejam feitas. A internet das coisas é a base da Indústria 4.0.

3.2.3 Internet dos Serviços (*Internet of Services - IoS*)

Quando a rede da IoT funciona perfeitamente, os dados processados e analisados em conjunto fornecerão um novo patamar de agregação de valor. Novos serviços serão introduzidos ou os existentes serão melhorados; a oferta por diferentes fornecedores e diversos canais produzirão uma nova dinâmica de distribuição e valor. Quando integrados, serão mais fáceis e simples de serem entendidos, já que a experiência como um todo se torna mais tangível. Quando isolados, serão mais complexos e mais difíceis de serem tangibilizados. Presume-se que, com o desenvolvimento da Indústria 4.0, este conceito será expandido de uma única fábrica para toda a sua rede de produção e consumo.

3.2.4 Fábricas Inteligentes (*Smart Factories*)

Nas fábricas inteligentes, os CPS serão empregados nos sistemas produtivos gerando significativos ganhos de eficiência, tempo, recursos e custos, se comparado às fábricas tradicionais. Os produtos, máquinas e linhas de montagem comunicar-se-ão entre si, trabalharão em conjunto e monitorar-se-ão, independentemente do local, com informações trocadas de forma instantânea. É necessário um alto nível de automação.

3.2.5 Indústria 4.0 no Brasil

Em uma pesquisa realizada em 2018, pela CNI, foi identificado um aumento no número de indústrias brasileiras que utilizam tecnologias digitais, ou seja, que estão inseridas na Indústria 4.0, ainda que em estágio inicial. Conforme a Figura 1, entre o início de 2016 e o de 2018, o percentual das grandes empresas que utilizam pelo menos uma tecnologia digital, entre as opções apresentadas, passou de 63 % para 73 %. Quase metade (48 %) das grandes empresas industriais pretende investir nessas tecnologias em 2018 (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2018).

PREVISÃO DE INVESTIMENTO EM TECNOLOGIAS DIGITAIS PARA 2018

Percentual de respostas do total de empresas respondentes (%)



* Pretende investir em pelo menos 1 das 13 opções de tecnologias digitais apresentadas.

** Inclui as empresas que não planejam investir em 2018 e as empresas que planejam investir, mas não em uma das 13 tecnologias digitais apresentadas.

Figura 1 - Previsão de investimento em tecnologias digitais para 2018.

Fonte: CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA: Investimentos em Indústria 4.0 (2018).

No Brasil, embora ainda esteja em estágio inicial, a indústria 4.0 possui alguns programas para incentivar o seu desenvolvimento. Sua aplicação deve acontecer de maneira gradual nos próximos anos.

Algumas empresas, como a estudada neste trabalho, buscam desenvolver projetos como o Pedrix, que engloba várias das vertentes citadas anteriormente, como: Internet das coisas, fabricas inteligentes, entre outros.

3.3 Tipos de manutenção

3.3.1 Corretiva não planejada e planejada.

Para Kardec e Nascif (2009), manutenção corretiva é a atuação para a correção da falha ou do desempenho menor do que o esperado. Já Almeida (2016) afirma que manutenção corretiva é um conjunto de procedimentos que são executados com a finalidade de atender imediatamente a produção, a máquina ou o equipamento que parou. A equipe de manutenção age imediatamente para restabelecer seu funcionamento o mais rápido possível.

Definida também por Gregório e Silveira (2018), a manutenção corretiva é efetuada após a ocorrência de uma pane, quando o componente é usado até a sua exaustão. Essa manutenção tem o objetivo de recolocar um item em condições de executar a função requerida e pode ser subdividida em corretiva não planejada e corretiva planejada:

- (I) **Corretiva não planejada:** segundo Kardec e Nascif (2009), é a correção da falha de maneira aleatória. Também define (Gregório e Silveira, 2018, p. 19) como forma de corrigir uma falha quando ela ocorre, paralisando as atividades produtivas do equipamento.

- (II) **Corretiva planejada:** para Kardec e Nascif (2009), é a correção do desempenho menor do que o esperado ou correção da falha por decisão gerencial. Em uma situação que a decisão é permanecer com o equipamento trabalhando até a falha, passa a ser uma decisão conhecida pela equipe de planejamento e um trabalho planejado tem sempre um menor custo, maior velocidade de reparo e mais segurança para quem for realizar a manutenção.

3.4 Preventiva

Para Almeida (2014), manutenção preventiva é a manutenção planejada e controlada, realizada em datas predeterminadas, de modo a manter a máquina ou o equipamento em corretas condições de funcionamento e conservação, evitando paradas imprevistas.

Kardec e Nascif (2009), também define manutenção preventiva como a atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha, ou diminuição do desempenho, obedecendo a um plano preventivamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo.

Oposto à definição de manutenção corretiva, a preventiva busca sempre evitar que ocorram falhas. Como o próprio nome já diz, procura prevenir a ocorrência de paradas não programadas de equipamentos, com isso é necessária uma equipe fixa de manutenção e peças de reposição a disposição da equipe.

3.5 Detectiva

Para Kardec e Nascif (2009), a manutenção detectiva é: “a atuação efetuada em sistema de proteção, comando e controle, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção”.

A verificação de falhas ocultas é essencial para garantir a confiabilidade dos sistemas. Cada vez é maior a utilização de computadores digitais em instrumentação e controle de processos.

3.6 Preditiva

Para Kardec e Nascif (2009), a manutenção preditiva é a atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática.

Para Almeida (2014), este tipo de manutenção baseia-se em inspeções periódicas, em que fenômenos como temperatura, vibração, ruídos excessivos etc. são observados através de instrumentos específicos. Esta análise permite a observação das reais condições do equipamento e o acompanhamento da evolução de um defeito, possibilitando o planejamento em curto prazo para uma intervenção de manutenção para troca de peças e a eliminação do defeito, além de indicar o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e dos equipamentos e as condições para que esse tempo de vida útil seja bem aproveitado.

Com o intuito de prever as reais condições do equipamento, a manutenção preditiva vem evoluindo acompanhada do desenvolvimento tecnológico, o que leva as técnicas utilizadas na manutenção preditiva a terem custo elevado, pois são necessários equipamentos de alto nível, que requerem atualizações constantemente.

Pode-se relacionar a manutenção preditiva com a manutenção preventiva, porém a principal diferença entre elas é de que enquanto a manutenção preventiva estabelece intervalos para a troca de peças ou componentes de acordo com critérios específicos, a manutenção preditiva monitora a evolução da falha de acordo com técnicas de análise para programar a atividade de manutenção. Percebe-se que, a partir da Figura 2, a manutenção preditiva precede a manutenção preventiva.



Figura 2 - Relação entre manutenção preditiva e preventiva.

Fonte: Gregório, Santos e Prata (2018, p. 122).

Dentre as técnicas utilizadas na manutenção preditiva, pode-se destacar algumas comuns em grandes empresas, como: análise de vibração, termografia, ultrassom e análise de óleo.

A análise de vibração é importante para a manutenção devido à vibração excessiva em equipamentos que podem gerar diversos problemas, como perdas de energia, deficiências na qualidade, problemas ambientais e diminuição na velocidade de produção. Em casos mais graves, esses problemas podem gerar falhas que resultem em acidentes e paradas não programadas.

Kardec e Nascif (2009, p.244) descrevem: “a vibração está presente em qualquer sistema à medida que este responde a uma excitação. Isso é válido para um eixo de compressor centrífugo, para a asa de um avião em voo, [...] ou ainda para uma estrutura sujeita à ação do vento”.

As vibrações mecânicas em equipamentos podem ser medidas de três maneiras, segundo Cyrino (2017): por aceleração (m/s^2); por velocidade (m/s ou pol/s); e por deslocamento (mícron = 0,001 mm).

Já a utilização da técnica de ultrassom na manutenção preditiva se dá através dos ruídos gerados pelos equipamentos em funcionamento. Devido às altas frequências, tal ruído é imperceptível ao ouvido humano, porém o ultrassom é capaz de detectar a descontinuidade em sua fase inicial, possibilitando a correção antes que se torne um problema real (KRAS, 2020).

A termografia é utilizada para, através dos raios infravermelhos emitidos pelo corpo, observar seus padrões térmicos relacionando-os com suas condições de operação. Podendo ser aplicada tanto em máquinas como em processos produtivos, um sistema de inspeção termográfica é formado por um conjunto de recursos que permitem a realização de tarefas de análise preditiva nos campos de redes elétricas, equipamentos mecânicos, redes de vapor, fornos, reatores e processos (VERRATI, 2011).

A análise de óleo é uma considerável ferramenta de manutenção preditiva. Por meio dela, é possível monitorar e avaliar as condições dos fluidos e equipamentos a partir de análises laboratoriais precisas. Dessa forma, maximiza-se o desempenho e a confiabilidade de ativos, identificando problemas antes que se tornem falhas, ou seja, é um procedimento que economiza tempo e reduz os custos de manutenção. (BAMAQ MÁQUINAS, 2020)

A manutenção preditiva vem acompanhada do desenvolvimento tecnológico. Diversas técnicas utilizadas podem ser implementadas em sistemas on-line, como o GE Predix, que pode oferecer um monitoramento automatizado das máquinas, levando assim informações atualizadas durante todo o seu período de utilização, otimizando a operação dos maquinários e equipamentos.

3.7 Engenharia de manutenção

Os principais objetivos da engenharia de manutenção são consolidar a rotina e implantar melhorias no processo. Dentre as suas atribuições estão: aumentar a confiabilidade e disponibilidade, solucionar problemas tecnológicos, dar suporte à execução, acompanhar os indicadores de manutenção e zelar pela documentação técnica, entre outras (KARDEC; NASCIF, 2009).

A organização que adota a utilização da engenharia de manutenção consegue resultados satisfatórios entre a relação de disponibilidade, confiabilidade, segurança, meio ambiente e custos.

3.8 GE Predix

3.8.1 Origem

A General Electric (GE) foi fundada por Thomas Edison e Charles A. Coffin e resultou da fusão entre a Edison Electric Light Company, empresa de Thomas, e da Thomson-Houston Company, fundada por Charles. Segundo a própria GE, a decisão de juntar as duas companhias foi devido à expansão de ambas as empresas, na qual a dificuldade de cada uma delas de construir instalações usando apenas as suas respectivas patentes e tecnologias era alta. Deste modo, em 1892 foi sacramentada a fusão entre as duas empresas.

Hoje a General Electric é uma das maiores empresas digitais industriais do mundo, que se dedica a desenvolver e transformar a indústria com maquinários e soluções conectadas a um software que possibilitam uma grande previsibilidade com rápidas respostas. Atualmente, a empresa possui vários negócios, como:

- GE Aviation: líder mundial na fabricação de turbinas de avião e na produção de sistemas mecânicos e elétricos para aeronaves. (GE Aviation, 2021).
- GE Additive: negócio que se dedica a desenvolver impressoras 3D e materiais aditivos. (GE Additive, 2021).
- GE Healthcare: empresa líder mundial em tecnologia médica e ciências da vida; fornece um amplo portfólio de produtos, soluções e serviços usados no diagnóstico, tratamento e monitoramento de pacientes e no desenvolvimento e fabricação de produtos biofarmacêuticos. (GE Healthcare, 2021).
- GE Power: líder mundial em energia, oferece tecnologia, soluções e serviços para toda a cadeia de energia, desde a geração até o consumo. (GE, 2021).

- GE Renewable Energy: a GE Renewable Energy é um negócio de US\$ 15 bilhões que combina um dos mais abrangentes portfólios da indústria de energia renovável e oferece soluções completas para seus clientes, que exigem energia limpa, acessível e confiável. Combinando soluções para a geração de energia eólica on-shore e off-shore, aero-geradores, hidrelétricas, armazenamento de energia, usinas solares e transmissão e distribuição, além de oferecer serviços digitais e sistemas híbridos renováveis. (GE Renewable Energy, 2021).
- GE Transportation: tornou-se líder mundial no segmento com componentes críticos, locomotivas, serviços, sistemas de sinalização e logística e serviços para as indústrias globais de transporte e logística. (GE Transportation. 2021).

Com um investimento bilionário, a GE Digital desenvolveu o Predix, e em meados de 2015, disponibilizou a plataforma para um seleto grupo de parceiros e clientes. O projeto foi disponibilizado para o mercado em 2016.

O Predix, plataforma de software baseada na nuvem construída com foco na indústria, foi desenvolvida para ser uma base de dados escalonáveis e centrada nos ativos, permitindo coletar dados de forma segura de vários equipamentos, como: motores, turbinas, ventiladores, fornos, entre outros, podendo analisar esses dados e trabalhar para dar um melhor funcionamento ao mesmo.

Atualmente, o Predix se desdobra em duas versões: o Predix Essentials e o Predix Edge. O que difere as duas versões são as tecnologias empregadas em cada modelo, porém ambos são focados no monitoramento de ativos. (GE Reports, 2016).

3.9 Utilização

Com a crescente necessidade de novas tecnologias baseadas na Internet das Coisas (*Internet of Things*), visto também que vários setores necessitam de informações rápidas e com segurança, a GE investiu na construção de recursos que oferecem não só esses resultados, mas também uma redução no tempo de inatividade não planejada, melhoria na produção e uma melhor eficiência operacional, podendo assim fornecer esses resultados para diversos setores.

Outro conceito que também é utilizado para a criação do software é o *Digital Twin*.

O Digital Twin integra todos os dados (teste, dados de operação, ...), modelos (desenhos de projeto, modelos de engenharia, análises, ...), e outras informações (requisitos, pedidos, inspeções, ...) de um ativo físico gerado ao longo de seu ciclo de

vida que potencializam as oportunidades de negócios. (HARTMANN e VAN DER AUWERAER, 2021, p 3).

O papel do *Digital Twin* é prever e otimizar o desempenho. Para este propósito, métodos de simulação e/ou métodos baseados em dados são usados.

Entre setores como o transporte, a utilização do Predix pode auxiliar no agendamento e na logística, de forma a aumentar a utilização do ativo com análises preditivas, melhorando, assim, o seu desempenho e eficiência e gerando um custo de reparo inferior.

Para os setores de fabricação e mineração, o emprego do Predix ajuda no gerenciamento dos ativos, podendo oferecer aos colaboradores dados em tempo real dos equipamentos de forma que seja possível monitorar a saúde deles. Assim, gera-se uma maior precisão nas atividades de manutenção planejada.

Em todos os setores, ilustrados na Figura 3, a busca por níveis mais altos de desempenho, confiabilidade e disponibilidade em todo o ciclo de vida dos equipamentos são fatores que podem ser influenciados pelo uso da tecnologia. Todos esses resultados são gerados com uma forte segurança dos dados que passa por medidas rigorosas para garantir uma indústria inovadora de forma segura.

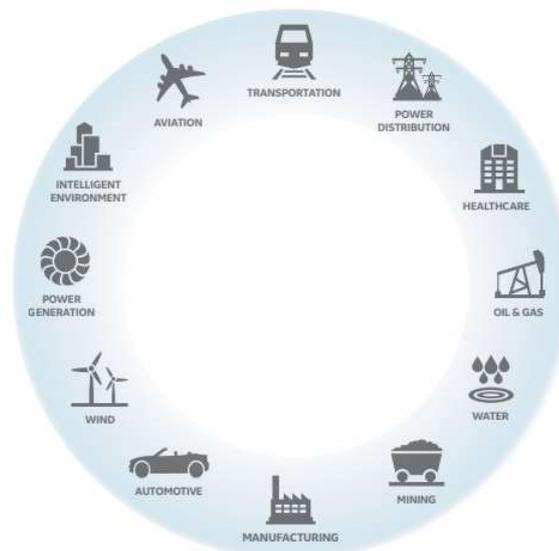


Figura 3 - Setores de aplicação.

Fonte: Adaptado GE Predix: A plataforma de aplicação industrial IoT.

4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da monografia, foi utilizado o método de pesquisa estudo de caso. Tal estudo consiste em uma investigação detalhada de uma ou mais organizações, ou grupos dentro das organizações, com o objetivo de fornecer uma análise do contexto e dos processos envolvidos no fenômeno em estudo.

Os estudos de caso são feitos para explorar novos processos ou comportamentos, para aumentar o conhecimento sobre fenômenos já conhecidos (HARTLEY, 1994). Conseqüentemente, a abordagem é particularmente útil para responder a questões *como* e *por que* sobre um conjunto contemporâneo de eventos (LEONARD-BARTON, 1990). Além disso, certos tipos de informação podem ser difíceis ou mesmo impossíveis de lidar por outros meios que não as abordagens qualitativas, como o estudo de caso (SYKES, 1990).

Uma vantagem importante da pesquisa de estudo de caso é a oportunidade de uma visão holística do processo. As observações detalhadas implicadas no método de estudo de caso permitem estudar muitos aspectos diferentes, examinar a relação entre si e visualizar o processo em seu ambiente total (TOOMER; BOWEN; GUMMESSON, 1993).

A natureza contextual do estudo de caso é ilustrada na definição de Chaiklin (1991), de um estudo de caso como uma investigação empírica que investiga um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto de vida real e aborda uma situação em que os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente evidentes.

4.1 Definição de uma estrutura conceitual teórica

Deve-se realizar um levantamento da literatura sobre o tema, a fim de se delimitar as fronteiras do que será investigado e proporcionar o suporte teórico para a pesquisa (fundamentos). O pesquisador se baseará nas informações levantadas pela revisão bibliográfica para avaliar os fenômenos observados com mais assertividade (MIGUEL *et al.*, 2012).

4.2 O estudo de caso

O estudo de caso foi realizado em uma empresa multinacional do ramo da mineração (Empresa X), que opera com a extração de minério de ferro, níquel, platina entre outros minerais. O projeto Predix foi instalado em uma planta industrial de exploração de níquel, começou a ser implantado em 2017 e em 2018 começou a sua utilização. Atualmente, o Predix possui duas versões, a Edge e a Essentials, que ainda não existiam na época em que pretendia-

se estudar a utilização do software. Tratava-se de um projeto-piloto no qual o principal software utilizado por parte da GE para fornecer as análises era o *SmartSignal*.

O software consegue fornecer alertas em forma de relatórios que são acionáveis quando alguma anomalia é encontrada. Neste relatório também são inclusos possíveis diagnósticos e a prioridade de atuação. Segundo a GE, essa tecnologia ajuda a reduzir custos de manutenção, auxiliando a reduzir paradas não planejadas levando, assim, à diminuição do tempo de inatividade do equipamento. Conseqüentemente, também pode atenuar os custos com falhas catastróficas e substituições de ativos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação do software começou com a criação dos modelos para cada ativo que iria ser monitorado. Dentro dos modelos estão inclusas diversas variáveis que são coletadas a partir de sensores instalados em campo: temperatura, pressão, velocidade, vibração, entre outros. Cada ativo, com o modelo pronto, gera uma lista de diagnóstico, que pode variar, em quantidade por ativo, devido à quantidade de sensores instalados no mesmo.

Após o modelo estar pronto, é necessário ter uma base histórica de cada variável para assim ser gerado um novo modelo que será usado para comparar o comportamento dos dados coletados em operação normal e em tempo real, ou seja, o modelo real do equipamento com o modelo gerado por dados históricos.

Com a tecnologia, foi possível criar modelos para motores, sistemas hidráulicos, fornos elétricos, transformadores, ventiladores, fornos rotativos, bombas e outros periféricos desses equipamentos, exemplificados na Tabela 2. No primeiro momento, apenas alguns equipamentos foram selecionados para receber o monitoramento, muitos pela sua criticidade, outros pela sua importância para o processo.

Tabela 2 - Exemplo de modelo.

Nome do modelo	Uso do equipamento	
MN_MOTOR_S	Mineração	
Sistema	Subsistema	Diagnóstico
Mecânica do motor	Rolamentos (2) Serviço de óleo lubrificante	Problema de rolamento Perda de resfriamento do rolamento Resfriador de óleo lubrificante Perda de resfriamento Problema da bomba de óleo lubrificante Problema de sensor
Motor	Estator Elétrico Anéis deslizantes	Alta temperatura do estator Problema de sensor Desequilíbrio de fase Problema Elétrico Excentricidade do vão de ar
Serviço de refrigeração	Sistema de refrigeração da unidade Sistema de resfriamento do motor Resfriamento E-House Bomba de água de resfriamento	Perda de resfriamento Degradação do desempenho da bomba

Tabela 2 - Exemplo de modelo.

(continuação)

Drive e fornecimento de potência	Drive Transformadores Fonte de energia	Desequilíbrio de fase Problema de controle
Importância do sensor	Sistema/Subsistema	Variável
A	Mecânica do motor	Temperatura do rolamento
	Motor estator	Temperatura do estator
	Motor elétrico	Corrente do motor Velocidade de motor
B	Mecânica do motor	Vibração do rolamento Pressão óleo lubrificante Temperatura óleo lubrificante
	Serviço de refrigeração	Temperatura da água de refrigeração Temperatura do ar de refrigeração Fluxo de água de refrigeração Status do ventilador de refrigeração
	Motor Elétrico	Fases da corrente do motor (ABC) Fases de tensão do motor (ABC) Potência do motor Potência reativa do motor
	Drive	Corrente do drive (ABC) Tensão do drive (ABC) Velocidade / torque do drive Velocidade do drive, demanda de torque

Fonte: Relatório GE para Empresa X

A empresa já possuía um sistema de supervisório pelo qual era possível ver o funcionamento em tempo real de todos os equipamentos e que alertava quando alguma anomalia era apresentada. Porém, com a tecnologia do Predix é possível obter um maior acerto, devido à base histórica que consegue relacionar várias variáveis para identificar que em X período do ano e em Y horário do dia, o valor deve estar entre um limite preestabelecido na criação dos modelos, exemplificado na Tabela 3.

Tabela 3 - Exemplo de limites para alarmes

Equipamento	Sensor	Descrição	Limite Alto GE	Limite Baixo GE	Limite Alto Empresa X	Limite Baixo Empresa X
Forno Elétrico	Sensor de posição	Sistema de medição da posição do curso do eletrodo 1	1377,5 mm	446,25 mm	1450 mm	425 mm
Tanque de óleo	Sensor de temperatura	Temperatura de óleo hidráulico do tanque 1	43° C	6,5° C	80° C	15° C

Fonte: Relatório GE para Empresa X

5.1 Alertas gerados

Após os modelos prontos e funcionais, foi possível dar início ao monitoramento, gerando, assim, alertas que eram enviados para uma lista de e-mails preestabelecidas. O relatório com todos os casos gerados era enviado toda segunda-feira, e às terças-feiras era realizada uma reunião com o responsável pelo tratamento dos dados na Empresa X e um engenheiro da GE para dar um retorno de como foi solucionado o problema e como o alerta ajudou na detecção do defeito da semana posterior.

O monitoramento era feito constantemente e, em caso de mudança abrupta em um equipamento crítico, um time chamado de RR (Reposta Rápida) era acionado para tentar corrigir o defeito com o menor tempo possível.

Os alertas gerados eram enviados já com uma interface estabelecida. Eles continham algumas informações importantes, como o número do alerta para controle, a sua categoria, data de criação, impacto e uma descrição do problema encontrado, uma possível causa e uma recomendação para solucionar o defeito, bem como os gráficos com os dados dos sensores que possuem algum defeito.

Por ser um projeto-piloto, alguns alertas eram considerados falsos devido ao problema reportado não ser correto, ou a análise feita pela ferramenta não ser conclusiva. Porém, outros casos mostraram-se corretos na predição de falha e que geraram benefícios para a empresa. Um exemplo de alerta é ilustrado na Figura 4.

Case Number 27555						
Owner	Category	Status	Impact	Likelihood	Created	Modified
Vitor Duca	Equipment	Under Investigation	Normal	Somewhat Likely	2019-08-19	2019-08-19
Asset(s) ROTARY KILN 01 (IPRC/Mining/ /RotaryKiln_01/ROTARY KILN 01)						
Description Was noticed by GE monitoring team that the bearing temperature on ring 1 for roller 1 is increasing from 50 deg C to 60 deg C (411FC001TI018/_PV_SCAL), while the other bearing is stable. Foi observado pelo time de monitoramento da GE que a temperatura no roller 1 do Kiln 01 está aumentando (411FC001TI018/_PV_SCAL) de 50 deg C para 60 deg C, sendo que para os outros mancais a temperatura está estável.						
Possible Cause Possible oil contamination or lack of lubrication. Possível contaminação no lubrificante ou baixa lubrificação.						
Recommended Action Check oil condition/contamination and lubrication condition. Verifique a condição do lubrificante e se há lubrificação adequando no mancal.						

Figura 4 - Exemplo de um alerta gerado.

Fonte: Relatório de casos Empresa X.

Na legenda mostrada na Figura 5, entende-se que a linha azul do gráfico é o valor atual, que está sendo coletado diretamente do sensor instalado em campo. A linha verde é o valor estimado para o sensor, baseado em todas as variáveis relacionadas a esse sensor e os dados históricos. O “X” vermelho indica um local onde o valor atual está acima do limite máximo estabelecido pelo modelo e o losango indica que em algum ponto do gráfico foi encontrada alguma anomalia.

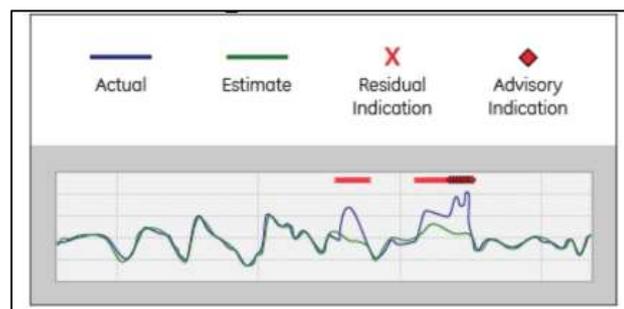


Figura 5 - Legenda do gráfico de um alerta gerado.

Fonte: Relatório de casos Empresa X.

No alerta ilustrado na Figura 6, foi reportado que a temperatura de um mancal do forno rotativo começou a descolar do valor estimado para ela naquele momento. A ferramenta analisa todas as variáveis que envolve esse sensor, para então enviar esse alerta. Nesse caso as variáveis

analisadas foram os outros sensores que têm a mesma funcionalidade e são instalados próximos do sensor que sofreu a mudança.

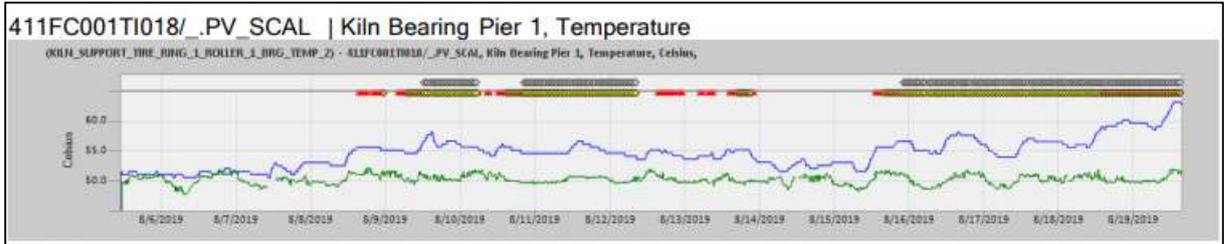


Figura 6 - Gráfico de um alerta gerado.

Fonte: Relatório de casos Empresa X.

Analisando os gráficos na Figura 7, é possível perceber que a linha verde e a azul dos sensores não possuem um descolamento tão grande, ou seja, o valor real está próximo ou até igual ao estimado. A partir dessa análise, pode-se admitir que o sensor acusado indica algum problema real de aumento de temperatura, visto que apenas um sensor passou por uma variação tão grande.

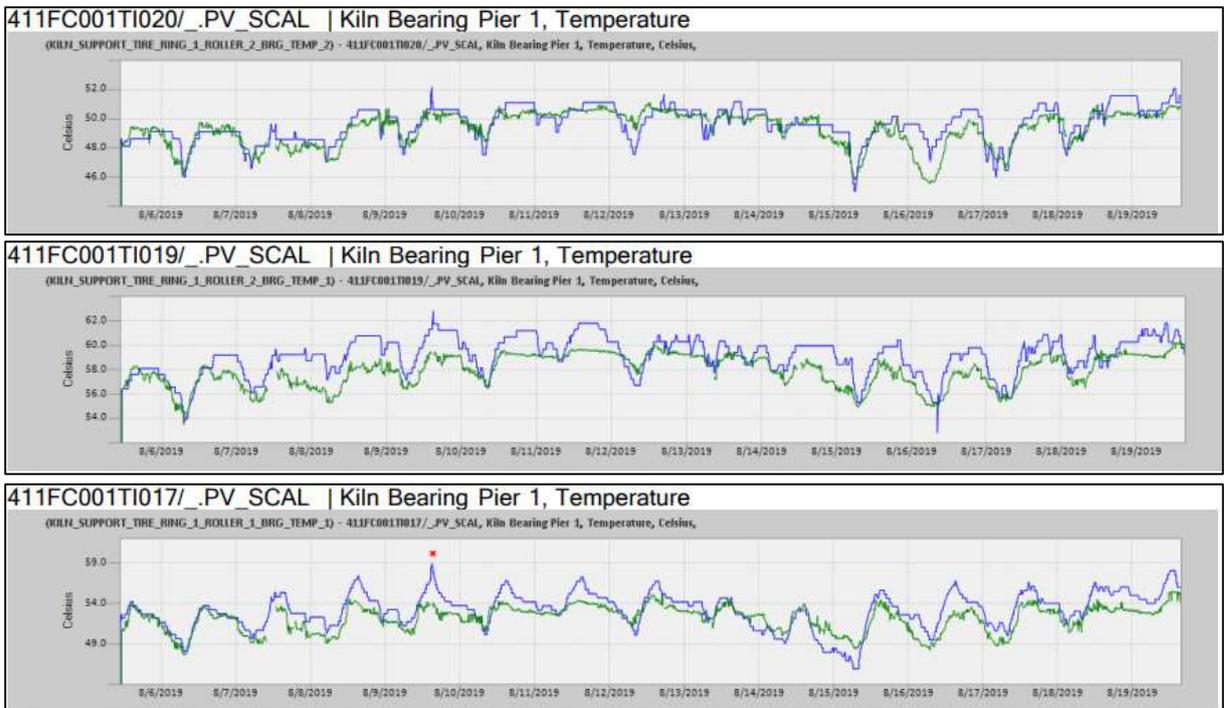


Figura 7 - Variáveis analisadas.

Fonte: Relatório de casos Empresa X.

O alerta foi então passado ao time de manutenção industrial, o qual realizou as tratativas para eliminar o problema.

Após o time de manutenção agir, foi possível identificar, pelo sistema de monitoramento, que o defeito foi corrigido, ilustrado na Figura 8. O alerta foi criado no dia 19/08/2019; no dia 23/08/2019 foi realizada uma limpeza no sistema de fluidização de água de resfriamento do mancal e em 26/08/2019 foi feito o alinhamento do mancal, quando se obteve a normalização da temperatura.

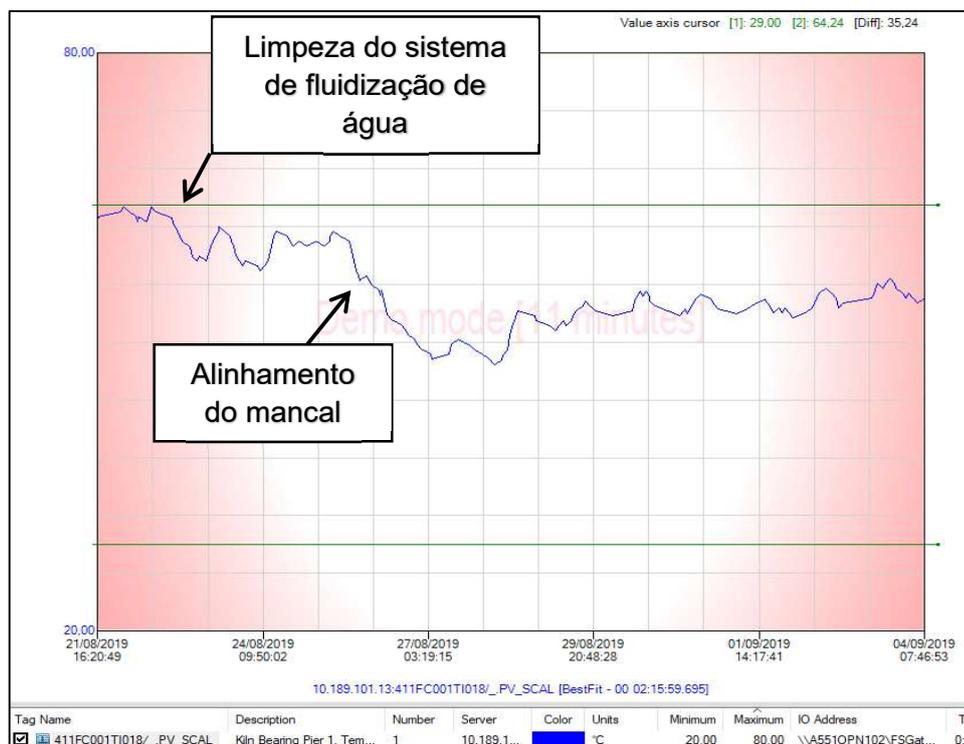


Figura 8 - Gráfico sistema da Empresa X.

Fonte: Sistema de supervisão empresa X.

Com a manutenção agindo de forma rápida e solucionando o problema, foi possível evitar um custo teórico de produção de US\$ 118.030,53, visto que, se o equipamento chegasse a falhar, a produção ficaria interrompida até a manutenção corretiva ser realizada. Somando-se um custo teórico de manutenção de US\$ 20.000,00, totalizou-se um custo teórico evitado de US\$ 138.030,53.

Na contramão de um caso de sucesso como o reportado, alguns casos que podem ser considerados falsos também eram alertados pela ferramenta, o que gerou alguns transtornos devido à equipe de manutenção se mobilizar para trabalhar no caso reportado e, no final, o

problema relatado não existir. Esses empecilhos originavam também uma baixa aderência por parte dos colaboradores.

No caso do alerta demonstrado pela Figura 9, a ferramenta alertou que um sensor que faz a leitura da corrente de uma bomba do sistema de recirculação de óleo do forno elétrico apresentou leituras de corrente de 144 %, sendo que, em condições normais, a corrente seria de 100 %.

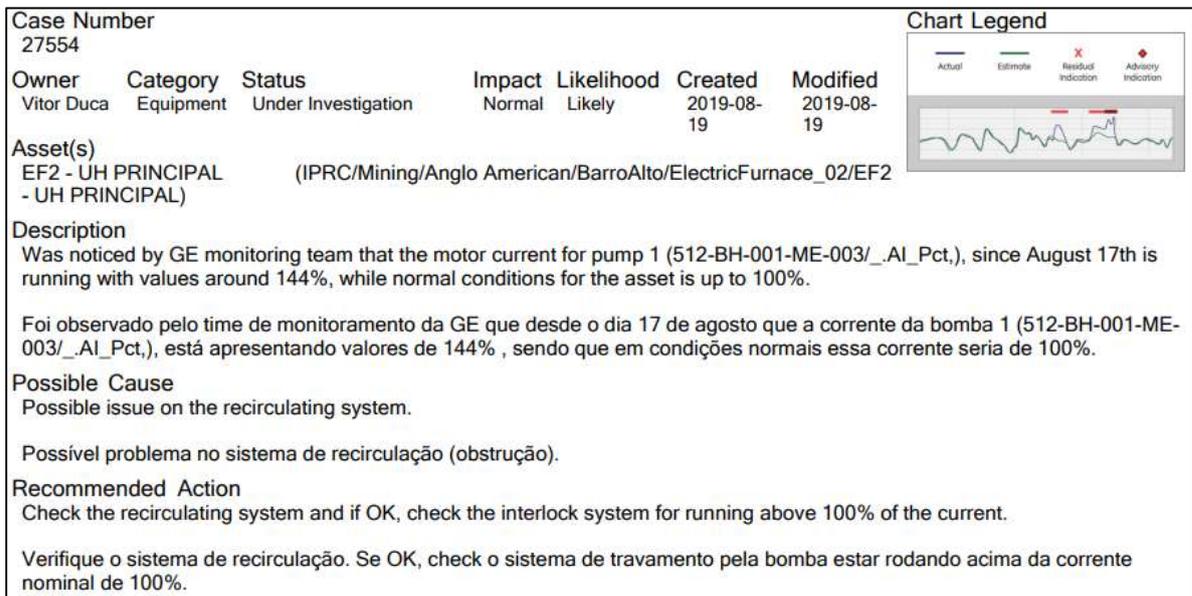


Figura 9 – Alerta gerado no dia 19/08/2019.

Fonte: Relatório de casos Empresa X.

Para esse caso, as variáveis utilizadas para análise do problema foram o sensor de leitura da corrente de uma bomba que trabalha no mesmo sistema, o sensor de temperatura de óleo do tanque e o sensor de pressão da linha, ilustradas na Figura 10.

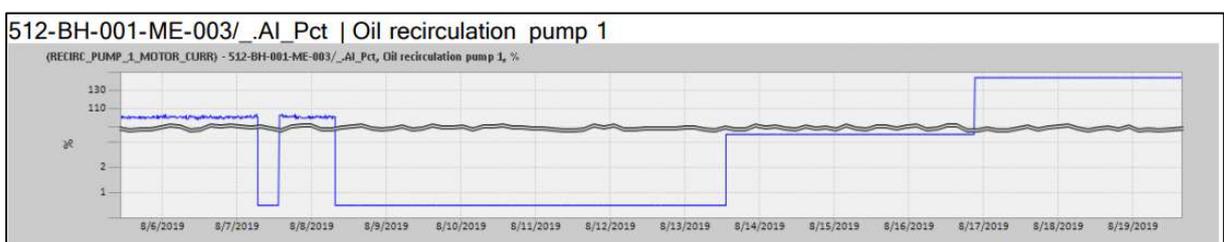


Figura 10 - Gráfico gerado no dia 19/08/2019.

Fonte: Relatório de casos Empresa X.

Após analisar as variáveis e o sistema da empresa, a equipe de manutenção constatou que a bomba estava desligada durante o período reportado e, em nenhum momento de operação

foi identificado valores de 144 %. Foi constatado também que a bomba não opera em conjunto com a outra, ou seja, as duas bombas são uma forma de redundância para o sistema não ficar parado. Segundo a GE, pode ter ocorrido algum bug no sistema que levou a gerar esse alerta falso, ilustrado na Figura 11.

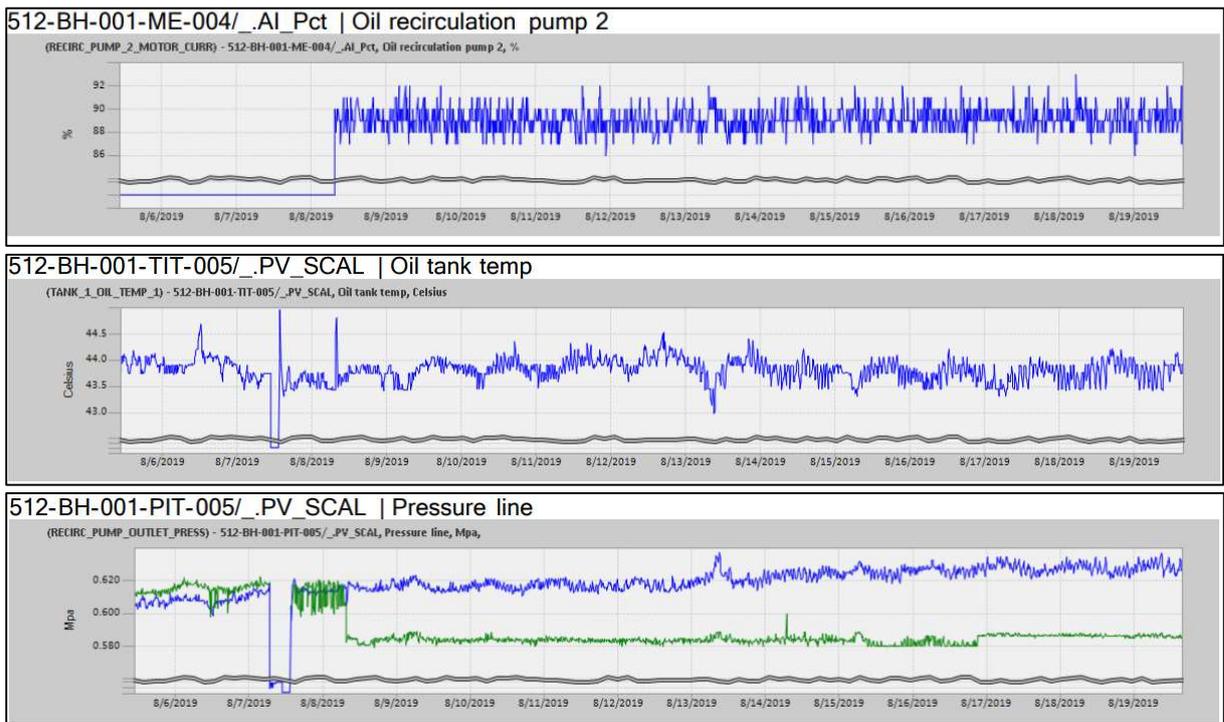


Figura 11 - Variáveis analisadas no dia 19/08/2019.

Fonte: Relatório de casos Empresa X.

5.2 Custo teórico evitado

Durante o período de operação da ferramenta na empresa, foram gerados muitos casos, que podem ser classificados como: equipamentos, performance, instrumentação, saúde do processo e outros. Os casos que possuem a classificação “equipamentos” dizem respeito a condição de uma máquina e os casos de “performance” já se enquadram em casos que afetam o desempenho do equipamento. Para “instrumentação”, são casos que dizem respeito apenas ao mau funcionamento de um sensor e “saúde de processo” refere-se aos casos que afetam ao funcionamento geral do processo.

O principal indicador para avaliar o desempenho da ferramenta pela Empresa X era o custo teórico evitado, que por sua vez era dividido em manutenção e produção. Apesar da

desenvolvedora da ferramenta afirmar que ocorre um aumento na confiabilidade, esse indicador não era calculado.

Para se avaliar o custo teórico evitado, utilizava-se uma metodologia fornecida pela desenvolvedora, no qual alguns fatores são extremamente relevantes, como o preço para extrair uma tonelada de minério, a probabilidade de um evento indesejado acontecer e o impacto que a falha causaria na produção e na manutenção.

O primeiro passo é determinar a probabilidade de uma falha acontecer, utilizando o fluxograma ilustrado na Figura 12.

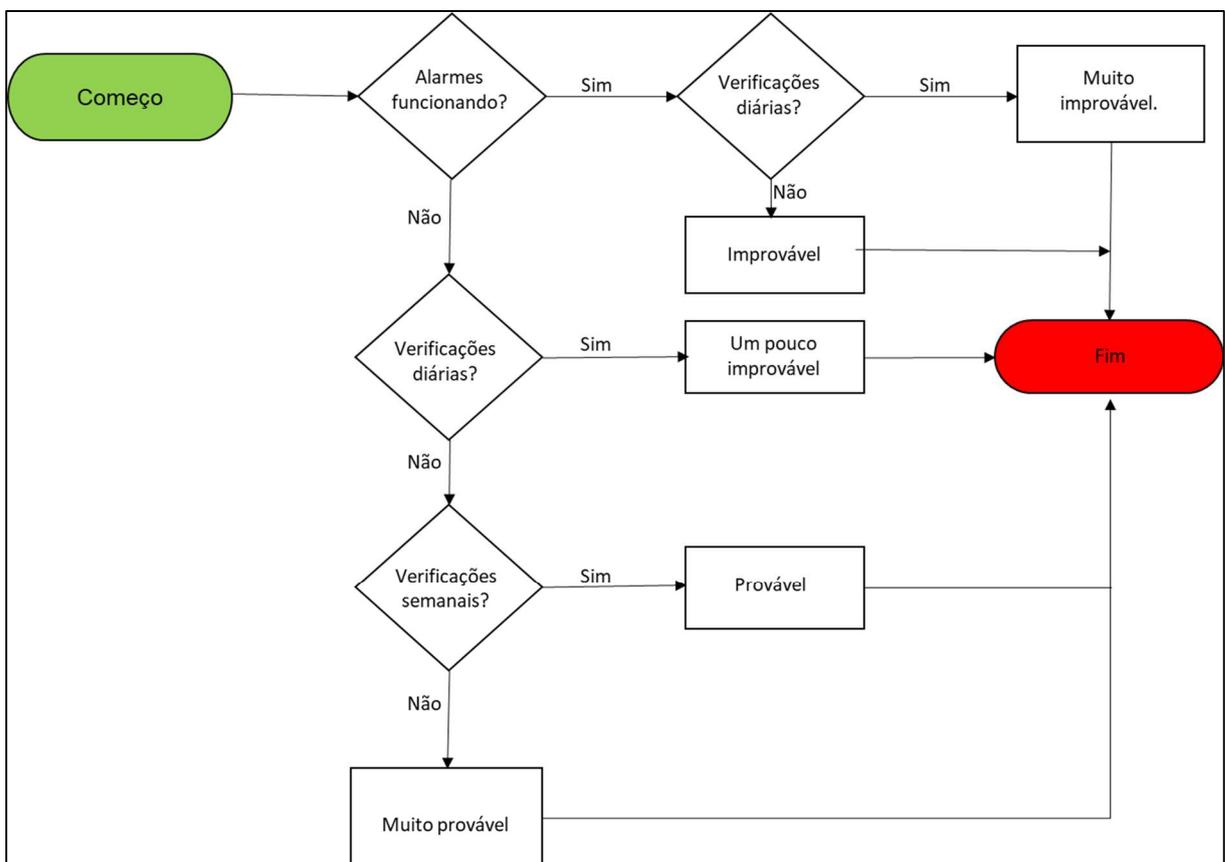


Figura 12 - Fluxograma para determinar a probabilidade de falha.

Fonte: Acervo Empresa X.

O segundo passo é determinar o impacto mecânico que uma falha pode causar, utilizando o fluxograma da Figura 13.

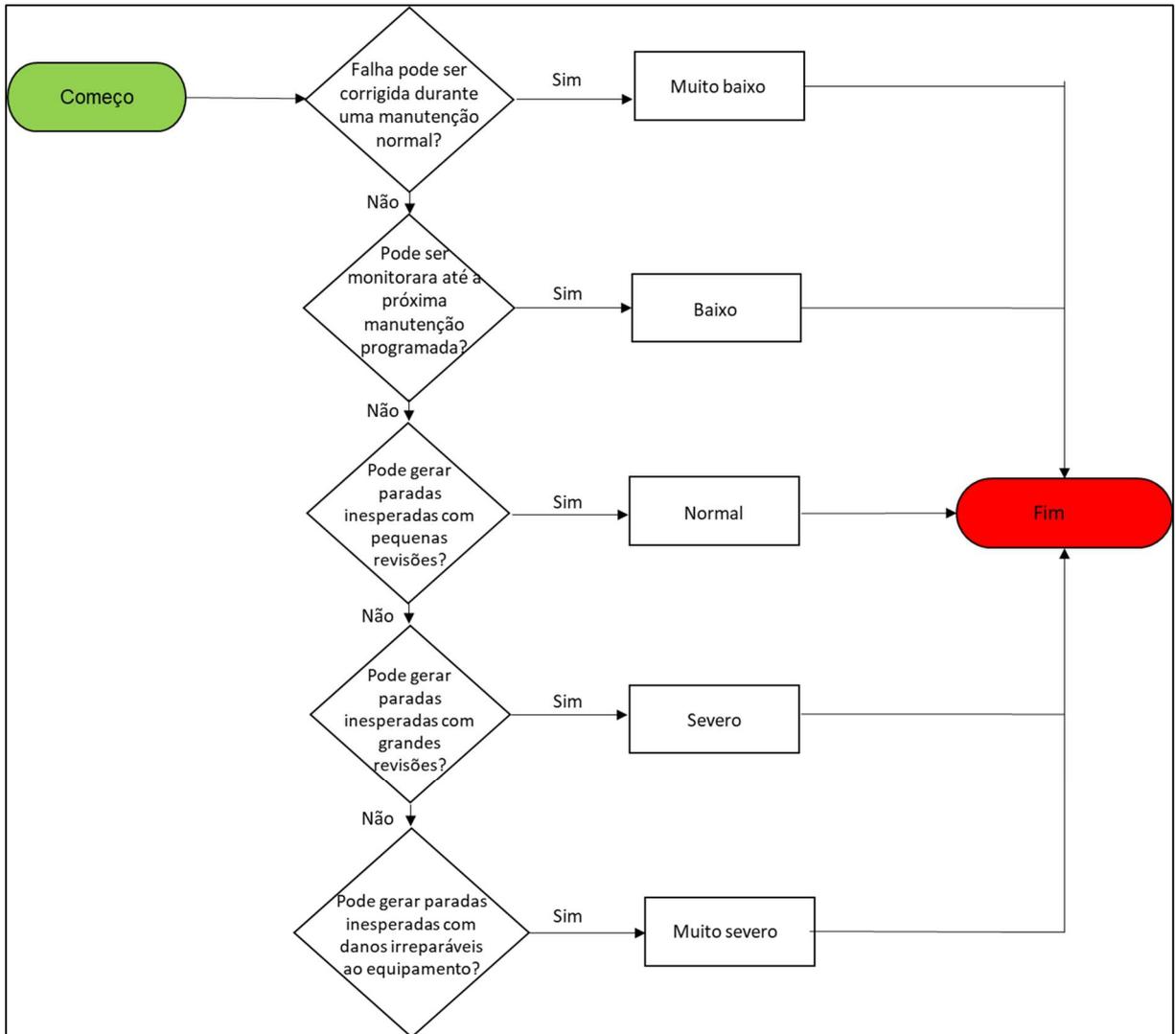


Figura 13 - Fluxograma para determinar o impacto mecânico.

Fonte: Acervo Empresa X.

O terceiro passo é determinar o impacto na produção da empresa em caso de uma falha utilizando o fluxograma da Figura 14.

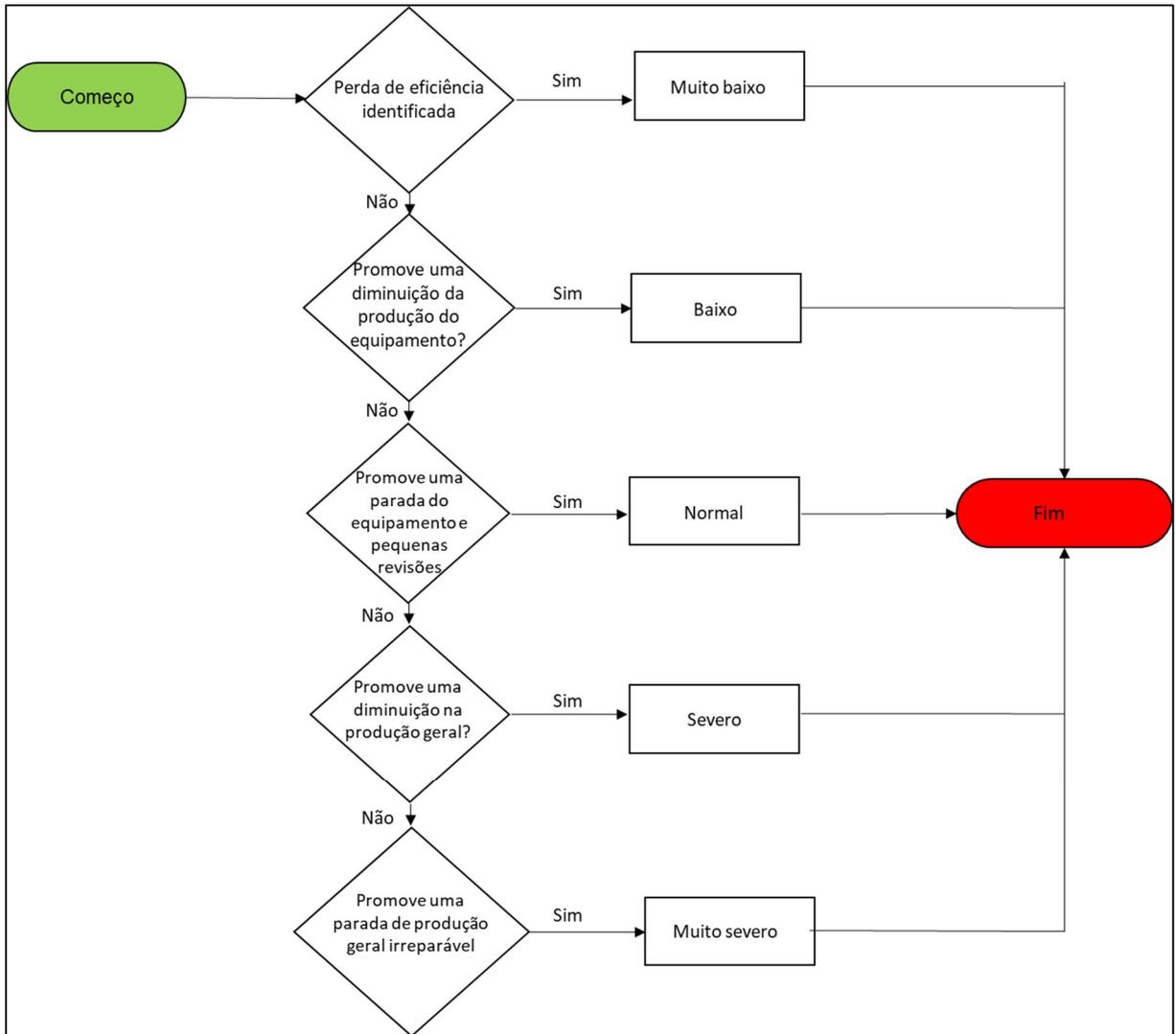


Figura 14 - Fluxograma para determinar o impacto na produção.

Fonte: Acervo Empresa X.

Após utilizar os fluxogramas, é possível determinar a probabilidade de uma falha acontecer e o impacto na produção e na manutenção. A metodologia segue para uma tabela de risco que relaciona probabilidade e impacto, demonstrada na Tabela 4.

Tabela 4 - Probabilidade x Impacto.

		Impacto				
		Muito baixo	Baixo	Normal	Severo	Muito severo
Probabilidade	Muito provável	18%	36%	54%	72%	90%
	Provável	15%	30%	45%	60%	75%
	Um pouco provável	10%	20%	30%	40%	50%
	Improvável	5%	10%	15%	20%	25%
	Muito improvável	2%	4%	6%	8%	10%

Fonte: Acervo Empresa X.

Seguindo com a metodologia, cada grupo de equipamentos possui um valor de custo evitado mecânico nominal, e uma quantidade de horas de produção perdida nominal, demonstradas na Tabela 5.

Tabela 5 - Grupo de equipamentos

Grupo de equipamentos	Custo evitado mecânico nominal	Horas de produção perdida nominal
Mineração: Forno rotativo (casco)	US\$ 95.000,00	120
Mineração: Suporte de rolamento principal do forno rotativo (Sistema de acionamento)	US\$ 100.000,00	96
Mineração: Sistema estável do forno rotativo	US\$ 70.000,00	72
Mineração: Transformador	US\$ 150.000,00	48
Mineração: Sistema de lubrificação	US\$ 65.000,00	72
Mineração: Unidades hidráulicas	US\$ 10.000,00	4

Fonte: Acervo Empresa X.

Possuindo todos os dados, é possível determinar o custo teórico evitado mecânico:

$$\text{Custo teórico evitado mecânico} = \text{Custo evitado mecânico nominal} \times X$$

Onde:

Custo evitado mecânico nominal = (Tabela 5, coluna 2).

X = Valor encontrado na matriz Probabilidade x Impacto (Tabela 4).

Para se calcular o custo evitado teórico de produção, utiliza-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned} \text{Custo evitado teórico de produção} &= \\ &= TF \times PPT \times \text{Horas de produção perdidas nominal} \times X \end{aligned}$$

Onde:

TF = Taxa de fluxo de material (fornecido pela Empresa X).

PPT = Preço por tonelada (fornecido pela Empresa X).

Horas de produção perdidas nominal = (Tabela 5, coluna 3).

Ao todo foram gerados 411 casos (Figura 15), no qual apenas 143 tiveram alguma ação efetiva por parte da equipe de manutenção (Figura 16).

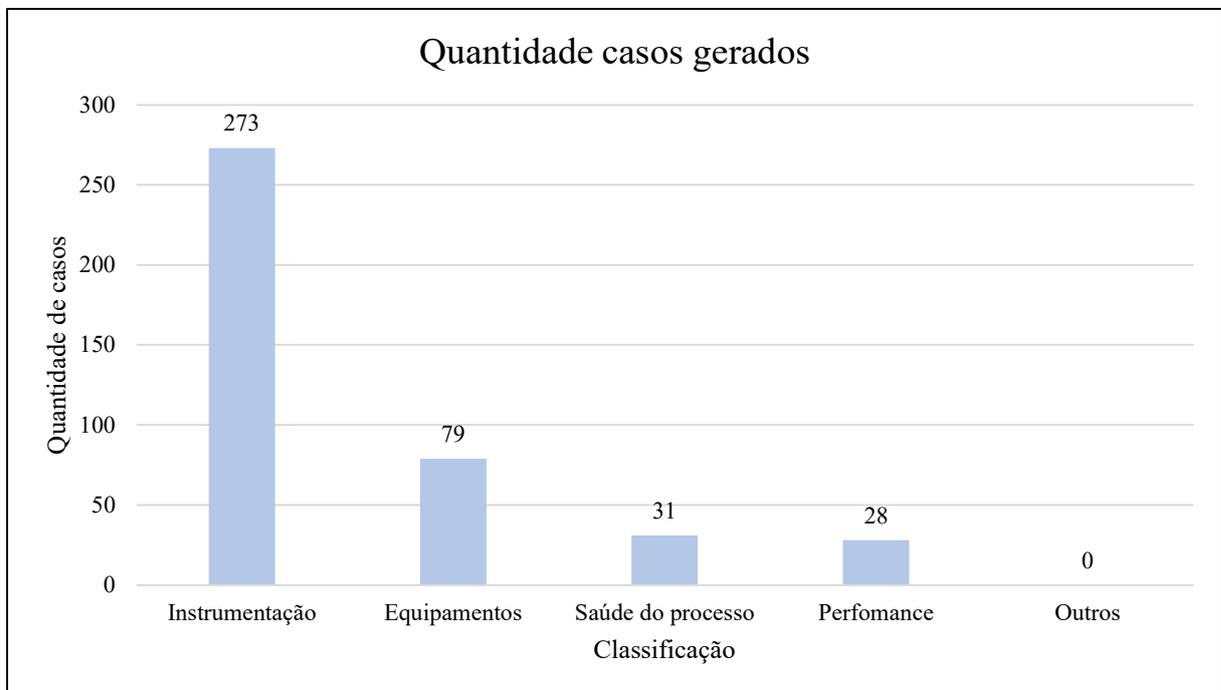


Figura 15 - Casos gerados

Fonte: o autor.

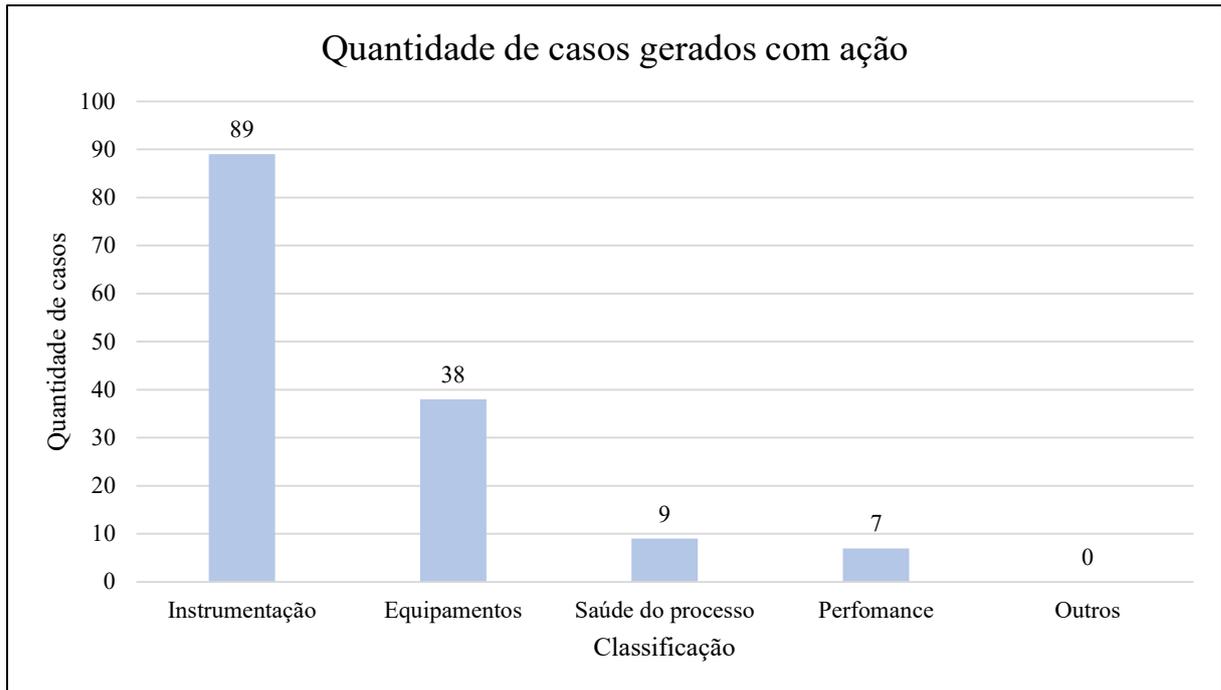


Figura 16 - Casos gerados com ação

Fonte: o autor.

Como já descrito no presente trabalho, o principal meio de avaliação de desempenho da ferramenta é a partir do custo teórico evitado. Por decisão gerencial, o período de utilização de teste do Predix foi de agosto de 2018 a junho de 2020. Após essa data, passaria a ser cobrado um valor de \$ 120.000,00 mensalmente. A avaliação de custo evitado foi feita a cada três meses, conforme demonstrada na Tabela 6.

Tabela 6 – Custo evitado teórico.

Custos Teórico Evitado			
Período	Custo teórico evitado mecânico	Custo teórico evitado de produção	Custo teórico evitado total
3Q/2018	US\$ 38.350,00	US\$ 18.828,66	US\$ 57.178,66
4Q/2018	US\$ 4.200,00	-	US\$ 4.200,00
1Q/2019	US\$ 12.400,00	US\$ 64.106,33	US\$ 76.506,33
2Q/2019	US\$ 62.400,00	US\$ 436.781,91	US\$ 499.181,91
3Q/2019	US\$ 40.400,00	US\$ 226.225,17	US\$ 266.625,17
4Q/2019	US\$ 4.560,00	US\$ 4.526,00	US\$ 9.086,00

Tabela 7 – Custo evitado teórico.

(continuação)

Período	Custos Teórico Evitado		
	Custo teórico evitado mecânico	Custo teórico evitado de produção	Custo teórico evitado total
1Q/2020	US\$ 16.730,00	US\$ 8.852,00	US\$ 25.582,00
2Q/2020	US\$ 61.060,00	US\$ 123.969,00	US\$ 185.029,00
Total	US\$ 240.100,00	US\$ 883.289,07	US\$ 1.123.389,07

Fonte: o autor.

Durante os primeiros meses de utilização, o processo ainda era instável, o que reflete nos valores evitados. A partir do 2Q/2019, o projeto passou a ter uma pessoa dedicada para tratar os casos, direcionando para suas respectivas áreas, acompanhando as manutenções e auxiliando na interface entre empresa e desenvolvedora.

Após o início da pandemia, causada pelo Covid-19, foi recomendada a modalidade de trabalho em casa, o que dificultou o tratamento dos casos gerados, o que também reflete nos valores evitados.

Algumas dificuldades encontradas no projeto foram:

- 88 % dos casos foram gerados para 20 ativos, o que representa apenas 50 % do escopo do projeto.
- 100 % dos benefícios gerados foram obtidos em 97 casos referentes a 18 ativos, o que representa 42 % do escopo do projeto.
- 69,7 % dos benefícios gerados estão associados a casos de instrumentação (Instrumento em falha).
- Apenas 35 % dos casos gerados e investigados durante a utilização da ferramenta eram de fato acionáveis e passíveis de ação por parte da manutenção, o que demonstra um nível de acerto relativamente baixo.
- Elevado número de casos falsos, causando uma desconfiança e uma baixa aderência por parte dos colaboradores.

6 CONCLUSÃO

A manutenção foi sendo modernizada ao longo dos anos, surgindo a necessidade de criação de novas tecnologias para se evitar uma parada não programada de um equipamento, fornecendo assim uma melhor confiabilidade para este. O processo de produção de grandes indústrias passa a ser mapeado desde o abastecimento inicial ao descarregamento final do produto, levando as empresas a investirem cada vez mais em desenvolvimento de técnicas e ferramentas.

A indústria 4.0 trabalha simbioticamente com a manutenção preditiva, criando meios para garantir o funcionamento desses mapeamentos. Sistemas de monitoramento on-line podem ser uma boa escolha, visando o custo-benefício.

A aplicação da ferramenta analisada neste trabalho gerou resultados considerados medianos sob o ponto de vista dos moderadores do projeto e decidiram por declinar da sua utilização. Durante toda a sua utilização, poupou-se um valor de US\$ 1.123.389,07, e, em comparação com o valor da mensalidade que passaria a ser cobrada de US\$ 120.000,00 não se enxergou um custo-benefício satisfatório. Outro fato que levou a não aquisição da ferramenta foi o nível de acerto relativamente baixo, o que gerou uma diminuição da aderência ao projeto por parte dos colaboradores da empresa.

Desta maneira, demonstrou-se por meio do presente estudo de caso, e confirmou-se a hipótese que sim, existe benefícios e dificuldades na utilização de ferramentas de monitoramento online de ativos e técnicas usadas na manutenção preditiva em uma operação de uma grande empresa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: **Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.

ALMEIDA, P. S. de. **Manutenção Mecânica Industrial - Conceitos Básicos e Tecnologia Aplicada**. São Paulo: Érica, 2014.

BAMAQ MÁQUINAS, **Análise de óleo: qual a sua importância e como fazer?** Contagem, 2020. Disponível em: <<https://www.bamaqmaquinas.com.br/blog/analise-de-oleo/>>. Acessado em: 09 de jun 2021.

CHAIKLIN, H. Case Study Research: Design and Methods. **The Journal of Nervous and Mental Disease**, [s. l.], v. 179, n. 2, 1991. Available at: <https://doi.org/10.1097/00005053-199102000-00025>

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Desafios para a indústria 4.0 no Brasil**. Brasília: CNI, 2016. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2016/8/desafios-para-industria-40-no-brasil/>. Acessado em: 01 de jun 2021.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Investimentos em Indústria 4.0**. Brasília: CNI, 2018. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/pqt-investimentos-em-industria-40/>. Acessado em: 02 de jun 2021.

CYRINO, L. **Transdutores de captação das vibrações**. 2017. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/transdutores-de-captacao-das-vibracoes/>>. Acessado em: 1 de jun. 2021.

GE ADDITIVE. 2021. Disponível em:< <https://www.ge.com/additive/>>. Acessado em: 17 de maio 2021.

GE AVIATION. 2021. Disponível em:< <https://www.geaviation.com/>>. Acessado em: 17 de maio 2021.

GE HEALTHCARE. **O que fazemos**, 2021. Disponível em:<<https://www.gehealthcare.com.br/about/about-ge-healthcare-systems>>. Acessado em: 18 de maio 2021.

GE. **Negócios**, 2021 Disponível em: < <https://www.ge.com/br/>>. Acessado em: 18 de maio 2021.

GE RENEWABLE ENERGY. 2021. Disponível em: < <https://www.ge.com/renewableenergy/home>>. Acessado em: 19 de maio de 2021.

GE REPORTS. 2016. Disponível em: < <https://gereportsbrasil.com.br/saiba-tudo-sobre-a-predix-plataforma-digital-da-ge-para-a-internet-industrial-c56158c2a3df>>. Acessado em: 21 de julho de 2021.

GE RESEARCH. **Transportation**, 2021. Disponível em:< <https://www.ge.com/research/sectors/transportation>>. Acessado em: 17 de maio 2021.

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

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595026971/>. Acessado em: 20 de fev 2021

GREGÓRIO, Gabriela; SANTOS, Danielle; PRATA, Auricélio. **Engenharia de manutenção**. 1. ed. São Paulo: Ed. Sagah educação S.A., 2018. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595025493/>. Acessado em: 06 de Jun 2021

HARTLEY, J. F. Case studies in organisational research. **Qualitative methods in organizational research : a practical guide**, [s. l.], 1994.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. *In:* , 2016. **Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences**. [S. l.: s. n.], 2016. Available at: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. **Acatech**, 2013.

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

KRAS. **Ultrassom Manutenção Preditiva**. São Paulo: 2020. Disponível em: <https://www.krasinspecao.com.br/ultrassom-para-manutencao-preditiva/ultrassom-manutencao-preditiva/>. Acessado em: 25, maio. 2021.

LEONARD BARTON, D. A. Dual methodology for case studies: synergistic use of longitudinal single with replicated multiple sites. **Organization Science**, v.1, 1990

MIGUEL, P.A.C., *et al.* **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2ª edição, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, R. M. da; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. **Modelagem de Sistema de Controle da Indústria 4.0 Baseada em Holon**, Agente, Rede de Petri e Arquitetura Orientada a Serviços. In: XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Natal, 2015.

SYKES, W. Validity and reliability in qualitative market research: a review of the literature. **Journal of the Market Research Society**, [s. l.], v. 32, n. 3, 1990.

TOOMER, E.; BOWEN, K.; GUMMESSON, E. Qualitative Methods in Management Research. **The Journal of the Operational Research Society**, [s. l.], v. 44, n. 7, 1993. Available at: <https://doi.org/10.2307/2584051>

VERRATI, Atilio Bruno. **Sistema básico de inspeção termográfica**. Disponível em: <https://docplayer.com.br/10165349-Sistema-basico-de-inspecao-termografica.html>. Acessado em 26, maio 2021.

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.