

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

PREDICTIVE MAINTENANCE AND INDUSTRY 4.0 A CASE STUDY OF THE IMPLEMENTATION OF A SYSTEM OF ONLINE ASSET MONITORING

Ariane Martins Caponi Lima¹; Lucas Gomes Espindula²; Cleber Caetano Thomazi³

Professor(a) do Curso de Engenharia Mecânica/FACEG¹. Email: arianecaponilima@gmail.com

Acadêmico do curso de Engenharia Mecânica²

Professor(a) do Curso de Engenharia Mecânica/FACEG³

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-chaves: 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.

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.

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. 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.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, 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.

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. Consequentemente, também pode atenuar os custos com falhas catastróficas e substituições de ativos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

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 1. No primeiro momento, apenas alguns equipamentos foram selecionados para receber o monitoramento, muitos pela sua criticidade, outros pela sua importância para o processo.

Tabela 1 – 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
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 supervisão 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 2.

Tabela 2 – 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

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 1.

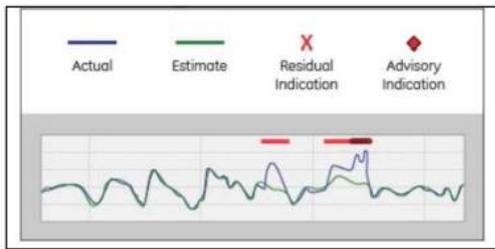
Figura 1 - Exemplo de um alerta gerado



Fonte: Relatório GE para Empresa X

Na legenda mostrada na Figura 2, 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.

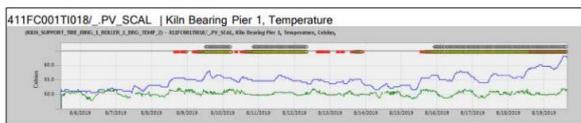
Figura 2 - Legenda do gráfico de um alerta gerado



Fonte: Relatório GE para Empresa X

No alerta ilustrado na Figura 3, 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.

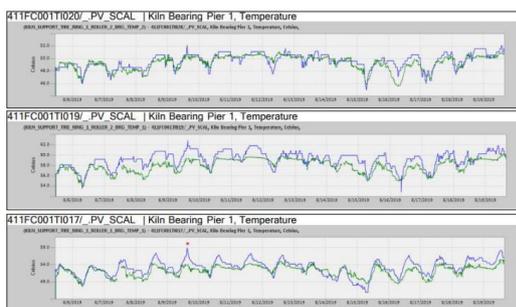
Figura 3 - Gráfico de um alerta gerado



Fonte: Relatório GE para Empresa X

Analisando os gráficos na Figura 4, 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 4 – Variáveis analisadas



Fonte: Relatório GE para 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 5. 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.

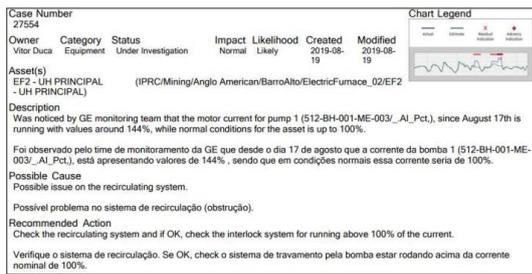
Figura 5 - Gráfico sistema da Empresa X.



Fonte: Relatório GE para 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 6, 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 %.

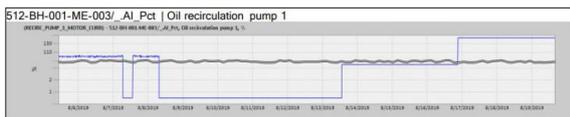
Figura 6 – Alerta gerado no dia 19/08/2019.



Fonte: Relatório GE para 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 7.

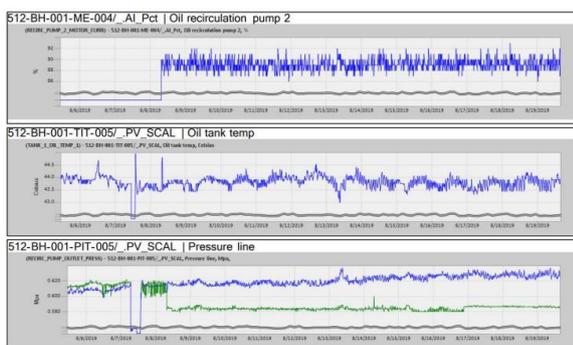
Figura 7 - Gráfico gerado no dia 19/08/2019



Fonte: Relatório GE para 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 8.

Figura 8 - Variáveis analisadas no dia 19/08/2019.

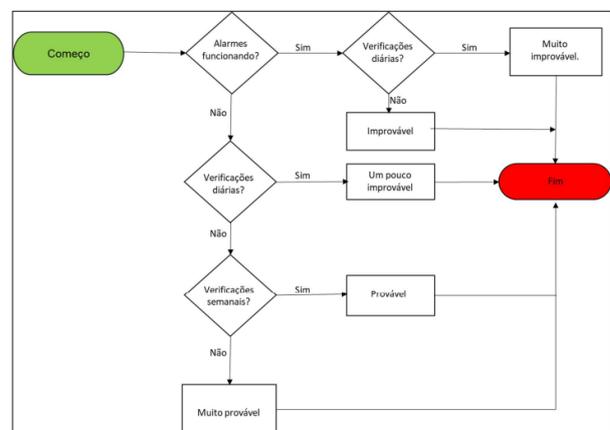


Fonte: Relatório GE para Empresa X

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 9.

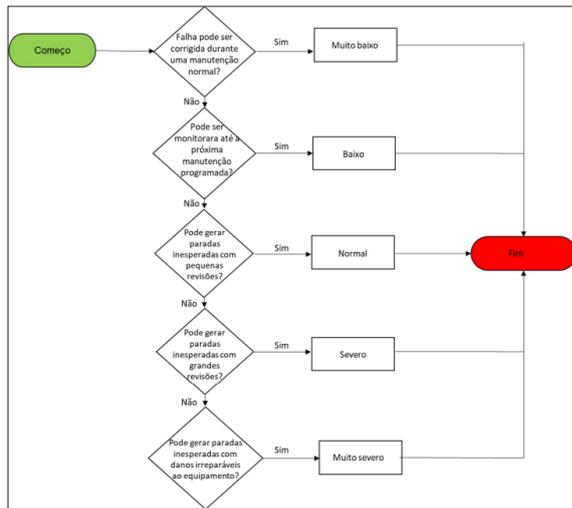
Figura 9 - Fluxograma para determinar a probabilidade de falha.



Fonte: Acervo Empresa X.

O segundo passo é determinar o impacto mecânico que uma falha pode causar, utilizando o fluxograma da Figura 10.

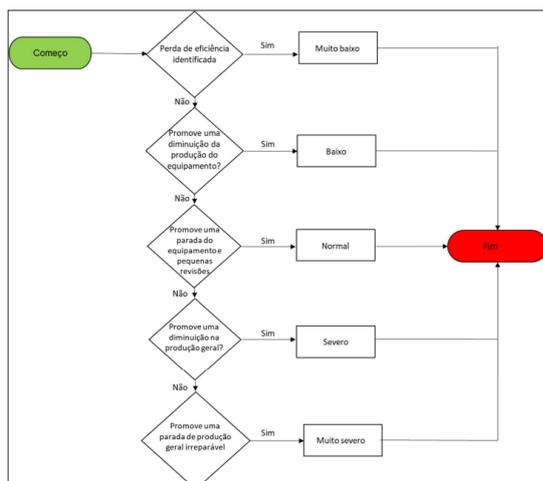
Figura 10 - Fluxograma para determinar o impacto mecânico.



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 11.

Figura 11 - 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 3.

Tabela 3 - 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 4.

Tabela 4 - 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:

$$Custo\ teórico\ evitado\ mecânico = Custo\ evitado\ mecânico\ nominal \times X$$

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

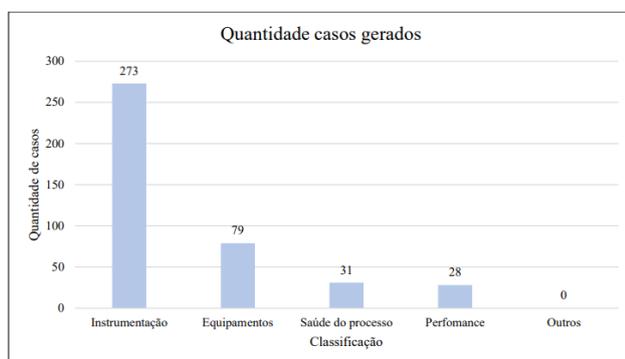
$$Custo\ evitado\ teórico\ de\ produção = TF \times PPT \times Horas\ de\ produção\ perdidas\ nominal \times X$$

Ao todo foram gerados 411 casos (Figura 12), no qual apenas 143 tiveram alguma ação efetiva por parte da equipe de manutenção (Figura 13)

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

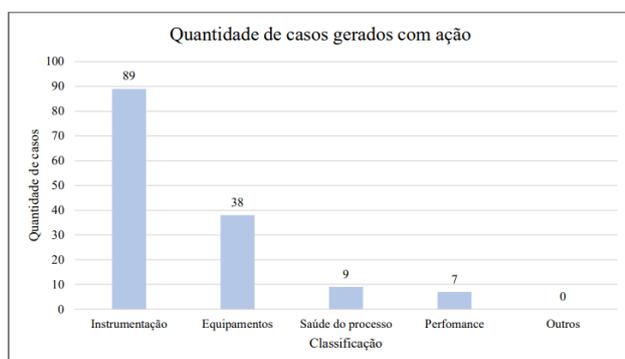
evitado foi feita a cada três meses, conforme demonstrada na Tabela 5.

Figura 12 - Casos gerados



Fonte: o autor.

Figura 13 - Casos gerados com ação



Fonte: o autor.

Tabela 5 – Custo evitado teórico.

Período	Custos Teórico Evitado		
	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\$ -	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
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.

CONSIDERAÇÕES FINAIS:

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 BIBLIOGRÁFICAS:

- 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: . 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-nobrasil/>. 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/pq-investimentos-em-industria-40/>. Acessado em: 02 de jun 2021.
- CYRINO, L. *Transdutores de captação das vibrações*. 2017. Disponível em: . 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: . 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-apredix-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/ultrassommanutencao-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
23. MIGUEL, P.A.C., et al. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. 2ª edição, Rio de Janeiro, 2012.
 24. 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.
 25. 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.
 26. 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>
 27. 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.
 28. 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.