

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ALEXANDRE CANHA

GABRIEL MELLO

**APLICAÇÃO DE SENSOR MULTIVARIÁVEL EM EQUIPAMENTOS
INDUSTRIAIS NA MINERAÇÃO DE CALCÁRIO**

PONTA GROSSA

2024

**ALEXANDRE CANHA
GABRIEL MELLO**

**APLICAÇÃO DE SENSOR MULTIVARIÁVEL EM EQUIPAMENTOS
INDUSTRIAIS NA MINERAÇÃO DE CALCÁRIO**

**Application of Multivariable Sensors in Industrial Equipment in Limestone
Mining**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Mezzadri

**PONTA GROSSA
2024**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ALEXANDRE CANHA
GABRIEL MELLO

**APLICACAO DE SENSOR MULTIVARIAVEL EM EQUIPAMENTOS
INDUSTRIAIS NA MINERACAO DE CALCARIO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 13/dezembro/2024

Felipe Mezzadri
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fernanda Cristina Correa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Virginia Helena Varotto Baroncini
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA
2024

Dedicamos este trabalho a Deus e às nossas
famílias, que nos ofereceram apoio
incondicional e força ao longo de todos esses
anos, sendo pilares fundamentais em nossa
trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos inicialmente a Deus pela vida, pelo discernimento e pela oportunidade de chegar a este momento tão significativo, concluindo este trabalho e recebendo o grau de Engenheiro Eletricista.

Eu, Alexandre Canha expresso meu profundo reconhecimento à minha família, que foi minha base em todos os instantes. À minha mãe, Rosilda, agradeço pela força, amor incondicional e sábios conselhos; à minha irmã, Hallana, pela cumplicidade e incentivo constantes; à minha avó, Apolonia, pelo carinho e exemplos de perseverança; e à minha namorada, Luiza, por seu apoio, encorajamento, que tornaram cada obstáculo mais leve. A cada um de vocês, devo não apenas este diploma, mas também a formação do meu caráter e a inspiração necessária para seguir adiante.

Eu, Gabriel Mello, agradeço a toda minha família que prestou todo apoio para minha pessoa, desde o início da minha trajetória acadêmica até aqui, fazendo o possível e impossível para chegar até a esse momento tão gratificante. Em especial agradeço aos meus pais, José Luiz e Isabel, e ao meu irmão, Samuel, por todos os momentos que me deram forças nessa trajetória e por todos os conselhos estimulando a seguir a caminhada, agradeço também por sempre me estimularem a ser uma pessoa ética e profissional, moldando meu caráter como ele é hoje. Agradeço a minha namorada, Amanda, que nos momentos de fraqueza me estimulou a seguir em busca desse sonho e tornando esse desafio mais fácil de ser encarado. A todos vocês o meu mais sincero muito obrigado.

Aos professores e, em especial, ao orientador Prof. Dr. Felipe Mezzadri, que com sua orientação, conhecimento técnico e confiança contribuíram decisivamente para o desenvolvimento deste trabalho; aos docentes que compartilharam saberes, experiências e valores ao longo de nossa formação; e às amizades construídas na graduação, que levaremos para a vida, nossa sincera gratidão.

Agradecemos à Pró-Reitoria de Relações Empresariais e Comunitárias (PROREC) e à Diretoria da Agência de Inovação (DIRAGI) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela oportunidade proporcionada através do Edital 03/2024 – Bolsas "TCC Inovação". O apoio financeiro e a valorização de iniciativas voltadas à inovação tecnológica foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, permitindo a concretização de ideias e o fortalecimento da nossa formação acadêmica e profissional.

Agradecemos também à empresa estudada e ao seu diretor, Marcos, pela oportunidade de conhecer em profundidade as operações e tecnologias. A confiança depositada ao permitir o acesso aos dados e o acompanhamento técnico foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradecemos a todos que contribuíram para que este trabalho se concretizasse. Cada gesto, palavra de incentivo e orientação fez a diferença. A cada um, deixamos nossa sincera gratidão, consciente de que ninguém trilha um caminho tão desafiador sozinho.

RESUMO

O presente projeto visa realizar uma verificação experimental da supervisão sistemática do controle e monitoramento de máquinas industriais, utilizando o sensor Smart Trac - Sensor. Espera-se, como resultado, a aquisição de dados por meio do sensor, que incluirão informações como temperatura, vibração e dados operacionais, como velocidade RMS e aceleração. A partir dos dados coletados, será iniciado o desenvolvimento do controle e monitoramento do ativo (equipamentos industriais). A pesquisa será conduzida em uma indústria de mineração de calcário, abrangendo uma série de ensaios experimentais. O objetivo principal é não apenas identificar melhorias nos processos, mas também enfatizar e aprimorar a eficiência operacional da planta. O estudo se propõe a desenvolver indicadores de desempenho e planos estratégicos de gestão. Esses indicadores serão fundamentais para avaliar e mensurar o funcionamento dos equipamentos, enquanto os planos de gestão terão foco na manutenção eficiente dos ativos monitorados. O intuito é não somente garantir a funcionalidade, mas também maximizar a vida útil e o rendimento dos equipamentos, contribuindo significativamente para a operação sustentável e otimizada da planta industrial.

Palavras-chave: mineração; calcário; sensor multivariável; equipamentos industriais.

ABSTRACT

The present project aims to carry out an experimental verification of the systematic supervision of the control and monitoring of industrial machines, using the Smart Trac sensor. As a result, data acquisition is expected through the sensor, which will include information such as temperature, vibration and operational data such as RMS speed and acceleration. Based on the data collected, the development of control and monitoring of the asset (industrial equipment) will begin. The research will be conducted in a limestone mining industry, covering a series of experimental tests. The main objective is not only to identify process improvements, but also to emphasize and improve the plant's operational efficiency. The study aims to develop performance indicators and strategic management plans. These indicators will be fundamental for evaluating and measuring the functioning of equipment, while management plans will focus on the efficient maintenance of monitored assets. The aim is not only to guarantee functionality, but also to maximize the useful life and performance of the equipment, contributing significantly to the sustainable and optimized operation of the industrial plant.

Keywords: minig; limestone; multivariable sensor; industrial equipment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da Indústria.	14
Figura 2 – Motor Elétrico Trifásico.	17
Figura 3 – Smart Trac Pro.	24
Figura 4 – Smart Receiver Pro.	25
Figura 5 – Representação de Rotação das Gaiolas.	27
Figura 6 – Representação das Gaiolas.	27
Figura 7 – Representação dos Eixos.	28
Figura 8 – Instalação Sensores - Moinhos.	33
Figura 9 – Instalação Sensores - Peneiras.	35
Figura 10 – Instalação Recptor.	36
Figura 11 – Árvore de Ativos.	37
Figura 12 – Ficha Técnica do Equipamento.	38
Figura 13 – Supervisório.	39
Figura 14 – Acompanhamento dos Indicadores.	40
Figura 15 – Velocidade RMS - Moinho 01.	42
Figura 16 – Aceleração RMS - Moinho 01.	42
Figura 17 – Velocidade RMS - Moinho 02.	44
Figura 18 – Aceleração RMS - Moinho 02.	44
Figura 19 – Identificação do Aumento de Velocidade RMS.	46
Figura 20 – Espectro de Frequência.	46
Figura 21 – Identificação de Desgaste.	47
Figura 22 – Espectro de Frequência Para Coleta - Desgaste.	49
Figura 23 – Comparação Temporal de Manutenção.	49
Figura 24 – Comparação Temporal de Manutenção - Peneira 04.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações Técnicas do Equipamento.	25
Tabela 2 – Histórico de Substituição do Rolamento M241549/10 (Timken).	29
Tabela 3 – Histórico de Substituição do Rolamento JHM720249/10 (Timken).	29
Tabela 4 – Comparação de Valores de Velocidade RMS.	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3	JUSTIFICATIVA	12
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	PROCESSO DE MINERAÇÃO DE CALCÁRIO	14
2.1.1	Sondagem	15
2.1.2	Decapagem do Solo	15
2.1.3	Perfuração, alocação de explosivos e detonação	15
2.1.4	Transporte	15
2.1.5	Britagem Primária	16
2.1.6	Moagem	16
2.2	EQUIPAMENTOS E MÁQUINAS INDUSTRIAIS	16
2.2.1	Motores Elétricos de Indução	16
2.2.2	Manutenção	18
2.2.3	Moinhos	18
<u>2.2.3.1</u>	<u>Manutenções Recorrentes</u>	19
2.2.4	Peneiras	19
<u>2.2.4.1</u>	<u>Manutenções Recorrentes</u>	20
2.3	SENSORIAMENTO DE EQUIPAMENTOS	20
2.3.1	Manutenção Preditiva e Análise de Vibração	20
2.3.2	Parâmetros Utilizados para o Monitoramento de Equipamentos	21
<u>2.3.2.1</u>	<u>Vibração</u>	21
<u>2.3.2.2</u>	<u>Velocidade RMS</u>	21
<u>2.3.2.3</u>	<u>Aceleração RMS</u>	22
2.3.3	Tipos de monitoramento	22
2.3.4	Tomada de decisão baseada em dados	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	24

3.2	LEVANTAMENTO DOS ATIVOS A SEREM MONITORADOS	26
3.3	APLICABILIDADE DOS SENSORES	26
3.4	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DO PROJETO	29
3.5	INSTALAÇÃO FÍSICA DOS SENSORES E CONECTIVIDADE	31
3.6	SISTEMA SUPERVISÓRIO	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	MANUTENÇÃO MOINHO 01	41
4.2	MANUTENÇÃO MOINHO 02	43
4.3	MANUTENÇÃO PENEIRA 04	50
5	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A extração mineral representa uma das principais forças impulsionadoras da economia brasileira. Hoje, abarcando apenas 0,5% do território nacional, a atividade mineradora contribui substancialmente para o cenário econômico, correspondendo a 16,8% do Produto Interno Bruto (PIB) Industrial do país. Além disso, gera cerca de 190 mil postos de trabalho diretos e 2 milhões de empregos indiretos, gerando um faturamento anual de aproximadamente US\$38 bilhões (IBRAM, 2020).

O Brasil é um significativo produtor mineral, com inúmeras reservas de minérios. A atividade mineradora no Brasil tem raízes que remontam ao período colonial, quando se buscava o ouro no interior do país, e desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento industrial do Brasil (BARRETO *et al.*, 2001).

O presente estudo insere-se no campo da exploração mineral do calcário, corretivo de solo mais utilizado na agricultura. É um material de baixa solubilidade em água, Encontrado na natureza em dois tipos: o calcítico e dolomítico. Atua na correção da acidez do solo, e sua ação de neutralização varia de acordo com a umidade da terra e a superfície de contato, de modo a adequar o solo para plantio, com fornecimento de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (TEDESCO; GIANELLO, 2000).

Os processos para a extração do calcário são feitos a partir das seguinte etapas: (1) Identificação da existência de calcário no subsolo; (2) Perfuração para alocação de explosivos; (3) Detonação dos explosivos inseridos nas perfurações; (4) Mobilização das rochas para beneficiamento; (5) Britagem primária; (6) Moagem do material produzido na britagem primária e transformado em pó; (7) Armazenagem; (8) Comercialização do calcário (CAMARGOS, 2021).

Os sistemas de monitoramento exercem uma função de extrema relevância na configuração da administração organizacional, circunstância pela qual deixaram de ser percebidos como simples instrumentos operativos ou de engenharia, e evoluíram para serem reconhecidos como uma fonte de informação crucial. No presente momento, os sistemas de monitoramento de procedimentos industriais automatizados realizam três tarefas fundamentais: monitoramento, execução e regulação (UDDIN; NOR; SALAM, 2000).

O conjunto de indicadores é um sistema que, por meio de modelos de causa e efeito e de diferentes perspectivas, possibilita compreender o comportamento e desempenho de uma organização, criar projeções em relação ao seu futuro e tomar decisões embasadas de maneira sólida (JR; SCUCUGLIA, 2012).

A partir do entendimento das etapas presentes no beneficiamento do calcário, é proposto, portanto, a aquisição de dados do processo industrial visando garantir a confiabilidade de equipamentos para a tomada de decisão.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste estudo é realizar uma supervisão sistemática das máquinas industriais em uma instalação de mineração de calcário. O intuito de identificar antecipadamente situações de falha ou a necessidade de manutenção corretiva.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as condições operacionais dos equipamentos industriais em uso na planta da mineradora em estudo.
- Analisar as características construtivas do sensor a ser instalado e avaliar sua adequação à aplicação proposta.
- Identificação dos equipamentos críticos para monitoramento contínuo.
- Elaborar um estudo de viabilidade econômica para avaliar a implantação do projeto.
- Analisar dados históricos de manutenção para identificar padrões de falhas e áreas de melhoria.
- Avaliar os benefícios esperados da aplicação dos planos de manutenção em termos de redução de paradas não programadas e aumento da eficiência da produção.
- Elaborar recomendações finais para a gestão da mineradora com base nos resultados obtidos.

1.3 JUSTIFICATIVA

Empresas do setor enfrentam desafios significativos em relação à operação e manutenção de seus equipamentos. Falhas inesperadas nesses componentes podem resultar em paradas não programadas da produção, causando prejuízos substanciais, tanto em termos financeiros quanto em termos de tempo de produção perdido.

O presente trabalho justifica-se pela necessidade premente de melhorar a gestão da manutenção desses ativos críticos na plantas industriais do setor. A análise detalhada do estado operacional, a identificação de pontos críticos de falha e o desenvolvimento de planos de manutenção preventiva e preditiva são passos fundamentais para minimizar a ocorrência de paradas inesperadas e otimizar a utilização desses recursos.

Portanto, este estudo visa contribuir para a melhoria da eficiência operacional da mineradora, promovendo uma abordagem mais proativa e estratégica em relação à manutenção de seus ativos críticos, o que, por sua vez, pode servir como um modelo para outras empre-

sas do setor. Além disso, busca-se fornecer *insights* relevantes para a comunidade profissional interessada no campo da gestão de ativos e manutenção industrial.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Os capítulos deste trabalho estão divididos conforme as estruturas descritas a seguir.

O Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica, abordando detalhadamente o processo de mineração de calcário, com foco em suas etapas distintas e nos equipamentos empregados tanto na extração quanto no beneficiamento. Além disso, são discutidos alguns dos principais equipamentos industriais utilizados no processo minerário, seus tipos e as manutenções recorrentes necessárias para garantir sua eficiência. Este capítulo também contempla uma introdução aos conceitos de manutenção, destacando suas diferentes abordagens e estratégias. Adicionalmente, são explorados os parâmetros utilizados no monitoramento dos equipamentos, com ênfase em sua importância para a tomada de decisão baseada em dados, visando a otimização operacional e o aprimoramento contínuo dos processos industriais relacionados à mineração de calcário.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia adotada para a execução do projeto, detalhando cada etapa das atividades propostas. Serão abordadas as informações técnicas do sensor utilizado, incluindo suas características e aplicabilidade, bem como o levantamento dos ativos a serem monitorados. Além disso, o capítulo contempla a análise de viabilidade econômica do projeto, a instalação física dos sensores e sua respectiva conectividade, e a integração com o sistema supervisório. Também será apresentado o plano de ação, que orientará o desenvolvimento e a implementação do projeto.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos a partir do estudo desenvolvido, destacando os principais achados e análises realizadas. Este capítulo também discute as projeções e impactos previstos com a aplicação do modelo de execução proposto, ressaltando os desdobramentos potenciais e as contribuições esperadas para a eficiência operacional e a manutenção preditiva no contexto da mineração de calcário.

E por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas ao longo da realização do projeto, sintetizando os principais *insights* e aprendizados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

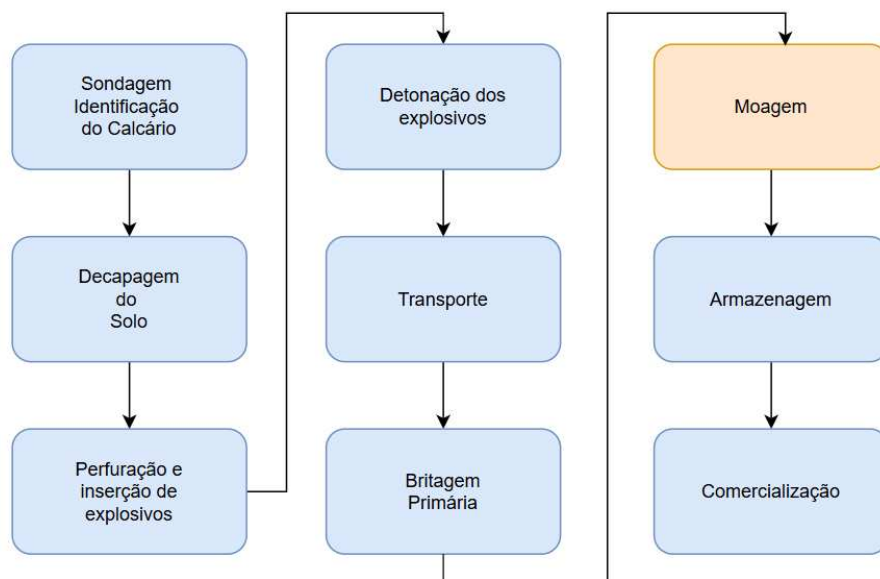
Este capítulo tem por finalidade apresentar os fundamentos teóricos relacionados à mineração de calcário, abrangendo suas etapas principais, desde a extração até o beneficiamento. Também são discutidos os equipamentos empregados no processo minerário, destacando suas características, tipos e manutenções recorrentes.

Além disso, serão abordados os dispositivos de aquisição e tratamento de dados, com ênfase nos sensores utilizados e em seus parâmetros de monitoramento. Esses conceitos são explorados para proporcionar uma compreensão detalhada sobre seu funcionamento, sua aplicabilidade e a relevância para a otimização dos processos industriais. Por fim, o capítulo inclui uma introdução aos conceitos de manutenção, elucidando estratégias e abordagens fundamentais no contexto industrial.

2.1 PROCESSO DE MINERAÇÃO DE CALCÁRIO

A Figura 1 ilustra o fluxograma do processo de mineração, destacando de maneira abrangente todas as etapas, desde a extração do calcário até sua comercialização. Esse fluxograma oferece uma visão clara e detalhada da operação, evidenciando a complexidade e a interdependência das atividades ao longo de toda a cadeia produtiva. A etapa onde o estudo está concentrado e sendo aplicado está identificada pela cor laranja no fluxograma, destacando sua importância para a eficiência e o aprimoramento das operações.

Figura 1 – Fluxograma da Indústria.



Fonte: Autoria própria, 2024

2.1.1 Sondagem

Com o propósito de identificar áreas potenciais contendo depósitos de minério de calcário, são realizadas sondagens geológicas. Essas investigações envolvem o uso de técnicas como análises geoquímicas, levantamentos geofísicos e mapeamento geológico para determinar a presença e extensão dos depósitos de calcário. Além disso, a prospecção por meio de métodos modernos, como o sensoriamento remoto e o uso de tecnologias avançadas de imagem, tem se mostrado eficaz na identificação preliminar dessas áreas. A identificação precisa desses depósitos é crucial para o planejamento estratégico e o desenvolvimento sustentável de atividades industriais e agrícolas que dependem desse recurso mineral (CAMARGOS, 2021).

2.1.2 Decapagem do Solo

Nesta fase, ocorre a supressão da vegetação que recobre a jazida de calcário, seguida pela remoção de todo o material superficial, incluindo solo e minerais, até atingir a rocha de calcário. Esse processo visa expor a rocha carbonática subjacente para facilitar a extração do calcário. A preparação do terreno para a extração do calcário geralmente envolve métodos de remoção de solo e vegetação que minimizam o impacto ambiental, como o uso de técnicas de recuperação de áreas degradadas após a exploração mineral. Além disso, é importante ressaltar a aplicação de medidas de mitigação para preservar ecossistemas próximos e promover práticas de mineração sustentável (CAMARGOS, 2021).

2.1.3 Perfuração, alocação de explosivos e detonação

Através do uso de uma perfuratriz pneumática, é possível realizar a perfuração da rocha para a inserção de explosivos, e a detonação controlada é realizada. Isso resulta na fragmentação da rocha, tornando mais fácil o seu transporte para as instalações de beneficiamento. É importante ressaltar que, juntamente com os avanços tecnológicos, surgiram métodos mais precisos e seguros para a detonação controlada, visando não só a eficiência na extração, mas também a redução dos impactos ambientais e dos riscos à segurança dos trabalhadores. Além disso, a otimização desse processo é fundamental para a redução de desperdícios e para a maximização da recuperação do minério durante as etapas de beneficiamento subsequente (CAMARGOS, 2021).

2.1.4 Transporte

A movimentação de pedras menores de minérios brutos para o carregamento nos caminhões é um passo essencial na logística do transporte da matéria-prima. Esse processo

requer o uso de maquinários de alta capacidade mecânica, como carregadeiras ou pás de grande porte, adaptados para manejar eficientemente volumes consideráveis de materiais pesados (CAMARGOS, 2021).

2.1.5 Britagem Primária

O beneficiamento consiste na fragmentação das rochas e é executado dentro da planta industrial da unidade. Este procedimento envolve uma linha contínua que compreende britadores primários, correias transportadoras e peneiras vibratórias, cujo objetivo é reduzir o material extraído até alcançar a granulometria desejada para sua utilização posterior. Durante as etapas de processamento, o material é submetido a sucessivas fragmentações até atingir as especificações necessárias. Se, porventura, a granulometria desejada não for alcançada, o material é submetido novamente ao processo de beneficiamento. Esse ciclo de retrabalho visa garantir a conformidade com os requisitos estabelecidos, assegurando a qualidade e uniformidade do material final (CAMARGOS, 2021).

2.1.6 Moagem

Após o ciclo de britagem, o produto passa então pelo moinhos para que então seja transformado em pó, produto este que posteriormente será armazenado e comercializado.

Após o estágio de britagem, o material resultante segue para os moinhos, onde passa por um processo de redução adicional até alcançar a forma de pó. Esse produto final, é armazenado em condições adequadas para posterior comercialização (CAMARGOS, 2021).

A transformação em pó é crucial, pois confere ao material características específicas que atendem às demandas de diversas indústrias. Esse pó resultante do beneficiamento pode ser utilizado em uma ampla gama de aplicações, como corretivo agrícola, produção de cimento, fabricação de cerâmicas, indústria química, entre outras.

Como introdução a esse panorama intrincado, a próxima seção explorará em detalhes os equipamentos elétricos utilizados nesse processo, destacando seu papel fundamental na eficiência e no êxito do ciclo de mineração de calcário.

2.2 EQUIPAMENTOS E MÁQUINAS INDUSTRIAIS

2.2.1 Motores Elétricos de Indução

O motor de indução trifásico, comumente denominado MIT, destaca-se como a escolha predominante em instalações industriais devido à sua robustez e vantagens significativas em termos de custo, eficiência energética e manutenção simplificada (CAPELLI, 2008).

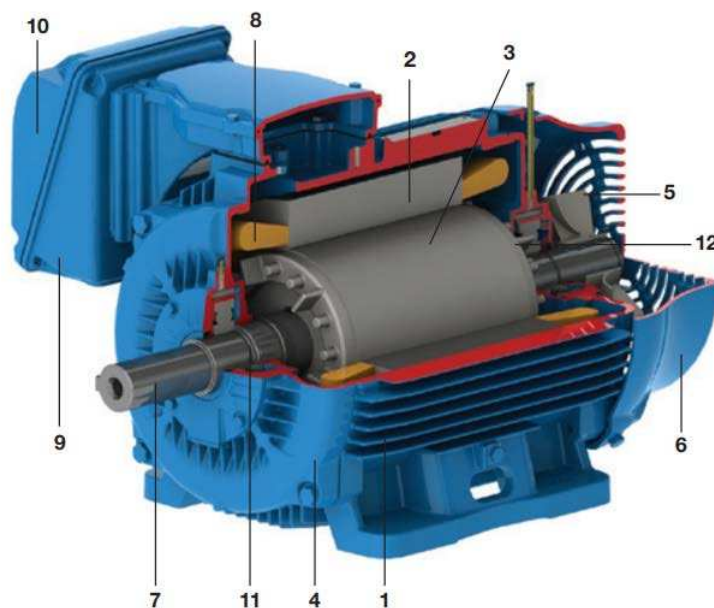
Constituindo uma máquina dinâmica que converte energia elétrica em energia mecânica rotacional, este dispositivo é composto por duas partes fundamentais. O estator, parte estática e externa, é prontamente visível e abriga as bobinas geradoras de fluxo magnético, bem como as entradas de energia para alimentação. Por outro lado, o conjunto rotórico inclui o eixo e o rotor, que pode ser equipado com as hélices do sistema de ventilação. Vale notar que os rotores podem ser do tipo bobinado ou do tipo gaiola de esquilo (WEG, 2012).

O rotor do tipo gaiola de esquilo é composto por barras condutoras dispostas em série e inseridas em ranhuras na superfície do rotor. Estas barras são conectadas em curto-circuito em suas extremidades através de anéis. Quanto ao rotor bobinado possui um conjunto de enrolamentos semelhantes ao estator. Os enrolamentos do rotor são colocados em curto-circuito por meio de escovas (CHAPMAN, 2013).

Ao alimentar o enrolamento do estator, uma tensão é induzida no enrolamento do rotor. Esse campo eletromagnético entre estator e rotor faz com que ocorra o movimento (CHAPMAN, 2013).

A Figura 2 apresenta uma visão ampla de um MIT do tipo gaiola de esquilo.

Figura 2 – Motor Elétrico Trifásico.



Fonte: Adaptado guia de especificações técnicas WEG, 2023

Legenda:

(1) - Carcaça; (2) - Núcleo de chapas estator; (3) - Núcleo de chapas rotor; (4) - Tampa; (5) - Ventilador (6) - Tampa defletora; (7) - Eixo; (8) - Enrolamento Trifásico; (9) - Caixa de ligação; (10) - Terminais; (11) - Rolamentos; (12) - Barras e anéis de curto-circuito;

2.2.2 Manutenção

Aumentar a longevidade de motores elétricos requer a vigilância constante de fatores que afetam diretamente seu funcionamento. A avaliação constante de indicadores como vibração, corrente e temperatura é crucial para identificar eventuais falhas nos motores elétricos.

Segundo Monchy (1989), “A Manutenção dos equipamentos de produção é um elemento chave tanto para a produtividade das indústrias quanto para a qualidade dos produtos. É um desafio industrial que implica rediscutir as estruturas atuais inertes e promover métodos adaptados á nova natureza dos materiais”.

A gestão da manutenção de ativos desempenha um papel crucial nas organizações, sendo uma função estratégica que impacta diretamente a disponibilidade dos ativos e desempenha um papel vital nos resultados da empresa. A eficácia da gestão da manutenção está intrinsecamente ligada à qualidade dos resultados obtidos (OTANI; MACHADO, 2008).

2.2.3 Moinhos

São equipamentos de moagem utilizados para reduzir o tamanho de partículas sólidas em diversos processos industriais. Na indústria de calcário, os moinhos têm o papel fundamental de transformar o material em partículas finas para aplicações como cimento e outros produtos derivados (EDWARDS, 2018). Os moinhos são essenciais na produção de partículas finas para diversas aplicações industriais. Especialmente na produção de cimento e produtos derivados de calcário, os moinhos operam moendo o material por meio de diferentes mecanismos, adequando a um determinado tamanho de partículas e características do material (KUTZ, 2017).

Entre os tipos de moinhos, observa-se:

(1) Moinho de Martelo: Este moinho utiliza martelos rotativos para atingir e fragmentar o material, sendo especialmente eficaz na redução de partículas de grande tamanho para tamanhos médios ou finos (WEISS, 1985).

(2) Moinho de Bolas: Composto por um cilindro giratório parcialmente preenchido com esferas de aço, realiza a moagem do material por meio de impactos repetidos. Esse tipo de moinho é amplamente utilizado na produção de pó fino, essencial para a fabricação de cimento (EDWARDS, 2018).

(3) Moinho Vertical de Rolos: Opera com rolos que se movem sobre uma superfície de moagem horizontal, comprimindo o material sob alta pressão. Este equipamento destaca-se pela eficiência energética e pela capacidade de proporcionar uma moagem uniforme, sendo ideal para indústrias que demandam alta produtividade com menor consumo de energia (KUTZ, 2017).

A escolha do tipo de moinho mais adequado depende das características do material a ser processado e da classificação granulométrica desejada, fatores cruciais para garantir a qualidade final do produto (OBERG; JONES, 2020).

Destaca-se que o objeto de estudo deste trabalho é o moinho de martelo.

2.2.3.1 Manutenções Recorrentes

Os moinhos estão sujeitos a desafios operacionais que podem impactar seu desempenho e eficiência, destacando-se três problemas principais para a utilização do moinho de martelos:

(1) o desgaste excessivo dos martelos, causado pelo constante choque com o material processado, resulta em alta frequência de substituição dessa ferramenta para manter a produtividade (CBMM - COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO, 2013);

(2) o desbalanceamento do rotor, provocado pelo desgaste desigual dos martelos, gera vibrações intensas que podem exigir a troca de eixos e rolamentos para evitar danos maiores ao equipamento (KUTZ, 2017);

(3) o acúmulo de material nas grelhas, comum nesse tipo de moinho, pode levar ao entupimento das grelhas de descarga, reduzindo significativamente a eficiência do processo de moagem (WEISS, 1985).

Esses fatores destacam a necessidade de manutenção regular e preventiva para garantir a operação ideal dos moinhos.

As estratégias de manutenção para moinhos envolvem diversas ações destinadas a garantir a eficiência operacional e prolongar a vida útil do equipamento. Entre as principais práticas, destaca-se a substituição regular de peças desgastadas, como esferas, martelos e rolos, para manter o padrão de qualidade na moagem (KUTZ, 2017). Além disso, o monitoramento de vibrações e temperatura por meio de sensores específicos permite detectar falhas potenciais em rolamentos e motores, viabilizando a aplicação de manutenção preditiva de forma eficaz (OBERG; JONES, 2020). Por fim, o balanceamento e alinhamento frequente é fundamental, especialmente para moinhos de martelo e de bolas, ajudando a evitar vibrações indesejadas e a aumentar a durabilidade dos componentes (EDWARDS, 2018). Essas medidas são essenciais para assegurar a operação confiável e eficiente dos moinhos.

2.2.4 Peneiras

As peneiras vibratórias são dispositivos de separação que classificam o material de acordo com o tamanho das partículas. No processamento mineral, sua função é segmentar o material triturado em distintas escalas de tamanho de partículas, o que é fundamental para garantir a padronização da qualidade e a adequação do calcário para aplicações específicas (WEISS, 1985). As peneiras vibratórias consistem em uma estrutura com telas que vibram em

alta frequência, possibilitando a passagem de partículas menores pelas aberturas da tela, enquanto as maiores permanecem para serem processadas ou classificadas (CBMM - COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO, 2013).

2.2.4.1 Manutenções Recorrentes

Entre os principais desafios de manutenção está o desgaste das telas, causado pelo constante movimento vibratório, o que exige substituições frequentes para manter a funcionalidade do equipamento (OBERG; JONES, 2020).

Outro problema significativo é a fadiga estrutural, decorrente da vibração contínua, que pode levar ao desgaste excessivo das molas e ao surgimento de trincas na estrutura, afetando a integridade do equipamento (CBMM - COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO, 2013). Além disso, o acúmulo de material nas grelhas, especialmente em casos de produtos com alto índice de umidade, pode causar entupimentos e reduzir consideravelmente a eficiência do processo (WEISS, 1985).

Esses fatores ressaltam a importância de manutenções preventivas e corretivas para garantir o desempenho ideal das peneiras vibratórias.

2.3 SENSORIAMENTO DE EQUIPAMENTOS

A inovação tem introduzido melhorias em diversos setores industriais, impactando até mesmo a esfera da mineração. Neste contexto, o avanço de novas tecnologias está reconfigurando a estrutura produtiva, devido à necessidade de otimizar procedimentos para torná-los mais eficazes e versáteis. Empresas dedicadas à mineração de calcário também estão integrando o conceito da Indústria 4.0 em suas operações, conforme ressaltado por (NETO *et al.*, 2019).

2.3.1 Manutenção Preditiva e Análise de Vibração

Na engenharia e na manutenção de máquinas e equipamentos, diferentes variáveis físicas são acompanhadas para assegurar o bom funcionamento e detectar falhas com antecedência. Segundo Márquez, Tobias e Papaelias (2012) o monitoramento de variáveis como vibração, temperatura e aceleração é essencial para a identificação precoce de falhas, garantindo maior confiabilidade operacional. Entre esses fatores, a vibração, velocidade RMS, aceleração RMS, temperatura, além do uso de acelerômetros e horímetros, destacam-se como parâmetros indispensáveis para a avaliação das condições de operação e implementação de estratégias de manutenção preditiva (ISO, 2009).

Embora a vibração nem sempre represente um problema, sendo até indispensável para determinadas atividades, muitos equipamentos são projetados para operar de maneira estável. Nesse contexto, a vibração torna-se um indicativo de anormalidades que, se não forem detectadas e corrigidas, podem gerar riscos operacionais, financeiros e de segurança. Em cenários mais críticos, a vibração excessiva pode causar danos severos aos equipamentos, resultando em interrupções inesperadas e grandes prejuízos econômicos (HOLANDA, 2016).

A análise de vibração mecânica consiste no estudo do comportamento vibratório das máquinas com foco na manutenção. É importante destacar que essa análise não corrige a falha, mas identifica a possível causa da vibração e suas consequências, cabendo aos responsáveis realizar os reparos necessários no equipamento (COSTA *et al.*, 2013).

Diversos problemas podem ser identificados por meio da análise de vibração, desde questões mais simples, como desalinhamento, desbalanceamento, folgas e falhas em rolamentos, até situações mais complexas, como falhas em engrenagens, eixos empenados, cavitação em bombas, problemas em compressores e falhas elétricas em motores. Para isso, é fundamental o uso de *softwares* específicos que traduzem os dados coletados e armazenados pelo coletor de vibração em informações compreensíveis para o analista. Esse profissional, por sua vez, deve possuir conhecimento sobre os componentes que influenciam o comportamento vibratório das máquinas, a fim de interpretar os resultados com precisão (NASCIMENTO, 2016).

2.3.2 Parâmetros Utilizados para o Monitoramento de Equipamentos

2.3.2.1 Vibração

Refere-se ao movimento oscilatório de um objeto em torno de uma posição de equilíbrio. Em sistemas mecânicos, a vibração é gerada por forças dinâmicas, como desbalanceamento, desalinhamento, folgas ou desgaste de componentes. Segundo a norma ISO (2009), o monitoramento de vibrações é fundamental para avaliar a severidade das condições operacionais em máquinas industriais. Essa prática é essencial na engenharia mecânica, pois níveis elevados de vibração podem indicar falhas iminentes ou a deterioração de sistemas rotativos e estruturas.

De acordo com Harris (2014), o estudo de vibrações pode ser classificado em análises de frequência, amplitude e fase. Essa análise é amplamente utilizada para identificar problemas em rolamentos, acoplamentos e eixos, sendo uma ferramenta indispensável em programas de manutenção preditiva.

2.3.2.2 Velocidade RMS

A velocidade RMS (*Root Mean Square*) é uma medida comum na análise de vibrações. Conforme Harris (2014), ela representa a média quadrática das variações de velocidade ao longo do tempo, sendo particularmente relevante por estar associada à energia dissipada no

sistema vibratório e aos danos potenciais que podem ocorrer em uma estrutura ou componente. Sua unidade de medida mais comum é de milímetros por segundo (mm/s).

2.3.2.3 Aceleração RMS

A aceleração RMS é uma métrica usada para quantificar a intensidade das vibrações. Segundo Márquez, Tobias e Papaelias (2012), essa métrica é crucial para monitorar impactos e excitações dinâmicas em componentes como rolamentos e engrenagens. Expressa em metros por segundo ao quadrado (m/s^2), a aceleração RMS fornece informações detalhadas sobre o desgaste de componentes, auxiliando na antecipação de falhas.

2.3.3 Tipos de monitoramento

A literatura identifica três categorias principais de monitoramento. O monitoramento subjetivo visa identificar variáveis como temperatura, vibração, ruídos e folgas, já observadas historicamente. Nesse método, o examinador confia em seus próprios sentidos para diagnosticar as falhas na máquina, dispensando o uso de equipamentos especializados (KARDEC; NASCIF, 2009).

O monitoramento objetivo refere-se à coleta de dados por meio de instrumentos de medição. Para obter sucesso nesse tipo de obtenção de informações, é essencial que o instrumento esteja devidamente calibrado (KARDEC; NASCIF, 2009).

Por fim, o monitoramento contínuo envolve princípios semelhantes ao monitoramento objetivo. No entanto, destaca-se por detectar defeitos com intervalos de amostragem muito curtos, aplicados em equipamentos considerados vitais para a linha de produção. Exemplos desses métodos incluem medições contínuas de temperatura, vibração, corrente e tensão elétrica (KARDEC; NASCIF, 2009).

2.3.4 Tomada de decisão baseada em dados

O processo de tomada de decisão pode ser caracterizado como um conjunto de passos que envolvem a obtenção de informações, a atribuição de importância a essas informações, a exploração de possíveis alternativas de solução e, por fim, a execução da escolha, ou seja, a deliberação e a tomada de decisão (GOMES; GOMES, 2014).

De acordo com Saaty (1991), o tomador de decisão, na busca de prever ou controlar determinada situação, normalmente se depara com um sistema complexo de componentes que se relacionam entre si. Quanto maior a compreensão desse sistema, mais assertiva será a decisão.

De acordo com Bitkom, Vdma e Zvei (2016):

O termo Indústria 4.0 representa a quarta revolução industrial, a próxima etapa na organização e controle de todo o fluxo de valor ao longo do ciclo de vida de um produto. Este ciclo baseia-se em desejos de clientes cada vez mais individualizados e varia desde a ideia, o pedido, desenvolvimento, produção e entrega ao cliente final, passando pela reciclagem e serviços relacionados Bitkom, Vdma e Zvei (2016).

Como enfatizado, fica evidente que a obtenção de informações é crucial para embasar a tomada de decisões estratégicas. Através dessa prática, é possível identificar áreas de aprimoramento, propor soluções eficazes, impulsionar a inovação e promover a eficiência operacional buscando o contínuo desenvolvimento de todos os processos na indústria. Além disso, a análise regular dessas informações permite ajustes precisos nos processos, facilitando a adaptação a mudanças no mercado e mantendo a competitividade da indústria.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, está descrito os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho, detalhando os equipamentos e seus componentes, as etapas envolvidas na construção deste estudo, assim como a coleta e análise dos dados.

3.1 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se o sensor *Smart Trac Pro*, da empresa *TRACTIAN*. Esse dispositivo permite o monitoramento online e em tempo real dos ativos, oferecendo soluções que otimizam a gestão diária da manutenção.

O sistema *TRACTIAN* integra sensores de vibração e temperatura a modelos matemáticos, gerando alertas que previnem paradas inesperadas e reduzem custos relacionados a falhas imprevistas.

Milhares de espectros de dados são coletados diariamente, permitindo que o sistema identifique falhas potenciais antes que elas ocorram. As coletas e análises são apresentadas de maneira intuitiva na plataforma online da *TRACTIAN*, acessível via computador ou celular, além de possibilitar integrações com outros sistemas.

A plataforma também oferece controle completo da manutenção, incluindo funcionalidades como horímetro, velocidade, consumo energético e cálculo automático de indicadores de desempenho dos ativos.

O *Smart Trac Pro* é alimentado por uma bateria de lítio com autonomia de até três anos em configuração padrão, e se comunica com o *Smart Receiver Pro* para transmitir os dados coletados. Ambos podem ser observados nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 – Smart Trac Pro.



Fonte: Adaptado Smart Trac Pro Datasheet, 2023

Figura 4 – Smart Receiver Pro.



Fonte: Autoria Própria, 2024

O *Smart Receiver Pro* atua como um transceptor, recebendo os dados do sensor e enviando-os à plataforma *TRACTIAN* via redes 2G, 3G ou 4G, selecionando automaticamente a melhor operadora disponível na região. Alternativamente, é possível utilizar redes *Wi-Fi*, quando necessário. Este equipamento é empregado em diversos segmentos industriais, sendo capaz de coletar dados de vibração triaxial, temperatura e horímetro. A Tabela 1 a seguir destaca as principais características construtivas destes dispositivos.

Tabela 1 – Especificações Técnicas do Equipamento.

Datasheet	Smart Trac Pro - Sensor	Smart Receiver Pro - Receptor
Material	Makrolon	Makrolon
Dimensões	40 x 78,5 x 40 mm	81 x 61 x 35 mm
Peso	240 g	180 g
Fixação	Rosca e adesivo	Imã e abraçadeira
Grau de Proteção	IP69K	-
Temperatura de operação	-40°C a +110°C	-40°C a +60°C
Protocolo de comunicação	IEEE 2.4 GHz 802.12	IEEE 2.4 GHz 802.12
Homologação	ANATEL	ANATEL
Fallback Wi-Fi	Via receptor	sim
Coberturas	Via receptor	2G / 3G / 4G
Operadoras	Via receptor	Vivo, Claro, TIM
Antena	Interna	Externa
Alimentação	Bateria Lítio-tionila 3,6V (Li-SOCl ₂)	Tomada Bivolt (127/220VAC)
Autonomia	3 anos na configuração padrão	-
Buffer offline	250 coletas	-
Intervalo entre amostra	5, 10, 15, 30 ou 60 min	-
Frequência de Amostragem	Até 32 kHz	-
Quantidade de linhas por eixo	8192	-
Escala	2g, 4g, 8g, 16g	-
Medições Assíncronas	Sim	-

Fonte: Adaptado de Catálogo Tractian, 2023

3.2 LEVANTAMENTO DOS ATIVOS A SEREM MONITORADOS

Em um esforço para otimizar a produção e reduzir os custos de manutenção na planta industrial, foi conduzido um estudo aprofundado com o intuito de identificar os equipamentos mais problemáticos em termos de falhas e quebras. Essas ocorrências, por sua vez, impactavam diretamente na produção, gerando perdas por paradas não programadas e elevando os custos de manutenção corretiva. A metodologia utilizada se baseou em uma análise minuciosa dos históricos de manutenção de cada equipamento, considerando a frequência das falhas, o tempo de parada e os custos a elas relacionados. Essa análise criteriosa possibilitou a identificação precisa dos equipamentos mais críticos na cadeia produtiva, classificando-os por ordem de prioridade para a implementação de medidas de otimização.

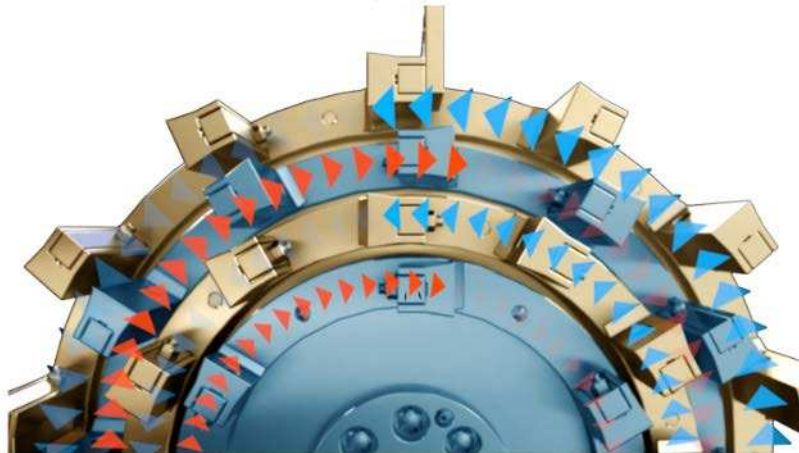
O setor de moagem emergiu como um dos pontos mais críticos e estratégicos da planta. Este setor se caracteriza pela utilização de máquinas importadas com alta complexidade operacional, o que dificulta a obtenção de peças de reposição em casos de quebras inesperadas. As consequências das paradas não planejadas neste setor são significativas, impactando diretamente na produção e resultando em perdas financeiras consideráveis. Some-se a isso a necessidade de mão de obra especializada para a manutenção, elevando ainda mais os custos de reparo. A complexidade e a criticidade do setor de moagem exigem a implementação de um sistema de manutenção preditiva. Essa abordagem, que se baseia no monitoramento constante e na análise de dados dos equipamentos, permite a antecipação de falhas e a realização de intervenções programadas, minimizando as chances de paradas abruptas e reduzindo os custos de manutenção.

Após uma análise criteriosa que avaliou o histórico de falhas, o tempo de inatividade e os custos de manutenção de cada equipamento, foram identificados dez ativos estratégicos para a operação contínua da planta industrial. Esses ativos, compostos por moinhos, peneiras centrífugas e motoredutores, demonstraram um papel crucial na cadeia produtiva, sendo fundamentais para garantir a fluidez das operações e evitar interrupções que podem resultar em perdas financeiras.

3.3 APLICABILIDADE DOS SENSORES

Os moinhos, componentes essenciais no processo produtivo, demandam uma atenção especial devido à sua complexidade operacional. Internamente, esses equipamentos são compostos por dois conjuntos de gaiolas rotativas que giram em sentidos opostos e com velocidades distintas. Enquanto o eixo vazado opera a 590 RPM, o eixo maciço atinge 780 RPM, como ilustra as Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Representação de Rotação das Gaiolas.



Fonte: Adaptado Terra Source Global, 2020

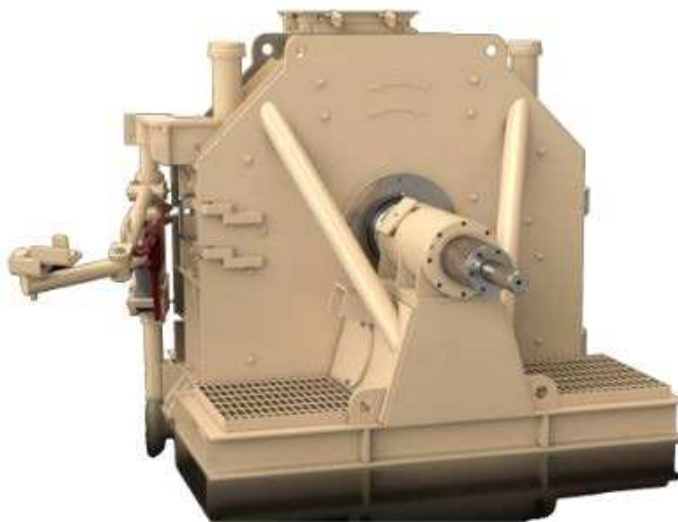
Figura 6 – Representação das Gaiolas.



Fonte: Adaptado Terra Source Global, 2020

Essa configuração, coordenada por dois eixos (um maciço e outro vazado) e suportada por quatro rolamentos, exige uma análise minuciosa para a identificação de potenciais falhas, os eixos podem ser observados na Figura 7.

Figura 7 – Representação dos Eixos.



Fonte: Adaptado Terra Source Global, 2020

Imagine que um dos rolamentos do eixo maciço apresente desgaste. O atrito excessivo gerado pode não ser detectado prontamente se a análise se basear apenas na vibração geral do moinho, uma vez que a rotação do eixo vazado e das gaiolas pode mascarar o problema. Para evitar esse tipo de situação e garantir a precisão da análise preditiva, a instalação de dois sensores por conjunto de rolamentos se torna crucial. Dessa forma, cada rolamento terá seu monitoramento individualizado, permitindo a detecção de anomalias específicas com maior precisão. No total, serão oito sensores distribuídos pelos quatro moinhos da planta.

As peneiras centrífugas, responsáveis pela separação granulométrica do produto após a moagem, também representam um desafio em termos de manutenção. A dificuldade de acesso e inspeção, aliada à complexidade do sistema rotativo interno com seis rolamentos, torna a identificação de falhas uma tarefa complexa.

Para ilustrar a importância do monitoramento das peneiras, imagine um cenário em que um dos rolamentos internos apresente uma falha prematura. A vibração excessiva pode levar a danos nas telas de peneiramento, comprometendo a qualidade do produto final e causando perdas por material fora da especificação. Além disso, uma eventual parada da peneira impacta diretamente na operação dos moinhos, que dependem do funcionamento contínuo da peneira para evitar o acúmulo de material. Essa interdependência entre os equipamentos exige uma estratégia de monitoramento integrada, capaz de identificar e prever falhas em ambos os sistemas.

A instalação de 4 sensores nas quatro peneiras permitirá um acompanhamento detalhado do desempenho de cada eixo, fornecendo dados precisos para a análise preditiva. Com um total doze sensores monitorando os moinhos e peneiras, a planta industrial contará com um sistema robusto de detecção e prevenção de falhas, garantindo a continuidade das operações, a qualidade do produto e a eficiência do processo produtivo.

3.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DO PROJETO

Após a definição da quantidade de sensores necessários para o monitoramento preditivo, deu-se início à análise de viabilidade econômica do projeto. Essa análise considerou o histórico de 10 anos de substituição dos rolamentos dos eixos vazado e maciço dos moinhos, bem como os custos e o tempo de inatividade associados a cada intervenção.

Os dados históricos revelaram um número expressivo de substituições dos rolamentos do modelo M241549/10 (Timken) no eixo vazado, como visualizado na Tabela 2 totalizando 63 intervenções com um custo total de R\$ 701.064,00.

Tabela 2 – Histórico de Substituição do Rolamento M241549/10 (Timken).

Ano	Quantidade	Valor Total
2015	2	R\$ 12.500,00
2016	6	R\$ 43.438,00
2017	2	R\$ 15.761,00
2018	4	R\$ 28.257,00
2019	2	R\$ 18.119,00
2020	10	R\$ 123.961,00
2021	18	R\$ 234.679,00
2022	9	R\$ 107.924,00
2023	10	R\$ 116.425,00
Total	63	R\$ 701.064,00

Fonte: Autoria Própria, 2024

No caso do eixo maciço, o modelo JHM720249/10 (Timken) apresentou 113 substituições, totalizando um custo de R\$ 97.768,00, como visualizado na Tabela 3.

Tabela 3 – Histórico de Substituição do Rolamento JHM720249/10 (Timken).

Ano	Quantidade	Valor Total
2014	2	R\$ 980,00
2015	2	R\$ 963,00
2016	14	R\$ 8.198,00
2017	6	R\$ 3.053,00
2018	9	R\$ 5.897,00
2019	17	R\$ 9.557,00
2020	10	R\$ 8.116,00
2021	15	R\$ 19.454,00
2022	15	R\$ 16.072,00
2023	23	R\$ 25.478,00
Total	113	R\$ 97.768,00

Fonte: Autoria Própria, 2024

Esses números evidenciam a frequência e o impacto financeiro das falhas nesses componentes.

Um fator que agrava o problema é a dificuldade de identificar o rolamento específico que apresenta a falha. Na prática, a manutenção corretiva exige a substituição completa do conjunto de rolamentos do mancal, o que implica em um tempo de parada considerável, variando de 6 a 8 horas. Durante esse período, a máquina permanece inoperante, impactando diretamente na produção e gerando custos adicionais por hora parada.

A viabilidade econômica da implementação da manutenção preditiva foi cuidadosamente avaliada, considerando tanto os custos de hora parada dos moinhos quanto os benefícios potenciais da utilização de sensores para monitoramento. Essa análise criteriosa teve como objetivo principal justificar o investimento na tecnologia e demonstrar seu potencial para otimizar as operações da planta industrial.

O ponto de partida foi a determinação precisa do custo de hora parada de cada moinho. Com base na capacidade individual de produção (65 toneladas por hora) e no valor de mercado do material processado (R\$ 40,00 por tonelada), chegou-se a um valor de R\$ 2.600,00 por hora. Esse dado representa o impacto financeiro direto de uma eventual interrupção na produção, deixando claro que cada hora de inatividade impacta significativamente os resultados da empresa.

Para exemplificar, imagine que um dos moinhos sofra uma parada não programada de 8 horas devido à falha em um rolamento. Nesse cenário, o custo total da interrupção seria de R\$ 20.800,00 (8 horas x R\$ 2.600,00/hora). Esse valor considera apenas a perda de produção, sem levar em conta os custos de manutenção corretiva, que incluem peças de reposição, mão de obra e possíveis danos a outros componentes do equipamento.

A proposta apresentada pela empresa especializada em manutenção preditiva visava minimizar esses custos através da instalação de 15 sensores, com um custo unitário de R\$ 250,00. O investimento total em um contrato de 12 meses seria de R\$ 45.000,00, incluindo os custos de instalação, configuração do sistema e treinamento da equipe.

Para justificar esse investimento, foi necessário demonstrar que os benefícios da manutenção preditiva superariam os custos. Para isso, foi realizada uma projeção conservadora, considerando um ganho de apenas 4,5 horas de disponibilidade por moinho em decorrência da prevenção de falhas. Ou seja, assumiu-se que, com a implementação do sistema, cada moinho operaria 4,5 horas a mais por mês do que operaria sem o sistema.

Com esse aumento na disponibilidade, o ganho financeiro mensal seria de R\$ 46.800,00 (4 moinhos x 4,5 horas/moinho x R\$ 2.600,00/hora). Esse valor supera o custo mensal do projeto (R\$ 3.750,00), resultando em um retorno financeiro positivo já no primeiro mês de operação.

Além do ganho financeiro direto, a manutenção preditiva oferece outros benefícios importantes, como:

- Redução dos custos de manutenção corretiva: a prevenção de falhas diminui a necessidade de reparos emergenciais, que geralmente são mais caros.

- Aumento da vida útil dos equipamentos: o monitoramento constante e a manutenção adequada contribuem para a preservação dos moinhos, prolongando sua vida útil.
- Melhoria da qualidade do produto: a operação contínua e estável dos moinhos garante a uniformidade do produto final.
- Aumento da segurança operacional: a prevenção de falhas e a garantia da integridade dos equipamentos contribuem para um ambiente de trabalho mais seguro.

Em resumo, a análise da viabilidade econômica demonstrou que a implementação da manutenção preditiva é um investimento estratégico para a empresa, com potencial para gerar um retorno financeiro significativo e proporcionar uma série de benefícios operacionais.

3.5 INSTALAÇÃO FÍSICA DOS SENSORES E CONECTIVIDADE

A instalação física dos sensores, etapa crucial para a implementação do sistema de manutenção preditiva, foi concluída com sucesso em 25 de julho de 2024. Em um período de apenas seis horas, todos os sensores foram devidamente instalados e ativados nos locais previamente mapeados, abrangendo tanto os moinhos quanto as peneiras centrífugas.

A agilidade desse processo foi um fator determinante, visto que a instalação dos sensores exigiu a paralisação temporária das máquinas, interrompendo a produção. A redução do tempo de inatividade foi tratada como prioridade, buscando mitigar impactos financeiros negativos e garantir uma retomada eficiente das operações da planta. A coordenação eficiente das equipes envolvidas, aliada a uma execução técnica precisa, permitiu que a paralisação fosse minimizada, assegurando a continuidade das atividades e o desempenho econômico da unidade.

Na Figura 8, podemos identificar onde o sensor multivariável foi posicionado e fixado nos moinhos, foram instalados um par de sensor por moinho obtendo um total de 8 sensores instalados neste equipamento.

A justificativa para ser instalado dois sensores por moinho se dá pela forma construtiva do equipamento e pelo grande impacto que este recebe na operação de moagem, sendo formado por duas gaiolas com um mancal, este mancal é construído com dois conjuntos de rolamentos, é fundamental fazer a tomada de dados separadamente de cada extremidade do mancal visando evitar que a tomada de dados de uma extremidade do mancal interfira na tomada de dados da outra extremidade do mancal.

Denominado como “Entrada” e “Saída” cada extremidade do mancal possui seu conjunto de rolamentos, e são esses rolamentos que devem ser analisados com a tomada de dados para verificar se a lubrificação está conforme as especificações técnicas que o fabricante indica, verificar se o eixo está bem alinhado conforme os níveis de vibração e ruído, e verificar se o próprio rolamento não está com problemas de operação. Por estes motivos que foi definido

o local onde o sensor seria instalado, conforme apresentado. Os sensores foram posicionados estrategicamente próximos à área de maior tendência de giro do rolamento, conforme orientação do técnico especializado na instalação. O objetivo foi garantir a coleta de dados de vibração mais precisa, minimizando interferências de outros ruídos. O local escolhido para a instalação do sensor levou em conta outros fatores, como a facilidade de acesso do operador ao sensor em caso de ser necessário fazer o reaperto do parafuso de fixação do sensor ou até mesmo uma possível troca do sensor por conta do alto índice de impacto que este equipamento trabalha.

Outro fator crucial na escolha da posição do sensor foi a verificação da conectividade do sensor com o receptor do sinal, sendo verificado a qualidade do sinal recebido e possíveis interferências neste sinal, como a instalação foi feita por mão de obra especializada, esses problemas de conectividade foram solucionados no mesmo momento da instalação do sensor, sem que fosse preciso fazer uma mudança de posição posterior do sensor. Na Figura 8 é possível observar que estes equipamentos trabalham em um ambiente de alto grau de sujeira e poeira, destacando a importância do grau de proteção dos sensores ser IP66, indicando que este é totalmente protegido contra poeira e resistente à entrada de água.

Figura 8 – Instalação Sensores - Moinhos.

Moinho 01E



Moinho 02E



Moinho 03E



Moinho 04E



Moinho 01S



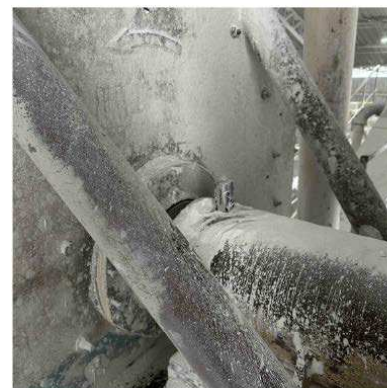
Moinho 02S



Moinho 03S



Moinho 04S



Fonte: Autoria Própria, 2024

Na Figura 9, pode-se identificar onde o sensor multivariável foi posicionado e fixado nas peneiras centrífugas. Destaca-se que a seta vermelha inserida na figura apresenta a posição onde os sensores foram instalados.

Optou-se por instalar um sensor por peneira, em locais que fossem próximos ao eixo de cada peneira, assim garantindo a assertividade dos dados coletados. Como a análise de velocidade e aceleração RMS é feita com base nestes valores nos eixos axial, horizontal e vertical, a instalação dos sensores no eixo da peneira, próximo as polias, foi necessário por ser o local onde o equipamento sofre maior avaria e stress com vibração e desbalanceamento por acúmulo de poeira, graxa e outros materiais.

Bem como nos moinhos, o estudo da posição de fixação do sensor multivariável levou em consideração a conectividade entre o sensor e o receptor do sinal gerado, posteriormente, foi verificado a qualidade do sinal recebido e possíveis interferências neste sinal, como a instalação foi feita por mão de obra especializada, esses problemas de conectividade foram solucionados no mesmo momento da instalação do sensor, sem que fosse preciso fazer uma mudança de posição posterior do sensor.

A instalação desse sensor foi viabilizada devido ao seu elevado grau de proteção IP66, essencial para ambientes industriais adversos. Esses locais estão frequentemente expostos a sujeira, poeira, acúmulo de resíduos lubrificantes e outros contaminantes que podem comprometer o desempenho de equipamentos eletrônicos. No caso específico do moinho de calcário e de outros equipamentos similares, é comum o acúmulo de sujeira nas proximidades do sensor, o que reforça a necessidade de dispositivos projetados para resistir a essas condições. O grau de proteção IP66 assegura que o sensor seja altamente resistente à poeira e protegido contra jatos de água, garantindo sua durabilidade e confiabilidade mesmo em condições operacionais desafiadoras.

Figura 9 – Instalação Sensores - Peneiras.

Peneira 01



Peneira 03



Peneira 02



Peneira 04



Fonte: Autoria Própria, 2024

O receptor dos sensores foi posicionado estrategicamente para garantir a melhor qualidade de sinal, tanto na comunicação direta com os sensores quanto na conexão via *Wi-Fi*. Esse posicionamento foi cuidadosamente planejado para otimizar a recepção de dados e garantir uma transmissão eficiente e ininterrupta das informações coletadas pelos sensores ao sistema de monitoramento central. A Figura 10 ilustra o posicionamento do receptor.

Figura 10 – Instalação Recptor.



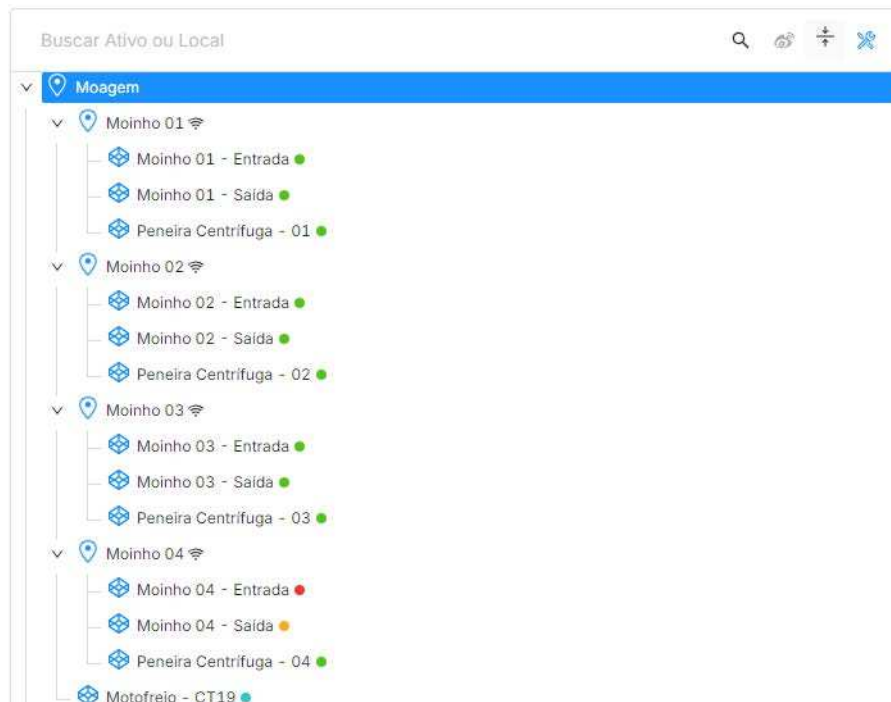
Fonte: Autoria Própria, 2024

3.6 SISTEMA SUPERVISÓRIO

No mesmo dia da instalação, foi possível acessar o *software* supervisor, que já apresentava as primeiras amostras de dados coletadas pelos sensores instalados. O sistema estava completamente operacional, e todas as informações necessárias para o monitoramento dos equipamentos estavam disponíveis no *software*.

Uma das primeiras ações realizadas dentro do *software* foi a criação de uma árvore de ativos, organizada de maneira clara e intuitiva buscando facilitar o entendimento do operador. Essa estruturação facilitou a compreensão do arranjo do sistema, permitindo uma navegação simplificada entre os diferentes equipamentos monitorados. A Figura 11 ilustra essa árvore de ativos, destacando a disposição hierárquica dos moinhos, peneiras e seus respectivos sensores, proporcionando uma visão abrangente e organizada.

Figura 11 – Árvore de Ativos.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Posteriormente, foi realizado o preenchimento das fichas técnicas de cada um dos ativos monitorados no *software* supervisor. Nessas fichas, foram inseridas informações detalhadas e pertinentes a cada equipamento, como especificações técnicas, manuais das máquinas, dados sobre rotações, além de outros parâmetros relevantes para o acompanhamento de desempenho e manutenção. A Figura 12 apresenta o preenchimento da ficha técnica para o Moinho 01E.

Figura 12 – Ficha Técnica do Equipamento.

< Editar Moinho 01 - Entrada



Moinho 01 - Entrada

Descrição (Opcional)

B I S [List Icon] [Link Icon]

Mancal com eixos de rotações opostas:

- Eixo Vazado (maior) --> 590 RPM
- Eixo Maciço (menor) --> 780 RPM

Motores:

- Eixo Vazado: 200 CV --> 1715 RPM
- Eixo Vazado: 175 CV --> 1715 RPM

Ativo ou Local

Moinho 01

Responsáveis

Alexandre Canha (você)

Criticidade

1 - Alta

Tipo de Sensor

Smart Trac Energy Trac

Sensor

KWA9233

Tipo de Fixação

Parafuso

Eixos

X: Axial, Y: Horizontal, Z: Vertical

Tipo de Equipamento

Mancal (Rolamento)

Ficha Técnica

Adicione as Especificações do seu Ativo

Editar Ficha Técnica

Custo de Hora Parada

R\$ 2.600,00 / Hora

Tipo de Suporte

Rígido

Ano de Fabricação

Ex: 2010

Código QR

9Y3W49M1TGMB6S27BBRZ

Salvar

Fonte: Autoria Própria, 2024

Compreendida como de extrema importância, a aprendizagem da inteligência artificial (IA) do sistema é parametrizada com base nos dados fornecidos pela ficha técnica de cada ativo e no desempenho observado ao longo das primeiras semanas de operação. Além disso, a IA realiza comparações com dados de ativos similares monitorados, tanto dentro da própria indústria quanto fora dela. Dessa forma, quando uma anomalia é detectada, ela é imediatamente reportada. No momento inicial de aprendizado e calibração, o sistema coleta e analisa os dados em tempo real, ajustando seus algoritmos conforme as características específicas de cada equipamento, como suas rotações, condições de operação e histórico de manutenção. Essas informações iniciais são fundamentais para que a IA possa estabelecer um perfil de funcionamento normal para cada ativo, identificando padrões de desempenho e, posterior-

mente, detectando qualquer desvio que possa indicar a necessidade de manutenção preditiva. Esse processo de calibração contínua permite que o sistema se torne mais preciso ao longo do tempo, garantindo uma gestão otimizada dos ativos e uma maior confiabilidade nas previsões de falhas.

Com a árvore de ativos criada e as fichas técnicas devidamente preenchidas, foi possível elaborar um sistema supervisório robusto para o acompanhamento em tempo real das condições operacionais de cada máquina. Esse sistema permite o monitoramento contínuo e detalhado dos dados fornecidos pelos sensores instalados, oferecendo uma visão completa do status dos equipamentos e alertas automáticos em caso de anomalias.

A partir de um registro aéreo da planta industrial, foi desenvolvido um *layout* visual no *software* supervisório, que facilita a localização e o monitoramento dos ativos dentro do espaço físico da fábrica, como ilustra a Figura 13.

Figura 13 – Supervisório.



Fonte: Autoria Própria, 2024

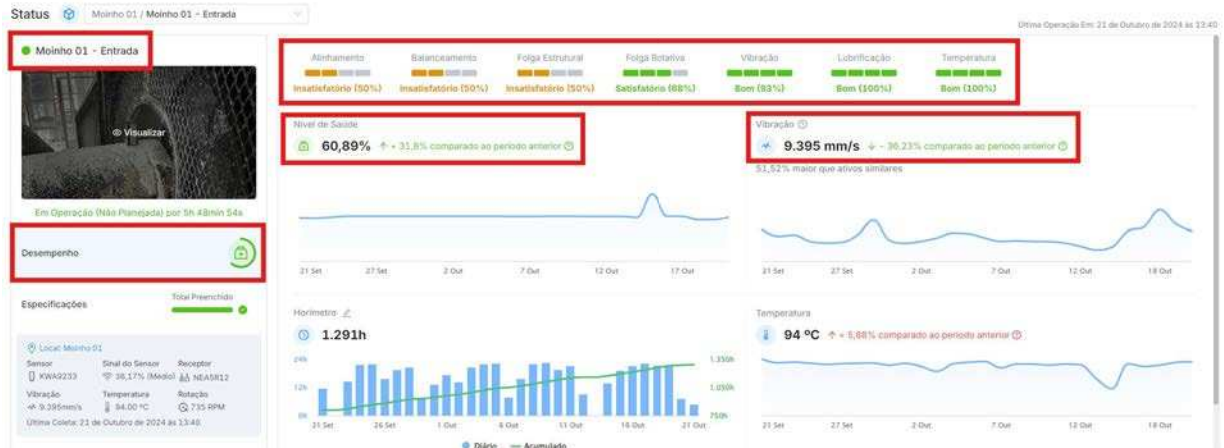
Essa interface gráfica, proporciona uma visão panorâmica da disposição dos equipamentos, permitindo que os operadores identifiquem rapidamente a condição operacional de cada máquina e ajam proativamente para prevenir falhas. O sistema foi desenhado para ser intuitivo para o operador, garantindo uma navegação eficiente e acesso fácil às informações críticas para a manutenção e operação da planta.

O sistema supervisório também oferece uma visão abrangente e em tempo real do *status* atual de cada máquina, apresentando indicadores-chave de desempenho (*KPIs*) críticos para a operação e manutenção dos equipamentos. Entre os *KPIs* monitorados estão: alinhamento, balanceamento, folga estrutural, folga rotativa, vibração, lubrificação e temperatura. Esses pa-

râmetros são fundamentais para a avaliação contínua das condições de operação e para a detecção precoce de possíveis falhas.

O sistema inclui um "termômetro" de saúde, que reflete o nível atual de integridade de cada máquina. Esse indicador, atualizado em tempo real, permite que os operadores tenham uma visão imediata e clara do estado de saúde dos ativos, possibilitando ações corretivas antes que ocorram falhas graves. A Figura 14 ilustra essa funcionalidade.

Figura 14 – Acompanhamento dos Indicadores.



Fonte: Autoria Própria, 2024

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados alcançados ao longo da execução do projeto. O estudo foi conduzido ao longo de um período de quatro meses, compreendido entre agosto e novembro de 2024, detalhando as principais análises e conclusões obtidas durante esse intervalo.

4.1 MANUTENÇÃO MOINHO 01

As Figuras 15 e 16, apresentam uma visão detalhada de todo o processo, abrangendo desde a identificação inicial de uma possível avaria até sua confirmação e o estado do equipamento após a conclusão da manutenção. Essas imagens ilustram como as etapas de monitoramento, diagnóstico e intervenção foram conduzidas, destacando a eficácia das estratégias aplicadas para restaurar o funcionamento ideal do sistema.

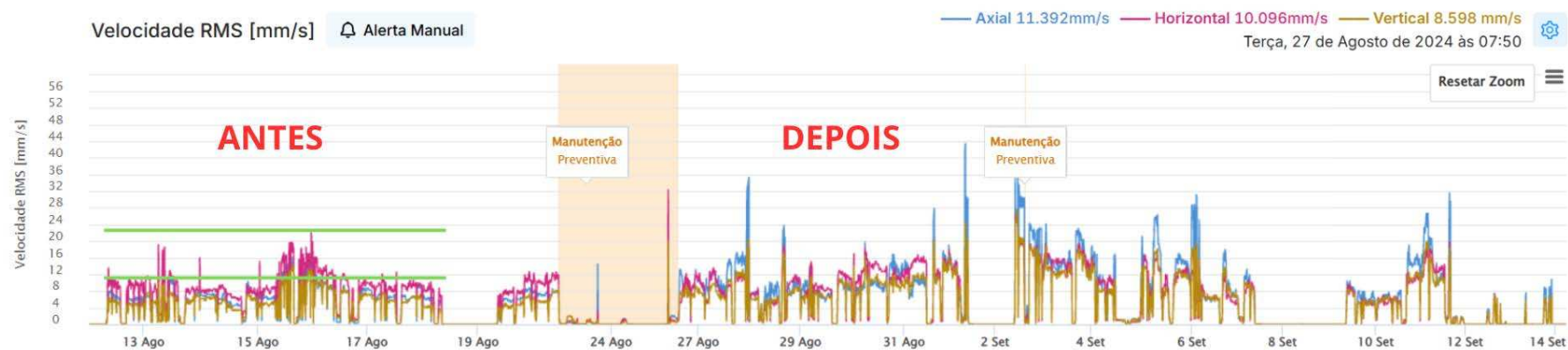
Durante as inspeções de campo, foi detectado um elevado nível de ruído por vibração, significativamente acima do padrão observado pelos operadores. Com o auxílio do sensor multivariável, foi possível monitorar o progresso da anomalia e determinar o momento mais adequado para realizar a parada programada do Moinho 01 para manutenção. Somente a análise da Figura 15 não permite identificar qualquer tipo de avaria, pois apresenta vários picos na amplitude do valor de velocidade RMS. No entanto, ao examinar a Figura 16, torna-se evidente o comportamento da aceleração, com amplitudes elevadas antes da manutenção, sendo que, após a intervenção, os valores foram significativamente reduzidos.

Antes da manutenção, a aceleração RMS apresentava valores médios de 1,8 g na componente horizontal, indicando um desgaste significativo. Após a intervenção, esses valores foram reduzidos para intervalos de 0,8 a 1,2 g, refletindo a eficácia das ações realizadas.

A manutenção foi iniciada em 20 de agosto de 2024 e concluída em 26 de agosto de 2024. Durante esse período, foi executada uma manutenção completa no Moinho 01, incluindo a substituição do mancal completo, dos eixos e dos rolamentos. Adicionalmente, foi realizada uma reforma na carcaça interna do moinho, com a substituição de chapas desgastadas e o reforço de pontos de solda críticos, garantindo a integridade estrutural do equipamento.

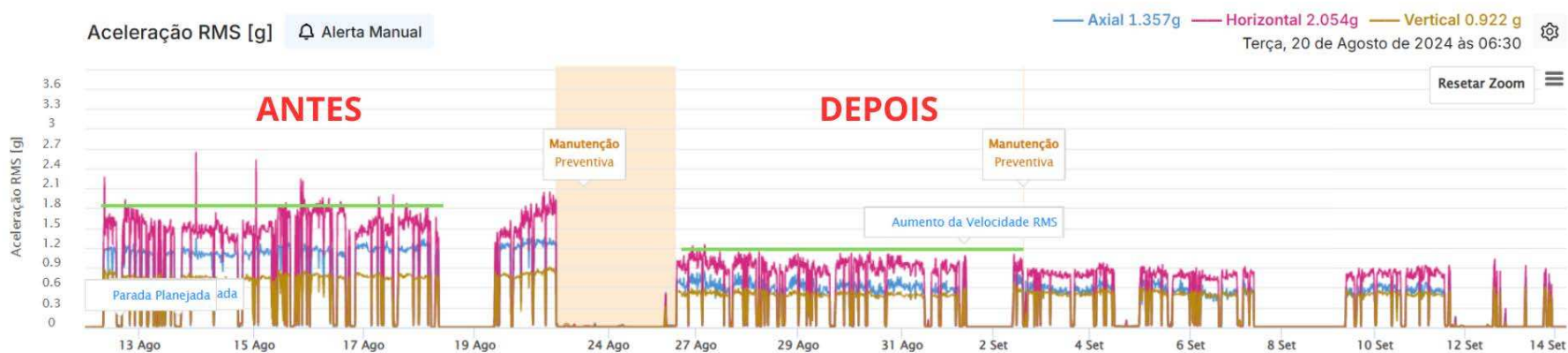
Com base nas análises realizadas, conclui-se que a intervenção sugerida pelo sensor multivariável, confirmada pela equipe de manutenção, diagnosticou corretamente a falha como resultado de rolamentos desgastados e eixos danificados. Essa estratégia permitiu a execução de uma manutenção programada e bem planejada, prevenindo paradas não programadas e evitando prejuízos à produção. A ação preventiva comprovou-se fundamental para restabelecer o pleno funcionamento do equipamento, evidenciando a relevância do monitoramento contínuo na garantia da eficiência operacional.

Figura 15 – Velocidade RMS - Moinho 01.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Figura 16 – Aceleração RMS - Moinho 01.



Fonte: Autoria Própria, 2024

4.2 MANUTENÇÃO MOINHO 02

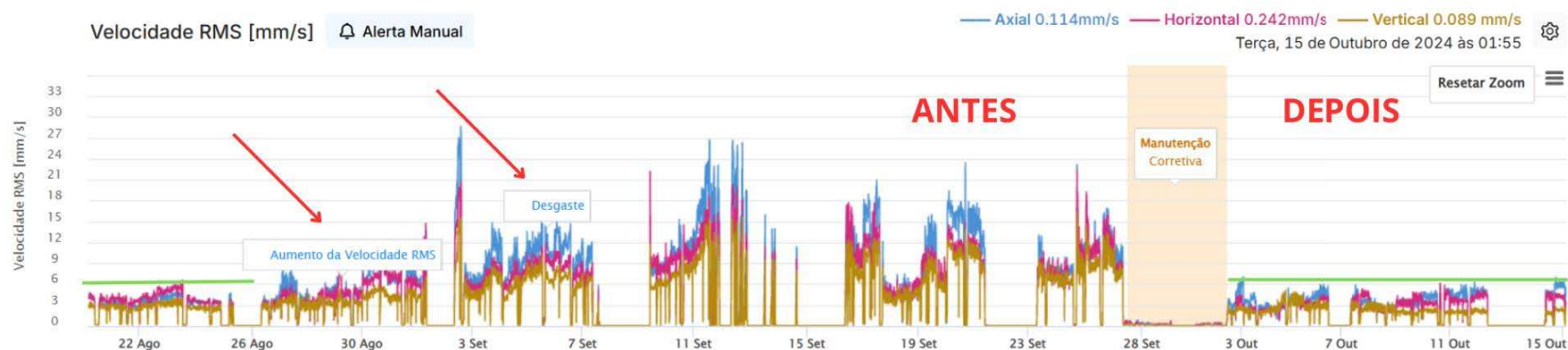
As Figuras 17 e 18 ilustram os valores de amplitude registrados pelo sensor para velocidade e aceleração, proporcionando dados cruciais para a análise do desempenho operacional do Moinho 02. Esses valores foram de extrema importância, pois permitiram identificar os limites operacionais seguros do equipamento. A análise revelou que o intervalo de 6 meses definido pela empresa para a manutenção preventiva já havia sido ultrapassado, o que aumentava os riscos de falha, conforme pode-se notar que antes da manutenção ser realizada as medições de velocidade RMS e aceleração RMS estão fora dos parâmetros definidos como padrão deste equipamento pela IA do sistema, com aumento significativo nos dados de leitura destes parâmetros. E após a manutenção ser realizada, nota-se que o equipamento volta ao seu estado de operação normal, com decréscimo dos níveis de leitura, sendo notável essa diferença de leitura nos dados de velocidade RMS, conforme indicado na figura 17.

Destaca-se que as setas vermelhas indicadas apresentam o momento em que os alertas foram disparados.

Com base nos dados coletados, foi possível determinar numericamente os valores máximos de velocidade e aceleração dentro dos quais o moinho ainda pode operar sem comprometer sua integridade. Essa informação é essencial para otimizar o planejamento de manutenções futuras, permitindo intervenções mais assertivas e baseadas em condições reais de operação.

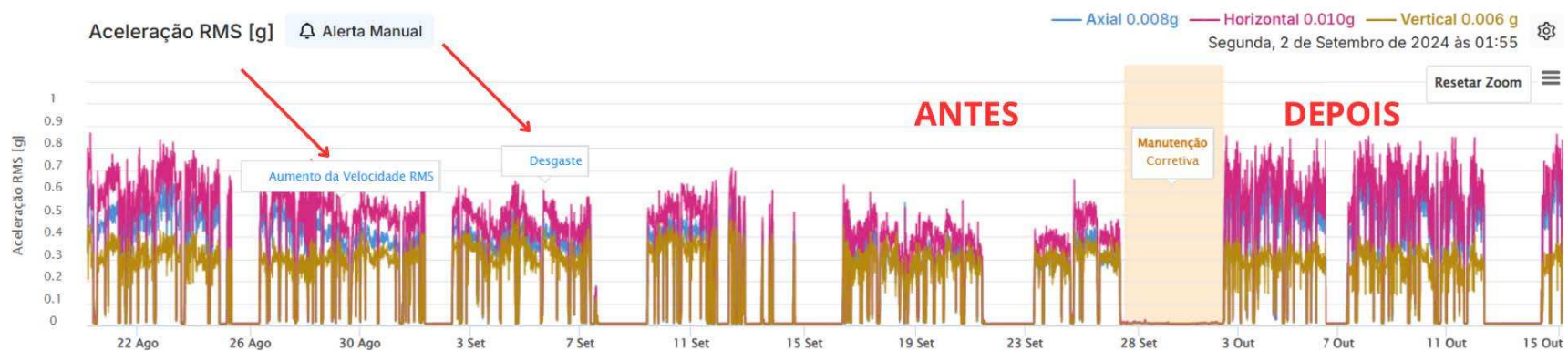
O uso do sensor permitiu o monitoramento contínuo do equipamento, auxiliando no ajuste de manutenções preventivas e corretivas, aumentando a segurança, a eficiência operacional e a vida útil dos componentes.

Figura 17 – Velocidade RMS - Moinho 02.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Figura 18 – Aceleração RMS - Moinho 02.



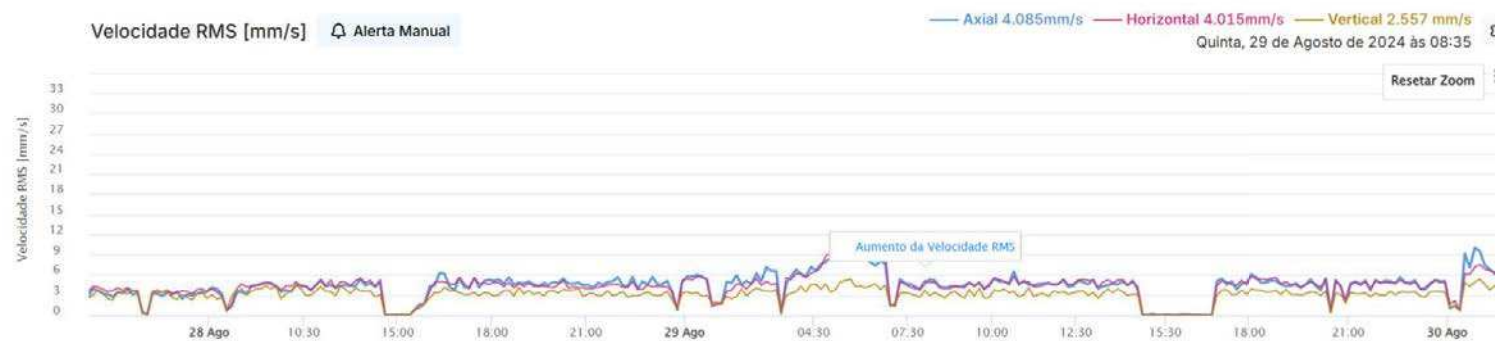
Fonte: Autoria Própria, 2024

Observa-se que o sensor, integrado com um sistema de inteligência artificial (IA), forneceu *insights* sobre possíveis falhas identificadas. Um exemplo notável ocorreu no dia 29 de agosto, quando o sensor detectou um aumento significativo nos valores de velocidade RMS, acionando automaticamente um alerta para o operador responsável pelo monitoramento do moinho. Essa funcionalidade é essencial, pois permite que o sistema não apenas identifique mudanças abruptas nos parâmetros operacionais, mas também compare o comportamento atual do equipamento com seu histórico e com padrões de ativos similares, garantindo maior precisão na detecção de anomalias.

Destaca-se que o sensor utiliza técnicas avançadas de análise, como a coleta do espectro de frequência, formas de onda e outras medições complementares, que permitem uma visão abrangente das condições do equipamento. Essas informações são fundamentais para identificar a origem das falhas e priorizar as ações corretivas. Detalhes dessas análises, como os espectros de frequência e outras coletas relevantes, estão ilustrados nas Figuras 19 e 20, destacando o impacto do monitoramento preditivo na manutenção e na eficiência operacional do equipamento.

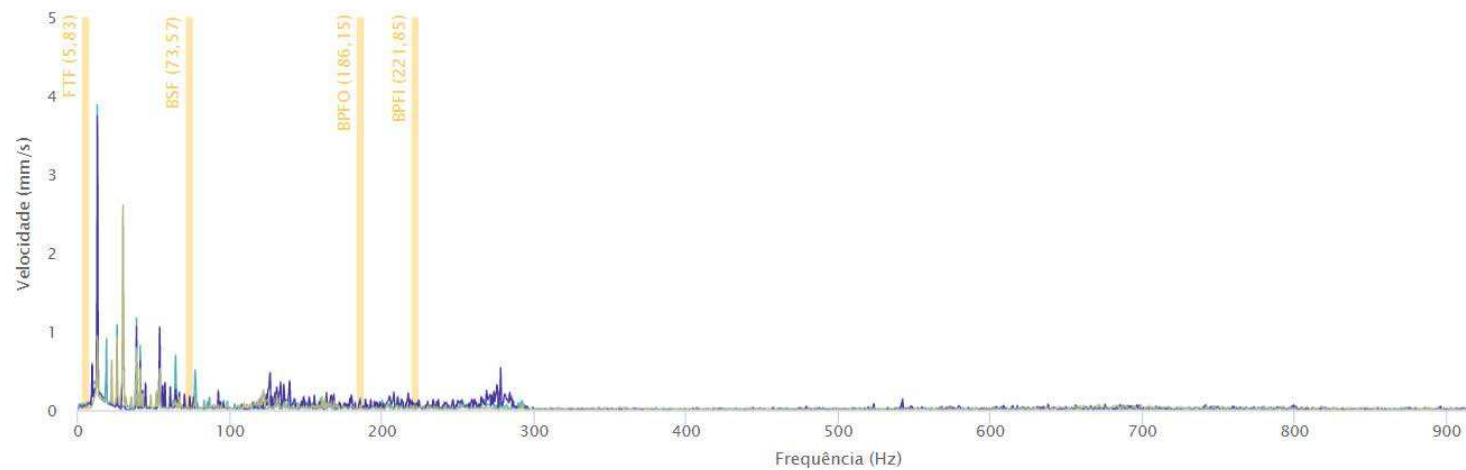
Conforme podemos ver na figura 19, o sistema implementado nos trás dados mais detalhados das falhas na tela do perfil do ativo, onde nesta figura foi possível ampliar os dados de velocidade RMS no momento em que o sistema identificou uma anomalia no equipamento, nos trazendo essa variação em uma escala de horas.

Figura 19 – Identificação do Aumento de Velocidade RMS.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Figura 20 – Espectro de Frequência.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Outro evento significativo foi registrado no dia 05 de setembro, quando o sensor emitiu um novo alerta, identificando sinais de desgaste no equipamento. Esse *insight*, gerado pelo sistema de monitoramento, destaca a capacidade do sensor de detectar alterações sutis nos parâmetros operacionais. A análise detalhada desse evento pode ser observada na Figura 21, que ilustra as condições detectadas, podendo ser observado também o momento exato em que o alerta foi disparado, indicado pela seta vermelha.

Figura 21 – Identificação de Desgaste.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Observa-se um aumento nos valores de velocidade RMS em todas as componentes analisadas: axial, horizontal e vertical. A Tabela 4 a seguir apresenta uma comparação detalhada dos valores registrados antes e no momento em que o alerta foi disparado, evidenciando as variações que indicaram a necessidade de intervenção.

Tabela 4 – Comparação de Valores de Velocidade RMS.

Componentes	72h Antes	48h Antes	24h Antes	Momento do Alerta
Axial	8,129 mm/s	12,323 mm/s	9,212 mm/s	11,819 mm/s
Horizontal	7,068 mm/s	9,128 mm/s	7,625 mm/s	9,248 mm/s
Vertical	6,333 mm/s	8,126 mm/s	6,746 mm/s	6,705 mm/s

Fonte: Autoria Própria, 2024

Observa-se que os valores aumentam significativamente de 72h para 48h antes do alerta, principalmente no componente axial, que registra o maior valor (12,323 mm/s) em 48h antes. No entanto, há uma redução nos valores em 24h antes do alerta, seguida por novos aumentos em alguns casos no momento do alerta.

Isso indica uma variação dinâmica nas condições de operação do equipamento, sugerindo possíveis instabilidades mecânicas ou degradação de componentes específicos.

O espectro de frequência apresentado na Figura 22 foi obtido no exato momento em que o alerta de desgaste foi gerado pelo sistema de monitoramento. A análise de vibração é um recurso fundamental na identificação de falhas, uma vez que os harmônicos presentes em determinadas faixas de frequência podem indicar com precisão o tipo de problema que está ocorrendo.

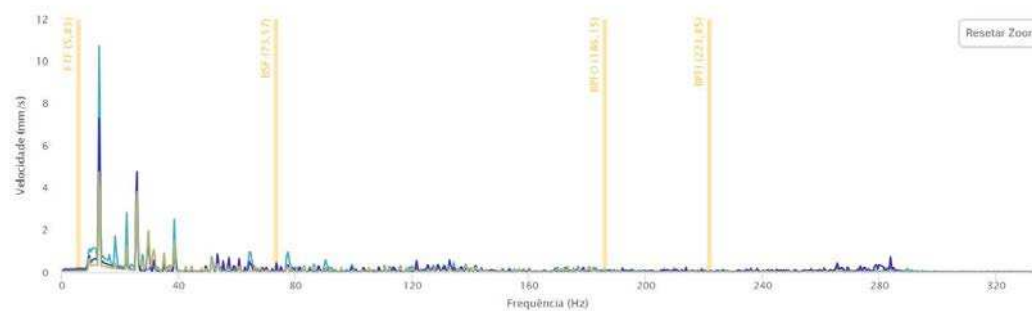
Na Figura 20 e 22, estão destacadas as frequências típicas associadas a falhas nos rolamentos avaliados, considerando parâmetros como frequências de passagem de elementos rolantes, pistas interna e externa, além de outros componentes críticos do conjunto mecânico.

Ao observar o espectro, contudo, nota-se que não há variação significativa na amplitude desses harmônicos característicos. Esse cenário sugere a ausência de anomalias diretamente relacionadas ao desgaste dos rolamentos naquele momento da coleta.

Diante dos alertas gerados pelo sistema, foi possível identificar o momento mais oportuno para realizar a parada do equipamento e executar as manutenções necessárias, prevenindo uma falha inesperada que poderia resultar em interrupções não planejadas e significativas perdas financeiras devido à paralisação da produção. Com base nessa análise, optou-se por iniciar a manutenção no dia 26 de setembro, com sua conclusão em 02 de outubro. Esse processo é detalhado e ilustrado na Figura 23.

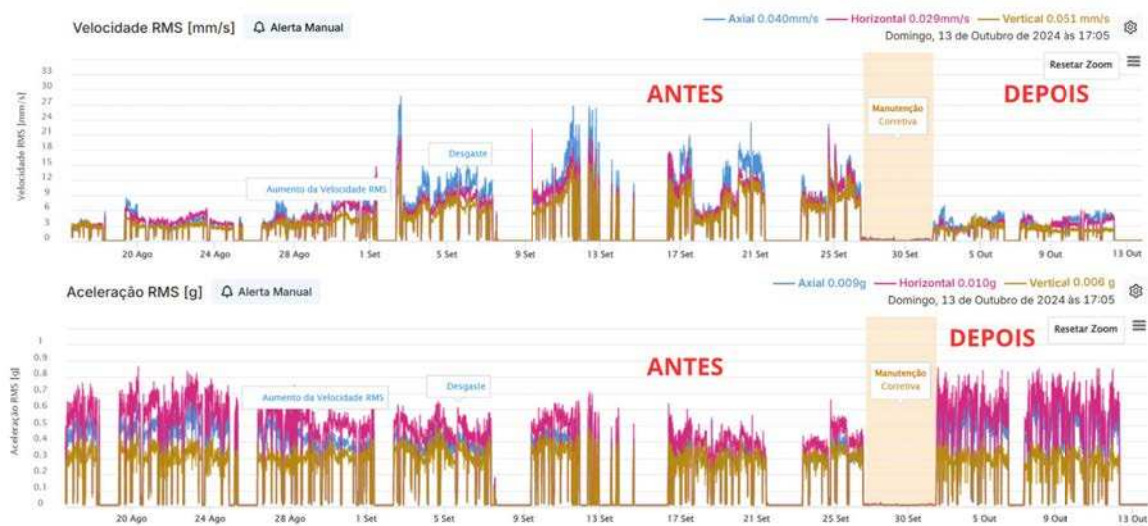
Durante essa manutenção, foi realizada a substituição completa do mancal, incluindo o eixo e os rolamentos. Além disso, foram trocados os conjuntos de gaiolas do moinho juntamente com todos os martelos, garantindo a integridade e o correto desempenho do equipamento. Também foram corrigidas as fixações das bases e realizado o alinhamento dos motores, assegurando maior estabilidade e impedindo qualquer tipo de desalinhamento e desbalanceamento.

Figura 22 – Espectro de Frequência Para Coleta - Desgaste.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Figura 23 – Comparação Temporal de Manutenção.



Fonte: Autoria Própria, 2024

4.3 MANUTENÇÃO PENEIRA 04

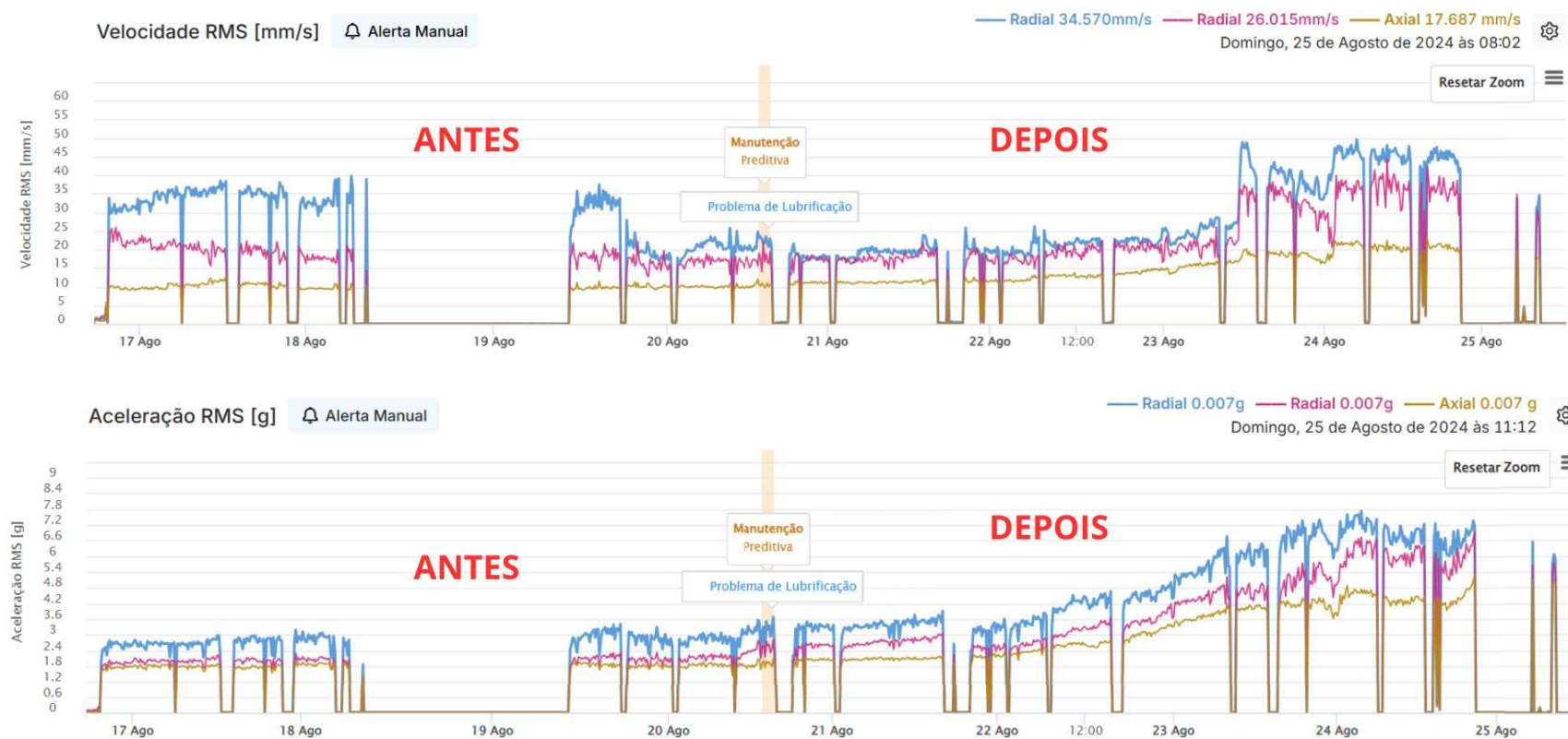
No dia 20 de agosto, foi emitido um alerta indicando um problema relacionado à lubrificação do equipamento, conforme ilustrado na Figura 24.

A equipe de manutenção realizou uma intervenção imediata após o alerta emitido. Durante a inspeção em campo, foi constatado que a causa do alerta estava associada ao acúmulo excessivo de resíduo de graxa no reservatório da peneira 04.

O padrão que pode ser notado no gráfico acima indica que antes do momento destacado com “manutenção preditiva” os valores de velocidade e aceleração RMS apresentou picos elevados, indicando um aumento significativo de vibração no equipamento, e esse aumento de vibração do equipamento foi confirmado com o diagnóstico de falha de lubrificação do equipamento. Após esse intervalo destacado nota-se que houve uma diminuição nos picos de leitura de velocidade e aceleração RMS até um determinado momento onde nota-se que após alguns dias os picos de leitura voltam a destacar-se, indicando que outro problema estava presente, onde a equipe de manutenção com uma inspeção visual no equipamento e visto esse aumento nos dados de, principalmente, aceleração RMS, constatou que havia necessidade de manutenção no equipamento, assim, nos dias seguintes, foi realizada a substituição do eixo da peneira, em momento oportuno de parada programada para manutenção, sanando esse problema no equipamento.

Após estas análises, é possível concluir que a intervenção indicada pelo sensor multivariável e a verificação da equipe de manutenção estavam corretas em seus diagnósticos de falha de lubrificação, sendo possível intervir no equipamento em tempo real e fazer a intervenção em horário programado, evitando uma parada inesperada e evitando perdas de produção.

Figura 24 – Comparação Temporal de Manutenção - Peneira 04.



Fonte: Autoria Própria, 2024

5 CONCLUSÃO

Após esse estudo, conclui-se que o presente trabalho atingiu com êxito seu objetivo principal de implementar um sistema de supervisão sistemática e manutenção preditiva em máquinas industriais utilizadas no processo de mineração de calcário. A aplicação do sensor multivariável *Smart Trac Pro* demonstrou ser uma solução eficiente para o monitoramento contínuo e em tempo real de componentes críticos da indústria de calcário, como os moinhos e peneiras, que desempenham papel fundamental na operação da planta industrial. A utilização desse sistema permitiu a análise de parâmetros essenciais, incluindo vibração, temperatura e aceleração RMS, elementos que serviram como indicadores de desempenho e facilitadores na tomada de decisão para intervenções de manutenção planejadas.

A implementação trouxe resultados expressivos, principalmente no que diz respeito à redução de paradas não programadas. A capacidade de identificar antecipadamente falhas em rolamentos e outros componentes possibilitou a realização de intervenções preditivas, o que amenizou os riscos de interrupções prolongadas.

Os resultados apresentados no Capítulo 4 reforçam a eficácia do sistema de monitoramento implementado. Destaca-se, por exemplo, a análise do espectro de frequência (Figura 20), que possibilitou a identificação precisa de padrões de vibração anormais, associados ao desgaste prematuro de componentes. Além disso, a comparação temporal dos indicadores de manutenção (Figura 23) revelou uma redução significativa nos picos de vibração após as intervenções planejadas, confirmando o impacto positivo das ações de manutenção preditiva. Esses achados comprovam que o uso de sensores multivariáveis não apenas aumentou a confiabilidade dos equipamentos, mas também elevou os padrões de gestão e monitoramento na planta industrial.

O uso desse tipo de sensores que utilizam a inteligência artificial para a realização de planos de manutenção preditiva e preventiva deverá se tornar cada vez mais comum, pois como vimos neste estudo, os benefícios e agilidade em apontar anomalias nos equipamentos faz com que o custo benefício da instalação destes sensores gere um grande impacto econômico para a empresa, isso se dá pelo fato de que com um bom plano de manutenção preditiva se evitam as longas paradas por falha do equipamento trazendo grande economia em custos operacionais e aumentam a eficiência dos equipamentos, e a implementação destes sensores é crucial para a melhoria contínua dos planos de manutenção.

Um aspecto promissor deste estudo é o potencial de desdobramentos futuros proporcionado pela integração do sistema com técnicas de Inteligência Artificial (IA). Conforme discutido no desenvolvimento do *software* supervisor, a IA representa um avanço significativo para a manutenção preditiva, uma vez que é capaz de aprimorar a análise dos dados coletados por meio do aprendizado contínuo. Esse aprimoramento permitirá a identificação de falhas com ainda maior precisão e antecedência, possibilitando a implementação de algoritmos de otimização que tornarão o processo mais automatizado e eficiente. A consolidação desse modelo abrirá

caminhos para sua replicação em outras unidades industriais ou mesmo em setores distintos, tornando-se uma referência em gestão e manutenção de ativos críticos.

Além de ser uma solução viável e economicamente atrativa, a aplicação proposta neste trabalho oferece uma série de benefícios operacionais adicionais. A operação estável e contínua dos equipamentos contribui não apenas para a eficiência da produção, mas também para a segurança dos trabalhadores, ao prevenir falhas catastróficas e reduzir riscos associados à operação industrial. Esses fatores evidenciam o papel estratégico da manutenção preditiva na indústria moderna, onde a otimização dos processos e a redução de custos se tornam prioridades centrais.

Portanto, este estudo contribuiu significativamente para a evolução da gestão de manutenção na indústria de mineração de calcário. Ao combinar inovação tecnológica, por meio do uso de sensores multivariáveis, com a análise detalhada dos dados, o projeto apresentou uma abordagem sólida e eficiente para garantir a otimização da planta industrial. Os resultados obtidos validam a viabilidade técnica e econômica da solução proposta, consolidando a manutenção preditiva como uma ferramenta estratégica para o setor. A partir deste trabalho, vislumbra-se um futuro promissor, em que a integração de tecnologias avançadas, como a Inteligência Artificial, será capaz de transformar ainda mais os processos industriais, garantindo melhorias contínuas e promovendo uma gestão mais eficiente e inovadora dos equipamentos da planta industrial.

Projeta-se a expansão do uso dessa tecnologia para outros equipamentos dentro da planta industrial, visando ampliar a confiabilidade e a disponibilidade operacional em todo o ciclo produtivo.

REFERÊNCIAS

- BARRETO, M. L. *et al.* Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o brasil. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), 2001.
- BITKOM, V.; VDMA, E.; ZVEI, E. **Implementation Strategy Industrie 4.0: Report on the results of the Industrie 4.0 Platform.** [S.l.]: Bitkom eV Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue ... , 2016.
- CAMARGOS, M. E. Aplicação do conceito indústria 4.0 no beneficiamento de calcário. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2021.
- CAPELLI, A. **Automação industrial: controle do movimento e processos contínuos.** [S.l.]: Ed. Érica, 2008.
- CBMM - COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO. **Manual de Britagem.** [S.l.], 2013.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas.** [S.l.]: AMGH editora, 2013.
- COSTA, G. A. S. *et al.* Análise vibratória de fundações de máquinas sobre estacas. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2013.
- EDWARDS, P. **Industrial Grinding Technology in the Cement Industry.** [S.l.]: Springer, 2018.
- GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério .** [S.l.]: Editora Atlas SA, 2014.
- HARRIS, C. M. **Shock and Vibration Handbook.** [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2014.
- HOLANDA, S. M. S. Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto. 2016.
- ISO. **Mechanical Vibration - Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts.** 2009.
- JR, O. P.; SCUCUGLIA, R. **Indicadores de Desempenho–Estruturação do Sistema de Indicadores Organizacionais.** [S.l.]: São Paulo: Fundação Nacional da Qualidade, 2012.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção-função estratégica.** [S.l.]: Qualitymark Editora Ltda, 2009.
- KUTZ, M. **Handbook of Mechanical Engineering.** [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2017.
- MONCHY, F. A função manutenção: formação para a gerência da manutenção industrial. **São Paulo: Editora Durban Ltda**, p. 424, 1989.
- MÁRQUEZ, F. P. G.; TOBIAS, A. M.; PAPAELIAS, M. **Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines.** [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2012.
- NASCIMENTO, B. d. Eixo empenado em máquinas rotativas, mais uma maneira de detecção. **Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica)–Centro Universitário Maurício de Nassau, Recife, 45p**, 2016.
- NETO, E. D. C. *et al.* Os impactos da indústria 4.0 na mineração. Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

OBERG, E.; JONES, F. D. **Machinery's Handbook**. [S.l.]: Industrial Press, 2020.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**, v. 4, n. 2, 2008.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1991.

TEDESCO, M.; GIANELLO, C. Escolha do corretivo da acidez do solo. **Kaminski J, coordenador. Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto. Pelotas: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 95–113, 2000.

UDDIN, S.; NOR, K. M.; SALAM, S. Integration technique for an expert system on to a real-time system. *In*: IEEE. **2000 TENCON Proceedings. Intelligent Systems and Technologies for the New Millennium (Cat. No. 00CH37119)**. [S.l.], 2000. v. 1, p. 144–150.

WEG, S. Motores elétricos: guia de especificação. **WEG, Jaraguá do Sul-SC**, 2012.

WEISS, N. L. **SME Mineral Processing Handbook**. [S.l.]: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1985.