

Implementação de um Sistema de Monitoramento Inteligente na Gestão da Manutenção Industrial: Construção e Análise de um Protótipo para Medição de Vibração Triaxial e Temperatura

Vithorio da Conceição Dutra (Universidade Federal de Pelotas)

William Dietrich Klug (Universidade Federal de Pelotas)

Aline Soares Pereira (Universidade Federal de Pelotas)

Alejandro Martins Rodriguez (Universidade Federal de Pelotas)



O artigo discute a aplicação de um sistema de monitoramento inteligente na gestão da manutenção industrial, incorporando tecnologias da Indústria 4.0. Desta forma foi desenvolvido um protótipo experimental com um microcontrolador ESP8266, um sensor de vibração ADXL345 e um sensor de temperatura digital DS18B20. Assim, os autores delimitaram um processo metodológico para a coleta e análise dos dados com o objetivo de coletar informações do maquinário industrial. Para projetos futuros, a integração de técnicas avançadas de análise de dados, como a transformada de Fourier, e a conectividade oferecida pela Internet das Coisas (IoT) pode aprimorar ainda mais a capacidade preditiva e a automação dos sistemas de manutenção.

Palavras-chave: Internet das coisas, Indústria 4.0, Monitoramento inteligente.

1. Introdução

As inovações tecnológicas presentes na indústria vêm sendo capazes de modernizar os processos bem como reduzir custos. Para o setor de manutenção, adotou-se o nome de manutenção 4.0, visto que ela incorpora tecnologias presentes na quarta revolução industrial, como *internet of things* (IOT), computação em nuvem, inteligência artificial, aprendizado de máquina, *edge computing*, *cybersecurity*, *digital twin* dentre outras. Com a 4ª Revolução Industrial, vêm sendo apresentadas novas ferramentas que prometem integrar o meio físico (máquina) com o meio digital (computador). Cita-se o exemplo de dispositivos inseridos em motores capazes de realizar a medição da vibração e da temperatura resultante. Assim, a aplicação da indústria 4.0 à manutenção pode diminuir os custos destas e o tempo de inatividade, melhorando a produtividade e a qualidade de acordo com relatos de Lambán et al. (2022). Ressalta-se a importância da medição constante do maquinário e equipamentos pelo setor de manutenção visando identificar possíveis falhas com o propósito de prolongar o tempo de vida útil do dispositivo. A partir desses conceitos, o monitoramento inteligente se destaca por proporcionar uma maior eficiência na coleta de dados sobre temperatura e vibrações do maquinário com o intuito de captar os dados para representação visual conforme estudos relatados por Namjoshi e Rawat (2022). Segundo Sahli, Evans e Manohar (2021), a manutenção é considerada uma atividade essencial que as organizações se esforçam para desenvolver e melhorar, onde seu aprimoramento resulta em diminuição de erros e/ou avarias. Além disso, o autor atenua que para os próximos anos, há uma expectativa que o uso das tecnologias preditivas aumente, pois qualquer indústria poderá se beneficiar com tal técnica. Nesse sentido, objetiva-se neste artigo apresentar a construção de um dispositivo para medição da vibração triaxial e temperatura da superfície utilizando um microcontrolador e sensores de aceleração e temperatura, de baixo custo, com o intuito de coletar dados experimentais para a realização de uma análise de sinal para motores elétricos. Deste modo, pretende-se identificar as variáveis e os processos metodológicos presentes na aplicação de um sistema de monitoramento inteligente na gestão da manutenção de motores, bem como os desafios e oportunidades que estes sistemas podem trazer. Este projeto é um avanço de estudos anteriores, realizados pelos integrantes do Núcleo de Estudos Aplicados em Indústria 4.0 - NEAI 4.0, ligados ao setor da manutenção. Desta forma destaca-se a importância dos grupos de pesquisa nas instituições de ensino superior, onde o conhecimento impulsiona inovações tecnológicas.

2. Referencial teórico

2.1 Gestão da Manutenção

Em paralelo com a constante evolução das máquinas dentro das fábricas, busca-se um modo de assegurar o pleno desempenho das mesmas. A fim de garantir a disponibilidade e eficiência dos ativos físicos, técnicas da gestão da manutenção são aplicadas constantemente. A manutenção, de acordo com Gregório, Santos e Prata (2018), se dá em um conjunto de ações técnicas e administrativas com o objetivo de manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. Além disso, os autores Moleda et al., complementam que essas ações visam ao longo do ciclo de vida de um item preservá-lo ou restaurá-lo para um estado funcional adequado. Reforçam que essas ações abrangem atividades como inspeção, monitoramento de condições, manutenções de rotina, substituição de peças, reparos, revisões, além do planejamento e supervisão de todas essas etapas. Para Nunes, Santos e Rocha (2023), as abordagens referentes às estratégias de manutenção passaram por muitas transformações e evoluções com o passar do tempo a fim de evitar paradas inesperadas do maquinário. O papel da indústria 4.0 permitiu essas estratégias avançarem para abordagens mais proativas como a manutenção baseada em condição, após ela a manutenção preditiva na qual busca prever falhas, determinar o tempo de vida útil restante de ativos industriais e sugerir ações de manutenção e por fim a manutenção prescritiva capaz de realizar previsões. Para haver uma boa previsão das falhas, é necessário que se conheça o comportamento do ativo em termos de coleta de dados, para isso ressalta-se a importância do amadurecimento da manutenção preditiva. Retomando o foco na manutenção preditiva, Gregório, Santos e Prata (2018) definem como o monitoramento de um ou mais parâmetros de um item com o objetivo de realizar as ações necessárias antes que a falha aconteça – também é conhecida como manutenção baseada na condição. Nessa linha, Achouche et al. (2022), salientam que a manutenção preditiva enfrenta desafios que dificultam sua implementação e aceitação ampla. Embora existam algoritmos disponíveis no mercado, as empresas que desejam os benefícios da Indústria 4.0 precisam equilibrar as oportunidades com os altos custos de instrumentação, software e conhecimento especializados. Essa desvantagem é especialmente significativa nas fases iniciais, quando há falta de dados sobre o comportamento dos equipamentos, e em novos sistemas, sem experiência operacional prévia. As inspeções feitas por técnicos e especialistas foram automatizadas por sensores e dispositivos capazes de medir, monitorar e processar sinais que representam parâmetros físicos de equipamentos industriais, como sinais acústicos, corrente, voltagem, temperaturas, forças, vibrações, entre outros (NUNES, SANTOS e ROCHA, 2023).

Com essas estratégias, as intervenções podem ser baseadas nos valores dos sensores e as ações podem ser acionadas quando um valor estiver fora dos limites pré-estabelecidos. Dentre os parâmetros físicos mais relevantes que se destacam na bibliografia, estão a análise de vibração e temperatura, onde a partir delas já é possível coletar dados relevantes com o intuito de uma análise das condições do equipamento. Para gerenciar estes indicadores, é necessário que uma organização possua um sólido sistema de informação. Na manutenção, o armazenamento destes dados deve ser algo comum, e este sistema deve registrar todas as informações dos equipamentos e formar um histórico de manutenções (Gonçalves, 2020).

2.2 Tecnologias de Análise de Vibração e Termografia na Manutenção Industrial

Ágoston (2020) comenta que os problemas no motor podem comprometer o desempenho, levando à destruição de componentes, impactando a operação do equipamento. O autor ainda afirma que o balanceamento é crucial para peças rotativas, sem ele, vibrações e movimentos irregulares surgem, causando desgaste prematuro, mau funcionamento e ruídos indesejáveis. Logo, o monitoramento da vibração deve ser controlado visto que esse fenômeno pode afrouxar ou soltar elementos de fixação como porcas, ou em processos de usinagem pode causar trepidação, causando um mau acabamento superficial. Além disso, Gonzalez et al. (2023) classificam três tipos de fontes de ruídos que podem ser distinguidas em motores elétricos: de origem aerodinâmica, mecânica e eletromagnética. Segundo Gregório e Silveira (2018) os parâmetros de vibração são expressos em termos de deslocamento, velocidade e aceleração, os autores reforçam que cada equipamento vibra de acordo com a frequência característica de seus componentes, ou seja, cada equipamento possui uma assinatura espectral original. No momento em que um ou mais componentes começam a falhar, a frequência e a amplitude da vibração mudam, deteriorando a assinatura espectral original. De acordo com a definição de deslocamento segundo Chu et al. (2024), podemos encontrar a velocidade e aceleração, sendo:

- Deslocamento $x = A.\text{sen}(w.t)$
- Velocidade $v = \frac{dx}{dt} = A.w.\text{cos}(w.t)$
- Aceleração $a = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d(\frac{dx}{dt})}{dt} = \frac{dv}{dt} = -A.w^2.\text{sen}(w.t)$

Assim a amplitude de vibração, que indica a severidade da vibração, pode ser expressa em termos de deslocamento, velocidade ou aceleração. O deslocamento mede a mudança de posição relativa e é usado para movimentos abaixo de 10 Hz. A velocidade, que é a taxa de variação do deslocamento, é apropriada para movimentos entre 10 Hz a 1000 Hz. A

aceleração, que é a taxa de variação da velocidade, é usada para frequências acima de 1000 Hz (CHU et al., 2024).

Como veremos adiante, os dados coletados são oriundos dos valores da aceleração dos eixos X , Y e Z . Com o objetivo de encontrar os valores em termos de velocidade e ou posição, se faz necessário realizar uma integração numérica, visto que não se conhece a função da onda apenas seus dados numéricos em função do tempo. Existem diferentes formas de aplicar uma integração numérica, sendo o método dos trapézios o mais simples de implementar, no entanto (Anton; Bivens, Davis, 2014) propõe que podemos utilizar o método de Simpson, pois ele fornece uma estimativa mais precisa da integral em comparação com o Método do Trapézio.

Com informações dos sinais de vibração, é possível estudar o comportamento das frequências que compõem o sinal. Conforme Lin e Ye (2019), os gráficos que representam o sinal de vibração, oferecem dados fundamentais para os engenheiros analisarem e identificarem falhas nas máquinas sejam no domínio temporal ou no domínio da frequência.

De acordo com Kshirsagar, Goud e Khan (2020) o analisador de espectro de transformada rápida de Fourier utiliza uma técnica de processamento digital de sinais para examinar uma forma de onda através da transformada de Fourier, proporcionando uma análise detalhada dos espectros da forma de onda do sinal. Sendo assim ela é capaz de identificar as frequências separadamente a partir de uma forma de onda. Logo o conhecimento do maquinário, bem como as frequências que compõem o movimento da mesma, permite identificar e prever possíveis falhas. Por outro lado, a termografia também se apresenta como uma técnica de manutenção preditiva que pode ser usada para monitorar a condição das máquinas. De acordo com Venegas et al. (2022) a termografia mede a radiação infravermelha emitida por um objeto e a relaciona com sua temperatura. Dado que muitas falhas em equipamentos industriais são precedidas por alterações de temperatura, tal monitoramento pode identificar problemas precocemente, permitindo correções antes que se agravam e se tornem mais caras.

Segundo NBR 15572:2013 anomalias por superaquecimento em equipamentos mecânicos, geralmente acontece devido ao atrito causado por falta de lubrificação adequada, desalinhamento, carga excessiva nos componentes ou mudanças nas condições de operação.

A análise da temperatura apresenta-se menos complexa em comparação com os procedimentos da análise de vibração. No entanto, a coleta dos parâmetros distintos da máquina, como temperatura e vibração, pode ser essencial para uma compreensão mais abrangente das condições operacionais e identificação de potenciais falhas. Para este propósito é possível fazer uso do modelo de regressão linear simples proposto por

Montgomery e Runger (2021), onde é possível relacionar a temperatura do equipamento (variável dependente) com a vibração (variável independente).

3. Metodologia

A pesquisa tem por objetivo o caráter exploratório, no qual (Marconi; Lakatos, 2017) classificam como uma pesquisa empírica que busca desenvolver hipóteses, aumentar a familiaridade do pesquisador com um ambiente ou fenômeno para futuras pesquisas e modificar e esclarecer conceitos. Quanto aos métodos empregados, foi adotado uma pesquisa experimental, onde segundo (Gil, 2022) consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. Trata-se, portanto, de uma pesquisa em que o pesquisador é um agente ativo, e não um observador passivo.

3.1. Materiais

Com o intuito de construir o protótipo de um sistema de vibração e temperatura utilizado por empresas no monitoramento de motores no setor da manutenção, utilizou-se um microcontrolador ESP8266, que possui capacidade de comunicação *Wi-Fi* e funciona como uma ferramenta de conexão entre os sensores de aceleração e temperatura e o computador. Quanto ao software empregado na análise dos sinais coletados, optou-se pelo programa GNU Octave devido à sua eficiência e ao fato de ser um software livre. Os sensores descritos são: Um módulo GY-291 ADXL345 é um acelerômetro de 3 eixos da empresa Analog Devices que é usado para medir vibrações. Ele tem uma faixa de voltagem de 2,0 V a 3,6 V e pode medir acelerações de até ± 16 g, com uma resolução de até 13 bits e uma precisão de 4 mg/LSB. A taxa de dados de saída e a largura de banda variam de 0,1 Hz a 1600 Hz. Além disso, ele pode operar em uma faixa de temperatura de -40°C a 85°C . Já o sensor de temperatura DS18B20, opera segundo a fabricante entre 3.0V e 5.5V e é capaz de medir temperaturas entre -55°C a 125°C , com uma precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$. A conexão é feita por três pinos: GND (Terra), DQ (Entrada/Saída de Dados) e VDD (Tensão de Alimentação). As aplicações definidas pelo fabricante incluem controles termostáticos, sistemas industriais, produtos de consumo, termômetros ou qualquer sistema termicamente sensível.

3.2. Procedimentos para Coleta e Análise de Dados

Com o protótipo de medição de vibração e temperatura em pleno estado de funcionamento, partiu-se para a aplicação prática a fim de obter os dados da máquina. Dessa maneira, delineamos os procedimentos da metodologia nas seguintes fases como é demonstrado na tabela 1:

Tabela 1 - Procedimento

Fases	Procedimentos	Objetivo
1	Coleta de Dados	No motor selecionado, posicionou-se os sensores estrategicamente para capturar os parâmetros físicos produzidos pela máquina.
2	Limpeza dos Dados	Após armazenar os dados, esses foram importados para uma planilha eletrônica, onde realizou-se a limpeza para corrigir erros e prepará-los para os processos matemáticos.
3	Gráfico no Domínio do Tempo	Importante para visualização dos parâmetros de aceleração e temperatura em função do tempo.
4	Gráfico no Domínio da Frequência	Decompõe um sinal no domínio do tempo para o domínio de frequência. Dessa forma, ela se torna importante para determinar as frequências presentes no espectro de onda.
5	Conclusão	De posse dos dados analisados, elaborou-se as considerações.

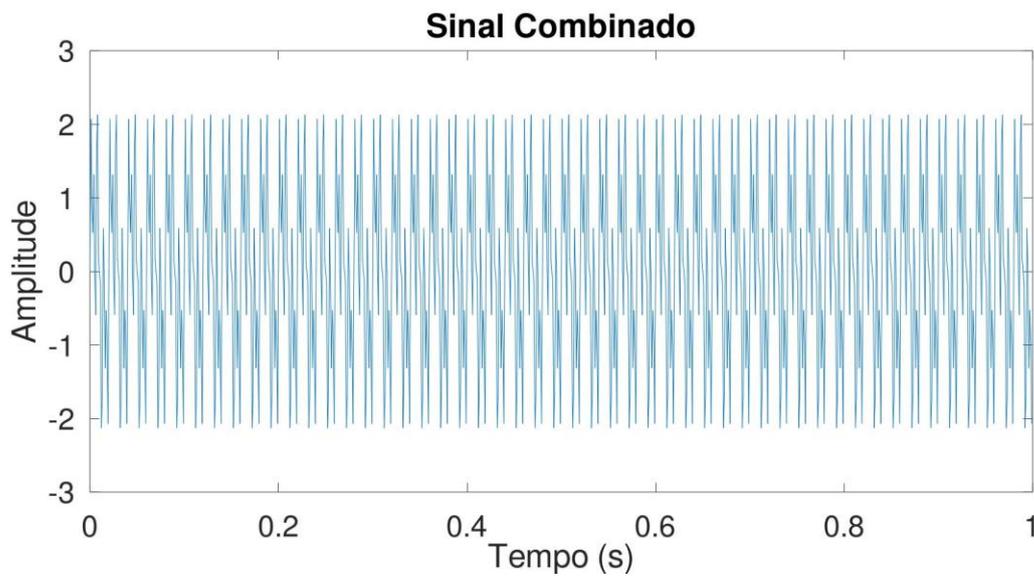
Fonte: elaborada pelos autores.

4. Resultados

O presente artigo apresentou os meios para a construção de um dispositivo para medição da vibração triaxial e temperatura da superfície utilizando um microcontrolador e sensores de aceleração e temperatura, de baixo custo, com o intuito de coletar dados experimentais para a realização de uma análise de sinal para motores elétricos.

Nesse sentido, para garantir a precisão e confiabilidade das análises de sinais nas medições reais, a simulação paralela com sinais de dados artificiais gerados pelo Octave se torna uma ferramenta valiosa. No código em questão, a criação de três ondas com frequências de 50 Hz, 150 Hz e 300 Hz, com amplitudes iguais (Figura 1), fornece um ambiente controlado para testar e validar os métodos de análise.

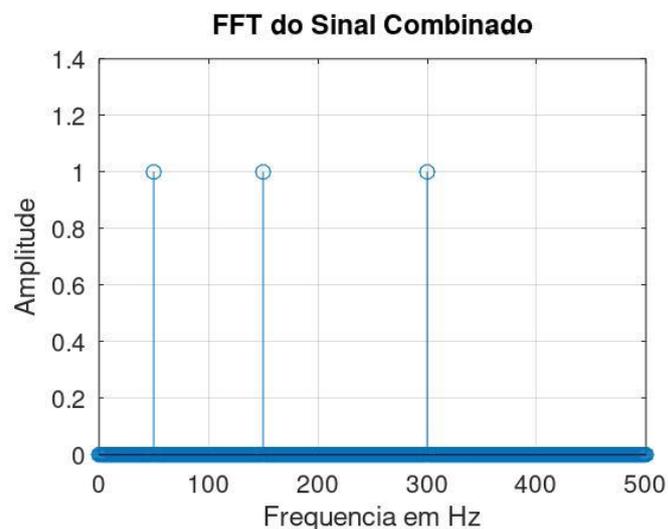
Figura 1 - Sinal Combinado das frequências de 50 Hz, 150 Hz e 300 Hz.



Fonte: elaborada pelos autores.

Após a criação do sinal, as variáveis que compõem a forma de onda são armazenadas em um arquivo de texto. Esse procedimento possibilita a recriação do sinal e a aplicação da técnica da Transformada de Fourier (Figura 2). Com isso, espera-se obter os valores de frequência mencionados durante a criação da onda através dessa análise.

Figura 2 - FFT do Sinal Combinado.



Fonte: elaborada pelos autores.

Como resultado, é possível comprovar a eficiência dos códigos utilizados para a análise de frequências em um sinal de onda. Diante disso, partimos para uma coleta de dados de uma fonte de vibração (Figura 3), no caso um motor elétrico presente em uma serra de bancada, onde pretendesse construir os gráficos pertinentes.

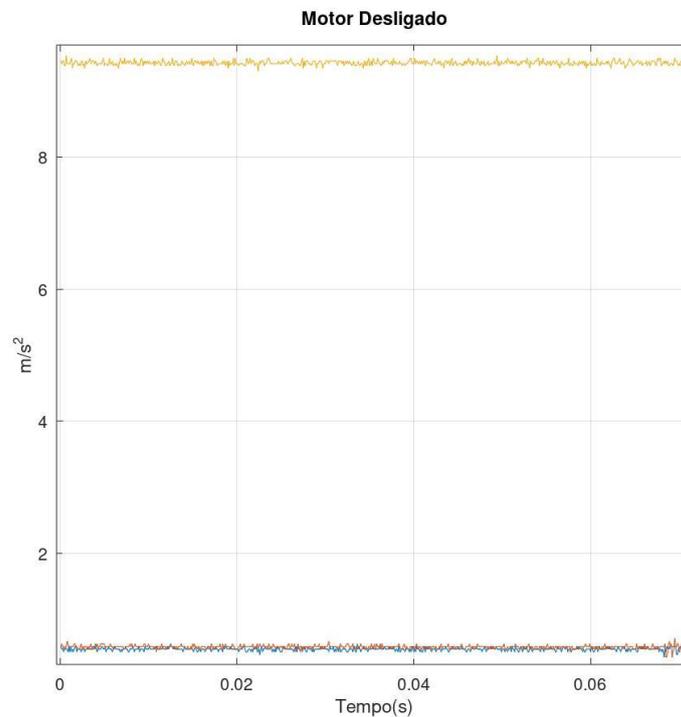
Figura 3 - Monitoramento do Motor.



Fonte: elaborada pelos autores.

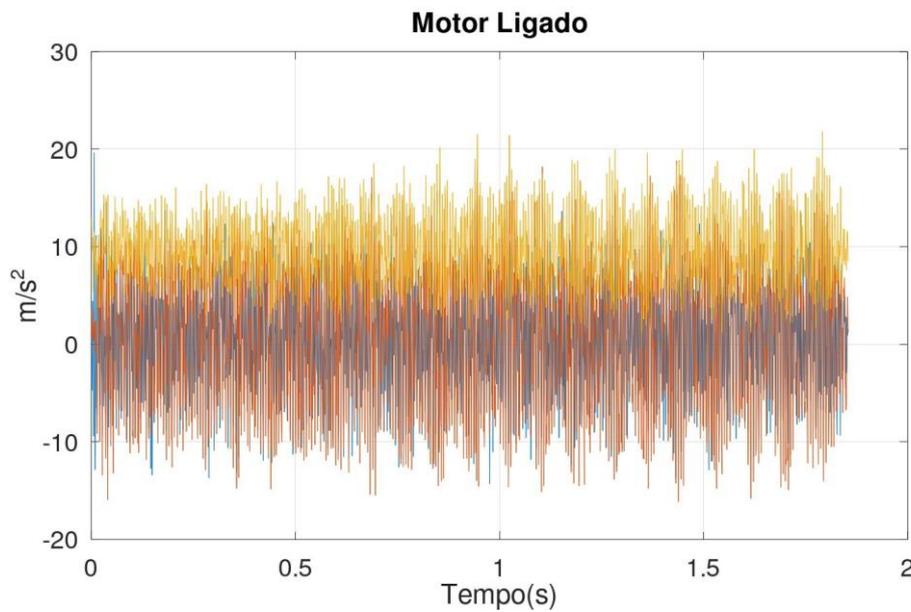
Com ambos os gráficos no domínio do tempo, podemos perceber uma gama de amplitudes do motor ligado em comparação ao motor desligado (Figura 4 e Figura 5). Esse comportamento reflete a rotação do motor. Esses dados já tem grande valor para identificar a intensidade que está ocorrendo a vibração.

Figura 4 - Análise de Vibração do Motor.



Fonte: elaborada pelos autores.

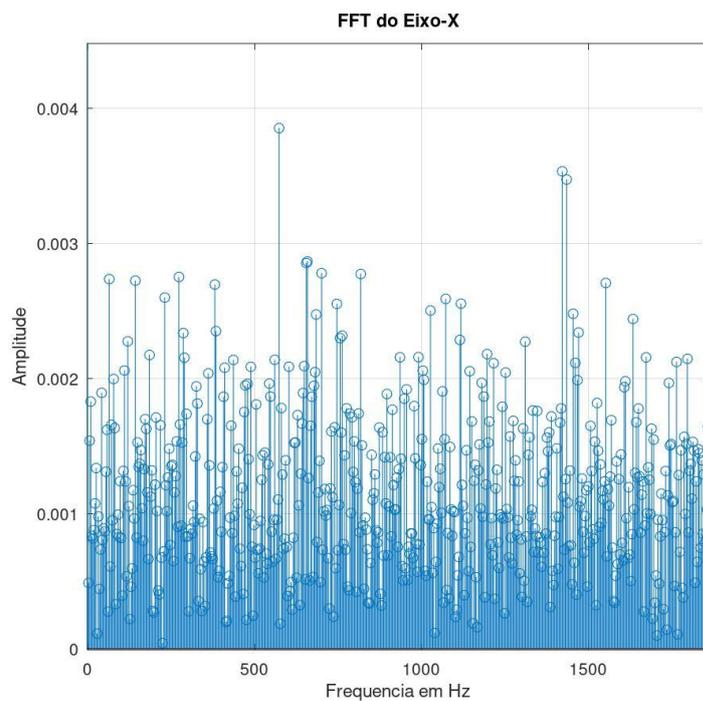
Figura 5 - Análise de Vibração do Motor.



Fonte: elaborada pelos autores.

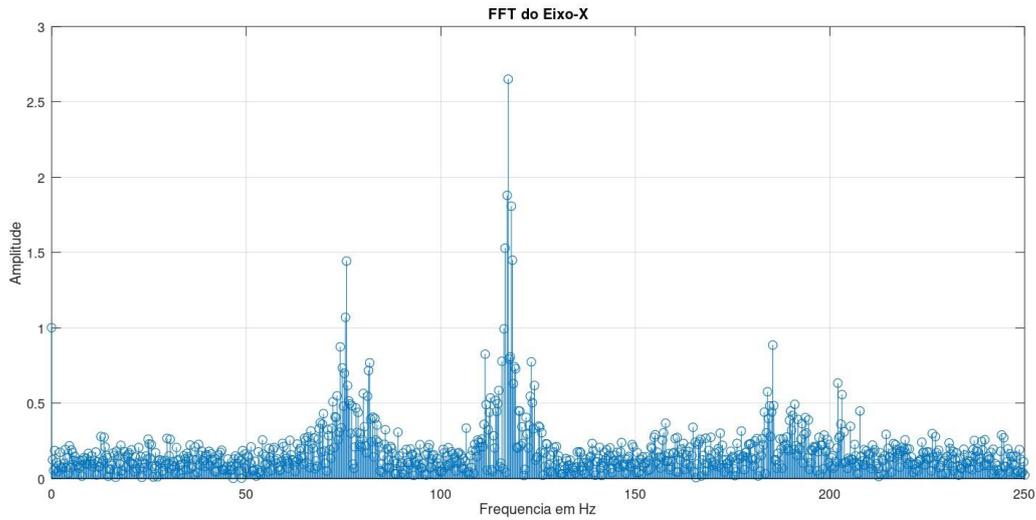
Podemos notar o mesmo comportamento nas figuras acima relacionadas a transformada rápida de Fourier (Figura 6 e Figura 7), porém com uma percepção mais voltada nas frequências dominantes. Nesse contexto, quando o motor está desligado, esperasse ver um espectro de frequências de baixa amplitude, confirmando que as frequências analisadas estão sendo geradas pela fonte de vibração.

Figura 6 - FFT do Sinal Coletado da Máquina Inativa.



Fonte: elaborada pelos autores.

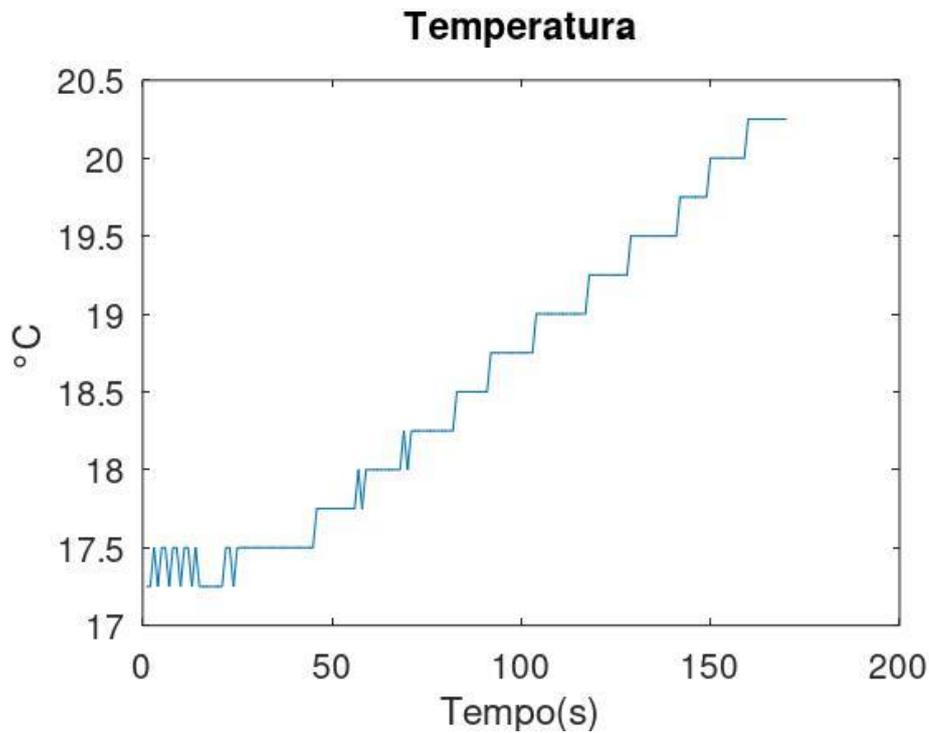
Figura 7 - FFT do Sinal Coletado da Máquina Ativa.



Fonte: elaborada pelos autores.

Por fim, o acompanhamento da temperatura (Figura 8) pode servir como uma ferramenta que previne problemas de superaquecimento ou falhas que podem ser relacionadas com o aumento excessivo de temperatura.

Figura 8 - Temperatura da Máquina Ativa.



Fonte: elaborada pelos autores.

4. Conclusão

Este trabalho teve como desafio a experimentação da construção de um protótipo para analisar a vibração e temperatura no setor de manutenção, partindo de abordagens teóricas sobre o tema. A dificuldade em projetar um experimento novo serviu como uma valiosa ferramenta de aprendizagem e incentivo à criatividade.

Observa-se que, para a implementação de um sistema de coleta de dados em uma empresa, seria necessário um investimento financeiro significativo em equipamentos ou até mesmo a terceirização desse serviço, considerando, como já dito, que muitas empresas oferecem soluções nessa área. No entanto, sob a perspectiva da engenharia de produção, reconhece-se que esse sistema tem um grande potencial para aplicação na indústria, especialmente na gestão da manutenção, assim como em outras áreas. O controle de temperatura e vibração pode fornecer dados valiosos no chão de fábrica. Por exemplo, pode-se monitorar a produtividade do maquinário ou o tempo de funcionamento das máquinas. Além disso, é possível medir o esforço físico que cada operador exerce em uma máquina, o que pode ser indicado por um aumento de temperatura. A compactação dessa tecnologia na construção de novas máquinas permite que as empresas, utilizando sensores, forneçam ferramentas digitais para os clientes monitorarem seus equipamentos de forma eficiente.

O artigo visa colaborar também com a visão "*maker*", que neste caso promoverá nas equipes de gestão da manutenção uma melhor avaliação da necessidade de sensores, do potencial da manutenção preditiva em cada caso específico, e conseqüentemente de uma clara avaliação benefício/investimento das opções desses equipamentos, disponíveis no mercado.

Assim, conclui-se que a implementação de um sistema de análise de vibração e temperatura no setor de manutenção não só aprimora a gestão e a produtividade industrial, como também oferece uma oportunidade significativa para inovação tecnológica. Embora haja desafios financeiros e técnicos, os benefícios em termos de eficiência operacional e monitoramento preventivo superam esses obstáculos. A adoção de tais sistemas representa um avanço estratégico para empresas que buscam excelência em suas operações e competitividade no mercado.

REFERÊNCIAS

ALLDATASHEET.COM. DS18B20 Datasheet(PDF) - Dallas Semiconductor. Disponível em:
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/58557/DALLAS/DS18B20.html>.

ACHOUCH, Mounia et al. **On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges**. Applied Sciences, v. 12, n. 16, p. 8081, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12168081>.

Analog Devices. ADXL345: Digital Accelerometer. Disponível em:
<<https://www.analog.com/en/products/adxl345.html>>.

ANTON, H.; BIVENS, I.; DAVIS, S. **Cálculo** - Volume I - 10.ed. [s.l.] Bookman Editora, 2014.

ÁGOSTON, Katalin. **Studying and Measuring System for Motor Base Unbalance**. Procedia Manufacturing, v. 46, p. 391-396, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.057>.

ABNT. NBR 15572:2013. **Ensaio não destrutivo — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

CHU, Thuy; NGUYEN, Tan; YOO, Hyunsang; WANG, Jihoon. **A review of vibration analysis and its applications**. Heliyon, v. 10, n. 5, e26282, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26282>

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022. ISBN 9786559771653.

GONÇALVES, Hélder Ricardo Domingues. **Gestão da manutenção na indústria 4.0**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Disponível em: <https://comun.rcaap.pt/handle/10400.26/34667>. Acesso em: 20 maio. 2024.

GONZALEZ, P.; BUIGUES, G.; MAZON, A. J. **Noise in Electric Motors: A Comprehensive Review**. Energies, v. 16, n. 14, p. 5311. 2023.

GREGÓRIO, Gabriela Fonseca Parreira; SANTOS, Danielle Freitas; PRATA, Auricélio Barros. **Engenharia de manutenção**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

GREGÓRIO, Gabriela Fonseca Parreira; SILVEIRA, Aline Moraes da. **Manutenção Industrial**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

KSHIRSAGAR, Balaji D.; GOUD, S. Chakradhar; KHAN, Subim N. **Vibration analysis of femur bone by using consistent mass matrices and fast Fourier transform analyzer**. Materials Today: Proceedings, v. 26, parte 2, p. 2254-2259, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.489>.

LAMBÁN, María Pilar; MORELLA, Paula; ROYO, Jesús; SÁNCHEZ, Juan Carlos. **Using industry 4.0 to face the challenges of predictive maintenance: A key performance indicators development in a cyber physical**

system. Computers & Industrial Engineering, v. 171, 2022. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108400>.

LIN, H-C.; YE, Y-C. **Reviews of bearing vibration measurement using fast Fourier transform and enhanced fast Fourier transform algorithms**. Advances in Mechanical Engineering, v. 11, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1687814018816751>

MARCONI, M. DE A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas Productions, 2017.

MOLEDA, Marek et al. **From Corrective to Predictive Maintenance**—A Review of Maintenance Approaches for the Power Industry. Sensors, v. 23, n. 13, p. 5970, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23135970>.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

NAMJOSHI, Janhavi; RAWAT, Manish. **Role of smart manufacturing in industry 4.0**. Materials Today: Proceedings, v. 63, p. 475-478, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.620>.

NUNES, P.; SANTOS, J.; ROCHA, E. **Challenges in predictive maintenance** – A review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 40, p. 53-67, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.004>.

SAHLI, Aymane; EVANS, Richard; MANOHAR, Arthi. **Predictive Maintenance in Industry 4.0: Current Themes**. Procedia CIRP, v. 104, p. 1948-1953, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.329>.

Thuy Chu, Tan Nguyen, Hyunsang Yoo, Jihoon Wang, **A review of vibration analysis and its applications**, Heliyon, Volume 10, Issue 5, 2024, ISSN 2405-8440.

VENEGAS, P.; IVORRA, E.; ORTEGA, M.; SÁEZ DE OCÁRIZ, I. Towards the Automation of Infrared Thermography Inspections for Industrial Maintenance Applications. Sensors, v. 22, n. 2, p. 613, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s22020613>.