

SISTEMA DE MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES EMBARCADO: UMA ANÁLISE BASEADA EM GNU/ OCTAVE

EMBEDDED VIBRATION MONITORING SYSTEM: A GNU/ OCTAVE-BASED ANALYSIS

Adriano de Souza Alvares ^{1, i}
André Roberto da Silva ^{2, ii}
Jose Sérgio Medeiros Junior ^{3, iii}
Tony Emerson Marim ^{4, iv}
Weslei Diego Pereira ^{5, v}

RESUMO

Este artigo apresenta o desenvolvimento e a análise de um sistema integrado de monitoramento de vibrações, concebido para uma implementação de baixo custo e prática em ambientes industriais. A arquitetura do sistema utiliza um microcontrolador ESP32, uma unidade de medição inercial (IMU) MPU6050, um módulo de Relógio de Tempo Real (RTC) DS3231 e um cartão microSD para o registro de dados. Essa configuração permite a aquisição de dados de vibração triaxiais, que são precisamente marcados com data e hora e armazenados em formato de valores separados por vírgula (CSV). A aquisição de dados ocorre a uma frequência de 100 Hz, seguida pelo condicionamento do sinal com um filtro *Butterworth* de 5ª ordem em uma banda de passagem de 10 a 45 Hz. A análise espectral subsequente é realizada no GNU Octave por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Determinou-se que o foco no eixo Z proporcionou uma detecção superior de vibrações verticais em superfícies planas. O sistema demonstrou sua eficácia na identificação de componentes espectrais chave, tornando os dados adequados para análises estatísticas avançadas, como a Densidade Espectral de Potência (PSD), e para a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina, incluindo o *K-means* para identificação de padrões. Estes resultados indicam que a estratégia proposta é uma solução viável e econômica para a manutenção preditiva, consistente com os princípios da Indústria 4.0, especialmente para pequenas e médias empresas.

Palavras-chave: análise; manutenção preditiva; monitoramento de vibrações.

ABSTRACT

This paper presents the development and analysis of an integrated vibration monitoring system conceived for low-cost and practical implementation in industrial environments. The system architecture uses an ESP32 microcontroller, an MPU6050

¹ Doutor em Biotecnologia e Professor da Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: aalvares@sp.senai.br

² Mestre em Ciência da Computação e Professor da Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: andre.roberto.prof@gmail.com

³ Mestre em Engenharia da Produção pela Universidade de Araraquara e Professor da Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: jose.sjunior@sp.senai.br

⁴ Mestre em Engenharia Mecânica e Professor da Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: tony.marin@sp.senai.br

⁵ Graduando em Mecatrônica Industrial pela Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: weslei.pereira@sp.senai.br

inertial measurement unit (IMU), a DS3231 Real-Time Clock (RTC) module, and a microSD card for data logging. This configuration enables the acquisition of triaxial vibration data, which is precisely timestamped and stored in comma-separated value (CSV) format. Data acquisition occurs at a frequency of 100 Hz, followed by signal conditioning with a 5th-order Butterworth filter in a 10 - 45 Hz passband. Later spectral analysis is performed in GNU Octave via the Fast Fourier Transform (FFT). It was determined that focusing on the Z-axis provided superior detection of vertical vibrations on flat surfaces. The system showed its efficacy in identifying key spectral components, rendering the data suitable for advanced statistical analysis, such as Power Spectral Density (PSD), and for the application of machine learning algorithms, including K-means for pattern identification. These findings indicate that the proposed strategy is a viable and economical solution for predictive maintenance, consistent with the tenets of Industry 4.0, particularly for small and medium-sized enterprises (SMEs).

Keywords: analysis; predictive maintenance; vibration monitoring.

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de processos, faz-se necessário identificar problemas nas máquinas logo no início. Isso previne interrupções inesperadas e assegura que tudo funcione de forma confiável. A análise de vibrações é uma das técnicas mais usadas, reconhecida por sua capacidade de detectar falhas mecânicas. Isso ocorre porque muitas dessas falhas causam mudanças no modo como a máquina se comporta dinamicamente, o que se manifesta como componentes harmônicos anormais.

Este estudo apresenta a criação e avaliação de um sistema integrado de monitoramento de vibrações, com ênfase na facilidade de acesso e integração a baixo custo. O sistema utiliza um microcontrolador ESP32, que coleta, processa e registra os dados de vibração captados pelo sensor MPU6050. Este sensor combina acelerômetro e giroscópio em um único componente. Um módulo de relógio RTC DS3231 garante que os dados sejam sincronizados no tempo, permitindo o rastreamento preciso das medições, que são salvas em um cartão SD para análise futura.

Ao contrário de soluções que empregam FPGAs e memória flash de grande capacidade, este sistema opta por uma estrutura mais simples, porém eficiente. Ele realiza o processamento local em C++ e registra continuamente os parâmetros de aceleração nos eixos X, Y e Z. Esses dados serão processados posteriormente na plataforma GNU Octave, usando algoritmos como a FFT para identificar padrões espectrais de falhas mecânicas, e técnicas de aprendizado de máquina como *K-means* para classificar esses padrões.

1.1 Objetivo(s)

Desenvolver e testar um sistema embarcado de monitoramento de vibrações de baixo custo, com capacidade de aquisição triaxial, armazenamento em memória não volátil e análise dos dados em ambiente GNU Octave.

Apesar de existirem várias opções tecnológicas para acompanhar as vibrações e antecipar problemas em equipamentos, muitas vezes elas são caras e complicadas de colocar em prática. Isso torna difícil para pequenas e médias empresas utilizá-las. Pensando nisso, criar um sistema mais em conta, usando microcontroladores baratos e sensores de Sistemas Microeletromecânicos (MEMS), pode ser uma solução boa e

eficaz para facilitar o acesso à manutenção preventiva. Isso ajudaria a aumentar a confiança no funcionamento das máquinas e a diminuir os gastos com quebras inesperadas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O monitoramento de vibrações em máquinas rotativas tem se modernizado com a chegada das tecnologias da Indústria 4.0, o que possibilita diagnósticos que preveem problemas e acompanhamento constante em tempo real (Esmaili; Cristaldi, 2024). Sistemas que usam a Internet das Coisas (IoT), com acelerômetros acessíveis como o ADXL335 e microcontroladores com Wi-Fi (por exemplo, o ESP32-C3), viabilizam a coleta e o envio de dados para bancos em nuvem, como o MongoDB Atlas, onde são analisados (Costa Monobi *et al.*, 2020).

A análise de vibração se mostra como a forma mais eficiente de descobrir falhas em seu início (Murugan *et al.*, s.d.), usando a FFT para achar as frequências ligadas aos defeitos, e a Transformada de Fourier de Curto Tempo (STFT) para sinais que mudam com o tempo (Durgam *et al.*, 2021). Além disso, retiram-se características estatísticas no tempo, como Raiz Média Quadrática (RMS), Curtose, Assimetria e Fator de Crista, sendo o RMS o mais indicado para mostrar a gravidade da vibração (Conese *et al.*, 2021).

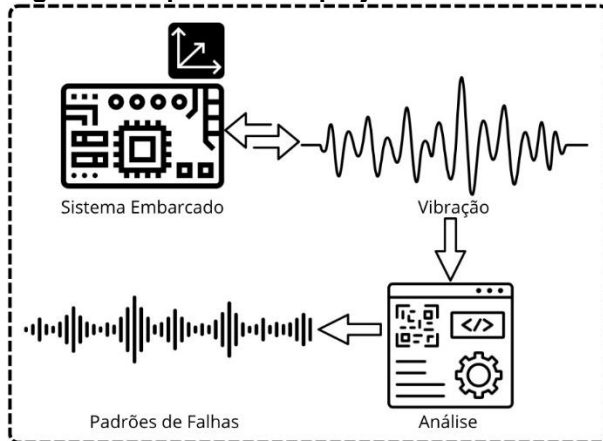
A identificação de harmônicos e faixas laterais que variam permite diagnosticar problemas como desgaste, desalinhamento e rotação fora do centro (Fu; Zhang, 2023). Esses métodos têm sido usados com sucesso em equipamentos como máquinas CNC, moinhos vibratórios, motores e prensas automáticas (Fu; Zhang, 2023), ajudando a detectar falhas como molas gastas, desbalanceamento do rotor e problemas nos rolamentos (Durgam *et al.*, 2021).

Estudos ainda ressaltam como esses sistemas são viáveis e baratos de serem implementados (Costa Monobi *et al.*, 2020), assim como sua eficácia em ambientes industriais reais (Esmaili; Cristaldi, 2024), reforçando sua importância na manutenção que antecipa problemas e na prevenção de falhas mecânicas (Ojovanu *et al.*, 2020).

3 METODOLOGIA

A metodologia deste projeto teve início com uma revisão bibliográfica voltada aos principais conceitos relacionados à análise de vibrações em máquinas, com foco na detecção de falhas mecânicas. A partir desse levantamento, foram identificadas lacunas nas abordagens existentes, especialmente no que se refere aos métodos de aquisição de dados vibracionais e às limitações de soluções aplicáveis em ambientes industriais com restrições de custo e infraestrutura. A Figura 1 demonstra a arquitetura básica do sistema utilizado para coleta dos sinais de vibração.

Figura 1: Arquitetura do projeto.



Fonte: Autores (2025).

Para monitorar vibrações, foi criado um sistema compacto que junta sensores MEMS, um microcontrolador potente e espaço para guardar informações. A ideia é coletar e salvar sozinhos os dados de vibração em três direções diferentes. Todo o processo de pegar os dados, arrumá-los e guardá-los acontece em três fases:

Primeiro, usa-se o sensor MPU6050 para medir as vibrações. Ele tem um acelerômetro e um giroscópio que medem com alta precisão (16 bits). O acelerômetro pode operar em diferentes escalas, mas foram ajustados para $\pm 2g$, com uma sensibilidade de 16.384 LSB/g. As amostras coletadas podem ser de até 1000 vezes por segundo, lendo os eixos X, Y e Z continuamente através de uma conexão I2C.

Para saber exatamente quando cada medição foi feita, usa-se o módulo RTC DS3231, que possui um oscilador de cristal compensado por temperatura (TCXO), garantindo alta precisão com desvio típico de ± 2 ppm (partes por milhão), o que equivale a cerca de ± 1 minuto por ano. Isso garante que cada amostra tenha a data e hora corretas. Os dados coletados são colocados em formato CSV, com o momento da medição, a aceleração em X, Y e Z, e salvos em um cartão microSD (FAT32) usando uma conexão SPI.

Por fim, o microcontrolador ESP32, que tem dois núcleos rodando a 240 MHz, Wi-Fi e 4 MB de memória flash, cuida do processamento.

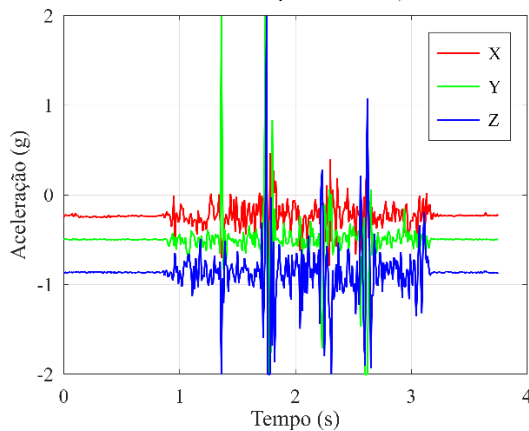
Os dados são organizados em arquivos que funcionam com o software *open-source* GNU Octave, para serem analisados depois no tempo e na frequência. Técnicas como a Transformada Rápida de Fourier (FFT) são utilizadas para encontrar padrões no espectro que indicam problemas, podendo usar classificadores como o K-means para agrupar padrões de vibração parecidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o teste do monitoramento, foi realizada uma simulação e os valores coletados correspondem aos três eixos X, Y e Z que sofreram alterações de valores durante a atividade.

Na Figura 2 é possível observar os três sinais coletados pelo sensor de vibração.

Figura 2: Gráfico de sinais dos eixos.
Sinais de Vibração - Eixos X, Y e Z

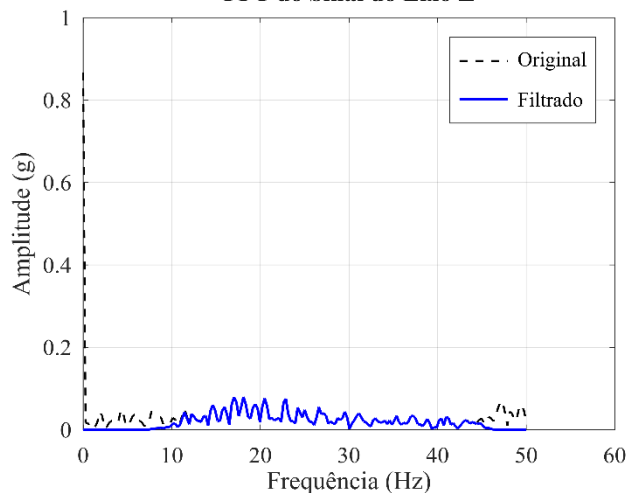


Fonte: Autores (2025).

Para tratamento do sinal de vibração captado pelo sensor MPU6050, aplicou-se um filtro *Butterworth* passa-faixa de 5ª ordem, ajustado para abranger a faixa de 10 Hz a 45 Hz. Este filtro propõe resposta uniforme na faixa de passagem, sem ondulações indesejadas, sendo assim perfeito para analisar sinais mecânicos, mantendo o formato original do espectro importante, ao mesmo tempo em que reduz ruídos.

A frequência de captura dos dados (f_s) ficou em 100 Hz, seguindo a regra de Nyquist, pois a maior frequência que queríamos analisar (45 Hz) era menor que $f_s/2$ (50 Hz). A ordem do filtro, definida em 5, garante uma mudança bem definida entre as faixas de passagem e bloqueio, encontrando um bom ponto de equilíbrio entre a precisão do espectro e a estabilidade dos cálculos durante o processo de filtragem.

Figura 3: Gráfico de sinais dos eixos.
FFT do Sinal do Eixo Z



Fonte: Autores (2025).

A representação gráfica da FFT exhibe uma comparação entre o espectro do sinal primário e o sinal processado, ambos originados do eixo Z do acelerômetro. É visível na Figura 3 que o sinal primário (indicado pela linha preta pontilhada) exibe componentes de magnitude reduzida, espalhadas por todo o espectro, abrangendo inclusive áreas fora da faixa de interesse. Após a implementação do filtro (linha azul contínua), o espectro é limitado à banda entre 10 Hz e 45 Hz, evidenciando

exclusivamente as frequências típicas relacionadas à vibração do sistema em análise. A opção pelo sinal do eixo Z é justificada pela sua superior capacidade de captar vibrações verticais em situações em que o sensor é fixado em superfícies horizontais ou estruturas planas. Em testes reais com rolamentos e motores, o eixo Z geralmente apresenta os sinais de falha mais claros, como picos, choques e componentes harmônicos, tornando-o adequado para aplicações de diagnóstico e manutenção preventiva.

5 CONCLUSÃO

As etapas desenvolvidas nesta pesquisa, que abrange desde a interpretação inicial dos dados brutos até a aplicação da FFT para examinar o espectro, estabelece um alicerce sólido para a criação de sistemas de monitoramento de desempenho baseados em vibração. Ao usar o filtro *Butterworth* passa-banda, foi possível realçar as frequências importantes ligadas à dinâmica de rolamentos e motores, atenuando interferências e elementos desnecessários.

Essas ações asseguram a integridade das informações que serão utilizadas em análises complexas, como a PSD, que oferece uma avaliação estatística mais consistente do conteúdo de frequência. Com base nessas representações, torna-se possível identificar características distintas, essenciais para a construção de modelos de *Machine Learning* destinados a detectar falhas de forma autônoma.

Portanto, as etapas exploradas aqui não só preparam os dados, como também tornam possível o desenvolvimento de uma ferramenta de análise inteligente, com capacidade de se transformar em um sistema preditivo completo e confiável, pronto para ser aplicado na indústria e integrado às abordagens inovadoras da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

CONESE, C.; CONTI, F.; CINQUEMANI, S.; BONO, F. M.; ZAVALLONI, A.; TARABINI, M. Vibration analysis for condition monitoring of an automatic press machine for thermoplastic polymers. In: **IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON METROLOGY FOR INDUSTRY 4.0 & IOT**, 2021, Rome, Italy. *Proceedings...* [S. l.]: IEEE, 2021. p. 270–274. DOI:

<https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488525>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9488525>. Acesso em: 21 fev. 2025.

DURGAM, S.; BAWANKULE, L. N.; KHINDKAR, P. S. Prediction of fault detection based on vibration analysis for motor applications. In: **BIENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON NASCENT TECHNOLOGIES IN ENGINEERING – ICNTE**, 4., 2021, Navi Mumbai, India. *Proceedings...* [S. l.]: IEEE, 2021. p. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICNTE51185.2021.9487771>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9487771>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ESMAILI, P.; CRISTALDI, L. Health indicator analysis in terms of condition monitoring on brownfield CNC milling machines using triaxial accelerometer. **IEEE Sensors Letters**, v. 8, n. 7, p. 1–4, jul. 2024. Art. no. 6008404. DOI: <https://doi.org/10.1109/LSSENS.2024.3417710>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10523389>. Acesso em: 23 fev. 2025.

FU, L.; ZHANG, Z. Malfunction diagnoses of bearings of vibration mill based on

vibration monitoring. In: **ASIA CONFERENCE ON MECHANICAL ENGINEERING AND AEROSPACE ENGINEERING – MEAE**, 10., 2024, Taichang, China. *Proceedings...* [S. l.]: IEEE, 2024. p. 883–886. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEAE62008.2024.11026740>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11026740>. Acesso em: 05 mar. 2025.

COSTA MONOBI, F. M.; MARTINS, A. C.; CERENTO DE LYRA, P. H.; ROBERTO, J. M.; DEL BEL SONODA, L.; COELHO LEITE, B. C. Development of an IoT based sensing system for structural health monitoring using low-cost accelerometers. In: **SYMPOSIUM ON INTERNET OF THINGS – SIOT**, 2024, Rio de Janeiro, Brazil. *Proceedings...* [S. l.]: IEEE, 2024. p. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIoT63830.2024.10780766>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10780766>. Acesso em: 17 abr. 2025.

MURUGAN, C. A.; THOMAS, S.; KANNAN, N. Matlab/Simulink based development and testing of embedded vibration monitoring system. In: **FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CYBER PHYSICAL SYSTEMS, POWER ELECTRONICS AND ELECTRIC VEHICLES – ICPEEV**, 2023, Hyderabad, India. *Proceedings...* [S. l.]: IEEE, 2023. p. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPEEV58650.2023.10391928>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10391928>. Acesso em: 12 mar. 2025.

OJOVANU, E.; DRAGOMIR, A.; ADAM, M.; ANDRUȘCĂ, M.; DEAC, C. N.; CARDAȘIM, M.; MOCANU, G. Mechanical fault detection by vibration monitoring of electrical equipment. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXPOSITION ON ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING – EPE**, 2020, [S. l.]. *Proceedings...* [S. l.]: IEEE, 2020. p. 166–170. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE50722.2020.9305685>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9305685>. Acesso em: 02 abr. 2025.

Sobre os autores:

i ADRIANO DE SOUZA ALVAREZ



Doutor em Biotecnologia na UFSCar, Graduado em Sistemas de Informação e Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Central Paulista – UNICEP. Professor da Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. CV: <http://lattes.cnpq.br/0734593128098221> Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-2375-3462>

ii ANDRÉ ROBERTO DA SILVA



Mestre em Ciência da Computação na UFSCar, Pós-Graduado em Indústria 4.0, Pós-Graduado em Automação da Manufatura e Graduado em Licenciatura em Ciências Exatas com habilitação em Física. Professor da Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. CV: <http://lattes.cnpq.br/1738208783371178> Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5969-245X>

iii JOSÉ SÉRGIO MEDEIROS JUNIOR



Mestre em Engenharia da Produção pela UNIARA. Pós-Graduação em Indústria 4.0. Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica pela UNIP de Ribeirão Preto (2001). Atualmente é Professor na Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe e Engenheiro de Projetos na Tempustec Tecnologia. CV: <http://lattes.cnpq.br/5556395715782877> Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6204-0153>

iv TONY EMERSON MARIM



Possui graduação em Automação Industrial pela Universidade Paulista (UNIP) e Licenciatura plena em Pedagogia pela UFSCar – Universidade Federal de São Carlos, além de mestrado em Engenharia pela UFSCar – Universidade Federal de São Carlos. Atualmente, ocupa o cargo de Professor de ensino Superior na Faculdade de Tecnologia do SENAI Antonio Adolpho Lobbe. CV: <https://lattes.cnpq.br/2215850363897403> Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8802-239X>

v WESLEI DIEGO PEREIRA



Graduando do Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial pela Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe, ocupa o cargo de Instrutor de Formação Profissional na Escola SENAI Antonio Adolpho Lobbe. CV: <https://lattes.cnpq.br/0189952195972722> Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-7244-4225>