

ANÁLISE VIBRACIONAL PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA DE MOTORES ELÉTRICOS COM SENSOR INERCIAL E MICROCONTROLADOR

Artur Serafim de Souza¹, Ênio José Peruchi²

Resumo: Este trabalho investiga e demonstra a viabilidade de um sistema de monitoramento vibracional de baixo custo para motores elétricos, combinando o microcontrolador ESP32 (Espressif Systems 32-bit), o sensor inercial MPU-6050 baseado em tecnologia MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems), análise espectral por Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform – FFT) e telemetria via Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). O protótipo realiza aquisição a $F_s = 400$ Hz com janelas de $N = 256$ (resolução $\Delta f \approx 1,56$ Hz), aplica pré-processamento com remoção da média e janela de Hamming, e extrai métricas no domínio do tempo, incluindo média, amplitude total (*range*), RMS bruto e RMS dinâmico (Root Mean Square – RMS), além da energia angular do giroscópio e da frequência de pico. As métricas são publicadas em formato JSON no tópico MQTT, permitindo inspeção imediata e integração simples a painéis. Ensaios em motor de pequena potência demonstraram separação consistente entre repouso, transições e regime intenso, com picos espectrais coerentes com o comportamento rotativo. O custo do hardware permaneceu entre R\$ 80 e R\$ 130, contrastando com soluções comerciais superiores a US\$ 1.065, representando redução de mais de uma ordem de grandeza em troca de uma banda espectral mais estreita. Os resultados confirmam a aplicabilidade do arranjo em contextos educacionais, laboratoriais e como etapa inicial de manutenção preditiva em pequenas e médias empresas.

Palavras-chave: manutenção preditiva; monitoramento vibracional; motores elétricos; sensores de vibração; microcontroladores; MQTT; Transformada Rápida de Fourier.

¹Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), arturserafimdeosouza@unesc.net

²Orientador. Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), enio@unesc.net

ABSTRACT: This work investigates and demonstrates the feasibility of a low-cost vibration monitoring system for electric motors, combining the ESP32 microcontroller (Espressif Systems 32-bit), the MPU-6050 inertial sensor based on MEMS technology (Micro Electro-Mechanical Systems), spectral analysis through the Fast Fourier Transform (FFT), and telemetry using the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol. The prototype acquires data at $F_s = 400$ Hz with windows of $N = 256$ samples ($\Delta f \approx 1.56$ Hz), applies preprocessing steps such as mean removal and a Hamming window, and extracts time-domain metrics including mean, total amplitude (*range*), raw and dynamic Root Mean Square (RMS), gyroscope angular energy, and dominant spectral peak. The metrics are published in JSON format to an MQTT topic, enabling immediate inspection and straightforward integration with simple dashboards. Tests performed on a low-power motor demonstrated consistent separation between idle, transient, and high-intensity regimes, with spectral peaks aligned with expected rotational behavior. Hardware cost remained between R\$ 80 and R\$ 130, whereas commercial vibration monitoring kits exceed US\$ 1,065, indicating a reduction of more than one order of magnitude at the expense of a narrower spectral band. The results confirm the applicability of the proposed setup in educational and laboratory environments, and as an initial step toward predictive maintenance in small and medium-sized enterprises.

Keywords: predictive maintenance; vibration monitoring; electric motors; vibration sensors; microcontrollers; MQTT; Fast Fourier Transform.

1 INTRODUÇÃO

O consumo excessivo de energia elétrica em motores industriais é uma das principais preocupações de diversos setores, impactando diretamente os custos operacionais e a eficiência dos sistemas produtivos. Motores elétricos mal calibrados ou que apresentem desgaste em componentes internos, como rolamentos e eixos, consomem mais energia do que o necessário. Esse consumo elevado não é apenas prejudicial em termos de custos, mas também reduz a vida útil dos equipamentos, causando interrupções não planejadas e aumento da necessidade de manutenções corretivas (Moura; Carlini; Silva, 2020; Rodrigues; Santos; Oliveira, 2023).

A vibração excessiva é um sintoma claro de falhas potenciais em motores elétricos, especialmente em componentes como os rolamentos e o alinhamento de eixos. No entanto, o monitoramento adequado dessas

vibrações e a análise precisa dos dados coletados por sensores especializados exigem o uso de tecnologias avançadas e, muitas vezes, de alto custo. Esse cenário torna a manutenção preditiva inacessível para muitas indústrias, principalmente as de pequeno e médio porte, que não possuem recursos para investir em sistemas caros e complexos (Santos, 2019).

A manutenção preditiva tem como objetivo prever falhas antes que elas ocorram, utilizando dados coletados em tempo real para realizar ajustes e substituições de componentes de forma planejada. Com isso, evita-se tanto o desgaste prematuro dos equipamentos quanto o consumo excessivo de energia elétrica, uma vez que a manutenção ocorre antes que o motor atinja níveis críticos de ineficiência. Nesse contexto, a implementação de sensores de vibração em motores elétricos é uma solução viável, sendo possível empregar alternativas de baixo custo que podem ser aplicadas de forma escalável (Moura; Carlini; Silva, 2020).

Uma opção promissora para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e controle de baixo custo é o uso de microcontroladores de código aberto, que possibilitam soluções acessíveis e flexíveis. Desde a popularização dessas plataformas, microcontroladores de código aberto têm sido amplamente empregados em diversas áreas da tecnologia, com destaque em projetos que envolvem automação e controle de processos, por conta de sua simplicidade, versatilidade e ampla disponibilidade de bibliotecas (Kondaveeti et al., 2021).

O objetivo deste trabalho é investigar soluções de um sistema de monitoramento vibracional de motores elétricos utilizando sensores de vibração e microcontroladores, identificando anomalias que comprometam o desempenho e a vida útil da máquina, com foco em uma solução acessível e eficiente para prevenir falhas e otimizar o consumo de energia.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma. Após esta introdução, apresentam-se os trabalhos correlatos e o posicionamento da proposta frente à literatura recente. Em seguida, em Materiais e Métodos, descrevem-se os componentes utilizados, a implementação do protótipo com parâmetros de amostragem e FFT e os procedimentos de ensaio em ambiente operacional real. Na sequência, em Discussão e Resultados, analisam-se os indicadores calculados e a telemetria publicada, com leitura espectral e interpretação de métricas. Por fim, apresentam-se as conclusões e as principais contribuições do estudo.

2 TRABALHOS CORRELATOS

Diversos estudos recentes abordam o monitoramento preditivo de motores elétricos, com ênfase na análise de vibração utilizando sistemas embarcados e técnicas de aprendizado de máquina. Em sequência, são apresentados os trabalhos de maior relevância, com destaque para a inovação tecnológica e para as contribuições convergentes com este estudo, indicando também lacunas que a proposta aqui desenvolvida busca suprir.

No trabalho de Hsia et al. (Hsia; Hsieh; Lee, 2023), apresenta-se um sistema de medição e controle de vibrações em tempo real baseado em um controlador FPGA (Field Programmable Gate Array), um circuito integrado reconfigurável que permite implementar processamento paralelo de baixa latência diretamente em hardware. Sinais de vibração de rolamentos são capturados e processados via Transformada Rápida de Fourier (FFT) em hardware, com visualização nos domínios do tempo e da frequência e lógica digital para detecção de anomalias, além do ajuste automático de velocidade do motor. Embora atinja latência muito baixa, a solução demanda hardware especializado, custo elevado e equipe com domínio em descrição de hardware, o que restringe a replicabilidade acadêmica e a adoção por pequenas e médias empresas. Em contraste, este trabalho privilegia baixo custo, bibliotecas abertas e implementação reproduzível em microcontrolador.

De forma semelhante, Quan et al. (Quan; Zhang; Zhang, 2024) desenvolveram um sistema embarcado de diagnóstico de motores, empregando análises espectrais combinadas com aprendizado de máquina. As características extraídas alimentam classificadores para identificação de falhas mecânicas. Apesar do bom desempenho, essa abordagem depende de bases rotuladas, maior poder de computação e processos de treinamento e validação, além de menor transparência na decisão. A proposta deste estudo fornece uma alternativa interpretável, baseada em métricas explícitas e histerese, que pode servir como etapa anterior e alimentar modelos futuros.

Koene et al. Koene et al. (2019) propuseram uma solução baseada em acelerômetros MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) com comunicação sem fio, acoplados a motores industriais de grande porte, visando substituir sensores piezoelétricos cabeados por alternativas mais acessíveis e flexíveis. Embora demonstre viabilidade em escala industrial, a

arquitetura pressupõe múltiplos nós e infraestrutura dedicada, com implicações de custo, energia e manutenção. A presente proposta simplifica o arranjo com um único nó de baixo custo, publicação padronizada em JSON e parâmetros de aquisição adequados a motores de pequeno e médio porte.

Sayyad et al. (Sayyad et al., 2022) investigaram aprendizado profundo para diagnóstico de falhas em motores de indução com dados reais de vibração, reportando acurácia superior a 97%. O alto desempenho vem acompanhado de exigência de dados extensos e curadoria, além de maior complexidade operacional. Este trabalho contribui ao disponibilizar um pipeline de aquisição, pré-processamento e extração de características em tempo real que pode ser integrado a classificadores no futuro, sem que a adoção inicial dependa de modelos complexos.

Em síntese, as abordagens correlatas confirmam a eficácia de sensores de vibração e processamento embarcado para manutenção preditiva, porém tendem a esbarrar em barreiras de custo, especialização, infraestrutura e interpretabilidade. A contribuição específica desta proposta está na combinação de baixo custo, replicabilidade, decisões transparentes por métricas e publicação MQTT em JSON, facilitando a integração imediata a painéis e fluxos existentes em ambientes educacionais e em pequenas e médias empresas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho consistiu no desenvolvimento de um protótipo funcional de monitoramento vibracional de motores elétricos, fundamentado em tecnologias de Internet das Coisas (IoT). O sistema foi projetado para realizar a coleta, o processamento e a transmissão de dados de vibração em tempo real, utilizando o microcontrolador ESP32 e o sensor MPU-6050, com envio das métricas processadas por meio do protocolo MQTT. O principal objetivo foi demonstrar a viabilidade de uma solução de baixo custo para aplicações de manutenção preditiva, voltada a motores de pequeno e médio porte.

A arquitetura foi estruturada em três etapas integradas. A primeira realizava a aquisição dos sinais de aceleração e giroscópio por meio do sensor MPU-6050, instalado na carcaça do motor. Na segunda, o ESP32 executava o pré-processamento dos dados, aplicava a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e extraía indicadores como o valor RMS e a frequência de pico. Por fim, a terceira etapa era responsável pela transmissão das métricas em formato JSON via protocolo MQTT, permitindo o acompanha-

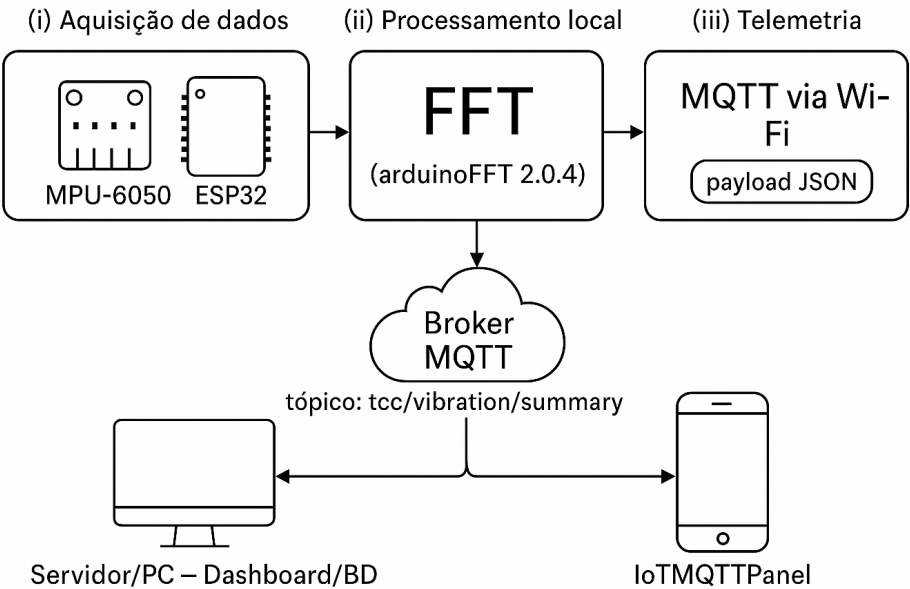
mento remoto e a análise dos resultados.

O desenvolvimento foi realizado no ambiente Arduino IDE, em linguagem C++, empregando bibliotecas específicas para cada módulo funcional. A escolha dos componentes priorizou baixo custo, simplicidade de integração e ampla disponibilidade comercial, de forma a permitir a replicação do projeto em contextos educacionais e laboratoriais.

3.1 ARQUITETURA DO PROTÓTIPO

O sistema foi organizado em três blocos principais: (i) aquisição de dados com acelerômetro triaxial e microcontrolador, (ii) processamento local no microcontrolador para cálculos de FFT e (iii) telemetria via MQTT para publicação de dados. A comunicação entre os módulos foi realizada por conexão Wi-Fi, permitindo a integração com servidores de dados ou dispositivos móveis para visualização e monitoramento remoto.

Figura 1 - Arquitetura do sistema de monitoramento vibracional



Fonte: elaborado pelo autor.

Para visualização simples durante os ensaios, utilizou-se o aplicativo *IoTMQTTPanel* (Android/iOS). O uso foi exclusivamente como visor de teste, sem registro de dados, apenas para confirmar a publicação das métricas (*IoTMQTTPanel*. . . , 2025). O microcontrolador ESP32 foi utilizado por sua alta performance de processamento e conectividade integrada. O acelerômetro triaxial MPU-6050 foi escolhido pela simplicidade, baixo custo e compatibilidade com o protocolo I²C, que simplifica a comunicação com o ESP32. O sensor foi fixado na carcaça do motor, na região superior, usando fita dupla face de alta aderência e abraçadeiras. Idealmente o ponto de me-

dição seria o mais próximo possível do eixo, porém, no ensaio realizado, o acesso ao eixo estava impedido; adotou-se, portanto, a carcaça superior como compromisso prático de acoplamento. O eixo observado é indicado no campo `axis` do payload JSON.

3.2 PROCEDIMENTOS E CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram conduzidos em ambiente operacional real, utilizando um motor de indução trifásico de baixa tensão, equivalente à linha W22 IR3 Premium da WEG. Trata-se de um motor de carcaça IEC 71, potência nominal de 0,75 cv (0,55 kW), quatro pólos, alimentado em 220/380 V, 60 Hz, com grau de proteção IP55 e refrigeração do tipo IC411. De acordo com o catálogo do fabricante, o motor opera em regime contínuo (S1), com rotação síncrona de 1800 rpm e rotação nominal em torno de 1680 rpm, escorregamento da ordem de 6,7% e corrente nominal típica de aproximadamente 2,8 A em 220 V e 1,6 A em 380 V (WEG, 2023). Esses valores caracterizam um motor industrial de pequena potência para uso geral, similar aos empregados em ventiladores, pequenas bombas e acionamentos leves, sendo adequado para o objetivo deste estudo.

Antes de cada sessão, realizou-se calibração estática do conjunto inercial por média de 300 leituras do sensor em repouso, compondo a linha de base por eixo. O MPU-6050 operou com faixa de $\pm 4g$ no acelerômetro, $\pm 500^\circ/s$ no giroscópio e banda interna de 94 Hz.

A aquisição foi configurada com frequência de amostragem de $F_s = 400$ Hz e janelas de $N = 256$ amostras, resultando em resolução espectral $\Delta f = 1,5625$ Hz (cerca de 0,64 s por janela). Em cada janela, removeu-se o componente contínuo e aplicou-se a janela de Hamming previamente à transformação espectral. As seguintes métricas no tempo foram calculadas por bloco: média, valores mínimo e máximo, amplitude de variação (*range*), RMS total (*rms_raw*) e RMS dinâmico (*rms_dyn*). A energia angular foi estimada pelo RMS do módulo do giroscópio em graus por segundo, convertendo-se de rad/s para $^\circ/s$.

A definição de $F_s = 400$ Hz e $N = 256$ não foi arbitrária, mas guiada por critérios clássicos de amostragem e pelas características do conjunto motor-sensor. Considerando a banda interna de aproximadamente 94 Hz do MPU/6050, adotou-se uma taxa de amostragem superior ao dobro da frequência máxima de interesse, em conformidade com o critério de Nyquist/Shannon, de forma que componentes vibracionais até a ordem de 200 Hz pudessem ser reproduzidas sem aliasing relevante.

Além disso, o valor de $N = 256$ foi escolhido como potência de dois, reduzindo o custo computacional da FFT no ESP32 e facilitando a implementação embarcada (Blahut, 2010). A resolução espectral resultante, $\Delta f = F_s/N \approx 1,56 \text{ Hz}$, mostrou-se adequada para acompanhar variações na rotação do motor e em suas harmônicas de baixa ordem, alinhando a configuração de aquisição ao fenômeno mecânico observado e às limitações de processamento do microcontrolador.

A presença de movimento foi inferida por histerese com confirmação após três janelas consecutivas, adotando-se limiares ON/OFF fixos durante os ensaios: *rms_dyn* (liga $\geq 0,20$; desliga $< 0,12 \text{ m/s}^2$), variação lenta da média entre janelas adjacentes $|\Delta m_{dia}|$ (liga $\geq 0,40$; desliga $< 0,25 \text{ m/s}^2$), *range* (liga $\geq 1,00$; desliga $< 0,70 \text{ m/s}^2$) e energia angular *gyro_rms* (liga $\geq 6,0$; desliga $< 3,0 \text{ %s}$). O estado positivo era indicado quando qualquer condição de ligação fosse satisfeita; o retorno ao estado estável requeria que todas as grandezas ficassem abaixo dos limiares de desligamento por três janelas.

No domínio da frequência, a FFT foi calculada com busca do pico de magnitude no semiespectro útil, utilizando a biblioteca `arduinoFFT` (Condes, 2025). O índice de pico k foi convertido em frequência característica por $f_{pico} = k \cdot F_s/N$, e a amplitude de pico foi registrada para comparação relativa entre janelas (Blahut, 2010).

A telemetria foi realizada mediante publicação em tópico MQTT dedicado (`tcc/vibration/summary`) em *broker* local com endereço mascarado do tipo `xx.xx.xx.xx`. Cada mensagem JSON incluiu: identificador do dispositivo, eixo observado, parâmetros de aquisição (*fs*, *samples*, *units*), métricas no tempo (média, mínimo, máximo, *range*, *rms_raw*, *rms_dyn*), energia angular (*gyro_rms_dps*), indicador de movimento e características espectrais (*peak_freq*, *peak_amp*). As bibliotecas e versões empregadas foram: *Adafruit_MPU6050* 2.2.6 (Adafruit, 2025), *arduinoFFT* 2.0.4 (Condes, 2025) e *PubSubClient* 2.8 (O’Leary, 2025).

Publicações em `tcc/vibration/summary` com QoS 0 e sem retenção. A mensagem de disponibilidade do nó foi publicada como retida em `tcc/vibration/status`. A reconexão foi tratada no laço principal com tentativas automáticas. Os testes ocorreram em rede local com `allow_anonymous true` no Mosquitto.

A publicação foi verificada em cliente MQTT genérico, inspecionando o tópico hierárquico `tcc/vibration/#` em *broker* local com IP mascarado. O objetivo foi apenas comprovar metodologicamente o fluxo

(aquisição → processamento → publicação), sem desenvolvimento de interface dedicada.

Tabela 1 - Campos do JSON publicados por janela

Campo	Descrição
device	Identificador do nó (ESP32)
axis	Eixo amostrado (X/Y/Z)
fs	Frequência de amostragem (Hz)
samples	Tamanho da janela (N)
units	Unidade do acelerômetro
mean	Média na janela (antes do detrend)
dmean	Diferença de médias entre janelas
min, max	Extremos na janela
range	Amplitude total (max – min)
rms_raw	RMS bruto
rms_dyn	RMS após remoção da média
gyro_rms_dps	RMS do módulo do giroscópio (%/s)
moving	Indicador de movimento (booleano)
peak_freq	Frequência de pico (Hz)
peak_amp	Amplitude do pico (relativa)

Fonte: elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios com o protótipo ESP32 e MPU-6050 foram realizados com taxa de amostragem de $F_s = 400$ Hz e janelas de $N = 256$ amostras (cerca de 0,64 s por janela). Em todas as janelas removeu-se a média do sinal e aplicou-se janela de Hamming antes do cálculo da FFT, resultando em resolução espectral $\Delta f = F_s/N = 1,5625$ Hz. As métricas calculadas por janela e publicadas via MQTT permitiram identificar padrões temporais e espectrais consistentes ao longo das séries.

Observou-se a separação de três regimes de comportamento. Em repouso, a parcela dinâmica de vibração permaneceu baixa, com o valor *rms_dyn* tipicamente entre 0,02 e 0,06 m/s², *gyro_rms* abaixo de 3 %/s e amplitude total (*range*) até 0,8 m/s². Em transições e perturbações leves surgiram aumentos breves, com *rms_dyn* entre 0,10 e 0,33 m/s², *gyro_rms* entre 8 e 22 %/s e *range* entre 0,6 e 1,4 m/s². No regime de operação intensa e sustentada, verificou-se crescimento marcante de energia: *rms_dyn* entre

0,7 e 3,0 m/s², *gyro_rms* entre 30 e 83 %/s e *range* entre 3,3 e 25 m/s². Essa estratificação manteve-se estável entre janelas, favorecendo a definição de limiares de alarme.

A detecção de estado operacional foi estável com histerese e confirmação por três janelas consecutivas. Durante os ensaios adotaram-se limiares coerentes com o firmware: *rms_dyn* (liga ≥ 0,20; desliga < 0,12 m/s²), variação lenta de média $|\Delta m_{dia}|$ (liga ≥ 0,40; desliga < 0,25 m/s²), *range* (liga ≥ 1,00; desliga < 0,70 m/s²) e *gyro_rms* (liga ≥ 6,0; desliga < 3,0 %/s). O estado positivo era indicado quando qualquer condição de ligação se mantinha satisfeita; o retorno à condição estável exigiu que todas as grandezas ficassem abaixo dos limiares de desligamento por três janelas. Com isso, reduziu-se a sensibilidade a flutuações transitórias, sem comprometer a detecção de atividade real.

Tabela 2 - Mapeamento de frequências observadas para RPM e interpretação no ensaio

Frequência (Hz)	Índice <i>k</i>	RPM	Regime típico	Observação no teste
1,56	1	93,6	Repouso	Pico isolado de baixa amplitude
3,12	2	187,2	Repouso	Baixa energia; possível ruído estrutural
4,69	3	281,4	Intenso	Pico dominante recorrente; amplitude elevada
6,25	4	375,0	Intenso	Pico recorrente no regime ativo
7,81	5	468,6	Transição	Aparece em perturbações leves
9,38	6	562,8	Repouso/Transição	Pico fraco e esperso
10,94	7	656,4	Intenso	Amplitude alta nos blocos ativos
12,50	8	750,0	Intenso	Provável harmônico da rotação
14,06	9	843,6	Intenso	Harmônico com amplitude elevada
29,69	19	1781,4	Transição	Energia moderada; eventos breves
45,31	29	2718,6	Repouso	Ocasional, baixa amplitude
73,44	47	4406,4	Repouso	Muito baixa amplitude em alta frequência

Parâmetros: $F_s = 400$ Hz; $\Delta f = 1,5625$ Hz.

Fonte: elaborado pelo autor.

No domínio da frequência, a FFT evidenciou picos recorrentes em baixas frequências, compatíveis com componentes rotativos e excitações estruturais. Com base em $\Delta f = 1,5625$ Hz, foram observados picos em 4,69, 6,25, 7,81, 10,94, 12,50 e 14,06 Hz, entre outros. Vale destacar que, para um motor de quatro pólos a 60 Hz com rotação nominal em torno de 1680 rpm, espera-se uma frequência mecânica próxima de 28 Hz, o que é coerente com os picos observados em torno de 29,69 Hz na Tabela 2. A conversão aproximada para rotação, por $RPM = 60 \cdot f$, permite relacionar diretamente as assinaturas espectrais a faixas de rotação de referência,

conforme mapeamento da Tabela 2. Em condição de operação intensa, as amplitudes de pico permaneceram sistematicamente maiores do que no repouso, indicando assinaturas determinísticas do conjunto mecânico e não flutuações aleatórias. A remoção da média por janela atenuou inclinações lentas, de modo que o *rms_dyn* refletiu a vibração de interesse para diagnóstico.

Do ponto de vista de condição do motor, os valores observados de *rms_dyn* e de amplitude de pico sugerem um comportamento compatível com um motor sem falhas graves nas condições de ensaio. Os espectros são dominados por componentes em baixas frequências, associadas à rotação e a excitações estruturais do conjunto motor–base, sem surgimento de bandas laterais pronunciadas ou picos isolados em faixas típicas de desbalanceamento severo ou defeitos localizados em rolamentos. Em repouso, a vibração dinâmica permaneceu baixa, enquanto no regime intenso houve aumento consistente de energia, porém com assinaturas espectrais estáveis e repetitivas.

Nas condições específicas deste estudo, um único motor, sem falha previamente diagnosticada e com banda efetiva limitada à ordem de 100 Hz pelo sensor, os dados permitem concluir que não há indícios de anomalias grosseiras no conjunto monitorado, embora não seja possível atestar ou descartar desgastes sutis em componentes internos. Assim, os resultados devem ser interpretados como uma caracterização de referência (*baseline*) para o motor e como validação do arranjo proposto para discriminar mudanças de regime operacional, e não como laudo definitivo de falha segundo normas de severidade vibracional.

Entre os meses de outubro e novembro de 2025, a ESP32 DevKit foi encontrada na faixa de R\$ 50 a R\$ 65 em varejistas nacionais, enquanto o módulo MPU-6050 GY-521 variou de R\$ 18,90 a R\$ 37,52. Considerando cabeamento e materiais simples de fixação, o custo total de hardware ficou entre R\$ 80 e R\$ 130. Os valores estão expressos em reais (R\$) e referem-se às datas de consulta informadas.

Para contextualização, soluções comerciais de monitoramento vibracional sem fio com software incluso apresentam custo de outra ordem de grandeza, com valores típicos iniciais na casa de US\$ 1.065 por conjunto de entrada, ao passo que acelerômetros piezoelétricos industriais do padrão IEPE com sensibilidade de 100 mV/g situam-se, individualmente, entre cerca de US\$ 270 e US\$ 640 nas páginas de fabricantes. Os valores estão expressos em dólares (US\$) e referem-se às datas de consulta.

Trata-se de uma comparação funcional de solução, e não de equivalência metrológica de faixa, sensibilidade, ruído ou certificações (Fluke, 2025; Technologies, 2025; SKF, 2025).

Em termos de alcance espectral, a configuração adotada de amostragem ($F_s = 400$ Hz, $N = 256$) cobre de 0 a 200 Hz, com resolução $\Delta f \approx 1,56$ Hz, suficiente para acompanhar componentes fundamentais e baixas harmônicas de motores em regime comum. Kits comerciais operam com bandas mais amplas; por exemplo, especificações de sensores industriais indicam coberturas de 10 a 1.000 Hz e até a ordem de quilohertz em sistemas dedicados.(Fluke, 2025; SKF, 2025)

O protótipo oferece redução de custo superior a uma ordem de grandeza quando comparado a kits comerciais de entrada e a acelerômetros IEPE industriais, ao preço de um alcance espectral mais estreito e sensibilidade menor para fenômenos de alta frequência. Para o objetivo deste trabalho, a relação custo-benefício mostrou-se favorável.

Em relação a soluções com FPGA e lógica dedicada (Hsia; Hsieh; Lee, 2023), a implementação aqui discutida obteve sinais e métricas coerentes com a dinâmica mecânica, porém com custo substancialmente menor, menor complexidade de desenvolvimento e maior replicabilidade educacional e industrial. Frente a abordagens que dependem de aprendizado de máquina para diagnóstico (Quan; Zhang; Zhang, 2024; Sayyad et al., 2022), o método apresentou um ganho prático de interpretabilidade por meio de limiares explícitos no tempo e da leitura direta de *rms_dyn*, *range*, *gyro_rms* e frequência de pico, mantendo desempenho consistente para discriminar repouso, transição e regime intenso. Em comparação a propostas de sensores MEMS sem fio para grandes máquinas (Koene et al., 2019), a arquitetura com ESP32, FFT embarcada e telemetria MQTT equilibrou simplicidade de implantação e capacidade analítica local, viabilizando adoção em motores de pequeno e médio porte. Em síntese, as vantagens específicas da proposta residem na combinação de baixo custo, configuração de aquisição alinhada ao fenômeno ($F_s = 400$ e $N = 256$ fornecendo Δf adequado), critérios de decisão transparentes com histerese e publicação padronizada em JSON, o que facilita integração imediata a painéis e *pipelines* já existentes, sem dependência de infraestrutura proprietária.

5 CONCLUSÃO

O estudo confirmou a viabilidade de um arranjo de baixo custo para monitoramento vibracional de motores elétricos, combinando ESP32,

acelerômetro MPU-6050, processamento espectral local e telemetria via MQTT. A proposta atende à necessidade de soluções acessíveis para manutenção preditiva e eficiência energética, especialmente em contextos de pequenas e médias empresas, em consonância com discussões recentes sobre custos, confiabilidade e impacto operacional (Moura; Carlini; Silva, 2020; Santos, 2019).

Os resultados obtidos com $F_s = 400$ Hz e janelas de $N = 256$ mostraram separação consistente entre condições de repouso, transição e operação intensa, com métricas no tempo e assinaturas espectrais estáveis entre janelas. Os picos de frequência observados nos múltiplos de $\Delta f = 1,5625$ Hz foram coerentes com faixas de rotação esperadas, o que indica que o sistema passou a discriminar fenômenos mecânicos reais e não apenas ruído. Esse comportamento é compatível com a literatura de análise espectral e com a implementação de FFT embarcada empregada no trabalho (Blahut, 2010; Condes, 2025).

A identificação do estado operacional apresentou estabilidade ao utilizar faixas de referência e histerese: o sistema reconheceu atividade mecânica relevante quando as métricas permaneceram acima desses referenciais por janelas sucessivas e retornou ao estado estável quando os valores ficaram consistentemente abaixo. A remoção de média por janela reduziu efeitos de inclinação lenta, preservando a vibração dinâmica útil ao diagnóstico. A publicação periódica das métricas em JSON tornou a solução integrável a painéis e serviços já existentes, mantendo a simplicidade de implantação por meio do protocolo MQTT (O’Leary, 2025). Em termos de arquitetura, os achados dialogam com a tendência de uso de sensores MEMS e conectividade IoT para aplicações industriais de monitoramento de condição (Koene et al., 2019).

Em comparação com trabalhos que adotam hardware dedicado ou fluxos analíticos mais complexos, como plataformas em FPGA com processamento em tempo real (Hsia; Hsieh; Lee, 2023) e abordagens com aprendizado de máquina para classificação de falhas (Quan; Zhang; Zhang, 2024), a solução desenvolvida priorizou custo, reprodutibilidade e integração simples, preservando os elementos fundamentais para detecção de alterações no comportamento vibracional. Essa escolha amplia o potencial de adoção e facilita a evolução incremental do sistema em ambientes reais.

Esta pesquisa então propõe, para trabalhos futuros, a construção de um instrumento completo com o conjunto de métricas adaptadas. Recomenda-se disponibilizar uma plataforma simples de visualização dos

dados, preferencialmente uma aplicação web que consuma mensagens MQTT, persista em banco de dados e apresente gráficos de séries temporais e espectros em tempo quase real, com filtros por período e por dispositivo. Sugere-se integrar um sensor de temperatura de baixo custo, como o DS18B20, para correlacionar aquecimento e vibração ao longo do tempo, ampliando a capacidade diagnóstica do arranjo. Propõe-se analisar conjuntamente os três eixos do acelerômetro, incluindo métricas vetoriais como módulo e energia total, reduzindo a dependência da orientação do sensor.

Como evolução natural, recomenda-se que as métricas atualmente publicadas em JSON sejam integradas a um painel de monitoramento (*dashboard*) baseado em MQTT, seja em aplicação web própria ou adaptando ferramentas existentes. Sobre esse painel, propõe-se ainda investigar técnicas leves de aprendizado de máquina supervisionado, alimentadas pelas características já extraídas (por exemplo, *rms_dyn*, *range*, *gyro_rms* e frequência de pico), com o objetivo de automatizar a detecção de anomalias em tempo quase real. Dessa forma, o arranjo aqui validado como etapa inicial de monitoramento pode evoluir para um sistema completo de apoio à manutenção preditiva, com visualização e classificação automática de eventos vibracionais.

REFERÊNCIAS

ADAFRUIT. **Adafruit MPU6050 Library**. 2025. Versão 2.2.6. Acesso em: 01 nov. 2025. Disponível em: <https://github.com/adafruit/Adafruit_MPU6050>.

BLAHUT, R. E. **Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms**. New York: Wiley, 2010.

CONDES, E. **arduinoFFT: Fast Fourier Transform for Arduino**. 2025. Versão 2.0.4. Acesso em: 01 nov. 2025. Disponível em: <<https://github.com/kosme/arduinoFFT>>.

FLUKE. **3561 FC Vibration Sensor**. 2025. Acesso em: 09 nov. 2025. Disponível em: <<https://www.fluke.com/en/product/condition-monitoring/vibration/3561-vibration-sensor>>.

HSIA, S.-C.; HSIEH, C.-C.; LEE, R.-F. **Real-Time Monitor and Control System for Abnormal Motor Vibrations**. 2023. 1–9 p.

IOTMQTTPANEL MQTT Dashboard (Android e iOS). 2025. Acesso em: 22 set. 2025. Disponível em: <https://play.google.com/store/apps/details?id=snr.lab.iotmqttpanel.prod&hl=pt_BR; <https://apps.apple.com/us/app/iot-mqtt-panel/id6466780124>>.

KOENE, I. et al. **Internet of Things Based Monitoring of Large Rotor Vibration With a MEMS Accelerometer**. 2019. 92210–92219 p.

KONDAVEETI, H. K. et al. **A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations**. 2021. 100364 p. Acesso em: 21 de set. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574013721000046>.

MOURA, C. R.; CARLINI, G. C.; SILVA, C. da. **Avaliação do consumo de energia elétrica e desgaste de ferramenta durante o processo de fresamento sobre diferentes trajetórias**. 2020.

O'LEARY, N. **PubSubClient: A client library for MQTT**. 2025. Versão 2.8. Acesso em: 01 nov. 2025. Disponível em: <https://pubsubclient.knolleary.net/>.

QUAN, Y.; ZHANG, Q.; ZHANG, J. **Design of Embedded Motor Diagnostic System Based on Vibration Signal Analysis and Machine Learning**. 2024. 1–8 p.

RODRIGUES, A. L. V.; SANTOS, T.; OLIVEIRA, M. **Estudo de viabilidade para implementação de manutenção preditiva no contexto da indústria 4.0**. 2023. 23133–23154 p. Acesso em: 27 out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv9n8-002>.

SANTOS, T. D. L. P. d. **Competências profissionais na indústria 4.0: uma revisão sistemática**. [S.l.]: DAD-Departamento de Administração–São Cristóvão-Presencial, 2019.

SAYYAD, S. et al. **Fault Detection in Induction Motor Using Time Domain and Spectral Imaging-Based Transfer Learning on Vibration Data**. 2022. 8210 p.

SKF. **QuickCollect Sensor**. 2025. Acesso em: 09 nov. 2025. Disponível em: <https://www.skf.com/pt/digital-tools/run-and-maintain/quickcollect>.

TECHNOLOGIES, W. S. **786A General Purpose Accelerometer, 100 mV/g**. 2025. Acesso em: 09 nov. 2025. Disponível em: <https://wilcoxon.com/786a/>.

WEG. **Guia de especificação: motores elétricos**. Jaraquá do Sul, 2023. Acesso em: 18 out. 2024. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>.