



DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE VIBRAÇÃO IOT EMPREGANDO UM SENSOR PIEZOELÉTRICO

Leonardo Trombetta, Davi Bernardo Silva, Marcos Antonio Salvador

Instituto Federal de Santa Catarina

Câmpus Jaraguá do Sul – Rau – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica

e-mail: leonardo.t21@aluno.ifsc.edu.br, davi.bernardo@ifsc.edu.br, marcos.salvador@ifsc.edu.br

Trabalho de Conclusão de Curso – 03/07/2026

Resumo – Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para medição de vibração em motores elétricos de indução, baseado em sensor piezoelétrico e microcontrolador ESP8266, integrado a uma arquitetura de Internet das Coisas (IoT) via protocolo MQTT. O sistema é composto por um circuito de condicionamento de sinais analógicos, responsável pela amplificação e adequação do sinal proveniente do sensor às características do conversor analógico-digital do microcontrolador. Os dados adquiridos são transmitidos sem fio ao servidor local, implementado em um Raspberry Pi, onde são processados por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Os espectros de frequência obtidos foram analisados e comparados com os resultados gerados pelo equipamento de referência WEG Scan, demonstrando correspondência entre as componentes espectrais identificadas e os fenômenos vibracionais esperados para o motor ensaiado. Os resultados evidenciam a viabilidade técnica da solução proposta como alternativa acessível às ferramentas comerciais de análise vibracional, com potencial de aplicação em ambientes acadêmicos e em pequenas indústrias.

Palavras-chave – Análise de vibração; Internet das Coisas; Manutenção Preditiva; Processamento de Sinais; Sensor Piezoelétrico.

DEVELOPMENT OF AN IOT VIBRATION METER USING A PIEZOELECTRIC SENSOR

Abstract – This work presents the development of a low-cost vibration measurement system for induction electric motors, based on a piezoelectric sensor and an ESP8266 microcontroller, integrated into an Internet of Things (IoT) architecture using the MQTT protocol. The system comprises an analog signal conditioning circuit responsible for amplifying and adapting the sensor output to the microcontroller's analog-to-digital converter input range. The collected data are wirelessly transmitted to a local server implemented on a Raspberry Pi, where they are processed through the Fast Fourier Transform (FFT). The resulting frequency spectra were analyzed and compared against measurements obtained with the WEG Scan

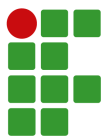
reference instrument, demonstrating agreement between the identified spectral components and the vibrational phenomena expected for the tested motor. The results confirm the technical feasibility of the proposed solution as an accessible alternative to commercial vibration analysis tools, with potential application in academic environments and small industrial facilities.

Keywords – Internet of Things; Piezoelectric Sensor; Predictive Maintenance; Signal Processing; Vibration Analysis.

I. INTRODUÇÃO

No cenário industrial contemporâneo, as máquinas elétricas girantes desempenham um papel crucial em processos automatizados, linhas de produção e sistemas de geração de energia. Devido à forte dependência desses equipamentos nos fluxos produtivos, eventuais falhas operacionais podem resultar em paralisações imprevistas, severos prejuízos econômicos e perda de confiabilidade na planta industrial [1]. Para mitigar esses impactos e estender a vida útil dos ativos, diferentes estratégias de manutenção foram desenvolvidas e aprimoradas ao longo dos anos.

Tradicionalmente, as abordagens destacam-se como: a manutenção corretiva que é realizada após uma falha; a manutenção preventiva, com paradas cronológicas programadas; e a manutenção preditiva, baseada no monitoramento contínuo ou periódico das condições reais de operação dos equipamentos [2]. A manutenção preditiva diferencia-se das abordagens convencionais por buscar a identificação de sintomas de anomalias em estágios iniciais, otimizando o planejamento de intervenções estratégicas antes que ocorra o colapso do sistema. Para alcançar esse objetivo, utilizam-se técnicas variadas como a termografia, a análise de lubrificantes e o monitoramento acústico [3]. Contudo, a análise de vibração consolidou-se como a técnica mais aplicada e eficaz no acompanhamento de máquinas rotativas, sendo vital para diagnóstico precoce e proporcionando economia expressiva em custos de reparo e associados à períodos de inatividade. As oscilações geradas por motores elétricos refletem diretamente suas condições mecânicas e dinâmicas internas, servindo como indicadores precisos de falhas clássicas, tais como desbalanceamento,



desalinhamento de eixo e desgaste prematuro de rolamentos [4].

Para que a análise vibracional seja efetuada, é necessário converter o fenômeno mecânico em sinais elétricos. Essa tarefa pode ser realizada por sensores piezoelétricos, reconhecidos por aliar simplicidade construtiva e uma excelente sensibilidade a deformações. Uma vez capturados, os sinais brutos no domínio do tempo necessitam de etapas de condicionamento, para adequação dos níveis de tensão, e de etapas de conversão e tratamento digital, fazendo-se necessária a aplicação de técnicas de processamento digital de sinais, tais como a Transformada Discreta de Fourier (DFT) e a Transformada Rápida de Fourier (FFT) [5]. Esse processamento converte o sinal temporal para o domínio da frequência, revelando de forma clara as componentes espectrais que caracterizam as frequências do sistema, permitindo um diagnóstico do equipamento sob análise. Em paralelo, a consolidação da Internet das Coisas (IoT) expandiu consideravelmente o horizonte da manutenção preditiva, viabilizando o surgimento de plataformas embarcadas de baixo custo voltadas à telemetria remota. A integração de microcontroladores dotados de conectividade Wi-Fi nativa, a exemplo do ESP8266, operando sob protocolos de comunicação leves e otimizados como o *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), possibilita a estruturação de arquiteturas robustas capazes de transmitir dados amostrados em tempo real para servidores centrais de armazenamento e processamento [6]. Esse fluxo contínuo de dados assegura um monitoramento remoto em tempo real, elevando a produtividade industrial e a segurança operacional [7].

Neste sentido, algumas abordagens têm sido propostas para o desenvolvimento de sistemas acessíveis de monitoramento vibracional utilizando conceitos de IoT. Por exemplo, o trabalho [7] demonstrou a viabilidade de monitorar ativos industriais através da aquisição sem fio de algoritmos de FFT para o tratamento de sinais. De forma semelhante, em [8] desenvolveram uma arquitetura de telemetria baseada no protocolo MQTT para avaliar o comportamento dinâmico de motores de indução trifásicos utilizando acelerômetros semicondutores. Contudo, observa-se que grande parte das pesquisas atuais foca em sensores digitais comerciais prontos (como o MPU6050, fabricado pela TDK InvenSense), deixando uma lacuna no que tange ao desenvolvimento de circuitos dedicados de condicionamento analógico para transdutores piezoelétricos de baixo custo combinados ao processamento espectral remoto.

Apesar dos benefícios evidentes, grande parte das soluções comerciais disponíveis no mercado para o monitoramento vibracional possui um custo de implementação significativo, dificultando sua adoção em indústrias de pequeno porte ou em laboratórios de ensino e pesquisa [9]. Esse tipo de barreira ressalta a relevância científica e prática de projetar soluções acessíveis e de código aberto que democratizem o acesso às técnicas preditivas [10]. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um medidor de vibração de baixo custo baseado em um sensor

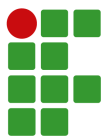
piezoelétrico e no microcontrolador ESP8266, integrado a uma arquitetura IoT via protocolo MQTT. O escopo do projeto contempla o desenvolvimento de um circuito de condicionamento analógico para adequação das tensões do sensor, bem como a implementação do software responsável pelas etapas de aquisição digital, transmissão de telemetria e o respectivo processamento espectral dos dados vibracionais obtidos.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Vibração

A vibração mecânica pode ser definida como um movimento oscilatório em torno de uma posição de equilíbrio, estando presente em praticamente em todos os sistemas mecânicos rotativos. Em máquinas elétricas girantes, como motores de indução, a vibração é uma característica inerente ao funcionamento do equipamento, podendo variar conforme as condições de operação e o estado de seus componentes mecânicos e elétricos. Dessa forma, o comportamento vibracional de uma máquina pode ser utilizado como um importante indicador de suas condições operacionais. As vibrações presentes podem ser originadas por diferentes fatores, tais como desbalanceamento, desalinhamento de eixo, desgaste de rolamentos, folgas mecânicas e defeitos estruturais [11]. Em determinadas situações, falhas elétricas também podem influenciar a resposta dinâmica da máquina, produzindo alterações perceptíveis nos sinais vibracionais.

Cada um desses fatores causadores de vibração produz uma assinatura espectral característica, possibilitando, por meio da análise do sinal no domínio da frequência, a identificação da natureza do defeito predominante. De maneira geral, essas assinaturas são descritas em relação à frequência de rotação do eixo do motor, designada por " f_r " ($1x$), a partir da qual se definem as principais componentes espectrais associadas a cada tipo de falha. O desbalanceamento mecânico decorre de uma distribuição não homogênea de massa em torno do eixo de rotação, originando uma força centrífuga proporcional ao quadrado da velocidade angular do eixo [12]. No espectro de frequências, esse defeito caracteriza-se pela predominância de um pico de elevada amplitude exatamente em $1x f_r$, com contribuição pouco significativa de harmônicas superiores quando o desbalanceamento constitui o defeito isolado e predominante. A vibração resultante manifesta-se de forma predominantemente radial (nas direções horizontal e vertical), com amplitudes de magnitude semelhante entre si e fase relativamente estável ao longo do tempo, o que resulta em uma forma de onda no domínio do tempo aproximadamente senoidal. No desalinhamento ocorre quando os eixos de máquinas acopladas não compartilham a mesma linha de centro, podendo se manifestar de forma paralela (radial), angular, ou como uma combinação de ambas. Espectralmente, esse defeito tende a se manifestar por meio de picos significativos em $1x f_r$ e, sobretudo, em $2x f_r$, podendo apresentar ainda



componentes em $3xFr$ e $4xFr$ nos casos de severidade mais elevada. O desalinhamento paralelo costuma produzir uma componente dominante em $2xFr$, associada a elevados níveis de vibração radial, enquanto o desalinhamento angular tende a gerar amplitudes significativas tanto em $1xFr$ quanto em $2xFr$, acompanhadas de vibração axial elevada. Sendo esta última, inclusive, um dos indicadores mais característicos para a identificação desse tipo de defeito [12].

Diferentemente dos defeitos anteriores, cujas frequências características correspondem a múltiplos inteiros de Fr , os defeitos em rolamentos geram componentes espectrais em frequências não síncronas com a rotação do eixo, determinadas pela geometria interna do rolamento e pelo elemento especificamente afetado: pista externa, pista interna, elementos rolantes (esferas ou rolos) ou gaiola. Em termos espectrais, defeitos incipientes em rolamentos manifestam-se inicialmente como picos discretos de baixa amplitude, tipicamente situadas entre 2 e 10 vezes Fr , dependendo da geometria do rolamento [13]. Frequentemente acompanhados de bandas laterais espaçadas em $1x Fr$, resultantes da modulação de amplitude provocada pela passagem periódica do defeito pela zona de carga a cada rotação do eixo. Com a evolução do desgaste, observam-se o surgimento de harmônicas das frequências características, o aumento do piso de ruído de banda larga e, em estágios mais avançados de degradação, o crescimento das próprias harmônicas de $1x Fr$, refletindo o agravamento das folgas mecânicas internas decorrentes da deterioração progressiva do rolamento.

B. Medição de Vibração

Para a realização da análise vibracional, torna-se necessária a utilização de sensores capazes de converter as oscilações mecânicas produzidas pela máquina em sinais elétricos passíveis de aquisição e processamento. O sensor piezoelétrico, citado anteriormente, é composto por materiais que tem como característica um fenômeno capaz de gerar uma diferença de potencial elétrico, quando submetidos a deformações mecânicas [9]. Dessa forma, se fixados em contato à estrutura do motor monitorado, os sensores produzem sinais elétricos proporcionais às vibrações presentes no equipamento.

Entretanto, os sinais produzidos pelos sensores piezoelétricos normalmente apresentam características que dificultam sua utilização direta em sistemas microcontrolados. Como pode ser observado na Figura 1, o sensor responde ao estímulo gerado criando uma reação contrária no nível de tensão.

Esses sinais gerados podem apresentar níveis incompatíveis com a faixa de operação da entrada analógica da maior parte dos microcontroladores comerciais para esse tipo de aquisição. Dessa maneira, tipicamente se faz necessário o desenvolvimento de um circuito de condicionamento de sinais responsável por adequar o sinal proveniente do sensor às características exigidas pelo sistema de aquisição digital [9]. Entre as principais funções desempenhadas pelo circuito estão a adaptação da amplitude do sinal, aplicação de nível de offset em corrente contínua, redução

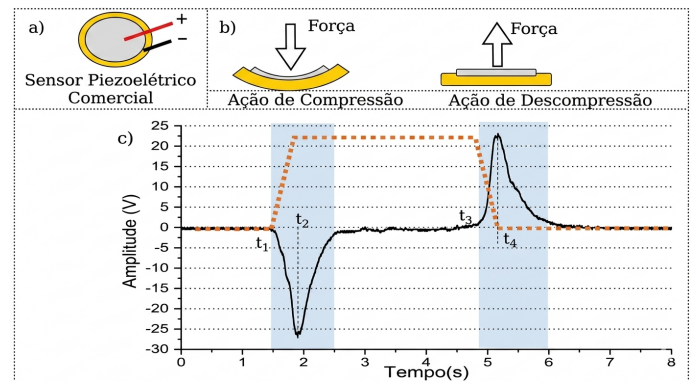


Fig. 1. Resposta do sensor piezoelétrico, adaptado de [14].

de ruídos e proteção da entrada analógica do microcontrolador.

A utilização do offset torna-se especialmente importante devido ao fato de o conversor analógico-digital presente no ESP8266 operar apenas com tensões positivas dentro de uma faixa limitada de leitura. Assim, o condicionamento permite que sinais alternados provenientes do sensor piezoelétrico possam ser adequados à aquisição a ser executado pelo dispositivo do sistema embarcado.

C. Processamento do Sinal

Após o condicionamento do sinal analógico proveniente do sensor piezoelétrico, torna-se necessária sua conversão para o domínio digital, permitindo que os dados adquiridos possam ser processados computacionalmente. Essa conversão é realizada pelo conversor analógico-digital (ADC) presente no microcontrolador, responsável por transformar os valores analógicos do sinal vibracional em uma sequência discreta de amostras digitais.

O processo de aquisição digital consiste na amostragem periódica do sinal analógico ao longo do tempo. A frequência de amostragem adotada possui influência direta na qualidade da representação digital do sinal adquirido, sendo necessário obedecer ao critério estabelecido pelo Teorema de Nyquist, para evitar distorções causadas pelo fenômeno de *aliasing* [15]. Esse critério é representado pela Equação 1, sendo que f_s representa a frequência de amostragem e f_{max} corresponde à maior frequência presente no sinal analisado.

$$f_s > 2f_{max} \quad (1)$$

Após a aquisição dos dados, o microcontrolador deve realizar o envio das amostras por meio de conexão Wi-Fi utilizando uma arquitetura baseada em Internet das Coisas (IoT). Para a comunicação entre os dispositivos do sistema, pode-se utilizar o protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), amplamente empregado em aplicações embarcadas devido ao seu baixo consumo de recursos computacionais e facilidade de integração em redes de monitoramento remoto [15]. Nesse sistema, o ESP8266 atua como dispositivo transmissor dos dados vibracionais, enquanto o Raspberry Pi realiza o recebimento, armazenamento e processamento das

informações adquiridas. A comunicação ocorre através de um *broker* MQTT, responsável pelo gerenciamento das mensagens trocadas entre os dispositivos conectados à rede.

Após o recebimento dos dados, torna-se possível realizar o processamento digital dos sinais vibracionais. Este processamento pode ser realizado por meio da DFT, utilizada para converter o sinal adquirido no domínio do tempo em sua representação no domínio da frequência, cujas componentes espectrais são obtidas conforme a Equação 2, em que $x[n]$ representa o sinal discreto no domínio do tempo e $X[k]$ corresponde às componentes espectrais obtidas após a transformação.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N} \quad (2)$$

A análise espectral permite identificar frequências características relacionadas ao comportamento vibracional da máquina, possibilitando detectar alterações associadas ao surgimento de falhas mecânicas. Além disso, a utilização da arquitetura IoT permite o monitoramento remoto dos sinais adquiridos.

III. METODOLOGIA

O sistema de monitoramento de vibração desenvolvido neste trabalho é composto por quatro blocos funcionais principais, conforme ilustrado na Figura 2.

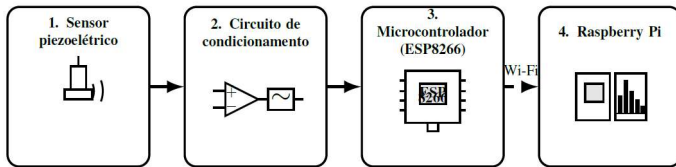


Fig. 2. Diagrama do Sistema.

O sensor piezoelétrico, responsável pela captação do sinal vibracional; o circuito de condicionamento de sinais, encarregado de adequar o sinal ao padrão exigido pelo conversor analógico-digital (ADC); o módulo microcontrolador ESP8266 (Wemos D1 Mini), responsável pela aquisição digital e transmissão sem fio dos dados; e o Raspberry Pi, que atua como servidor local de recebimento, processamento e disponibilização das informações. Na Figura 3, o layout do circuito de condicionamento desenvolvido é apresentado.

O sinal alternado de baixa amplitude, vindo do sensor piezoelétrico, centrado em torno do referencial de terra (GND), que não é compatível com a entrada analógica do ESP8266 por duas razões principais: a presença de tensões negativas, que o ADC não consegue processar, e a possibilidade de que picos positivos ultrapassem o limite máximo de leitura de 3,3 V. Para resolver essas restrições, foram projetados dois estágios para condicionamento dos sinais, utilizando o Circuito Integrado MCP6002 em encapsulamento SMD.

O primeiro estágio tem como objetivo gerar e aplicar um

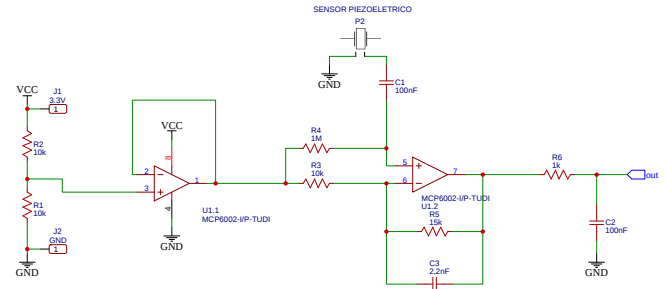


Fig. 3. Esquemático do Circuito de Condicionamento.

nível de tensão contínua (*offset*) ao sinal proveniente do sensor, deslocando-o para uma faixa de tensão positiva adequada à leitura pelo ADC. Um divisor resistivo formado por R1 e R2 (ambos de 10 k Ω) ajusta a tensão de referência para aproximadamente 1,65 V, conforme demonstrado na Equação 3.

$$V_{\text{offset}} = V_{CC} \cdot \frac{R2}{R1 + R2} = 3,3 \cdot \frac{10k}{10k + 10k} = 1,65 \text{ V}. \quad (3)$$

O amplificador operacional U1.1 é configurado como *buffer*, isolando o divisor resistivo da carga do estágio seguinte sem introduzir queda de tensão. Essa configuração apresenta elevada impedância de entrada e baixa impedância de saída, contribuindo para que a tensão de *offset* permaneça estável.

No segundo estágio, o amplificador operacional U1.2, realiza simultaneamente a amplificação do sinal do sensor e a filtragem de componentes de alta frequência. Inicialmente tem-se um filtro passa-altas de entrada (Desacoplamento DC) formado pelo capacitor de acoplamento C1 e pelo resistor de polarização R4. Este filtro bloqueia qualquer componente de corrente contínua vinda do sensor, permitindo apenas a passagem da vibração AC e definindo a frequência de corte inferior (f_{HP}), indicado na Equação 4.

$$f_{HP} = \frac{1}{2\pi \cdot R_4 \cdot C_1} \quad (4)$$

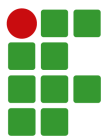
Substituindo os valores, ($R_4 = 1 \text{ M}\Omega$ e $C_1 = 100 \text{ nF}$), tem-se a Equação 5.

$$f_{HP} = \frac{1}{2\pi \cdot (1 \cdot 10^6) \cdot (100 \cdot 10^{-9})} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,1} \approx 1,59 \text{ Hz}; \quad (5)$$

O ganho, calculado na Equação 6, é configurado em um amplificador na topologia não-inversora, determinado pelos resistores R3 (10 k Ω) e R5 (15 k Ω).

$$A_v = 1 + \frac{R5}{R3} = 1 + \frac{15k}{10k} \approx 2,2 \text{ V/V} \quad (6)$$

O capacitor C3 (2,2 nF), conectado em paralelo com R5, forma um filtro passa-baixa integrado à malha de realimentação, com frequência de corte calculada na Equação 7.



$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi \cdot R5 \cdot C3} = \frac{1}{2\pi \cdot 15k \cdot 2,2n} \approx 4823 \text{ Hz} \quad (7)$$

Essa frequência de corte limita intencionalmente a banda do sinal amplificado, atenuando componentes de alta frequência, que não são de interesse para o diagnóstico do motor e reduzindo o risco de *aliasing* na etapa de aquisição digital.

Na saída do circuito, um filtro RC passa-baixa formado por R6 (1 kΩ) e C2 (100 nF) fornece uma etapa adicional de suavização do sinal, com frequência observada na Equação 8.

$$f_{c3} = \frac{1}{2\pi \cdot R6 \cdot C2} = \frac{1}{2\pi \cdot 1k \cdot 100n} \approx 1591 \text{ Hz} \quad (8)$$

O sinal resultante é centrado em 1,65 V, com amplitude compatível com a faixa de 0 a 3,3 V do ADC do microcontrolador.

O módulo Wemos D1 Mini, baseado no microcontrolador ESP8266, foi utilizado como unidade central de aquisição e transmissão de dados. O módulo integra conectividade *Wi-Fi*, conversor analógico-digital de 10 bits e suporte ao ambiente de desenvolvimento Arduino, facilitando a prototipagem e o desenvolvimento do *firmware*. Além do sinal analógico proveniente do circuito de condicionamento, conectado ao pino A0, o módulo conta com um botão de acionamento físico no pino D6 para disparo manual da coleta. O circuito e a disposição das trilhas estão apresentados no Apêndice A.

Em seguida, a definição dos parâmetros de aquisição partiu da análise das frequências de interesse do motor monitorado, trifásico, quatro polos, rotação nominal de 1780 RPM. A frequência de rotação fundamental do eixo, denominada $1\times$, é obtida pela Equação 9.

$$f_{1\times} = \frac{1780}{60} \approx 30 \text{ Hz} \quad (9)$$

Além da fundamental, o diagnóstico exige observar harmônicas e frequências de componentes mecânicos: desbalanceamento manifesta-se em $1\times$; desalinhamento angular em $2\times$ e $3\times$; defeitos em rolamentos tipicamente entre 60 Hz e 300 Hz; problemas elétricos no estator e rotor em 60 Hz e 120 Hz, respectivamente. Assim, o limite superior de interesse foi fixado em $f_{\max} = 1000 \text{ Hz}$, cobrindo todas essas componentes.

A frequência de amostragem foi ajustada para 2000 Hz, com janela de 2s resultando em 4000 amostras por análise. A Tabela I resume os parâmetros adotados.

A aquisição dos dados é controlada por um temporizador de hardware (*Timer1*), evitando a dependência de rotinas de software sujeitas a *jitter* (variação no tempo de entrega dos pacotes de dados), que comprometeriam a análise espectral posterior. A cada disparo do *timer*, uma rotina de serviço de interrupção (ISR) realiza a leitura do ADC e armazena o valor em um *buffer* estático de 4000 posições, ocupando 8 KB de RAM (10% da RAM disponível no ESP8266). A declaração como variável global estática evita o uso do *stack*,

TABELA I
Parâmetros de aquisição — frequência e tempo.

Parâmetro	Valor / Justificativa
f_s (amostragem)	2000 Hz
T (janela)	2 s — resolução espectral de 0,5 Hz
N (amostras)	4000 — $f_s \times T$
$f_{\max}$ detectável	< 1000 Hz — harmônicas e rolamentos

Fonte: Elaborado pelo autor.

cujas alocações grandes poderiam causar corrupção de memória e exceções em tempo de execução. A ISR foi declarada e alocada na memória RAM de instruções (IRAM). O fluxo completo de aquisição, incluindo a verificação de preenchimento do *buffer* e a sinalização ao laço principal por meio de uma variável *volatile*, é ilustrado na Figura 4.

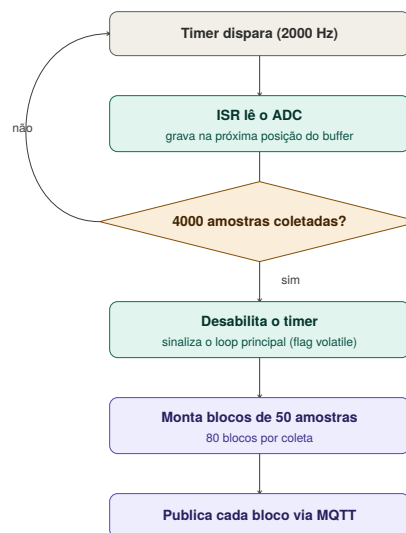
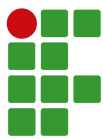


Fig. 4. Fluxo de aquisição e transmissão de dados no ESP8266.

Concluída a janela de aquisição, o *firmware* inicia a transmissão dos dados para o *broker* MQTT instalado no Raspberry Pi. O protocolo MQTT foi adotado por ser leve e baseado no modelo publicador-assinante (*publish-subscribe*), projetado para dispositivos com recursos limitados de processamento e largura de banda. As 4000 amostras serializadas em um único objeto *JSON* (formato de texto usado para trocar dados) resultariam em aproximadamente 20 KB, valor muito superior ao limite de *buffer* do cliente MQTT do ESP8266 (2048 bytes). Adotou-se, portanto, uma estratégia de transmissão em blocos, na qual os dados são divididos em grupos de 50 amostras por mensagem, totalizando 80 blocos por ciclo de coleta.

No Raspberry Pi, um *broker* MQTT é executado localmente com uma aplicação Django¹, onde a identificação e a

¹Os códigos utilizados na aplicação Django e para a



remontagem da coleta seguem a lógica apresentada na Figura 5. O bloco de índice zero inicia uma nova coleta, identificada por uma chave composta pelo identificador do motor e por um *timestamp* e armazenada no sistema de cache do Django, enquanto os blocos subsequentes são associados a essa coleta ativa ou, na ausência desta, dão origem a uma nova coleta como mecanismo de contingência. Um temporizador de 30 segundos é associado a cada coleta ativa, de modo que, em caso de perda de pacotes ou instabilidade da rede Wi-Fi, a coleta parcial seja salva mesmo assim, evitando que falhas de transmissão de blocos isolados resultem na perda total da aquisição. Quando completa, a coleta é ordenada pelo índice de cada bloco, concatenada em um único vetor de 4000 amostras e persistida no banco de dados por meio de uma única operação de inserção, evitando-se múltiplas escritas individuais por bloco.

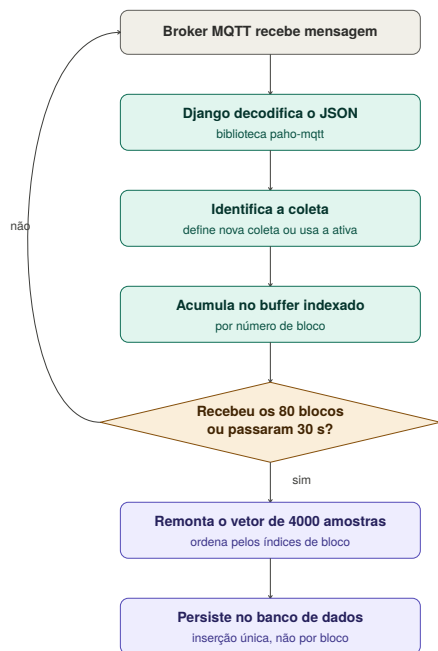


Fig. 5. Fluxo de recepção e remontagem da coleta no Raspberry Pi.

Após a remontagem, o sinal bruto, expresso em contagens do conversor analógico-digital é processado por meio de uma rotina implementada em Python, utilizando as bibliotecas *NumPy* e *Matplotlib*, seguindo as próximas etapas.

Antes da aplicação da transformada de Fourier, uma janela de Hann (*Hanning window*) é aplicada ao sinal, com o objetivo de reduzir o vazamento espectral decorrente da descontinuidade nas extremidades do bloco de amostras, fenômeno inerente à análise espectral de sinais de duração finita. A FFT é então calculada na forma unilateral, conforme Equação 10, considerando-se apenas as frequências positivas do espectro, uma vez que o sinal

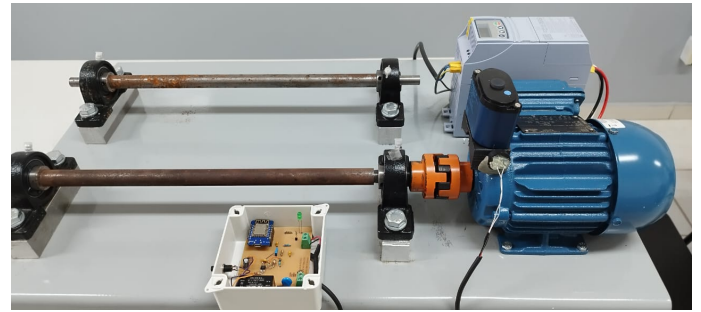


Fig. 6. Base com inversor, motor e eixo.

analisado é real. O $w(n)$ representa a janela de Hann aplicada ao sinal.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} V(n) \cdot w(n) \cdot e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0, 1, \dots, N/2 \quad (10)$$

A magnitude do espectro é, por fim, normalizada em relação à soma dos coeficientes da janela aplicada, de modo a corrigir o ganho de amplitude introduzido por essa etapa, multiplicada por um fator 2 para compensar a energia associada às frequências negativas descartadas no espectro unilateral. Isso ocorre porque, para um sinal real, a energia de cada componente de frequência se divide igualmente entre a frequência positiva e a negativa correspondente; ao manter-se apenas o lado positivo, é necessário dobrar seu valor para recuperar a amplitude original do sinal. A equação 11 demonstra a normalização.

$$|X[k]|_{\text{norm}} = \frac{2}{\sum_{n=0}^{N-1} w(n)} \cdot |X[k]| \quad (11)$$

O espectro resultante é exibido na faixa de 0 a $f_s/2 = 1000$ Hz, correspondente ao limite de Nyquist do sistema, com a amplitude expressa em Volts no eixo das ordenadas.

IV. RESULTADOS

Com o objetivo de avaliar a coerência da resposta espectral do sistema, os resultados obtidos pelo sensor piezoelétrico foram comparados aos dados de referência fornecidos pelo sistema comercial WEG Scan, instalado no mesmo motor de indução trifásico de quatro polos. É importante destacar que, no momento da coleta, o motor avaliado apresentava condição de distúrbio provocado de forma propositada, caracterizada por desalinhamento de um eixo montado em uma base com dois mancais de rolamentos, acoplado ao eixo de um motor trifásico de 1/2 cv acionado por um inversor de frequência. Além disso, o rolamento de um dos mancais também possui um dano em sua estrutura. O conjunto motor-eixo pode ser visualizado na Figura 6

A comparação direta entre as duas medições é validada pelo fato de que ambas correspondem à mesma direção física de medição, a direção axial do motor. O sistema WEG identifica



essa direção como eixo Y, assim como o sistema desenvolvido neste trabalho. O sensor piezoelétrico teve sua orientação montada especialmente para atender essas condições.

Cabe ressaltar que a comparação realizada não considera os valores de amplitude entre os dois espectros, uma vez que o sistema WEG apresenta os resultados em unidades de aceleração (g), previamente calibradas, enquanto o sistema piezoelétrico desenvolvido neste trabalho fornece a leitura em tensão elétrica (V), sem conversão para uma grandeza física equivalente. Dessa forma, a validação proposta baseia-se exclusivamente no comportamento espectral e na correspondência da posição relativa dos picos de frequência entre os dois sistemas.

Observa-se, em ambos os espectros, uma estrutura espectral em duas regiões características. Na faixa de baixa frequência (abaixo de aproximadamente 250 Hz), verificam-se picos discretos correspondentes a múltiplos de baixa ordem da frequência de rotação do motor, comportamento compatível com a assinatura típica de desalinhamento de eixo, falha cuja manifestação se concentra preferencialmente na direção axial, justamente a direção avaliada em ambos os sistemas. Na faixa de frequência mais elevada (acima de aproximadamente 600 Hz), observa-se em ambos os espectros um aumento da densidade e da energia de picos não harmonicamente relacionados à frequência de rotação, comportamento característico de defeitos localizados em rolamentos, cujas frequências de falha (relacionadas à geometria interna do componente) não correspondem a múltiplos inteiros exatos da frequência de rotação do eixo.

Pequenas diferenças nas frequências identificadas entre os dois sistemas (WEG Scan e Protótipo) podem ser justificadas por: características distintas dos sensores e circuitos empregados, diferenças nas frequências de amostragem e número de amostras de cada sistema, variações de velocidade e escorregamento do motor entre as duas medições, fenômeno de modulação por bandas laterais (*sidebands*) espaçadas pela frequência de rotação ao redor das frequências características de falha do rolamento. Além disso, o protótipo desenvolvido não passou por otimizações no sentido de melhorar sua imunidade a ruídos e interferências, diferentemente do produto comercial utilizado como referência de comparação.

1) Validação Cruzada entre Diferentes Velocidades de Operação: Com o objetivo de reforçar a análise de validação, foram comparadas medições com o motor operando em três condições de velocidade distintas, alimentado a 30 Hz, 45 Hz e 60 Hz, mantendo-se a mesma condição de falha (desalinhamento de eixo e rolamento danificado) e o mesmo eixo de medição (axial). Essa comparação permite avaliar não apenas a coerência espectral em uma única condição de operação, mas também o comportamento dos picos identificados frente à variação da velocidade de rotação do motor.

Dessa forma, analisou-se que os picos dominantes identificados na faixa de baixa frequência permaneceram aproximadamente nas mesmas posições nas três condições

de velocidade avaliadas, tanto no sistema WEG Scan, vistos nas Figuras 7, 9 e 11, com pico dominante entre 145 Hz e 150 Hz, quanto no sistema piezoelétrico desenvolvido, notado nas Figuras 8, 10 e 12, com pico dominante próximo a 175 Hz. Esse comportamento é apresentado de forma resumida na tabela II.

A manutenção dos picos em posições de frequência praticamente fixas, independentemente da variação da frequência de rotação do motor, é um comportamento característico de ressonância estrutural do conjunto motor-base-sensor, e não de um harmônico puro sincronizado à rotação, uma vez que este último seria esperado deslocar-se proporcionalmente à velocidade do eixo. A reprodução desse mesmo comportamento de estabilidade da frequência por ambos os sistemas de medição, constitui uma relevância de que o sensor piezoelétrico está captando um fenômeno dinâmico real do sistema mecânico, e não um produto aleatório do circuito de condicionamento de sinais, uma vez que tal correspondência entre dois instrumentos independentes, repetida em três condições de velocidade, dificilmente seria observada por coincidência.

Destaca-se, entretanto, que a região de alta frequência (acima de 600 Hz), associada majoritariamente ao defeito de rolamento, não apresentou deslocamento proporcional evidente entre as condições de velocidade avaliadas em nenhum dos dois sistemas, comportamento que seria esperado caso essa banda fosse determinada exclusivamente por frequências características de falha de rolamento, as quais escalam linearmente com a velocidade do eixo. Tal observação sugere que parte do conteúdo espectral nessa faixa também pode estar associada a componentes de ressonância estrutural, ou que a sobreposição de múltiplos harmônicos e bandas laterais (*sidebands*) na região de alta frequência dificulta a identificação visual de um deslocamento proporcional, sendo recomendável a análise quantitativa dos dados brutos para confirmação em trabalhos futuros.

Além disso, na Figura 12 notou-se na condição de 45 Hz um pico de amplitude próximo a 30 Hz, não destacado com a mesma evidência nas demais condições de velocidade avaliadas. Embora o espectro do sistema WEG Scan para essa condição apresente picos de magnitude comparável na mesma faixa de frequência, recomenda-se cautela na interpretação dessa componente, uma vez que não foi possível confirmar sua origem com o nível de detalhamento disponível nesta análise. Possíveis explicações incluem uma componente de baixa ordem associada à rotação do eixo nessa condição específica de velocidade, ou interferência elétrica proveniente do acionamento por inversor de frequência utilizado para obtenção dessa condição de operação, não devendo essa componente ser interpretada de forma conclusiva sem investigação adicional em trabalhos futuros.

2) Validação por Alteração Controlada da Condição Mecânica (com e sem eixo acoplado): A fim de complementar

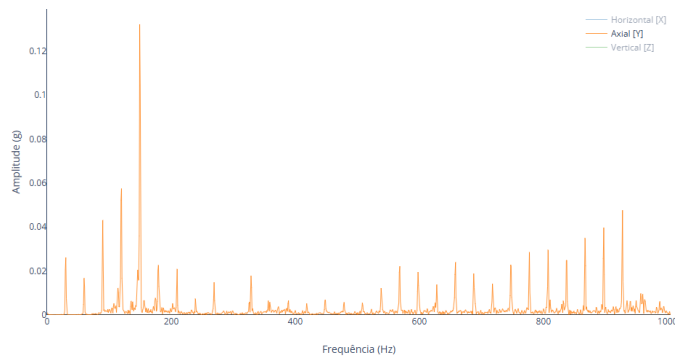
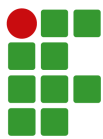


Fig. 7. Sistema WEG Scan, motor em 60 Hz.

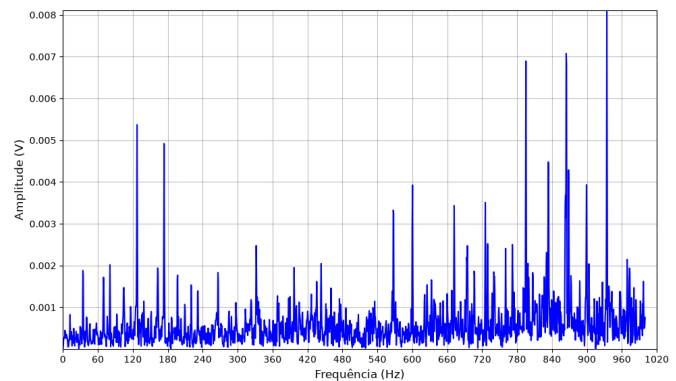


Fig. 8. Sensor piezoelétrico, motor em 60 Hz.

TABELA II

Comparação dos picos dominantes identificados nos dois sistemas de medição em diferentes condições de velocidade de operação do motor

Sensor	30 Hz	45 Hz	60 Hz
WEG Scan	≈ 95 e ≈ 145 Hz	≈ 150 Hz (dominante)	≈ 90–95 e ≈ 145–150 Hz
Sensor Piezoelétrico	≈ 120–125 e ≈ 175 Hz	≈ 130 e ≈ 175 Hz	≈ 120 e ≈ 175 Hz

Fonte: Elaborado pelo autor.

a análise de validação, foi realizado um ensaio adicional no qual o eixo previamente acoplado ao motor, responsável pelas condições de desalinhamento e de excitação do rolamento danificado nas medições anteriores foi removido, permanecendo apenas um pequeno trecho do elemento de acoplamento na ponta do eixo do motor, suficiente para gerar um leve desbalanceamento residual. A medição foi realizada com o motor alimentado a 60 Hz, mantendo-se o mesmo eixo de medição (axial) em ambos os sistemas, permitindo a comparação direta com os resultados obtidos na condição equivalente com o eixo acoplado.

Constatou-se uma alteração expressiva no comportamento espectral de ambos os sistemas de medição. Nas condições anteriores, com o eixo acoplado, o pico dominante do espectro situava-se de forma consistente próximo a 145–150 Hz no sistema WEG Scan e próximo a 175 Hz no sistema piezoelétrico, conforme discutido anteriormente. Com a remoção do eixo, esse pico foi substancialmente reduzido em ambos os sistemas, restando apenas componentes residuais de menor amplitude nessa região. Em substituição, obteve o surgimento de um novo pico dominante, de amplitude consideravelmente superior às demais componentes do espectro, situado em aproximadamente 905–910 Hz presente nos dois sistemas de medição. As respostas referentes estão expressas na Figura 13 e na Figura 14.

O fato de o pico dominante coincidir entre os dois sistemas, justamente após a alteração física do motor, torna esse resultado especialmente relevante para a validação. Não se trata apenas de observar uma condição estática, mas de verificar que o sistema piezoelétrico acompanhou uma mudança real no comportamento

da máquina. Esse comportamento é consistente com a hipótese de ressonância estrutural discutida anteriormente. Ao remover o eixo acoplado, a massa e a rigidez do conjunto motor-acoplamento-base são alteradas, deslocando as frequências naturais de vibração do sistema. O pico cede lugar a um novo modo predominante, agora excitado pelo desbalanceamento residual remanescente. Vale destacar ainda um critério de comparação que contorna a diferença de unidades entre os dois sistemas, sendo (g) no WEG Scan e (V) no sistema piezoelétrico. O critério adotado foi a posição do pico de maior amplitude relativa em cada espectro. Por ser relativo, ele permite comparação direta entre os dois sistemas independentemente da grandeza medida. Os resultados mostraram concordância nas duas condições avaliadas. Esse resultado reforça a validade do sistema desenvolvido como instrumento de monitoramento de vibração.

V. CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido cumpriu os objetivos propostos, operando de forma estável nas condições de teste e gerando espectros de frequência compatíveis com os obtidos pelo equipamento de referência WEG Scan. O resultado obtido pelo sensor piezoelétrico reproduziu, de forma qualitativamente consistente e na direção de medição correta, o padrão espectral esperado para a condição de falha conhecida do motor avaliado, evidenciando tanto a componente de desalinhamento em harmônicos de baixa ordem quanto a componente de defeito de rolamento em banda larga de alta frequência.

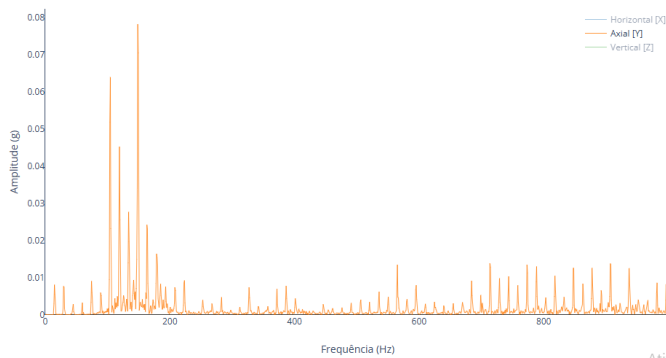
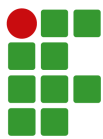


Fig. 9. Sistema WEG Scan, motor em 30 Hz.

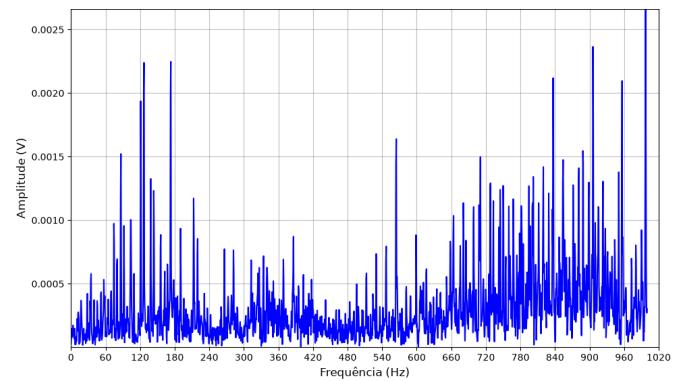


Fig. 10. Sensor piezoelétrico, motor em 30 Hz.

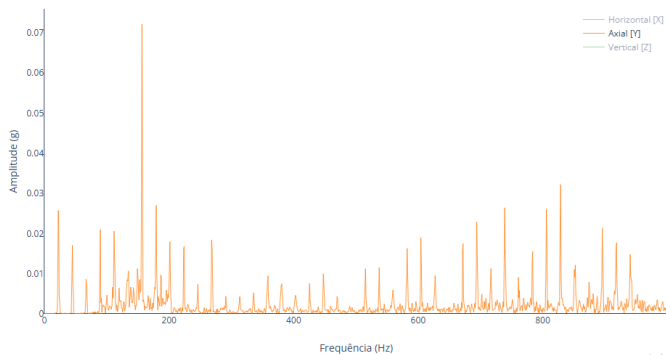


Fig. 11. Sistema WEG Scan, motor em 45 Hz.

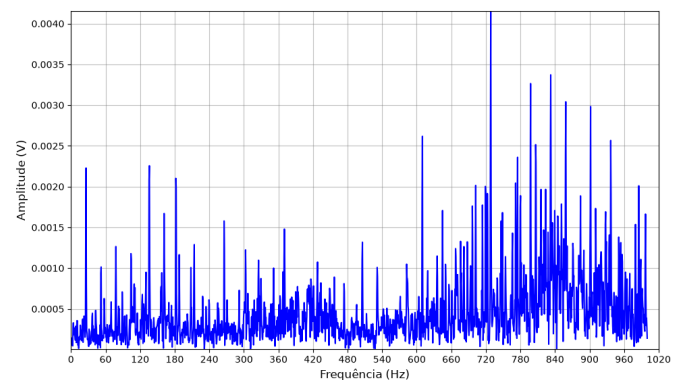


Fig. 12. Sensor piezoelétrico, motor em 45 Hz.

As limitações identificadas, principalmente a ausência de calibração formal do sensor e a incompatibilidade de unidades com o sistema de referência, não comprometeram as conclusões, mas apontam caminhos naturais para o aprimoramento da solução. Nesse sentido, trabalhos futuros podem explorar desde a implementação de um procedimento de calibração e a expansão para monitoramento multieixo, até a integração de algoritmos de detecção automática de falhas baseados em aprendizado de máquina e a avaliação do sistema em condições industriais reais. Por fim, o trabalho evidencia que é possível construir uma ferramenta funcional de análise vibracional com componentes acessíveis e software de código aberto, o que representa uma contribuição concreta para a democratização das técnicas de manutenção preditiva em contextos onde soluções comerciais não são viáveis.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Kardec, J. Nascif, *Manutenção: função estratégica*, 3 ed., Qualitymark, Rio de Janeiro, 2009.
- [2] J. C. Santos, *et al.*, *Análise de vibração em motores elétricos da classe 1 da norma ISO 10816*, Dissertação de Mestrado, Anima Educação, 2024, URL: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/feb88ba6-c0b0-47b3-bee2-d99d5ff2cb40>.

- [3] G. Betta, C. Liguori, A. Paolillo, A. Pietrosanto, “A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 6, pp. 1316–1322, 2002, doi:10.1109/TIM.2002.808037, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1177930/>.
- [4] J. Rafiee, *et al.*, “Fault detection and diagnosis in rotating machinery by vibration monitoring using FFT and Wavelet techniques”, in *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2010, doi:10.1109/ETFA.2010.5641311, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6602399/>.
- [5] P. Kolok, *et al.*, “Low-Cost IoT-Based Predictive Maintenance Using Vibration”, *Sensors*, vol. 25, no. 21, p. 6610, 2025, doi:10.3390/s25216610, URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/21/6610>.
- [6] F. Silva, *et al.*, *Metodologia para análise de vibrações aplicada em sistemas mecânicos acionados por motores elétricos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal

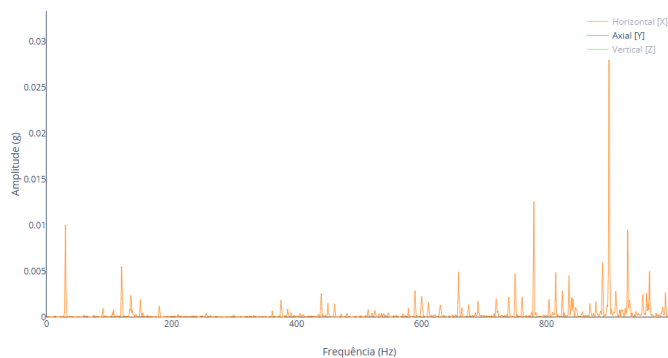
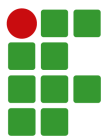


Fig. 13. Sistema WEG Scan, motor em 60 Hz sem eixo.

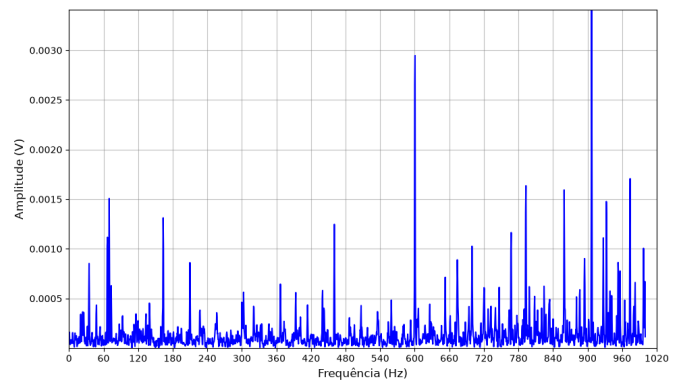


Fig. 14. Sensor piezoelétrico, motor em 60 Hz sem eixo.

- Rural do Semi-Árido (UFERSA), 2022, URL: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/d1490df3-5543-409b-b78e-516366d6c958>.
- [7] J. V. G. d. Lima, M. N. d. Oliveira Júnior, “Desenvolvimento de aplicativo para análise de padrões de vibração de compressores”, *Revista Sítio Novo*, vol. 10, p. e1887, 2026.
- [8] L. F. Rodrigues, *et al.*, “Sistema de Monitoramento de Vibração em Motores de Indução Trifásicos Utilizando IoT e Sensores MEMS”, in *Anais do Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, vol. 1, 2022, URL: <https://proceedings.science/cba-2022/papers/sistema-de-monitoramento-de-vibracao-em-motores-de-inducao-trifasicos-utilizando-iot-e-sensores-mems>.
- [9] T. Wu, *et al.*, “A circuit design in piezoelectric vibration measurement system”, in *IEEE International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI)*, 2011, doi:10.1109/ICEMI.2011.6037713, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6167306/>.
- [10] M. Blodt, *et al.*, “Application of Piezoelectric Sensors to Rotor Fault Diagnostics in Squirrel-Cage Induction Machines”, in *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2008, doi:10.1109/DEMPED.2009.5292763, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4658811/>.
- [11] “ISO 10816-1: Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts – Part 1: General Guidelines”, , 1995.
- [12] C. S. Sakaris, J. S. Sakellariou, S. D. Fassois, “Vibration-Based Fault Detection and Identification in Rotating Machinery Under Varying Operating Conditions”, *Rotating Machinery, Structural Health Monitoring, Shock and Vibration*, vol. 5, pp. 295–303, 2015.
- [13] Y.-T. Sheen, “Vibration Analysis of Rolling Element Bearings Defects”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 308, no. 1–2, pp. 59–80, 2007, doi:10.1016/j.jsv.2007.06.043, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1665642314716207>.
- [14] M. Vieira, J. Mendes Júnior, M. Pires, S. Stevan Jr, “DISPOSITIVO PARA ANÁLISE DE PRESSÃO PLANTAR EM PALMILHAS UTILIZANDO PIEZOELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO”, , 10 2016.
- [15] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3 ed., Pearson/Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2010.

