

SISTEMA DE MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA EM MOTORES ELÉTRICOS

Wellington Lucena Barros¹, Rogério Thomazella², Ralf Felipe Dworak³

¹Graduando em Automação Industrial, Fatec Bauru, wellington.barros@fatec.sp.gov.br.

²Doutor em engenharia elétrica, Fatec Bauru, rogerio.thomazella@cps.sp.gov.br.

³Especialista em Engenharia de Manutenção, Fatec Bauru, ralf.dworak@cps.sp.gov.br

RESUMO

O monitoramento de vibrações em motores elétricos constitui uma importante estratégia para aumento da confiabilidade operacional, redução de falhas e otimização dos processos de manutenção em sistemas industriais. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar um sistema de baixo custo destinado à aquisição, processamento e análise de sinais vibracionais aplicados à manutenção preditiva de motores elétricos. O sistema foi desenvolvido utilizando sensor piezoelétrico, circuito de condicionamento de sinais e microcontrolador ESP32, responsável pela aquisição dos dados em tempo real. Os sinais obtidos foram processados computacionalmente no software MATLAB®, permitindo a extração de parâmetros no domínio do tempo e da frequência, incluindo tensão pico a pico (Vpp), valor eficaz (Vrms), Transformada Rápida de Fourier (FFT) e análise de amplitude dos sinais. Para validação experimental, foram realizados ensaios em bancada sob diferentes condições simuladas de operação, incluindo impacto mecânico, desbalanceamento, vibração induzida no eixo e atrito mecânico. Durante os testes, as formas de onda foram acompanhadas por meio de osciloscópio digital Tektronix, possibilitando a análise do comportamento vibracional em diferentes situações de falha. Os resultados demonstraram que o sistema foi capaz de identificar alterações significativas nos padrões vibracionais associados às falhas simuladas, apresentando sensibilidade adequada para detecção de anomalias mecânicas. Conclui-se que a solução desenvolvida apresenta potencial para aplicação em estratégias de manutenção preditiva de baixo custo, contribuindo para aumento da confiabilidade operacional e redução de falhas em motores elétricos.

Palavras-chave: Monitoramento de motores elétricos; Vibração mecânica; Manutenção preditiva; Aquisição de dados; Microcontrolador.

1 INTRODUÇÃO

Motores elétricos desempenham um papel fundamental nos processos industriais modernos, sendo responsáveis pela movimentação de equipamentos essenciais à produção. Devido à sua elevada importância operacional, falhas nesses dispositivos podem ocasionar paradas não programadas, prejuízos financeiros significativos e riscos à segurança. Nesse contexto, a busca por maior confiabilidade dos ativos industriais tem impulsionado a adoção de estratégias que permitam identificar falhas de forma antecipada, evitando impactos negativos na produção. Segundo Kardec e Nascif (2019), estratégias de manutenção preditiva contribuem significativamente para a redução de falhas inesperadas e aumento da confiabilidade operacional dos equipamentos industriais.



Entre os parâmetros utilizados para avaliação das condições operacionais de motores elétricos, a vibração mecânica destaca-se como um dos principais indicadores de falhas. Alterações nos níveis de vibração podem indicar problemas como desalinhamento, desbalanceamento, folgas mecânicas e falhas em rolamentos, permitindo a identificação precoce de anomalias. Conforme a ISO 20816-3 (ISO, 2022), alterações nos níveis vibracionais podem indicar falhas mecânicas em máquinas rotativas. Segundo Thomazella (2019), a análise vibracional associada ao processamento digital de sinais permite identificar padrões característicos relacionados ao comportamento dinâmico de máquinas rotativas. Dessa forma, o monitoramento contínuo da vibração possibilita uma análise mais precisa das condições operacionais dos equipamentos, contribuindo para intervenções mais assertivas.

Com o avanço da eletrônica e dos sistemas embarcados, tornou-se viável o desenvolvimento de dispositivos de baixo custo capazes de realizar a aquisição e o processamento de dados em tempo real. Esses sistemas permitem o acompanhamento contínuo das condições de operação dos motores, fornecendo informações relevantes para a tomada de decisão e para o planejamento de ações de manutenção. O ESP32 foi utilizado devido à sua elevada capacidade de processamento, conectividade integrada e compatibilidade com aplicações embarcadas de monitoramento em tempo real (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

Nesse contexto, o monitoramento em tempo real da vibração se apresenta como uma solução eficiente para aumentar a confiabilidade operacional e reduzir a ocorrência de falhas inesperadas, contribuindo para maior disponibilidade dos equipamentos e otimização dos processos industriais.

Diante desse cenário, este projeto tem como objetivo desenvolver um dispositivo de baixo custo para monitoramento em tempo real da vibração em motores elétricos, visando identificar variações no comportamento vibracional e auxiliar na detecção precoce de falhas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de monitoramento desenvolvido foi composto por sensor piezoelétrico, circuito de condicionamento de sinais, microcontrolador ESP32 e sistema de processamento digital dos dados vibracionais. Segundo Thomazella (2019), sensores piezoelétricos apresentam boa sensibilidade para aplicações de análise vibracional em máquinas rotativas.

O processamento e aquisição dos sinais foram realizados utilizando o microcontrolador ESP32, escolhido devido à sua capacidade de processamento e compatibilidade com aplicações embarcadas de monitoramento em tempo real (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

Os sinais coletados foram processados no software MATLAB®, utilizando técnicas baseadas na Transformada Rápida de Fourier (FFT). O processamento digital dos sinais foi baseado em técnicas descritas por Oppenheim e Schaffer (2010).

Durante os testes experimentais, foram simuladas diferentes condições de falha mecânica, incluindo impacto mecânico, desbalanceamento, vibração induzida na ponta do eixo e atrito mecânico próximo ao sensor. Segundo Rao (2008),



alterações nos padrões vibracionais estão associadas ao comportamento dinâmico de sistemas rotativos submetidos a falhas mecânicas.

2.1 LISTA DE MATERIAIS

Para o desenvolvimento do sistema de monitoramento vibracional, foram selecionados componentes eletrônicos capazes de realizar a aquisição, condicionamento e processamento dos sinais provenientes do sensor de vibração. A escolha dos materiais considerou critérios como baixo custo, facilidade de implementação e compatibilidade com sistemas embarcados, permitindo a construção de um protótipo funcional destinado à análise de vibrações em motores elétricos. A lista de materiais pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais utilizados na montagem do circuito

Item	Componente	Identificação	Especificação	Quantidade
1	Circuito-integrado	IC1	CI – MCP6002	1
2	Sensor de vibração	J1	Piezoelétrico (PZT)	1
3	Resistor	R1	1 MΩ	1
4	Resistor	R2	1 kΩ	1
5	Resistor	R3	10 kΩ	1
6	Resistor	R4	10 kΩ	1
7	Resistor	R5	1 kΩ	1
8	Diodo Schottky	D1	1N5817	1
9	Diodo Schottky	D2	1N5817	1
10	Capacitor	C1	100 nF / 35 V	1
11	Capacitor	C2	100 nF / 35 V	1
12	Fonte de alimentação	—	3,3 V estabilizada	1
13	Protoboard/Placa (PCI)	—	—	1
14	Cabos/Jumper	—	Conexão elétrica	Diversos
15	Super-ímã	—	25x10mm	1
16	Microcontrolador	—	ESP32-Devkit	1

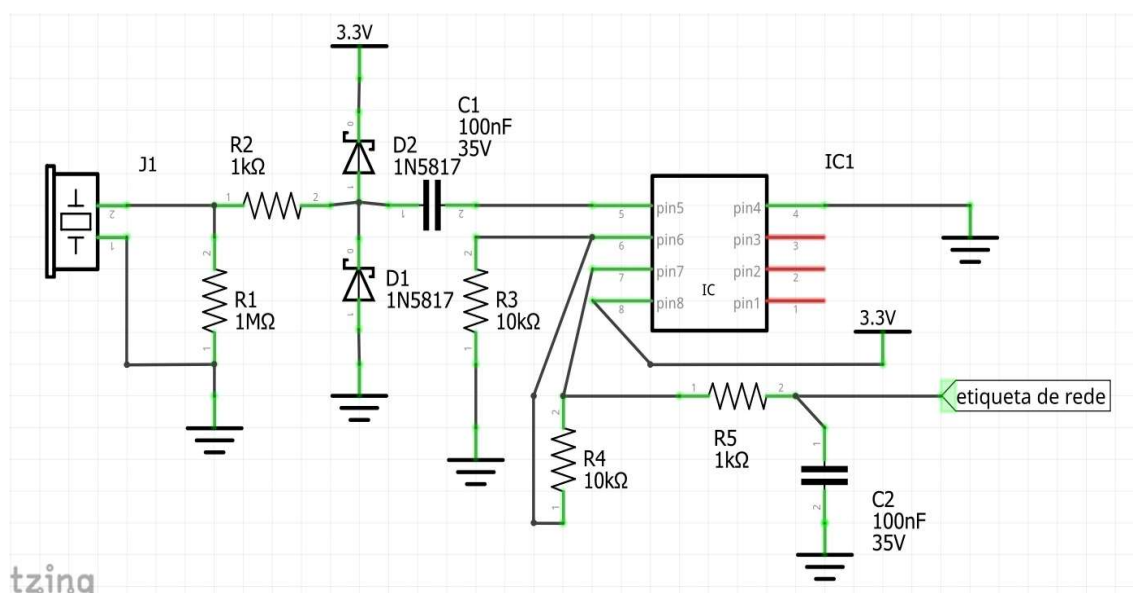
Fonte: Elaboração própria (2026).

2.2 ESQUEMA ELÉTRICO E LAYOUT DE PLACA



Após a definição dos componentes utilizados no projeto, foi elaborado o esquema elétrico do sistema de monitoramento, contemplando as etapas de proteção, filtragem, amplificação e condicionamento do sinal vibracional. Posteriormente, realizou-se o desenvolvimento do layout da placa de circuito impresso, visando organizar adequadamente os componentes eletrônicos e otimizar as conexões elétricas do sistema. A Figura 1 ilustra o esquema elétrico projetado.

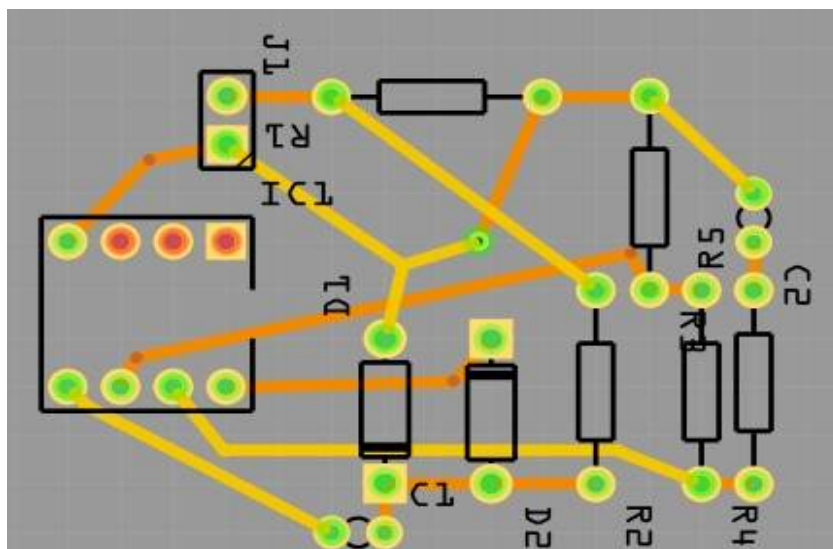
Figura 1 – Esquema elétrico do sistema de monitoramento.



Fonte: Elaboração própria – Aplicativo Fritzing (2026).

A Figura 2 ilustra o layout da placa de circuito impresso (PCB) desenvolvido para o sistema de monitoramento vibracional, evidenciando a disposição dos componentes eletrônicos responsáveis pelo condicionamento e aquisição dos sinais provenientes do sensor piezoelétrico. O projeto da placa foi elaborado com o objetivo de otimizar as conexões elétricas, reduzir interferências eletromagnéticas e proporcionar maior organização física ao circuito, contribuindo para a estabilidade e confiabilidade do sistema durante os ensaios experimentais.

Figura 2 – Layout da placa de circuito impresso (PCB).



Fonte: Elaboração própria – Aplicativo Fritzing (2026).

2.3 MÉTODO DE MONTAGEM

A montagem do sistema foi realizada de forma a garantir a correta integração entre sensor, circuito de condicionamento e microcontrolador responsável pela aquisição dos dados. Nesta etapa, foram executadas as conexões elétricas, fixação mecânica do sensor vibracional e implementação do circuito eletrônico, possibilitando o funcionamento adequado do protótipo durante os ensaios experimentais.

O circuito foi projetado para realizar o condicionamento do sinal de vibração proveniente de um sensor piezoelétrico (PZT), permitindo sua adequada leitura por um microcontrolador. Inicialmente, o sensor PZT foi acoplado à carcaça do motor por meio de um ímã de neodímio, garantindo fixação mecânica eficiente e melhor transmissão das vibrações. O sinal gerado pelo sensor foi aplicado ao circuito por meio do conector J1. O resistor R1 (1 M Ω) foi utilizado para fornecer referência ao terra, evitando flutuações no sinal de entrada, enquanto o resistor R2 (1 k Ω) atua como limitador de corrente. Os diodos D1 e D2 (1N5817) foram empregados como proteção contra sobretensão, limitando o sinal de entrada entre os níveis de 0 V e 3,3 V, garantindo a integridade dos componentes do circuito. O capacitor C1 (100 nF) foi utilizado para desacoplamento e filtragem de ruídos de alta frequência. Na sequência, o sinal foi aplicado ao circuito integrado MCP6002 (IC1), configurado como amplificador operacional, cuja função é realizar a amplificação e o condicionamento do sinal proveniente do PZT, elevando sua amplitude para níveis adequados à aquisição. O ajuste do sinal foi complementado por uma rede resistiva composta por R3 e R4 (10 k Ω), responsável pela adequação do nível de tensão. O resistor R5 (1 k Ω) em conjunto com o capacitor C2 (100 nF) forma um filtro passa-baixa, com a finalidade de suavizar o sinal e reduzir interferências de alta frequência.

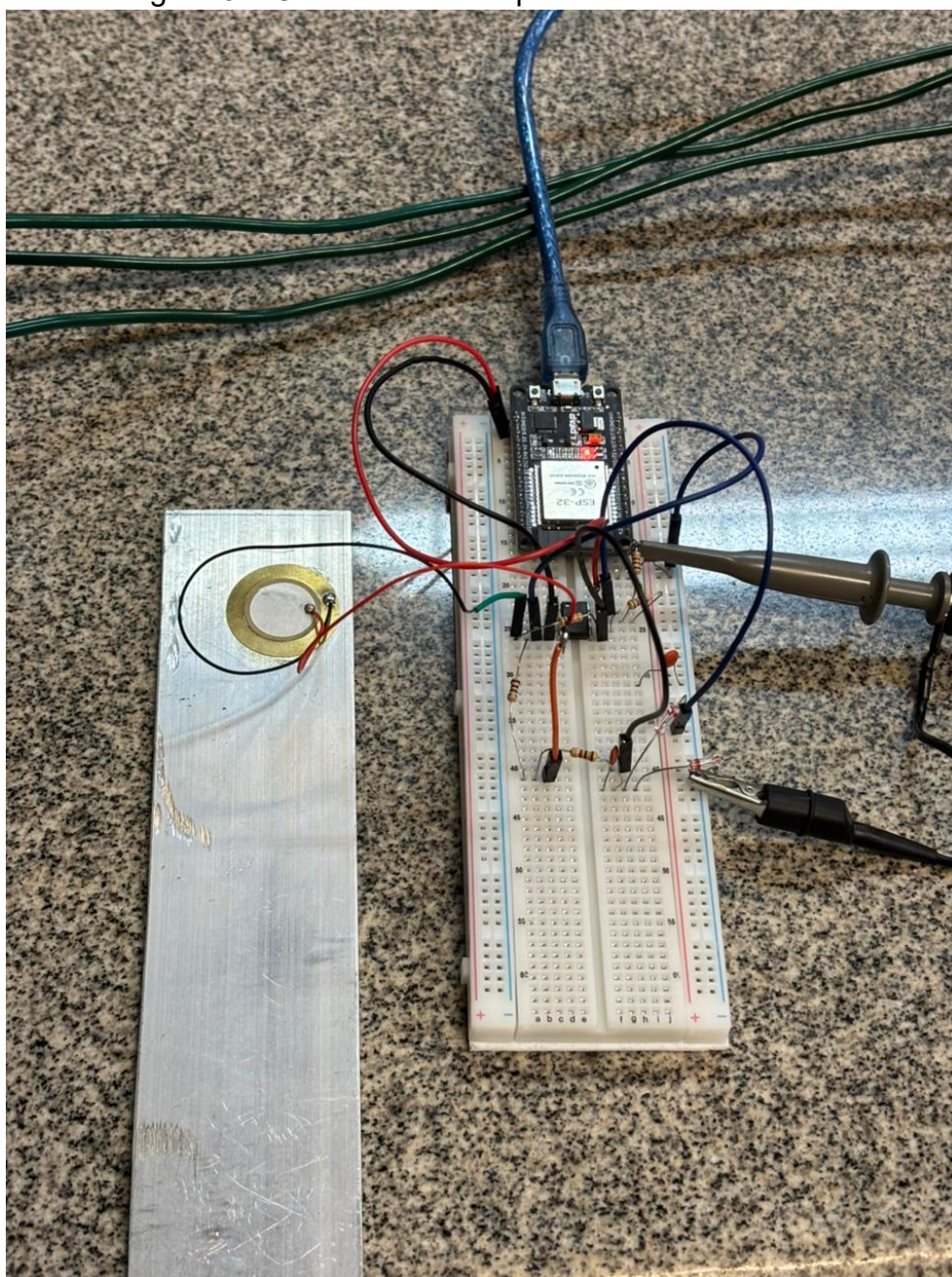
Após o condicionamento, o sinal amplificado foi encaminhado ao microcontrolador ESP32, responsável pela aquisição dos dados de vibração por meio de seu conversor analógico-digital (ADC), bem como pelo processamento e análise dos sinais obtidos. O sistema foi alimentado por uma fonte estabilizada de 3,3 V,



garantindo estabilidade operacional e funcionamento adequado de todos os componentes.

A Figura 3 representa o circuito montado para realização dos testes em bancada, evidenciando a integração entre o sensor piezoelétrico, o circuito de condicionamento de sinais e o microcontrolador ESP32. A montagem experimental permitiu validar o funcionamento do sistema desenvolvido, possibilitando a aquisição dos sinais vibracionais gerados pelo motor elétrico durante as diferentes condições simuladas de operação.

Figura 3 – Circuito montado para teste em bancada.



Fonte: Elaboração própria – Câmera Iphone 15 (2026).



A Figura 4 ilustra o ensaio experimental realizado em bancada durante a etapa de validação do sistema de monitoramento vibracional. Nesta configuração, o protótipo foi submetido a diferentes condições simuladas de funcionamento do motor elétrico, permitindo a aquisição e análise dos sinais de vibração em tempo real. Os testes realizados possibilitaram verificar a sensibilidade do sistema frente às variações vibracionais associadas a possíveis falhas mecânicas.

Figura 4 – Teste em bancada.



Fonte: Elaboração própria – Câmera Iphone 15 (2026).

2.4 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS

Após o condicionamento do sinal, os dados vibracionais foram adquiridos pelo microcontrolador ESP32 por meio do conversor analógico-digital (ADC) interno. O sistema realizou leituras contínuas das vibrações mecânicas do motor elétrico, permitindo o acompanhamento em tempo real das condições operacionais do equipamento.

Os sinais obtidos foram processados pelo microcontrolador, possibilitando a identificação de alterações significativas nos níveis de vibração durante os ensaios experimentais. Quando detectadas condições anormais previamente estabelecidas, o sistema acionava um sinal de alerta indicando possível falha mecânica.

Os dados coletados durante os testes foram utilizados para análise do comportamento vibracional em diferentes condições simuladas de operação. Os sinais obtidos durante os ensaios experimentais foram analisados computacionalmente no software MATLAB®, permitindo a extração de parâmetros como tensão pico a pico (Vpp), tensão eficaz (Vrms), valor médio e frequência dominante dos sinais



vibracionais. Os sinais foram adquiridos utilizando frequência de amostragem de 500kHz e janelas de 2500 amostras, permitindo posterior processamento digital no MATLAB®.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes experimentais foram realizados em bancada utilizando um sistema de monitoramento de vibração baseado em sensor piezoelétrico, circuito de condicionamento de sinal e aquisição via microcontrolador ESP32. As medições foram acompanhadas por meio de um osciloscópio digital Tektronix, permitindo a visualização das formas de onda durante diferentes condições simuladas de falha mecânica.

Durante os testes, foram simuladas condições de impacto mecânico, desbalanceamento, vibração induzida na ponta do eixo e atrito mecânico. Em todas as situações avaliadas, o sistema identificou alterações significativas no comportamento vibracional, acionando o sinal de alerta conforme a proposta do projeto.

Conforme a ISO 20816-3 (ISO, 2022), alterações nos níveis vibracionais podem indicar falhas em máquinas rotativas. Segundo Thomazella (2019), técnicas de análise vibracional associadas ao processamento digital de sinais permitem identificar padrões característicos relacionados a falhas mecânicas em motores elétricos.

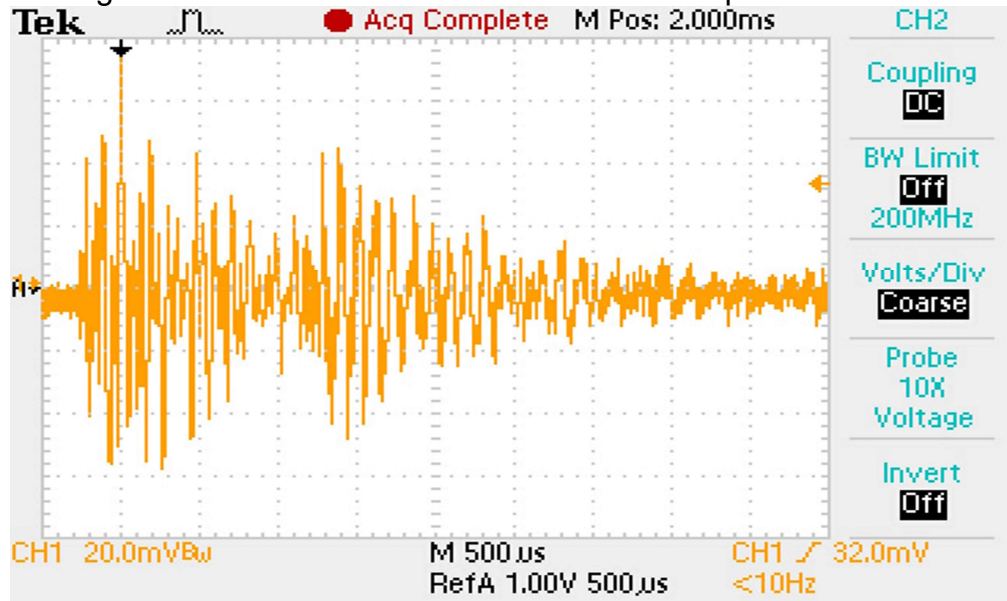
A Figura 6 apresenta o processamento digital aplicado ao sinal vibracional obtido durante o ensaio de desbalanceamento do motor elétrico. Foram aplicadas técnicas baseadas no cálculo do valor eficaz móvel (RMS – Root Mean Square) e do valor pico a pico móvel (Peak-to-Peak), utilizando janelas deslizantes de 100 amostras.

Os resultados demonstraram aumento significativo dos níveis de RMS e do valor pico a pico móvel durante o ensaio de desbalanceamento, evidenciando alterações no comportamento dinâmico do motor elétrico. Segundo Thomazella (2019), técnicas de processamento digital de sinais associadas à análise vibracional contribuem para aplicações de manutenção preditiva e monitoramento contínuo de equipamentos industriais.

3.1 ANÁLISE DOS SINAIS OBTIDOS NO OSCILOSCÓPIO E ESP32

As formas de onda observadas no osciloscópio e ESP32 apresentaram características distintas para cada condição simulada, evidenciando a sensibilidade do sensor piezoelétrico às variações mecânicas aplicadas ao sistema.

A Figura 5 ilustra o sinal vibracional obtido durante o ensaio de impacto mecânico, evidenciando a resposta do sistema frente a uma excitação impulsiva aplicada ao conjunto experimental. Observa-se a presença de um pico transitório de elevada amplitude seguido de amortecimento gradual do sinal, comportamento característico de impactos mecânicos em sistemas rotativos. A análise dessa resposta demonstra a capacidade do sistema em detectar variações abruptas de vibração associadas a possíveis condições anormais de operação.



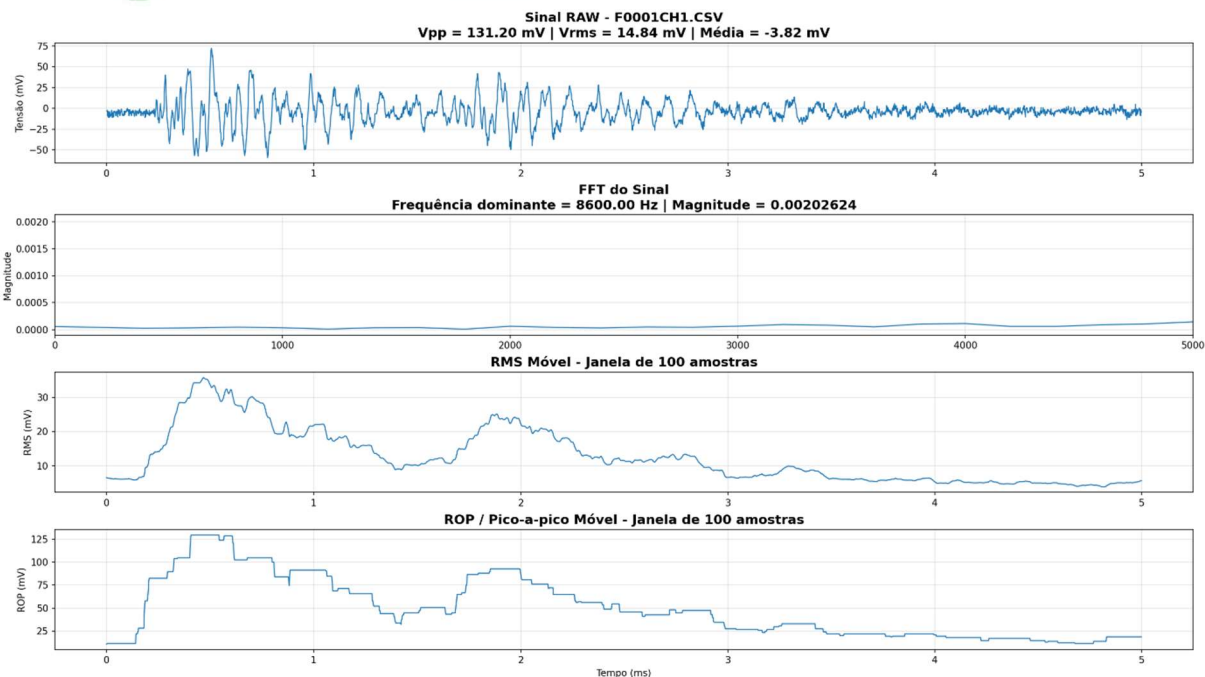
Fonte: Osciloscópio Tektronix TDS204C (2026).

A Figura 6 apresenta o processamento digital aplicado ao sinal vibracional obtido durante o ensaio de desbalanceamento do motor elétrico. Inicialmente, observa-se o sinal bruto (RAW) adquirido pelo sistema de monitoramento, evidenciando oscilações associadas às vibrações mecânicas do conjunto rotativo. Em seguida, é apresentada a Transformada Rápida de Fourier (FFT), utilizada para identificação das componentes em frequência presentes no sinal, permitindo determinar a frequência dominante associada ao comportamento vibracional do sistema.

Além da análise espectral, foram aplicadas técnicas de processamento baseadas no cálculo do valor eficaz móvel (RMS – Root Mean Square) e do valor pico a pico móvel (Peak-to-Peak), utilizando janelas deslizantes de 100 amostras. O parâmetro RMS é amplamente empregado na análise vibracional por representar a energia média do sinal ao longo do tempo. Já o parâmetro pico a pico móvel permite avaliar a variação entre os valores máximos e mínimos do sinal, possibilitando identificar eventos transitórios, impactos e irregularidades mecânicas.

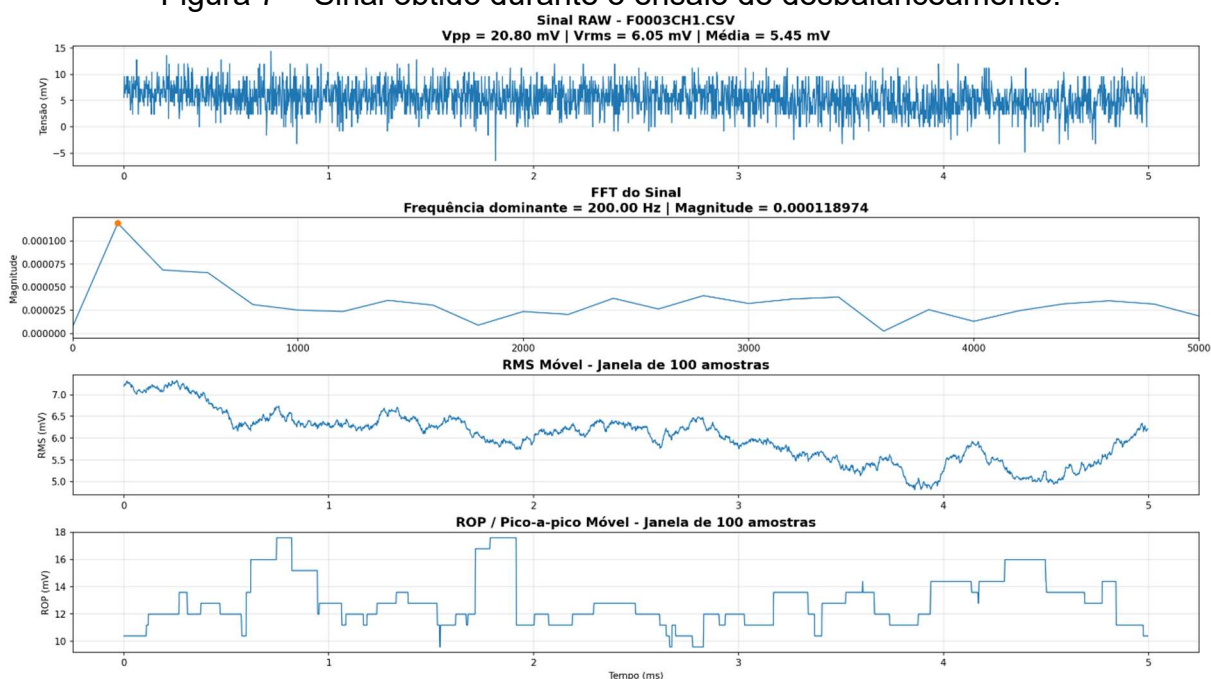
Os resultados obtidos demonstraram aumento significativo dos níveis de RMS e do valor pico a pico móvel durante o ensaio de desbalanceamento, evidenciando alterações no comportamento dinâmico do motor elétrico. Segundo Thomazella (2019), técnicas de processamento digital de sinais associadas à análise vibracional permitem identificar padrões característicos de falhas mecânicas em máquinas rotativas, contribuindo para aplicações de manutenção preditiva e monitoramento contínuo de equipamentos industriais.

Figura 6 – Processamento digital do sinal vibracional obtido durante o ensaio de desbalanceamento, contendo sinal bruto (RAW), análise espectral por FFT, valor eficaz móvel (RMS) e valor pico a pico móvel (Peak-to-Peak).



Fonte: Elaboração própria a partir dos sinais adquiridos no ESP32 e processados no MATLAB® (2026).

Figura 7 – Sinal obtido durante o ensaio de desbalanceamento.



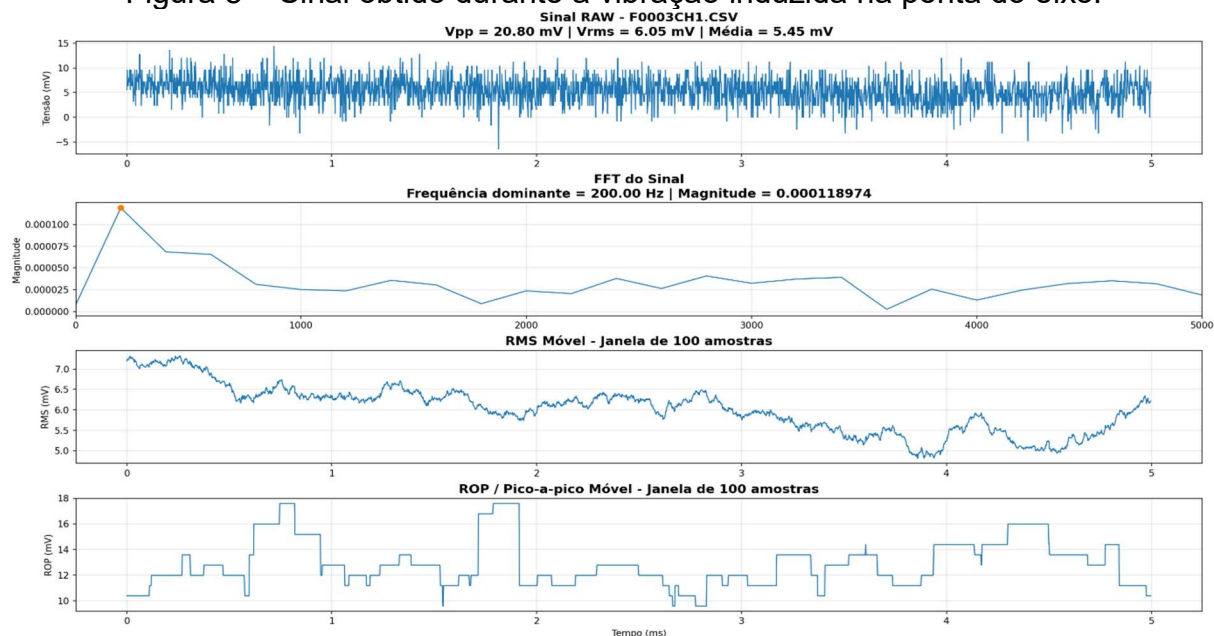
Fonte: Elaboração própria a partir dos sinais adquiridos no ESP32 e processados no MATLAB® (2026).

No ensaio de desbalanceamento, representado pela Figura 7, verificou-se aumento significativo da dispersão do sinal e da amplitude das oscilações. O comportamento observado é característico de sistemas rotativos desbalanceados, nos quais forças centrífugas geram vibrações periódicas durante a rotação do eixo.



Falhas como desbalanceamento, desalinhamento e atrito mecânico provocam alterações significativas na amplitude e frequência dos sinais vibracionais.

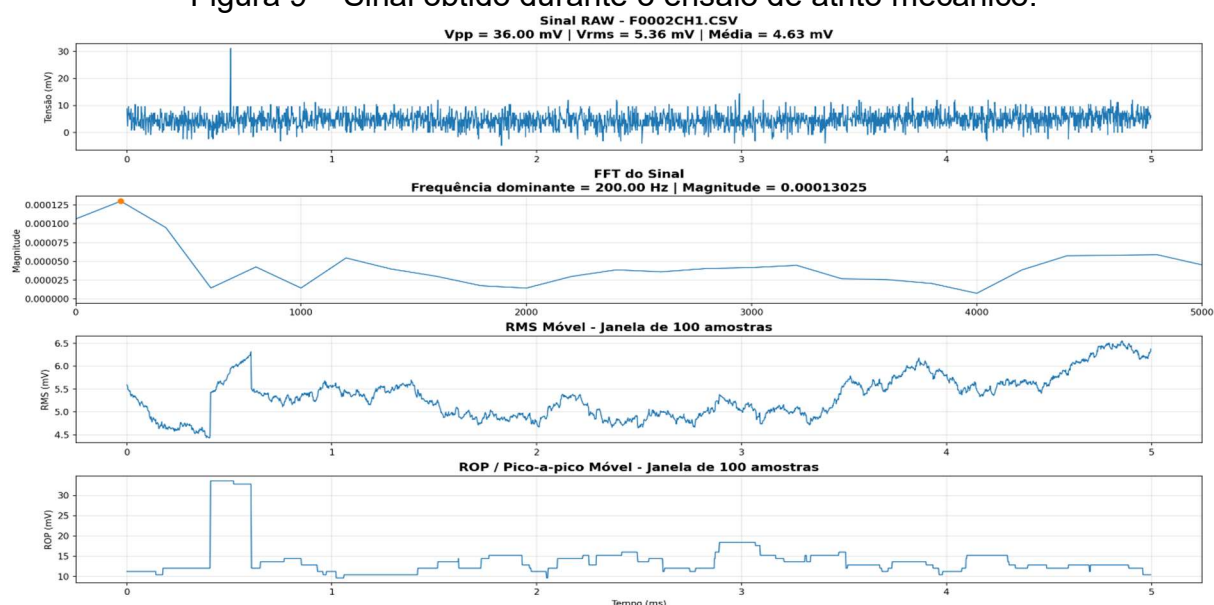
Figura 8 – Sinal obtido durante a vibração induzida na ponta do eixo.



Fonte: Elaboração própria a partir dos sinais adquiridos no ESP32 e processados no MATLAB® (2026).

Durante o teste de vibração na ponta do eixo, o contato do material polimérico com a região do rasgo da chaveta produziu pequenas perturbações repetitivas ao longo do sinal, conforme mostrado na Figura 8. Mesmo apresentando amplitude inferior aos demais ensaios, o sistema foi capaz de identificar a anomalia e registrar o evento.

Figura 9 – Sinal obtido durante o ensaio de atrito mecânico.

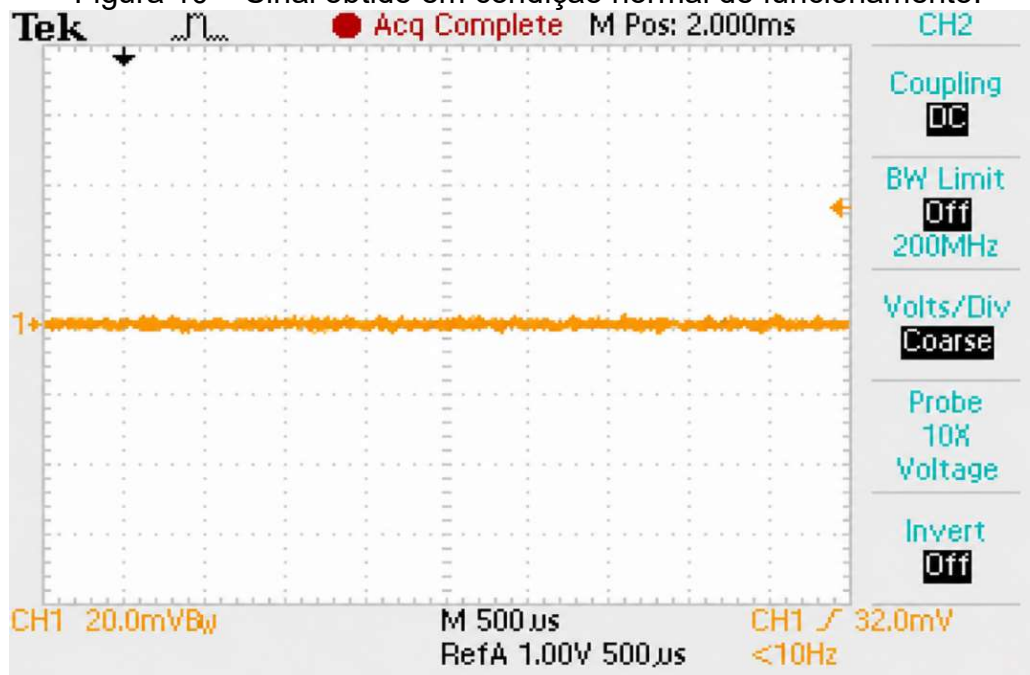




Fonte: Elaboração própria a partir dos sinais adquiridos no ESP32 e processados no MATLAB® (2026).

No ensaio de atrito mecânico, ilustrado pela Figura 9, observou-se um sinal contínuo e irregular, associado ao contato metálico próximo ao sensor. O comportamento apresentado demonstra a capacidade do sistema em detectar vibrações provenientes de raspagens e desgastes mecânicos.

Figura 10 – Sinal obtido em condição normal de funcionamento.



Fonte: Osciloscópio Tektronix TDS2024C (2026).

Na condição normal de funcionamento, demonstrada na Figura 10, observou-se um sinal contínuo e estável, com baixa amplitude e pequenas oscilações associadas ao funcionamento natural do motor elétrico. A amplitude permaneceu em aproximadamente 40 mV, indicando baixos níveis de vibração e ausência de anomalias mecânicas significativas. O comportamento observado caracteriza uma condição operacional estável, servindo como referência para comparação com os demais ensaios realizados.

A Tabela 2 apresenta as principais características observadas nos sinais vibracionais durante os ensaios experimentais. Foi possível identificar diferenças no comportamento dos sinais para cada condição simulada, permitindo distinguir situações normais de operação das condições associadas a falhas mecânicas.

Tabela 2 – Parâmetros observados durante os ensaios.

Condição simulada	Característica do sinal observado	Amplitude aproximada	Comportamento identificado
Situação normal	Sinal constante com pequenas oscilações	~40 mV	Vibração leve e contínua



Impacto mecânico	Pico transitório de alta intensidade seguido de amortecimento	~60 mV	Vibração impulsiva e abrupta
Desbalanceamento	Oscilações contínuas com maior dispersão do sinal	~130 mV	Vibração periódica elevada
Vibração na ponta do eixo	Vibração contínua com pequenas perturbações repetitivas	~50 mV	Vibração intermitente associada ao contato mecânico
Atrito mecânico	Sinal com ruído contínuo de baixa amplitude	~70 mV	Vibração irregular causada por raspagem metálica

Fonte: Elaboração própria (2026).

A Tabela 3 apresenta os parâmetros quantitativos extraídos dos sinais adquiridos durante os ensaios experimentais. Os dados foram analisados no software MATLAB®, permitindo comparar os níveis de vibração e as frequências predominantes em cada condição simulada de funcionamento do motor elétrico.

Tabela 3 – Dados quantitativos dos sinais.

Arquivo	Condição de Ensaio	Amostras	Fs	Vpp	Vrms	Média	Frequência Dominante
F0000CH1	Impacto mecânico	2500	500 kHz	38,40 mV	5,45 mV	0,66 mV	6,6 kHz
F0001CH1	Desbalanceamento	2500	500 kHz	131,20 mV	14,84 mV	-3,82 mV	8,6 kHz
F0002CH1	Vibração na ponta do eixo	2500	500 kHz	36,00 mV	5,36 mV	4,63 mV	200 Hz
F0003CH1	Atrito mecânico	2500	500 kHz	72,00 mV	11,20 mV	2,80 mV	1,8 kHz
F0004CH1	Condição normal	2500	500 kHz	40,00 mV	4,90 mV	0,52 mV	120 Hz

Fonte: Elaboração própria (2026).

Os resultados obtidos demonstram que o dispositivo apresentou elevada sensibilidade para detecção de vibrações mecânicas em diferentes condições de falha simulada. Mesmo em eventos de baixa amplitude, o circuito de condicionamento de sinal foi capaz de fornecer estabilidade suficiente para aquisição e interpretação dos dados pelo microcontrolador.



Sistemas de monitoramento vibracional são amplamente utilizados na manutenção preditiva devido à capacidade de identificar alterações no comportamento dinâmico de máquinas rotativas antes da ocorrência de falhas severas. Falhas como desbalanceamento, atrito e impactos mecânicos provocam assinaturas vibracionais específicas, possibilitando sua identificação por meio da análise dos sinais coletados.

Os resultados experimentais mostraram compatibilidade com os comportamentos descritos na literatura, validando o funcionamento do protótipo desenvolvido. Além disso, observou-se que o sistema apresentou resposta rápida aos eventos simulados, acionando corretamente o alerta de anomalia e registrando os dados obtidos durante os ensaios experimentais.

Dessa forma, os ensaios realizados em bancada demonstraram que o protótipo possui potencial para aplicação em sistemas de monitoramento de motores elétricos, contribuindo para estratégias de manutenção preditiva de baixo custo e maior confiabilidade operacional.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento e validação de um sistema de monitoramento de vibrações aplicado à manutenção preditiva de motores elétricos. O sistema desenvolvido teve como objetivo realizar o monitoramento das condições operacionais do equipamento em tempo real, identificando alterações vibracionais associadas a possíveis falhas mecânicas e emitindo sinais de alerta em situações consideradas anormais.

Os testes realizados em bancada demonstraram que o sistema foi capaz de detectar diferentes condições simuladas de falha, como impacto mecânico, desbalanceamento, vibração induzida no eixo e atrito mecânico. Em todas as situações avaliadas, o protótipo apresentou resposta satisfatória, identificando alterações significativas nos sinais vibracionais e acionando corretamente o alerta de anomalia conforme proposto no projeto.

Os resultados obtidos evidenciaram que a integração entre sensor vibracional, circuito de condicionamento de sinal e processamento via microcontrolador permitiu o funcionamento adequado do sistema de monitoramento. Além disso, verificou-se que a solução desenvolvida apresentou boa sensibilidade na identificação de alterações vibracionais, inclusive em sinais de baixa amplitude, demonstrando potencial para aplicações em monitoramento contínuo de máquinas rotativas.

Dessa forma, conclui-se que o sistema desenvolvido atende aos objetivos estabelecidos, apresentando potencial para utilização em estratégias de manutenção preditiva industrial. A capacidade de monitorar vibrações em tempo real e emitir alertas preventivos pode contribuir significativamente para redução de falhas inesperadas, aumento da confiabilidade operacional e diminuição de custos relacionados à manutenção corretiva e paradas não programadas.

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se a implementação de técnicas mais avançadas de processamento e análise de sinais, bem como a integração do sistema com plataformas IoT para monitoramento remoto, armazenamento de dados e emissão automática de alertas, visando ampliar as funcionalidades e a aplicabilidade do sistema em ambientes industriais.



5 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10520: informação e documentação – citações em documentos – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. Disponível em: <https://www.abnt.org.br/>. Acesso em: 23 maio 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6022: informação e documentação – artigo em publicação periódica científica impressa – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. Disponível em: <https://www.abnt.org.br/>. Acesso em: 23 maio 2026.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 Technical Reference Manual. Shanghai, 2023. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf. Acesso em: 23 maio 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 20816-3: Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 30 000 r/min when measured in situ. Geneva: ISO, 2022. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/81809.html>. Acesso em: 23 maio 2026.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. Manutenção: função estratégica. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2019.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. Processamento de sinais em tempo discreto. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

RAO, Singiresu S. Vibrações mecânicas. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

MOBLEY, R. Keith. An introduction to predictive maintenance. 2. ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2002.

THOMAZELLA, Rogério. Técnicas de processamento digital de sinais de sensor piezelétrico na detecção de vibrações auto-excitadas (chatter) no processo de retificação. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/4e64eeab-1fa8-4a42-bec6-f6a1fd57341d>. Acesso em: 23 maio 2026.

THE MATHWORKS INC. MATLAB Documentation. Natick, 2024. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>. Acesso em: 23 maio 2026.