DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO INDICADOR DE FALHAS EM MOTORES DC VIA ANÁLISE DE SINAIS DE VIBRAÇÃO E APRENDIZADO DE MÁQUINA

Caio Toscano, Wagner dos Santos Clementino de Jesus

Universidade do Vale do Paraíba/Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, caio.toscano345@gmail.com.

Resumo

Este trabalho em desenvolvimento apresenta a proposta de um software indicador de falhas em motores empregados em sistemas industriais, comerciais e laboratoriais, a partir da análise de sinais de vibração. O objetivo é construir um protótipo capaz de coletar dados de aceleração, organizar os registros, processar os sinais e apresentar uma indicação sobre a condição do motor. A metodologia prevê uma bancada experimental com motor DC 775 de 12 V, fonte de alimentação, controlador PWM, acelerômetro triaxial ADXL345, ESP32 e notebook para armazenamento e processamento. Diante dos testes preliminares realizados, optou-se pela utilização do ADXL345 na etapa experimental, pois o sensor apresentou desempenho satisfatório para aquisição dos sinais de vibração e validação do pipeline computacional. Os resultados preliminares incluem a aquisição dos componentes, o acionamento do motor e o controle de velocidade por potenciômetro. Espera-se obter sinais em diferentes condições de operação, extrair características no domínio do tempo e da frequência e avaliar modelos de aprendizagem de máquina para indicação de funcionamento normal ou comportamento anômalo.

Palavras-chave: Motores. Vibração. Acelerômetro. Aprendizagem de máquina. Manutenção preditiva.
Área do Conhecimento: Engenharias / Engenharia de Computação.

Introdução

Motores elétricos e de corrente contínua são empregados em diferentes sistemas industriais, comerciais e laboratoriais, sendo responsáveis por converter energia elétrica em movimento mecânico para acionar equipamentos rotativos. Mesmo em aplicações de pequeno porte, esses sistemas estão sujeitos a desgaste, atrito, desalinhamento, desbalanceamento, folgas e variações de carga. Nesse contexto, o acompanhamento da condição de funcionamento torna-se relevante para reduzir paradas inesperadas e apoiar estratégias de manutenção preditiva e manutenção baseada em condição (Carvalho et al., 2019; Romanssini et al., 2023; Ward et al., 2024).

A vibração é uma grandeza importante para o monitoramento de máquinas rotativas, pois alterações mecânicas podem modificar a amplitude, a dispersão e o conteúdo de frequência dos sinais medidos. Estudos recentes indicam que a análise de vibração pode ser combinada com técnicas de processamento de sinais, extração de características e métodos computacionais para apoiar a identificação de alterações em motores e conjuntos rotativos (Romanssini et al., 2023; Matania et al., 2024; Fontoura, 2023; Lourenço et al., 2021).

Do ponto de vista da Engenharia da Computação, o problema pode ser tratado como um fluxo de dados. As leituras do acelerômetro são coletadas, armazenadas, segmentadas, transformadas em características numéricas e utilizadas em algoritmos computacionais. Técnicas de aprendizagem de máquina e métodos de identificação de desvios podem ser aplicados conforme a disponibilidade de dados rotulados e a formulação final do problema (Surucu; Gadsden; Yawney, 2023; Ward et al., 2024; Dalprá, 2023).

O objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo de software indicador de falhas em motores por análise de vibração, integrando aquisição de dados, processamento de sinais, extração de características e apresentação de uma indicação objetiva sobre a condição do motor. Por se tratar de um trabalho em desenvolvimento, esta versão descreve a proposta metodológica, a bancada inicial e os resultados preliminares já obtidos.

Metodologia

A metodologia proposta contempla a montagem de uma bancada experimental, a coleta de sinais de vibração, a transmissão dos dados para um notebook, o processamento computacional e a apresentação dos resultados por meio de software. O sistema será composto por motor DC 775 de 12 V, fonte chaveada de 12 V e 10 A, controlador PWM para variação de velocidade, suporte metálico, base rígida, acelerômetro triaxial ADXL345, ESP32 e computador para armazenamento e análise dos sinais. Essa organização segue a lógica de sistemas de monitoramento de condição baseados em aquisição, tratamento de sinais, extração de características e interpretação computacional dos dados (Romanssini et al., 2023; Matania et al., 2024).

Tabela 1 - Componentes previstos para a bancada experimental.

Componente	Função no projeto
Motor DC 775 12 V	Gerar vibração em condições controladas de funcionamento.
Fonte 12 V 10 A	Alimentar o motor com tensão contínua adequada aos ensaios.
Controlador PWM	Permitir variação de velocidade durante a coleta dos sinais.
ADXL345	Medir aceleração nos eixos X, Y e Z para análise de vibração.
ESP32	Realizar a leitura do sensor e enviar dados ao notebook.
Notebook	Armazenar dados, executar processamento e treinar modelos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O motor 775 foi selecionado por apresentar baixo custo, disponibilidade comercial, alimentação em baixa tensão, eixo acessível e possibilidade de controle de velocidade. Essas características favorecem a criação de uma bancada segura e repetível para ensaios iniciais, com condições normais de operação e possíveis alterações controladas, como variação de rotação ou pequenos desbalanceamentos (Handson Technology, s.d.).

Diante dos testes preliminares realizados, optou-se pela utilização do acelerômetro digital triaxial ADXL345 para a aquisição dos sinais de vibração no protótipo. O sensor apresentou desempenho adequado para validar a comunicação com a ESP32, a fixação na bancada experimental e o pipeline computacional proposto. O ADXL345 possui comunicação digital por SPI ou I²C, faixas configuráveis de medição e capacidade de registrar variações nos eixos X, Y e Z, características suficientes para os ensaios de análise do comportamento vibracional do motor. Dessa forma, o sensor será utilizado como componente principal da etapa experimental, permitindo a coleta dos dados necessários para o processamento, extração de características e avaliação do software indicador de falhas (Analog Devices, 2020).

A ESP32 será utilizada como unidade de aquisição. Sua função será ler os dados do acelerômetro e enviá-los ao notebook, preferencialmente por comunicação USB serial durante os testes iniciais. Dessa forma, o microcontrolador será responsável apenas pela interface entre sensor e computador, enquanto o processamento, armazenamento, visualização, extração de características e treinamento dos modelos serão realizadas no notebook (Espressif Systems, 2025).

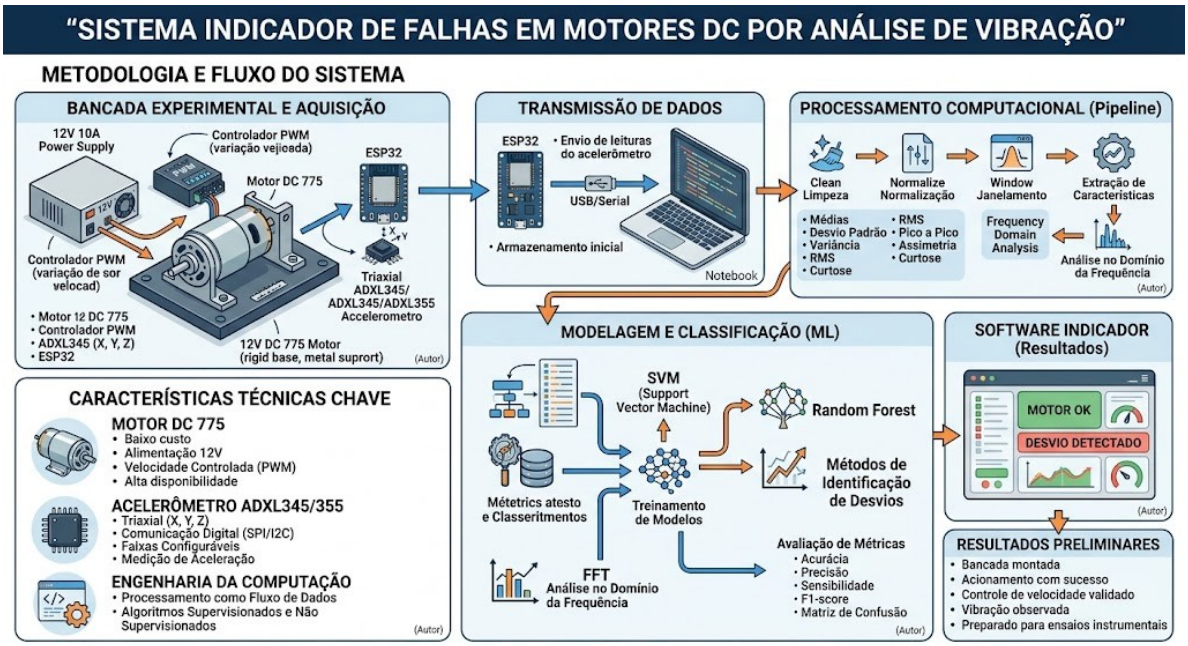
Os ensaios serão identificados por informações de contexto, como data, condição do motor, posição do sensor, frequência de amostragem, duração da coleta e configuração do controlador de velocidade. Inicialmente serão coletados sinais com o motor desligado, em baixa rotação, média rotação e rotação elevada. Em seguida, poderão ser adicionadas condições controladas de alteração mecânica, mantendo a fixação do sensor e a mesma estrutura de coleta para favorecer a comparação entre ensaios.

Os dados brutos serão organizados em arquivos contendo tempo e aceleração nos eixos X, Y e Z. Em seguida, será aplicado um pipeline de processamento com limpeza, normalização, janelamento e extração de características. Entre as características previstas estão média, mínimo, máximo, desvio padrão, variância, raiz média quadrática, pico a pico, assimetria e curtose. Também será avaliada a análise no domínio da frequência por Transformada Rápida de Fourier, recurso utilizado em sistemas

de monitoramento por vibração para observar componentes espectrais dos sinais medidos (Romanssini et al., 2023; Matania et al., 2024).

Na etapa de modelagem serão testados algoritmos de aprendizagem de máquina, como SVM, Random Forest e métodos de identificação de desvios, conforme a quantidade e a qualidade dos dados obtidos. A implementação será realizada em Python, com apoio de bibliotecas de aprendizagem de máquina, e os modelos serão avaliados por métricas como acurácia, precisão, sensibilidade, F1-score e matriz de confusão, quando houver dados rotulados suficientes (Carvalho et al., 2019; Brito et al., 2022; Surucu; Gadsden; Yawney, 2023; Gawde et al., 2023; Ward et al., 2024; Dalprá, 2023).

Figura 1 - Metodologia e fluxo do sistema indicador.



Fonte: Autor.

Resultados

Até o momento, os resultados são preliminares e correspondem à etapa de preparação da bancada. Foram adquiridos os principais componentes do sistema, incluindo fonte de alimentação de 12 V e 10 A, motor DC 775, controlador PWM, suporte metálico, base em MDF, ESP32 e acelerômetro ADXL345 para os testes de aquisição dos dados.

A primeira validação prática consistiu na ligação da fonte ao controlador PWM e deste ao motor. O motor foi acionado com sucesso e respondeu adequadamente à variação do potenciômetro, permitindo alterar a velocidade desde a condição mínima até a condição máxima do controlador. Esse resultado confirma a viabilidade inicial do conjunto de acionamento e permite avançar para os ensaios com sensor fixado na estrutura.

Durante o primeiro teste visual e tátil, observou-se que o motor apresentou vibração perceptível relativamente baixa, principalmente em rotações mais altas. Em rotação mais baixa, a vibração foi percebida com maior intensidade. Esse comportamento reforça a necessidade de medição instrumental, pois o acelerômetro poderá revelar variações que não são facilmente percebidas apenas por observação direta.

Como próximos resultados experimentais, espera-se obter séries temporais dos três eixos do acelerômetro e comparar os registros do motor desligado, em diferentes velocidades e em condições controladas de alteração. A partir dessas coletas, serão gerados gráficos no domínio do tempo, indicadores estatísticos e espectros de frequência para verificar se as diferenças entre as condições são suficientemente representativas para alimentar o software indicador.

Tabela 2 - Objetivos preliminares atingidos.

Objetivo preliminar	Situação observada
Aquisição dos componentes	Fonte 12 V, motor DC 775, controlador PWM, suporte metálico, base em MDF, ESP32 e ADXL345 disponíveis para os ensaios.
Acionamento do motor	Motor ligado com sucesso por meio da fonte e do controlador PWM.
Controle de velocidade	Potenciômetro validado, permitindo variar a rotação do mínimo ao máximo.
Preparação para aquisição	Bancada apta para a fixação do acelerômetro e coleta dos sinais nos eixos X, Y e Z.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Discussão

Os resultados preliminares indicam que a bancada possui viabilidade inicial, pois o conjunto fonte, controlador e motor funcionou de forma estável. Ainda assim, a baixa vibração percebida no motor em condição normal representa um ponto de atenção para a etapa de aquisição. Esse aspecto não inviabiliza o projeto, mas reforça a importância de configurar corretamente o acelerômetro, garantir uma fixação mecânica adequada do sensor e comparar os sinais por métricas numéricas e análise espectral, em vez de depender apenas da percepção visual ou tátil. A literatura de monitoramento de condição destaca que a aquisição e o processamento dos sinais constituem etapas fundamentais para a identificação de alterações no comportamento de máquinas, enquanto a forma de montagem do acelerômetro pode influenciar diretamente a resposta em frequência e a confiabilidade da medição (PCB Piezotronics, s.d.; Romanssini et al., 2023)

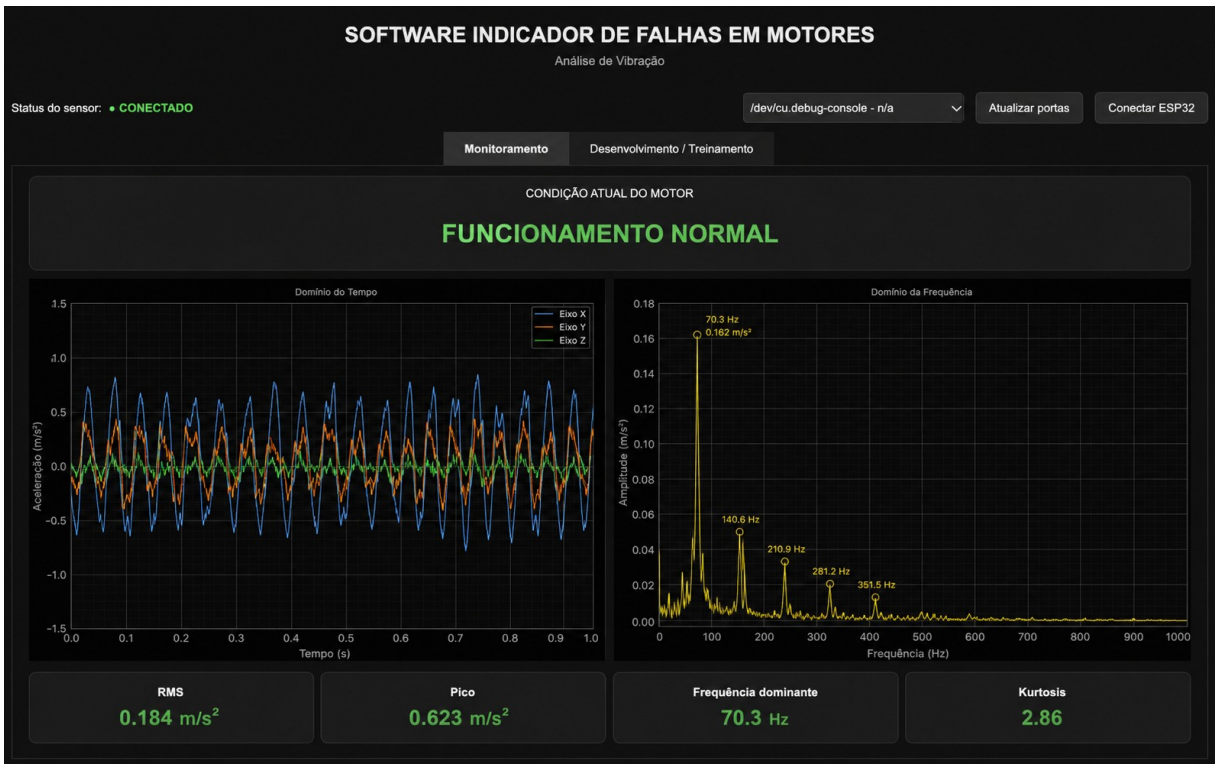
A utilização do ADXL345 foi mantida no protótipo após os testes preliminares, pois o sensor apresentou desempenho adequado para a validação da comunicação, da fixação e da estrutura inicial de aquisição. O dispositivo é um acelerômetro digital triaxial, com faixas selecionáveis de ±2 g a ±16 g, resolução de até 13 bits em modo de resolução completa, comunicação por SPI ou I²C e taxa de saída configurável de até 3200 Hz, características compatíveis com a realização de ensaios experimentais de vibração em bancada (Analog Devices, 2020). Embora existam sensores voltados a aplicações de maior precisão, como o ADXL355, que possui conversor de 20 bits e densidade de ruído significativamente menor, o ADXL345 atende ao objetivo desta etapa do trabalho, que é demonstrar a viabilidade do fluxo completo de aquisição, tratamento, modelagem e indicação da condição do motor em uma bancada de baixo custo (Analog Devices, 2025).

Estudos recentes também apontam a ausência ou escassez de dados rotulados como uma dificuldade importante para modelos supervisionados de diagnóstico em máquinas rotativas (Brito et al., 2022; Gawde et al., 2023). Por isso, nesta etapa, a proposta será tratada inicialmente como um indicador de condição, capaz de identificar desvios em relação ao comportamento considerado normal, enquanto a classificação do tipo específico de falha dependerá da obtenção de ensaios rotulados e repetíveis para cada condição estudada.

Do ponto de vista acadêmico, o trabalho contribui por integrar conceitos de hardware, aquisição de sinais, organização de dados, processamento digital, aprendizagem de máquina e desenvolvimento de software. Essa abordagem é coerente com arquiteturas de monitoramento de condição descritas na literatura, nas quais aquisição, processamento e tomada de decisão são tratados como etapas integradas do sistema (Romanssini et al., 2023). Revisões recentes sobre diagnóstico baseado em dados em máquinas rotativas também destacam a integração entre seleção de sensores, aquisição,

extração de características e técnicas de inteligência artificial como parte do processo de construção de sistemas de diagnóstico (Gawde et al., 2023). A principal contribuição esperada neste trabalho está, portanto, na construção de um fluxo reprodutível, documentado e de baixo custo, capaz de demonstrar como sinais de vibração podem ser transformados em informações úteis sobre a condição de um motor em bancada experimental.

Figura 2 – Interface e gráficos do software



Fonte: Elaborado pelo autor

Conclusão

O trabalho apresenta a construção inicial de um software indicador de falhas em motores por análise de vibração. A proposta considera a integração entre bancada experimental, acelerômetro triaxial ADXL345, ESP32 e processamento em notebook, com o objetivo de transformar sinais de aceleração em informações úteis para avaliação da condição do motor.

Os objetivos preliminares atingidos incluem a aquisição dos componentes da bancada, a ligação segura da fonte ao controlador PWM e ao motor DC 775, o acionamento do motor e a validação da variação de velocidade pelo potenciômetro. A etapa seguinte consistirá na fixação do acelerômetro, coleta dos sinais nos eixos X, Y e Z, aplicação do pipeline de tratamento e avaliação de modelos computacionais. Ao final, espera-se obter um protótipo funcional, documentado e coerente com os limites experimentais da bancada, capaz de indicar funcionamento normal ou comportamento anômalo a partir dos dados coletados.

Referências

ANALOG DEVICES. ADXL345: 3-axis, ±2 g/±4 g/±8 g/±16 g digital accelerometer. Rev. G. Norwood: Analog Devices, 2020. Disponível em: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf. Acesso em: 22 ago. 2026.

ANALOG DEVICES. ADXL354/ADXL355: low noise, low drift, low power, 3-axis MEMS accelerometers. Rev. D. Norwood: Analog Devices, 2025. Disponível em: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl354_adxl355.pdf. Acesso em: 21 set. 2026.

BRITO, Lucas C.; SUSTO, Gian Antonio; BRITO, Jorge N.; DUARTE, Marcus A. V. An explainable artificial intelligence approach for unsupervised fault detection and diagnosis in rotating machinery. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 163, art. 108105, 2022. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.108105.

CARVALHO, T. P. et al. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. Computers & Industrial Engineering, v. 137, 2019. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106024.

DALPRÁ, H. C. Detecção de falhas em motores elétricos com uma abordagem de identificação de outliers utilizando o algoritmo One-Class SVM e sinais de vibração. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal do Espírito Santo, Serra, 2023.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 Series Datasheet: 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth + Bluetooth LE SoC. Version 5.2. Shanghai: Espressif Systems, 2025. Disponível em: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 28 maio 2026.

FONTOURA, F. Sistemas de detecção de falhas em motores elétricos baseados em análises de vibração: estudo de um motor de indução trifásico. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

GAWDE, Shreyas; PATIL, Shruti; KUMAR, Satish; KAMAT, Pooja; KOTECHA, Ketan; ABRAHAM, Ajith. Multi-fault diagnosis of industrial rotating machines using data-driven approach: a review of two decades of research. Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 123, art. 106139, 2023. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106139.

HANDSON TECHNOLOGY. 775 Ball Bearing DC Motor. [S. l.]: Handson Technology, [s.d.]. Disponível em: https://www.handsontec.com/dataspecs/motor_fan/775-Motor.pdf. Acesso em: 29 maio 2026.

LOURENÇO, R. F. B. et al. Detecção de falhas em um sistema rotativo utilizando sistemas imunológicos artificiais. Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 8, n. 1, 2021. DOI: 10.5540/03.2021.008.01.0395.

MATANIA, O.; BACHAR, L.; BECHHOEFER, E.; BORTMAN, J. Signal processing for the condition-based maintenance of rotating machines via vibration analysis: a tutorial. Sensors, v. 24, n. 2, 2024. DOI: 10.3390/s24020454.

PCB PIEZOTRONICS. Guidelines for Mounting Test Accelerometers. Depew, NY: PCB Piezotronics, [s.d.]. Disponível em: https://www.pcb.com/resources/technical-information/mounting. Acesso em: 27 ago. 2026.

ROMANSSINI, M.; DE AGUIRRE, P. C. C.; COMPASSI-SEVERO, L.; GIRARDI, A. G. A review on vibration monitoring techniques for predictive maintenance of rotating machinery. Eng, v. 4, n. 3, p. 1797-1817, 2023. DOI: 10.3390/eng4030102.

SURUCU, O.; GADSDEN, S. A.; YAWNEY, J. Condition monitoring using machine learning: a review of theory, applications, and recent advances. Expert Systems with Applications, v. 221, 2023. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119738.

WARD, T.; JENAB, K.; ORTEGA-MOODY, J.; STAUB, S. A comprehensive review of machine learning techniques for condition-based maintenance. International Journal of Prognostics and Health Management, v. 15, n. 2, 2024. DOI: 10.36001/ijphm.2024.v15i2.3850.