PLATAFORMA INTEGRADA DE AQUISIÇÃO E DIAGNÓSTICO VIBRACIONAL PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA DE ROLAMENTOS

Victor Romero Siqueira dos Santos, Hélio Lourenço Esperidião Ferreira

Universidade do Vale do Paraíba/Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Curso de Engenharia da Computação, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, victor.romero.2000@hotmail.com, helioesperidiao@gmail.com.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma integrada para organizar a aquisição e a análise de sinais vibracionais de rolamentos, reunindo cadastro de máquinas, coletas por rota, processamento pela Transformada Rápida de Fourier (FFT), comparação com frequências características de falha e consulta dos resultados. A plataforma foi implementada com Django e React, com aquisição física pelo módulo MPS-060602 e acelerômetro IEPE Wilcoxon 787B. Seu funcionamento foi avaliado em ensaio de bancada, com excitação de 197 Hz para uma frequência de passagem dos elementos rolantes pela pista externa (BPFO) de referência de 196,52 Hz e três registros sequenciais nas direções vertical, horizontal e axial. Foram identificadas componentes nessa faixa nos três registros, com desvios relativos entre 0,24% e 0,34%, sem correspondência relevante nas demais frequências características monitoradas. Os resultados demonstram o funcionamento integrado entre cadastro, aquisição, processamento e comparação espectral; a confirmação de defeitos mecânicos reais depende de ensaios com rolamentos de condição conhecida.

Palavras-chave: Manutenção preditiva. Análise vibracional. Rolamentos. Transformada rápida de Fourier. Diagnóstico de falhas.

Área do Conhecimento: Engenharias / Engenharia de Computação.

Introdução

A manutenção preditiva busca acompanhar a condição dos ativos ao longo do tempo para apoiar o planejamento das intervenções e reduzir a dependência de ações tomadas apenas após o surgimento de falhas. A análise vibracional é uma das técnicas empregadas nesse acompanhamento, auxiliando a avaliação de máquinas rotativas, como motores, bombas e compressores. Alterações nos sinais de vibração podem indicar mudanças nas condições mecânicas e orientar essas intervenções de manutenção.

Os rolamentos participam do suporte e da orientação dos eixos rotativos, e alterações nesses componentes podem produzir mudanças no sinal vibracional. Nos rolamentos, a avaliação do espectro fornece informações sobre componentes associadas à rotação, aos elementos rolantes e às pistas de contato (Scheffer; Girdhar, 2004; Randall, 2011). Entre as referências empregadas nessa análise estão a frequência da gaiola (FTF), a frequência característica associada aos elementos rolantes (BSF) e as frequências de passagem pela pista externa (BPFO) e pela pista interna (BPFI); esses valores dependem das características do rolamento e da velocidade de rotação, e sua comparação com o espectro auxilia a interpretação dos sinais (Harris; Kotzalas, 2006; Poveda; Carvalho; Mesquita, 2025). Essas frequências funcionam como referências para a interpretação do espectro, mas a presença de uma componente isolada não deve ser tratada automaticamente como confirmação de um defeito físico.

O uso dessas informações na manutenção depende da organização dos registros e de sua associação com a máquina, o ponto de medição e as condições de aquisição (Jardine; Lin; Banjevic, 2006). Essa análise não depende apenas do cálculo da Transformada Rápida de Fourier: o acompanhamento de um mancal também exige associar corretamente cada sinal à máquina, ao mancal, ao rolamento, à direção de medição, à rotação, aos parâmetros de aquisição e ao histórico de resultados processados. Quando o cadastro, a aquisição, o processamento e os resultados ficam dispersos em arquivos ou ferramentas diferentes, a consulta histórica e a comparação entre registros ficam mais difíceis.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma plataforma integrada para organizar a aquisição e a análise de sinais vibracionais de rolamentos, reunindo cadastro de máquinas, organização das

coletas por rota, aquisição física, processamento por FFT, comparação com frequências características, preservação do histórico e consulta dos resultados. Seu funcionamento foi avaliado por meio de um ensaio de bancada.

Metodologia

O sistema utiliza Python, Django (Django Software Foundation, [s. d.]) e Django REST Framework na camada de processamento, e React, Vite e TypeScript na interface. A comunicação ocorre por API REST (Fielding, 2000), e os gráficos são apresentados com Plotly. Na instalação local, o banco SQLite armazena os cadastros e metadados, enquanto os sinais e os espectros são preservados em arquivos NPZ. A separação entre interface, API, processamento e armazenamento organiza o sistema em camadas com responsabilidades distintas, de modo que o cadastro, a aquisição física e o processamento espectral possam evoluir de forma independente.

O uso da plataforma inicia pelo cadastro da máquina, dos mancais e do rolamento de referência, com a associação da rotação de operação correspondente. A partir desse cadastro, cria-se uma rota de aquisição que define as direções de medição a serem registradas. O módulo MPS-060602 realiza a aquisição física do sinal nessas direções, e a aplicação converte as amostras para a unidade física antes de preservar os sinais e os parâmetros utilizados. Em seguida, a área de Análise processa os sinais por FFT e compara o espectro resultante com as frequências características do rolamento cadastrado, permitindo sobrepor os espectros das diferentes direções de uma mesma rota. Os resultados processados ficam disponíveis para consulta histórica, e a plataforma também permite gerar relatórios em PDF a partir desses registros. A plataforma também disponibiliza análise Wavelet como recurso complementar para investigações no domínio tempo-frequência.

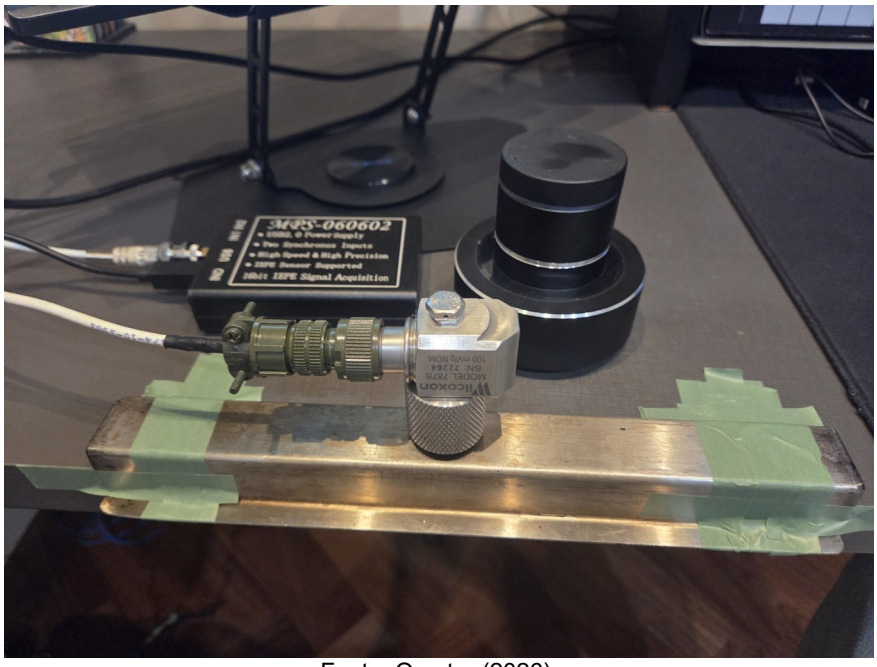
Os parâmetros de cada aquisição permanecem associados ao resultado histórico, o que preserva o contexto de cada registro, entre eles a direção de medição, a rotação de referência, o rolamento, os parâmetros de aquisição, os indicadores calculados, as frequências características e o espectro processado. Essa rastreabilidade dos registros permite consultar análises anteriores e comparar diferentes direções e rotas ao longo do tempo.

A aquisição foi realizada com um acelerômetro IEPE Wilcoxon 787B, de sensibilidade nominal de 100 mV/g, conectado ao módulo MPS-060602 (Wilcoxon Sensing Technologies, [s. d.]) por um cabo coaxial blindado, que conduz a alimentação por corrente constante do sensor IEPE e o sinal de medição, contribuindo para reduzir a suscetibilidade a interferências eletromagnéticas durante a aquisição. O módulo digitalizou o sinal e o enviou ao computador. A aplicação converteu os valores em tensão e, em seguida, em aceleração, utilizando a sensibilidade nominal do sensor. O acelerômetro foi fixado por base magnética a um perfil metálico preso com fita adesiva à borda da mesa, conforme a Figura 1.

A resposta vibratória observada pode variar conforme a orientação de medição e o caminho de transmissão da vibração pela estrutura (Scheffer; Girdhar, 2004). Por esse motivo, o registro sequencial nas direções vertical, horizontal e axial permite comparar como as componentes do sinal se manifestam em cada orientação e amplia a caracterização do ponto monitorado.

Um excitador de superfície apoiado na mesa recebeu os tons do aplicativo Frequency Sound Generator (Bialamusic, [s. d.]), executado em um tablet conectado por Bluetooth. A direção vertical foi definida como perpendicular ao tampo, a axial como paralela ao comprimento do perfil e a horizontal como perpendicular à axial no plano da mesa. Os três registros foram obtidos sequencialmente com o mesmo acelerômetro uniaxial: a aquisição vertical manteve a fixação mostrada na Figura 1, e as aquisições horizontal e axial exigiram retirar e refixar o sensor em cada nova orientação, e não um arranjo triaxial simultâneo.

Figura 1 – Bancada de aquisição com o acelerômetro na orientação vertical, módulo MPS-060602 e excitador de superfície.



Fonte: O autor (2026).

Para representar uma aplicação da plataforma, foi criado o cadastro de uma bomba genérica com dois mancais. O ensaio de bancada foi associado a um desses mancais, configurado com o rolamento SNR 6212ZZC3 e rotação de referência de 2.900 rpm. Os fatores adotados, obtidos do catálogo do fabricante para esse rolamento (NTN-SNR, [s. d.]), foram 0,407 para FTF, 5,168 para BSF, 4,066 para BPFO e 5,934 para BPFI.

As frequências características de falha são obtidas a partir da frequência de rotação de referência e do fator adimensional de cada componente, conforme a Equação 1. Nela, f_j representa a frequência característica da componente j, k_j o respectivo fator adimensional e n a rotação de referência, em rpm.

$$f_j = k_j \left(\frac{n}{60} \right) \tag{1}$$

Para n = 2.900 rpm e os fatores adotados, obtêm-se 19,67 Hz para FTF, 249,79 Hz para BSF, 196,52 Hz para BPFO e 286,81 Hz para BPFI, com as referências de rotação 1× e 2× em 48,33 Hz e 96,67 Hz. No ensaio, foram configurados tons de 48 Hz e 197 Hz, com o nível relativo do tom de 1× ajustado abaixo do nível relativo do tom de BPFO e sem um tom adicional em 2×; os níveis exatos aplicados no gerador não foram registrados numericamente.

Cada registro foi configurado com taxa de amostragem de 10.000 Hz, duração de 5 s, ganho PGA 1 (Gain 0), faixa de entrada de ±10 V e saída em g, com 50.000 amostras úteis por direção e espaçamento nominal de 0,2 Hz entre as frequências da FFT. A média do sinal é removida antes da aplicação da janela Hann, denominada Hanning na interface, e a rotina rFFT gera o espectro unilateral de amplitude de pico, com compensação pela soma dos pesos da janela (Oppenheim; Schafer, 2009).

O RMS global é calculado pela raiz da média dos quadrados do sinal temporal centralizado. O pico global corresponde ao maior valor absoluto desse sinal, e o fator de crista é a razão entre pico e RMS. Esses indicadores utilizam o registro completo, independentemente do limite de 300 Hz escolhido para exibição dos gráficos. As amplitudes de 1× e 2× são consultadas no espectro salvo nos pontos mais próximos das frequências de referência.

A lista geral de picos utiliza a função scipy.signal.find_peaks, com proeminência mínima de 2,5% da maior amplitude espectral e limite de 200 picos na configuração automática (SciPy Community, [s. d.]). A classificação das faixas de rolamento usa uma rotina adicional de relevância local, que avalia máximos próximos das frequências fundamentais e dos harmônicos 2 e 3, estimando o fundo por mediana e dispersão robusta (desvio absoluto mediano e intervalo interquartil) em até 24 intervalos

espectrais de cada lado do pico, com guarda de três intervalos para a janela Hann e critério de escore local z ≥ 6 e razão entre amplitude e fundo ≥ 2,5.

Na versão de referência, a tolerância efetiva combina o percentual configurado com o espaçamento espectral e um limite de 5 Hz, conforme a Equação 2. Nessa expressão, p representa o valor numérico da tolerância percentual, f a frequência de referência e Δf o espaçamento da FFT. Para uma tolerância de 5%, utiliza-se p = 5.

$$T_{ef}(f) = max\left\{2\Delta f, min\left[\left(\frac{p}{100}\right)f, 5\ \ Hz\right]\right\} \quad (2)$$

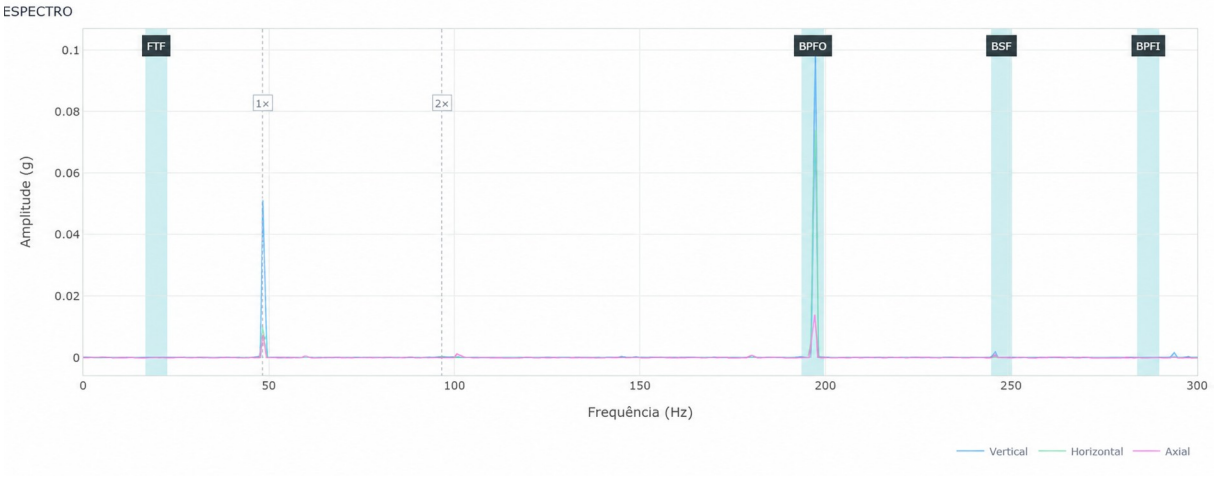
Para p = 5, Δf = 0,2 Hz e BPFO de 196,52 Hz, a tolerância efetiva dessa rotina é de ±5 Hz, correspondendo à faixa aproximada de 191,52 Hz a 201,52 Hz. O critério combina proximidade em frequência e relevância local do pico.

Resultados

Como resultado do desenvolvimento, a plataforma passou a reunir, em um mesmo fluxo, o cadastro de máquinas e rolamentos, a aquisição física de sinais pelo módulo MPS-060602, o processamento por FFT e a consulta comparativa dos resultados por rota, com geração de relatórios em PDF. Esse fluxo foi avaliado por meio de um ensaio de bancada, cujos resultados são apresentados a seguir.

A rota associada ao mancal avaliado reuniu registros nas direções vertical, horizontal e axial. Os espectros sobrepostos apresentam componentes próximas de 48 Hz e 197 Hz, com amplitudes distintas entre as direções (Figura 2). A plataforma destacou a faixa de BPFO nos três registros e não indicou correspondência relevante nas faixas de FTF, BSF e BPFI.

Figura 2 – Espectros das três direções, com referências de rotação e frequências características do rolamento.



Fonte: O autor (2026).

Os indicadores calculados para cada registro são apresentados na Tabela 1, com o fator de crista mais elevado na direção axial entre as três avaliadas; a correspondência com a frequência de BPFO é detalhada a seguir, na Tabela 2.

Tabela 1 – Indicadores temporais por direção de medição.

Indicador	Vertical	Horizontal	Axial
RMS global (g)	0,084	0,057	0,018
Pico global (g)	0,206	0,151	0,098
Fator de crista	2,45	2,64	5,37

Fonte: O autor (2026).

A Tabela 2 apresenta as componentes identificadas na faixa de BPFO. As diferenças foram calculadas em relação à referência de 196,523 Hz. Os desvios relativos ficaram entre 0,24% e 0,34%.

Tabela 2 – Correspondência entre a componente detectada e a frequência de referência de BPFO nas três direções.

Direção	Frequência detectada (Hz)	Amplitude espectral (g)	Diferença absoluta (Hz)	Desvio relativo (%)
Vertical	197,20	0,101	0,677	+0,34
Horizontal	197,20	0,074	0,677	+0,34
Axial	197,00	0,014	0,477	+0,24

Fonte: O autor (2026).

A amplitude espectral da componente BPFO é distinta do Pico Global calculado no domínio do tempo, apresentado na Tabela 1.

Discussão

O ensaio demonstrou o funcionamento integrado do fluxo proposto pela plataforma, desde a associação dos sinais ao cadastro da máquina, do mancal e do rolamento até a aquisição, o processamento espectral e a consulta comparativa dos resultados. A preservação da direção de medição, da rotação de referência e dos parâmetros utilizados permite recuperar o contexto de cada registro e favorece a formação de um histórico organizado para o acompanhamento da condição dos mancais. Essa integração é relevante para a manutenção baseada em condição, na qual a interpretação dos sinais depende não apenas do espectro obtido, mas também da correta associação entre os dados e o ponto monitorado (Jardine; Lin; Banjevic, 2006).

Os indicadores temporais apresentaram respostas distintas entre as três direções. A direção vertical registrou os maiores valores de RMS global e Pico Global, enquanto a direção axial apresentou o maior fator de crista. Essas diferenças mostram que a orientação do sensor e o caminho de transmissão da vibração pela estrutura influenciam a resposta observada. Entretanto, como o experimento não isolou individualmente os efeitos da fixação, do acoplamento e da orientação, os valores devem ser interpretados como características da montagem utilizada e não como evidência, por si só, de uma condição mecânica específica.

A principal correspondência espectral ocorreu na faixa de BPFO. A frequência de referência calculada foi de 196,523 Hz, enquanto as componentes identificadas foram de 197,20 Hz nas direções vertical e horizontal e de 197,00 Hz na direção axial. Os desvios relativos, entre 0,24% e 0,34%, permaneceram dentro da tolerância efetiva de ±5 Hz utilizada pela rotina de classificação. Esse resultado demonstra que a plataforma foi capaz de relacionar uma componente conhecida do sinal às frequências características cadastradas e de apresentar essa correspondência nas três direções avaliadas. Não foram observadas correspondências relevantes nas demais faixas monitoradas.

A interpretação desses resultados deve considerar que o ensaio empregou excitações tonais contínuas. Defeitos localizados em rolamentos reais podem produzir impactos, modulações e componentes laterais mais complexas, exigindo procedimentos adicionais de processamento e interpretação (Randall; Antoni, 2011). Além disso, a montagem não teve sua rigidez caracterizada dinamicamente, a saída do gerador não foi verificada por um instrumento independente e não foram realizadas repetições para avaliar a variabilidade dos registros. Assim, o experimento demonstra o funcionamento do fluxo de aquisição e análise em condição controlada, enquanto a avaliação diagnóstica em campo requer ensaios com rolamentos de condição conhecida e instrumentação de referência.

Conclusão

Este trabalho desenvolveu uma plataforma integrada para organizar o cadastro de máquinas, mancais e rolamentos, realizar aquisições de sinais vibracionais por rota, processar os registros por FFT e comparar os resultados com as frequências características cadastradas. No ensaio de bancada, a plataforma identificou componentes na faixa de BPFO nas três direções de medição, com desvios relativos entre 0,24% e 0,34% em relação à frequência de referência e sem correspondência relevante nas demais faixas monitoradas. Os resultados demonstram a capacidade da solução de preservar o

contexto das aquisições, processar sinais físicos e apresentar correspondências espectrais de forma integrada. Como continuidade, recomenda-se avaliar a plataforma com rolamentos em condições mecânicas conhecidas, incluindo repetições e comparação com instrumentação de referência, a fim de ampliar a análise para situações reais de manutenção preditiva.

Referências

BIALAMUSIC. **Frequency Sound Generator**. [S. l.]: Google Play, [s. d.]. Disponível em: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.finestandroid.soundgenerator. Acesso em: 4 out. 2026.

DJANGO SOFTWARE FOUNDATION. **Django documentation**. Versão 5.2. [s. d.]. Disponível em: https://docs.djangoproject.com/en/5.2/. Acesso em: 4 out. 2026.

FIELDING, R. T. **Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures**. 2000. Tese (Doutorado em Information and Computer Science) – University of California, Irvine, 2000. Disponível em: https://ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm. Acesso em: 4 out. 2026.

HARRIS, T. A.; KOTZALAS, M. N. **Essential Concepts of Bearing Technology**. 5. ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2006.

JARDINE, A. K. S.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 7, p. 1483-1510, 2006. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.

NTN-SNR. **6212ZZC3 - SNR**. [S. l.]: NTN-SNR, [s. d.]. Disponível em: https://eshop.ntn-snr.com/pt/product/6212ZZC3-SNR/6212ZZC3. Acesso em: 4 out. 2026.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.

POVEDA, P. F.; CARVALHO, M. R.; MESQUITA, R. N. Identificação, monitoramento e análise de falhas em rolamentos por análise espectral de vibrações. **Revista DELOS**, v. 18, n. 65, e4246, 2025. DOI: 10.55905/rdelosv18.n65-005.

RANDALL, R. B. **Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications**. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

RANDALL, R. B.; ANTONI, J. Rolling element bearing diagnostics: a tutorial. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, n. 2, p. 485-520, 2011. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.07.017.

SCHEFFER, C.; GIRDHAR, P. **Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance**. Oxford: Newnes/Elsevier, 2004.

SCIPY COMMUNITY. **scipy.signal.find_peaks**. SciPy documentation. [s. d.]. Disponível em: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.find_peaks.html. Acesso em: 4 out. 2026.

WILCOXON SENSING TECHNOLOGIES. **787B: general purpose industrial accelerometer sensor, low profile, 100 mV/g**. [s. d.]. Disponível em: https://wilcoxon.com/787b/. Acesso em: 4 out. 2026.