
DETECÇÃO PREDITIVA DE FALHAS EM SERVOMOTORES INDUSTRIAIS POR ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Rayssa Milena Castro¹, Isis Alves Nunis Bordinassi², Viviane Akemi Miyazaki³
e Renato Kazuo Miyamoto⁴

RESUMO

A identificação precoce de falhas em equipamentos industriais contribui para reduzir danos, custos de manutenção e paradas não programadas, estando alinhada aos princípios da Indústria 4.0. Nesse contexto, o monitoramento de motores torna-se fundamental para garantir a continuidade e a eficiência dos processos produtivos. Entre os principais indicadores de falhas, destacam-se as vibrações, capazes de revelar condições inadequadas de funcionamento, como desalinhamentos, antes que alterações visuais ou sonoras sejam perceptíveis. Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema de manutenção preditiva utilizando um servomotor instalado em bancada, com uma flange para aplicação controlada de desalinhamento. A aquisição das vibrações foi realizada por meio de um acelerômetro conectado a um ESP32 Heltec, responsável pela coleta e transmissão dos dados utilizando tecnologia LoRa. Integrada ao conceito de Internet das Coisas (IoT), a solução proposta busca auxiliar na detecção antecipada de falhas, aumentando a vida útil dos equipamentos e otimizando os custos relacionados à manutenção industrial.

Palavras-chave: Manutenção preditiva; Análise de vibrações; Servomotores; Internet das Coisas (IoT); LoRa.

ABSTRACT

The early detection of faults in industrial equipment contributes to reducing damage, maintenance costs, and unplanned downtime, in accordance with the principles of Industry 4.0. In this context, motor monitoring plays a fundamental role in ensuring the continuity and efficiency of production processes. Among the main indicators of faults, vibrations stand out, as they can reveal abnormal operating conditions, such as misalignment, before visual or audible changes become noticeable. In this study, a predictive maintenance system was developed using a servo motor installed on a test bench, equipped with a flange for the controlled application of misalignment. Vibration data were acquired using an accelerometer connected to a Heltec ESP32, which was responsible for data collection and transmission using LoRa technology. Integrated into the Internet of Things (IoT) concept, the proposed solution aims to support early fault detection, extend equipment service life, and optimize costs associated with industrial maintenance.

Keywords: Predictive maintenance; Vibration analysis; Servo motors; Internet of Things (IoT); LoRa.

¹ UniSenaiPR; rayssa.correia01032640@sesisenaipr.org.br

² UniSenaiPR; isis.bordinassi@sistemafiep.org.br

³ UniSenaiPR; viviane.akemi.miyazaki@gmail.com

⁴ UniSenaiPR; renato.miyamoto@sistemafiep.org.br (Autor correspondente)

1 INTRODUÇÃO

A Quarta Revolução Industrial, também denominada Indústria 4.0, trouxe uma nova perspectiva para os processos industriais, introduzindo conceitos e tecnologias voltados ao desenvolvimento, à automação e à otimização da produção. Nesse contexto, destacam-se a utilização de sensores, a comunicação entre dispositivos, a conectividade, o processamento de dados e a busca por maior velocidade de produção e redução dos prazos. A integração desses recursos contribui para o desenvolvimento da indústria e para o crescimento econômico, além de possibilitar avanços nos sistemas de automação e no monitoramento de máquinas e equipamentos, buscando reduzir paradas não programadas e aumentar a eficiência dos processos produtivos.

Entre os equipamentos que acompanham essa evolução, os servomotores apresentam ampla aplicação em diferentes setores industriais, principalmente em sistemas de robótica e automação, devido à sua versatilidade e precisão. Em aplicações que exigem controle preciso de velocidade, posição e torque, os servomotores de corrente alternada (AC) apresentam elevada capacidade de controle. Diferentemente dos motores convencionais de corrente contínua ou alternada, os servomotores são projetados para operar com sistemas de realimentação (*feedback*), permitindo o monitoramento e o ajuste de sua saída de acordo com as necessidades específicas da aplicação.

Com o aumento da utilização desses equipamentos nos processos industriais, torna-se necessário garantir sua disponibilidade e seu funcionamento adequado. Nesse contexto, a manutenção preditiva, também denominada manutenção sob condição ou manutenção baseada na condição do equipamento, apresenta-se como uma estratégia para acompanhar o estado operacional dos sistemas. Essa abordagem busca determinar o comportamento futuro de um equipamento ou sistema por meio da coleta de dados ao longo do tempo, utilizando instrumentação específica para monitorar e analisar a tendência das variáveis relacionadas às suas condições de funcionamento.

No ambiente industrial, máquinas e equipamentos estão sujeitos ao surgimento de defeitos, falhas e alterações em seu comportamento durante a operação. Em determinadas situações, esses problemas são identificados somente após a interrupção do funcionamento da máquina, ocasionando paradas não programadas e possíveis impactos no processo produtivo. Nos servomotores, essa condição também pode ocorrer ao longo de sua operação e, por isso, o acompanhamento de suas condições de funcionamento torna-se relevante para a identificação antecipada de possíveis falhas. Dessa forma, a manutenção preditiva pode contribuir para a prevenção de falhas e para a tomada de decisões relacionadas à manutenção do equipamento.

Entre as técnicas utilizadas para o monitoramento das condições de máquinas e motores, destaca-se a análise de vibrações. Por meio da medição das vibrações, é possível estabelecer padrões de comportamento durante uma condição considerada normal de operação e, posteriormente, identificar alterações nesses padrões que possam indicar um possível problema. Uma variação significativa nos níveis de vibração em determinada região do motor, por exemplo, pode estar relacionada a condições como desalinhamento ou desgaste de componentes mecânicos. A identificação dessas alterações por meio de análises prévias possibilita a adoção de medidas antes que ocorra uma parada inesperada do processo, permitindo o planejamento da manutenção e, quando aplicável, a substituição temporária do equipamento até que a intervenção seja realizada.

Diante desse contexto, este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema destinado ao monitoramento e à visualização, em tempo real, das vibrações de um servomotor. Para a aquisição das informações, foi utilizado um acelerômetro capaz de realizar a leitura das variações de aceleração nos eixos X, Y e Z. Os dados obtidos são processados por uma placa de desenvolvimento Heltec baseada em ESP32, que também possibilita a comunicação dos dados por meio da tecnologia LoRa (*Long Range*), caracterizada pelo longo alcance e baixo consumo de energia. Após a transmissão, os dados são recebidos por uma segunda placa, conectada a um computador, no qual um *script* desenvolvido em Python realiza o processamento e a interface de visualização para o usuário. Dessa forma, o sistema permite o

acompanhamento das condições de vibração do servomotor em tempo real, possibilitando a análise de seu comportamento e contribuindo para a identificação de possíveis alterações que possam estar relacionadas ao estado do equipamento.

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de um servomotor por meio do monitoramento de suas vibrações, buscando identificar padrões de funcionamento e detectar alterações nesses padrões que possam indicar possíveis anomalias. A partir dos dados obtidos, pretende-se contribuir para o acompanhamento das condições do equipamento e, futuramente, possibilitar a identificação de possíveis causas e soluções relacionadas às alterações observadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Servomotores

Os servomotores são máquinas elétricas empregadas em aplicações que exigem elevado controle de movimento, especialmente em sistemas de automação e robótica. Diferentemente de motores convencionais utilizados apenas para fornecer movimento, os servomotores são empregados em sistemas de controle nos quais parâmetros como posição, velocidade e torque precisam ser monitorados e controlados com precisão. Para isso, normalmente são integrados a sistemas de realimentação (*feedback*), permitindo que o acionamento ajuste o comportamento do motor de acordo com a referência estabelecida.

O servomotor utilizado neste trabalho pertence à família de motores síncronos de corrente alternada (AC) com excitação por ímãs permanentes, fabricada pela Moog. Segundo o fabricante, os servomotores da família Fastact W foram desenvolvidos para aplicações que exigem elevado desempenho dinâmico e operação contínua. Essa família utiliza sistema de resfriamento líquido, característica que contribui para o desempenho do motor em aplicações com ciclos de operação exigentes (MOOG, 2003).

Os motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM, do inglês *Permanent Magnet Synchronous Motor*) possuem uma construção na qual os ímãs permanentes são posicionados no rotor, substituindo o enrolamento de campo convencional. Essa

característica elimina a necessidade de escovas e reduz a necessidade de manutenção. Além disso, esse tipo de motor apresenta elevada densidade de potência e torque, sendo adequado para aplicações que exigem desempenho dinâmico e precisão (MEIRINHO, 2015).

A estrutura básica do PMSM é composta principalmente pelo estator e pelo rotor. O estator possui os enrolamentos responsáveis pela produção do campo magnético, enquanto o rotor contém os ímãs permanentes responsáveis pela formação de seu campo magnético. A interação entre esses campos produz o torque eletromagnético responsável pelo movimento do eixo. Dependendo da disposição dos ímãs no rotor, os motores podem apresentar diferentes configurações construtivas, que influenciam características como robustez mecânica, densidade de fluxo e capacidade de operação em diferentes faixas de velocidade (MEIRINHO, 2015).

As características dos motores síncronos de ímãs permanentes tornam esse tipo de máquina adequado para aplicações industriais que necessitam de precisão, resposta dinâmica e controle de movimento. Dessa forma, sua utilização em sistemas de automação torna o monitoramento de suas condições de funcionamento relevante para garantir a confiabilidade e a continuidade dos processos.

2.2 Manutenção Preditiva

A eficiência da manutenção está diretamente relacionada à disponibilidade dos equipamentos para o processo produtivo. Entre os indicadores utilizados para avaliar esse desempenho, destaca-se o Tempo Médio Entre Falhas (TMEF ou MTBF), que representa a média do tempo de funcionamento do equipamento entre as falhas. De acordo com Baldissarelli e Fabro (2019), “o tempo médio entre falhas (TMEF ou MTBF) é a média aritmética entre falhas, considerando somente o tempo em funcionamento”.

A manutenção tem como finalidade acompanhar e preservar as condições de funcionamento dos equipamentos, utilizando informações obtidas durante sua operação para auxiliar na tomada de decisões. Nesse contexto, a coleta e o tratamento sistemático dos dados permitem analisar o comportamento dos equipamentos e propor melhorias que contribuam para o desempenho operacional e para o processo de manutenção (BALDISSARELLI; FABRO, 2019).

Entre os diferentes tipos de manutenção, a manutenção preditiva destaca-se pela possibilidade de antecipação de falhas por meio do acompanhamento das condições do equipamento. Essa abordagem utiliza medições, acompanhamento ou monitoramento de parâmetros específicos para avaliar o estado atual da máquina e identificar alterações que possam indicar a necessidade de uma intervenção. Dessa forma, a manutenção pode ser planejada de acordo com as condições observadas, evitando, quando possível, intervenções desnecessárias e reduzindo a ocorrência de paradas não programadas (BALDISSARELLI; FABRO, 2019).

Para a realização desse acompanhamento, são utilizados equipamentos e instrumentos capazes de coletar informações sobre o funcionamento da máquina. Os dados obtidos podem ser armazenados e comparados com parâmetros de referência ou com o histórico do próprio equipamento, possibilitando a identificação de alterações em seu comportamento e auxiliando na definição das ações de manutenção. Essa característica torna a manutenção preditiva uma importante estratégia no contexto da Indústria 4.0, na qual a utilização de sensores, aquisição de dados e monitoramento dos equipamentos contribui para processos produtivos mais eficientes e conectados (BALDISSARELLI; FABRO, 2019).

No contexto deste trabalho, a manutenção preditiva está relacionada ao monitoramento das vibrações do servomotor. A análise desses dados permite acompanhar seu comportamento durante a operação e identificar possíveis alterações em relação aos padrões observados, contribuindo para a detecção antecipada de condições que possam estar relacionadas a falhas.

2.3 Análise de Vibrações

A vibração pode ser definida como o movimento oscilatório de um corpo em relação à sua posição de equilíbrio. Em máquinas e equipamentos, esse comportamento está presente naturalmente devido às características de fabricação, montagem e funcionamento, podendo resultar em uma assinatura vibratória característica para cada equipamento (RODRIGUES et al., 2025).

O acompanhamento e a análise das vibrações constituem importantes métodos empregados na manutenção preditiva, principalmente em máquinas rotativas. Por meio do monitoramento dos sinais vibratórios, é possível acompanhar as condições

mecânicas do equipamento e identificar alterações em seu comportamento que possam estar relacionadas ao surgimento de falhas (BALDISSARELLI; FABRO, 2019).

Os equipamentos rotativos produzem vibrações que podem estar relacionadas às próprias características de funcionamento ou ser decorrentes de defeitos e excitações externas. Esses sinais são compostos por diferentes frequências e amplitudes, e sua análise permite identificar alterações nos padrões vibratórios do equipamento. Dessa forma, o acompanhamento desses parâmetros possibilita estabelecer uma referência para o comportamento considerado normal e reconhecer possíveis desvios durante a operação (BALDISSARELLI; FABRO, 2019).

A análise de vibrações também pode ser utilizada como ferramenta de diagnóstico, uma vez que alterações nas características vibratórias podem indicar a presença de defeitos em estágios iniciais. Assim, o monitoramento dos sinais permite identificar mudanças em relação ao comportamento esperado do equipamento e auxiliar na definição da necessidade de intervenção de manutenção (RODRIGUES et al., 2025).

Entretanto, a análise de vibrações está principalmente relacionada ao acompanhamento da condição mecânica do equipamento e, isoladamente, não fornece todas as informações necessárias para uma avaliação completa de sua condição operacional. Por esse motivo, programas de manutenção baseados em condição podem utilizar diferentes técnicas de monitoramento e diagnóstico de forma complementar (BALDISSARELLI; FABRO, 2019).

No contexto deste trabalho, a análise de vibrações é utilizada como parâmetro para o acompanhamento do comportamento de um servomotor. A partir da aquisição dos sinais de aceleração nos eixos X, Y e Z, busca-se estabelecer padrões de funcionamento e identificar alterações nesses padrões que possam indicar possíveis anomalias no equipamento.

2.4 Aquisição e Transmissão dos Sinais de Vibração

A aquisição dos sinais de vibração é uma etapa fundamental para o monitoramento das condições de funcionamento de máquinas e equipamentos. Entre os dispositivos utilizados para essa finalidade, os acelerômetros destacam-se por sua

aplicação na medição de vibrações mecânicas, permitindo obter informações relacionadas à aceleração do equipamento durante seu funcionamento (BALDISSARELLI; FABRO, 2019). A partir dos sinais de aceleração, é possível acompanhar o comportamento vibratório do equipamento e identificar alterações em relação aos padrões observados.

No desenvolvimento de sistemas de monitoramento, a utilização de microcontroladores possibilita realizar a aquisição, o processamento inicial e a transmissão dos dados provenientes dos sensores. O ESP32 apresenta características adequadas para aplicações relacionadas à Internet das Coisas (IoT), por integrar recursos de processamento e comunicação sem fio em uma única plataforma. A placa WiFi LoRa 32 V3.2, desenvolvida pela Heltec Automation, integra um microcontrolador ESP32-S3 e o módulo de comunicação LoRa SX1262, além de recursos de comunicação Wi-Fi e Bluetooth, sendo destinada a aplicações de IoT e comunicação de longa distância (HELTEC AUTOMATION, 2022).

A tecnologia LoRa (*Long Range*) é utilizada em aplicações que necessitam de comunicação sem fio a longas distâncias e baixo consumo de energia. Sua utilização em sistemas IoT permite a transmissão de informações provenientes de sensores para outros dispositivos da rede, possibilitando o acompanhamento dos dados coletados. Redes baseadas nessa tecnologia podem utilizar dispositivos LoRa para receber informações de sensores e encaminhar essas informações para outros elementos responsáveis pelo processamento e tratamento dos dados (SCHWAB, 2020).

No sistema desenvolvido neste trabalho, o acelerômetro é responsável pela aquisição dos sinais de aceleração nos eixos X, Y e Z. Os dados são recebidos e processados inicialmente por uma placa Heltec WiFi LoRa 32 V3.2, que realiza a transmissão das informações por meio da tecnologia LoRa. Uma segunda placa recebe os dados transmitidos e os encaminha para um computador, no qual são processados por meio de um *script* desenvolvido em Python e apresentados em uma interface de visualização.

Essa arquitetura permite separar as etapas de aquisição, transmissão, processamento e visualização dos dados, possibilitando o acompanhamento do

comportamento vibratório do servomotor durante sua operação. Dessa forma, a utilização conjunta do acelerômetro, ESP32 e LoRa fornece a infraestrutura necessária para a coleta e transmissão dos sinais utilizados no sistema de monitoramento proposto.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do sistema de monitoramento foi realizado de forma experimental, envolvendo etapas de levantamento das necessidades, estudo dos componentes, montagem do sistema de aquisição, desenvolvimento da comunicação sem fio, processamento dos dados e validação experimental. O objetivo foi desenvolver uma solução capaz de realizar o monitoramento das vibrações do motor em tempo real, permitindo identificar alterações no comportamento vibratório e classificá-las de acordo com níveis previamente estabelecidos.

Inicialmente, foi realizada uma visita à empresa, com o objetivo de compreender o processo industrial e as condições de aplicação do sistema de monitoramento (Figura 1).

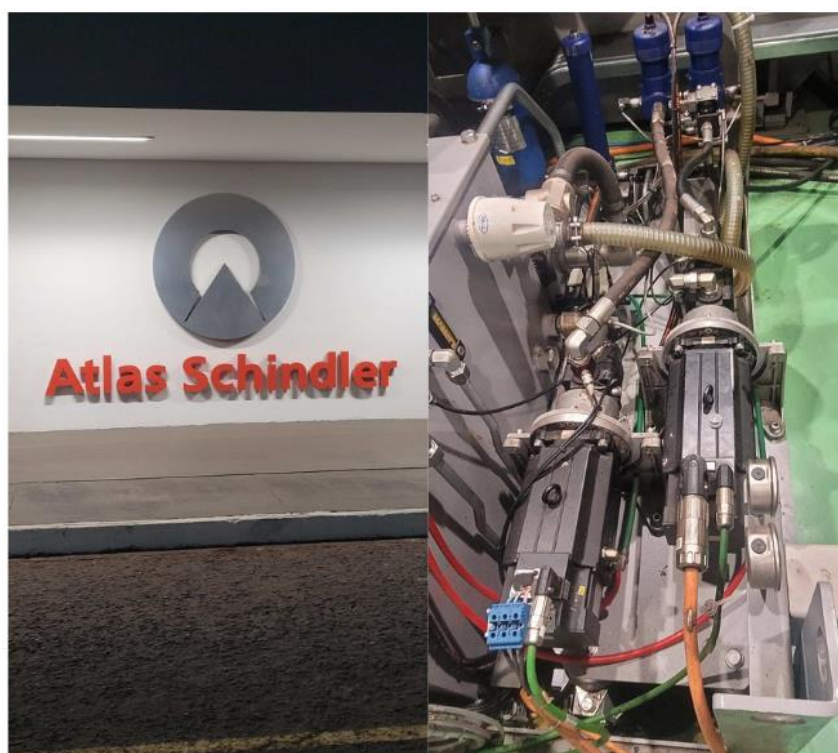


Figura 1 – Visita a Atlas Schindler
Fonte: Autoria própria.

Durante essa etapa, foram levantadas informações relacionadas ao funcionamento do equipamento e à necessidade de acompanhamento das condições de operação. Posteriormente, foi adquirido o conjunto composto pelo motor e seu respectivo acionamento, sendo realizado um estudo para compreender seu funcionamento e definir a forma de integração do sistema de monitoramento.

Após essa etapa, foi desenvolvida e fabricada uma bancada destinada à instalação e realização dos ensaios com o motor. Paralelamente, foram realizados estudos sobre o acelerômetro utilizado no projeto, bem como testes iniciais para verificar sua leitura e funcionamento, conforme ilustra a Figura 2.



Figura 2 – Bancada
Fonte: Autoria própria.

A etapa seguinte consistiu na calibração e análise dos dados provenientes do acelerômetro. Durante esse período, foram realizados testes para identificar o comportamento das medições e estabelecer uma condição de referência para o funcionamento do equipamento. A calibração dos dados ocorreu paralelamente ao desenvolvimento da comunicação por radiofrequência, utilizando a tecnologia **LoRa** Figura (3).



Figura 3 – teste de vibração

Fonte: Autoria própria.

A comunicação entre as placas foi inicialmente desenvolvida e testada de forma independente, com o objetivo de garantir o correto envio e recebimento dos dados. Após a obtenção de uma comunicação estável entre os dispositivos, o código responsável pela leitura das vibrações foi integrado ao sistema de transmissão. Dessa forma, os dados obtidos pelo acelerômetro passaram a ser enviados por meio da comunicação LoRa para a unidade responsável pelo monitoramento.

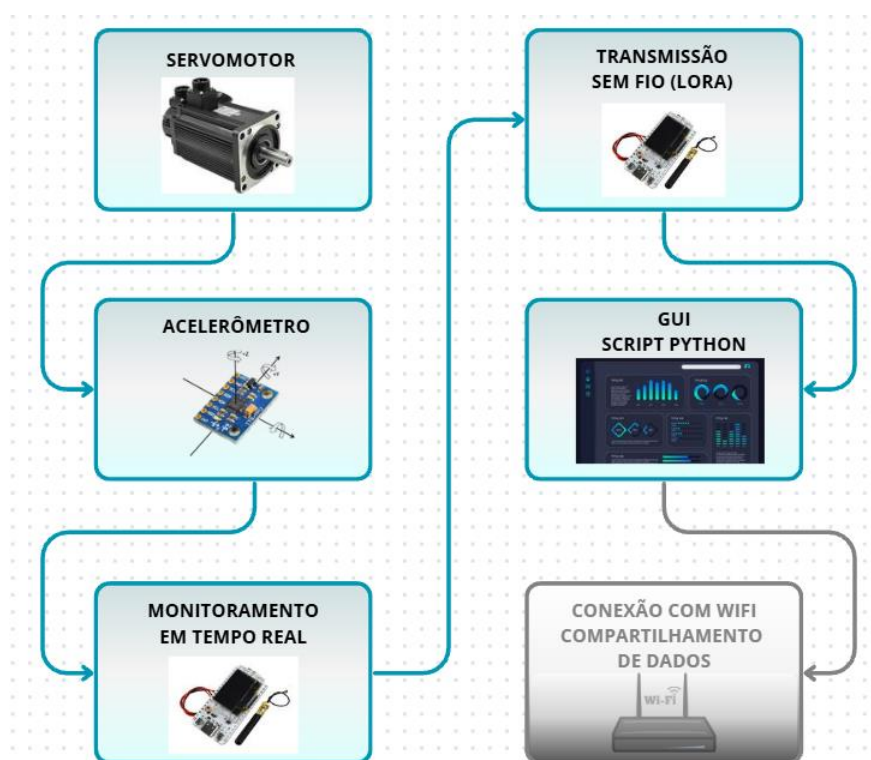


Figura 4 – Fluxo simplificado do sistema de monitoramento

Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na Figura 4, o sistema é composto pelo equipamento sob monitoramento, acelerômetro, dispositivos de comunicação LoRa e uma interface gráfica desenvolvida em Python. O acelerômetro é instalado no motor e realiza a aquisição dos sinais de vibração. Os dados coletados são processados pelo sistema embarcado e transmitidos por radiofrequência para a segunda placa, conectada ao computador.

Após a integração entre aquisição e transmissão dos dados, foi desenvolvida uma **placa de circuito impresso (PCB)** destinada à conexão e fixação da placa de desenvolvimento Heltec e do acelerômetro. Essa etapa teve como finalidade organizar as conexões elétricas e proporcionar maior estabilidade ao conjunto durante os ensaios.



Figura 5 – Desenvolvimento da placa de circuito impresso
Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, foi desenvolvida uma case por fabricação aditiva (impressão 3D), contendo uma tampa de acrílico para proteção dos componentes e visualização do conjunto. A estrutura foi projetada para permitir a fixação do sistema sobre o motor, mantendo o acelerômetro posicionado de maneira adequada para a aquisição das vibrações.

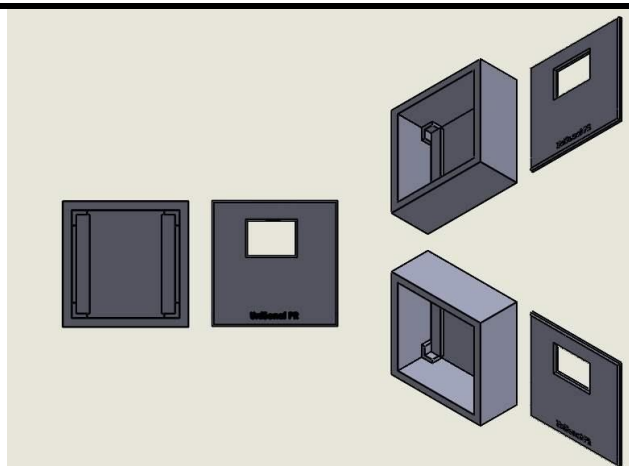


Figura 6 – Desenho 3D

Fonte: Autoria própria.

Por fim, os dados recebidos pela unidade de monitoramento foram integrados a um script desenvolvido em Python, responsável pelo processamento e apresentação das informações ao usuário. Foi desenvolvida uma interface gráfica de característica minimalista, contendo gráficos para acompanhamento das medições e indicadores do estado de funcionamento do equipamento. A partir dos valores de vibração obtidos, o sistema classifica a condição monitorada em diferentes estados, como normal, atenção e alteração, possibilitando uma interpretação visual do comportamento do equipamento.

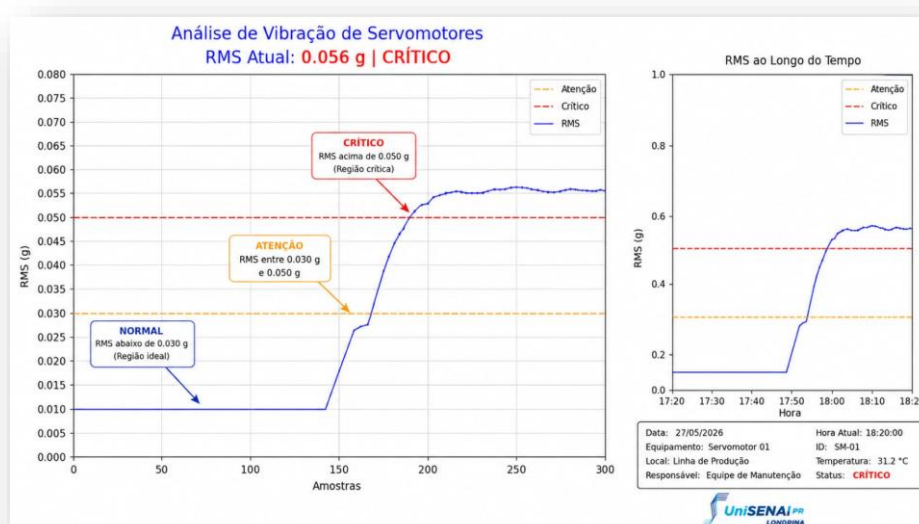


Figura 7 – Interface gráfica

Fonte: Autoria própria.

3.1 Ambiente de desenvolvimento

O desenvolvimento do sistema foi realizado utilizando ferramentas destinadas à programação dos dispositivos embarcados e ao processamento dos dados. Para o desenvolvimento do firmware das placas ESP32, foram utilizados ambientes de programação compatíveis com a plataforma, enquanto o processamento dos dados e desenvolvimento da interface gráfica foram realizados utilizando a linguagem Python.

O firmware foi desenvolvido em linguagem C/C++, sendo responsável pelo gerenciamento do acelerômetro, aquisição dos dados de vibração e comunicação entre os dispositivos por meio do protocolo LoRa.

O ambiente Visual Studio Code (VS Code) foi utilizado como ferramenta de desenvolvimento e organização dos códigos do projeto. Já o Python foi utilizado para a implementação do processamento dos dados recebidos e da interface gráfica destinada ao acompanhamento das medições.

3.1.1 Aquisição e processamento dos dados

A aquisição dos dados foi realizada por meio de um acelerômetro instalado no equipamento sob ensaio. O sensor foi responsável pela medição da aceleração nos diferentes eixos, permitindo acompanhar o comportamento vibratório do motor durante sua operação.

Os dados obtidos pelo acelerômetro foram enviados ao sistema embarcado, que realizou a leitura e preparação das informações para transmissão. Após o recebimento dos dados pela segunda placa, as informações foram encaminhadas ao computador por meio da interface serial.

Para a avaliação do comportamento vibratório, foram utilizados os dados de aceleração e o cálculo do valor **RMS (Root Mean Square)**, utilizado como parâmetro para representar o nível global da vibração durante os ensaios.

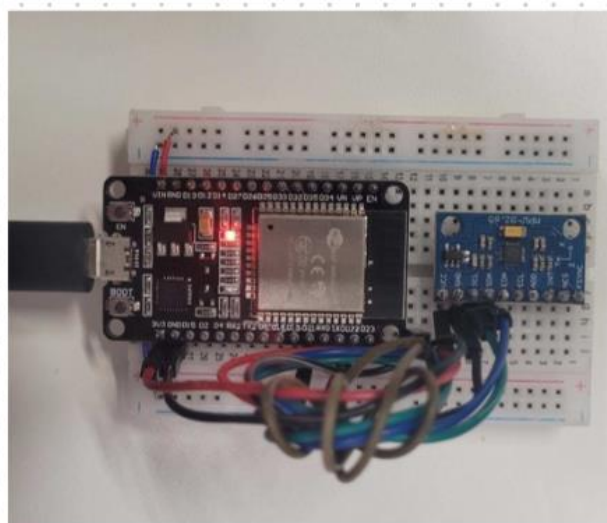


Figura 8 – Acelerômetro e ESP32: Primeiro teste

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Comunicação sem fio

Para a comunicação entre o sistema instalado no motor e a unidade conectada ao computador, foi utilizada a tecnologia LoRa (Long Range). Inicialmente, foram realizados testes específicos para verificar o funcionamento da comunicação entre as duas placas de desenvolvimento. Após a validação do envio e recebimento dos dados, o sistema de comunicação foi integrado ao código responsável pela aquisição das vibrações. A utilização da comunicação LoRa permitiu eliminar a necessidade de uma conexão física entre o sistema instalado no motor e a unidade de monitoramento, possibilitando a transmissão dos dados por radiofrequência durante os ensaios.

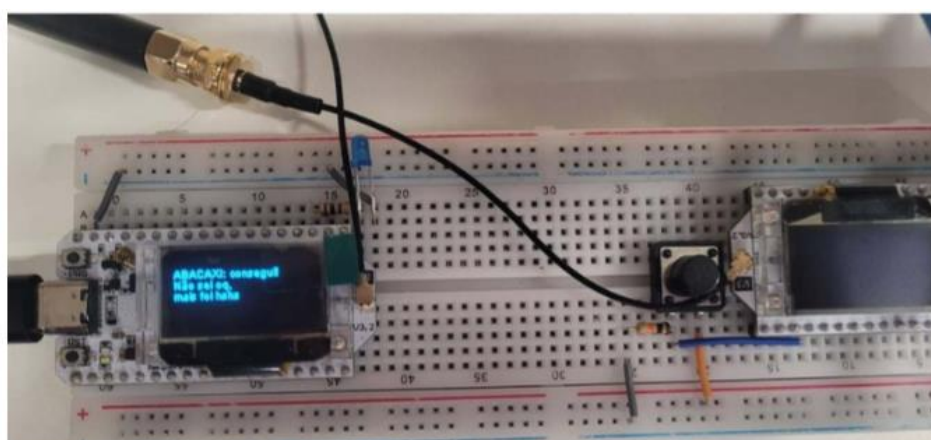


Figura 9 – Placas Heltec: comunicação LoRa

Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Interface do usuário e visualização dos dados

Os dados recebidos pela unidade de monitoramento foram processados por um programa desenvolvido em Python. A aplicação possui uma interface gráfica destinada à apresentação das informações de forma simplificada e de fácil interpretação. A interface apresenta os valores de vibração por meio de gráficos e indicadores visuais, permitindo acompanhar o comportamento do equipamento durante a operação. Com base nos valores processados, o sistema apresenta diferentes estados de condição, classificados como normal, atenção e alteração. Essa abordagem permite que o usuário acompanhe o comportamento do equipamento em tempo real e identifique alterações nos níveis de vibração que possam indicar uma mudança em sua condição de funcionamento.

3.1.4 Construção e montagem do sistema

Após a validação individual dos componentes, foi realizada a integração física do sistema. Para isso, foi desenvolvida uma PCB destinada à montagem da placa Heltec e do acelerômetro, reduzindo a quantidade de conexões externas e proporcionando maior organização ao conjunto.

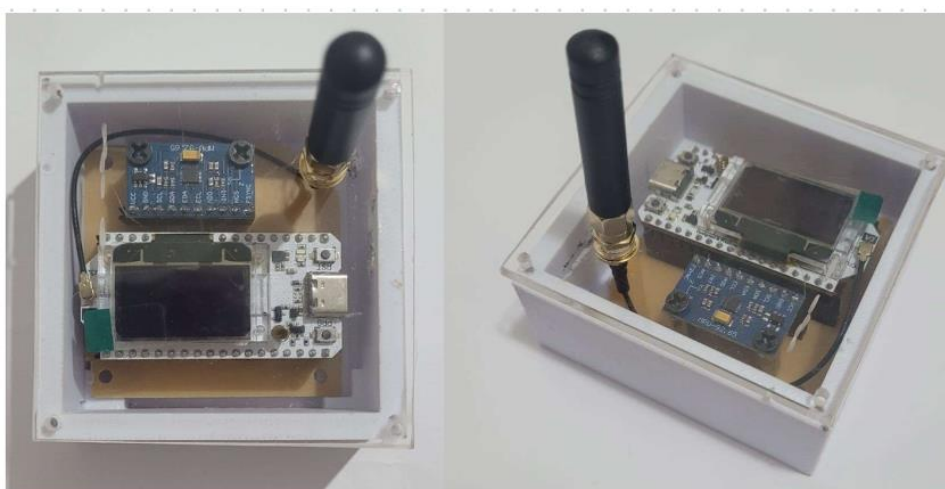


Figura 11 – Case final
Fonte: Autoria própria.

Em seguida, foi confeccionada uma estrutura de proteção utilizando impressão 3D. A case recebeu uma tampa de acrílico e foi projetada para permitir a fixação do sistema sobre o motor, garantindo o posicionamento do acelerômetro durante os ensaios.

3.1.5 Validação experimental

A validação experimental foi realizada por meio de ensaios com o motor em funcionamento, buscando verificar o comportamento do sistema de aquisição, transmissão e visualização dos dados.

Inicialmente, foram realizadas medições para estabelecer uma condição de referência do equipamento, denominada condição normal de operação. Em seguida, foram realizados testes com diferentes condições de vibração, permitindo observar a resposta do sistema diante das alterações provocadas durante os ensaios.

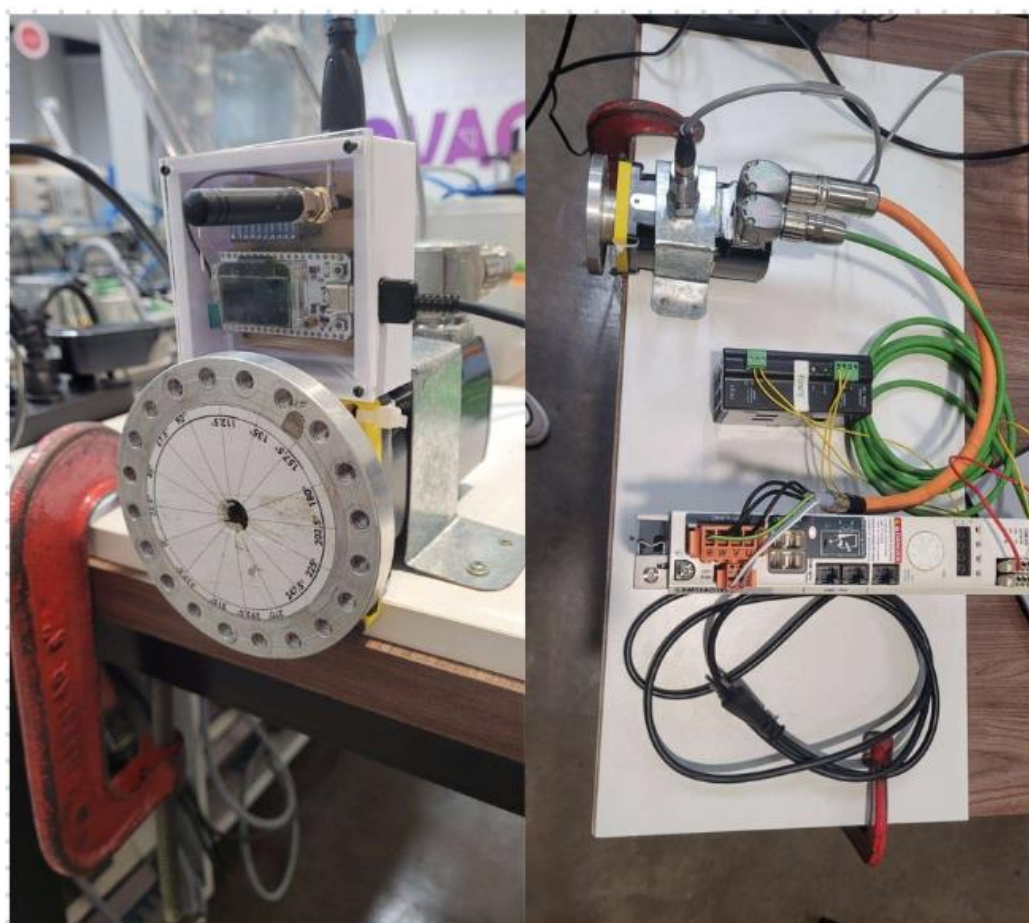


Figura 12 – Bancada de teste.

Fonte: Autoria própria.

Durante a validação, foram avaliados o funcionamento do acelerômetro, a transmissão dos dados por LoRa, o recebimento das informações pelo computador e a representação dos dados na interface gráfica. Dessa forma, foi possível verificar o funcionamento integrado do sistema e sua capacidade de identificar alterações no comportamento vibratório do equipamento.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O desenvolvimento do sistema possibilitou a integração entre o acelerômetro, o microcontrolador ESP32, a comunicação LoRa e uma interface desenvolvida em Python para o monitoramento das vibrações do servomotor.

Inicialmente, foram realizados testes com o acelerômetro para verificar a aquisição dos sinais e o comportamento das medições durante o funcionamento do motor. A partir desses testes, foram realizados procedimentos de calibração e estabelecida uma condição de referência para as medições.

Paralelamente, foi desenvolvida e testada a comunicação entre as placas utilizando a tecnologia LoRa. Após a validação do envio e recebimento dos dados, o sistema de aquisição do acelerômetro foi integrado à comunicação, permitindo a transmissão das informações de vibração para a unidade conectada ao computador.

Os dados recebidos foram processados por meio de um programa desenvolvido em Python. A aplicação apresenta os valores de vibração em uma interface gráfica, utilizando gráficos e indicadores para facilitar o acompanhamento do comportamento do equipamento. O valor RMS da aceleração foi utilizado como parâmetro para representar o nível global de vibração durante os ensaios.

Com base nos critérios definidos para os testes, a interface apresenta diferentes estados de condição, classificados como normal, atenção e alteração, permitindo identificar visualmente mudanças nos níveis de vibração.

Após a validação dos componentes, foi realizada a integração física do sistema. Para isso, foi desenvolvida uma PCB para a montagem do acelerômetro e da placa

Heltec, proporcionando maior organização das conexões. Também foi confeccionada uma case por impressão 3D, com tampa de acrílico, destinada à proteção dos componentes e à fixação do conjunto sobre o motor.

A validação foi realizada de forma progressiva, avaliando inicialmente os componentes de maneira individual e, posteriormente, o sistema integrado. Os ensaios demonstraram o funcionamento do fluxo proposto, desde a aquisição da vibração até sua transmissão, processamento e apresentação na interface gráfica.

Dessa forma, os resultados demonstram a viabilidade do protótipo para o monitoramento das vibrações do servomotor em tempo real. Entretanto, os ensaios realizados ainda não são suficientes para afirmar a identificação precisa de falhas específicas ou a previsão da vida útil do equipamento. Para isso, são necessários novos ensaios, uma base de dados mais ampla e métodos de análise mais avançados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do projeto permitiu atingir o objetivo proposto de desenvolver e testar um sistema de monitoramento de vibrações aplicado a um servomotor, integrando sensor, sistema embarcado, comunicação sem fio e interface computacional.

Durante o projeto, foram realizados estudos sobre o funcionamento do servomotor, do acelerômetro e da comunicação LoRa, além do desenvolvimento do sistema de processamento e visualização dos dados em Python. A integração desses elementos possibilitou a construção de um protótipo funcional capaz de adquirir, transmitir, processar e apresentar os dados de vibração em tempo real.

A utilização do acelerômetro permitiu acompanhar as variações de vibração do equipamento, enquanto a comunicação LoRa possibilitou a transmissão dos dados entre o dispositivo instalado junto ao motor e a unidade de monitoramento. A interface desenvolvida em Python facilitou a visualização das informações por meio de gráficos e indicadores de condição.

Apesar dos resultados obtidos, o sistema ainda apresenta características de protótipo e necessita de aprimoramentos antes de uma possível aplicação em ambiente industrial. Entre as principais limitações estão a necessidade de ampliar a

base de dados, aprimorar os critérios de classificação dos níveis de vibração e aumentar a robustez dos componentes eletrônicos e mecânicos.

5.1 Próximas etapas

Como continuidade do projeto, pretende-se aprimorar os valores de referência utilizados na classificação das vibrações por meio da realização de novos ensaios e da construção de uma base de dados mais abrangente.

Também é prevista a implementação de armazenamento em nuvem e banco de dados, possibilitando o histórico das medições e o acompanhamento das tendências de vibração ao longo do tempo. Essa etapa permitirá ampliar o sistema para além do monitoramento local realizado atualmente.

Outra possibilidade é a utilização de métodos mais avançados de processamento de sinais, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT), além de técnicas de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina. Com uma base de dados adequada, esses recursos poderão futuramente auxiliar na identificação de padrões associados a possíveis falhas e na estimativa da vida útil do equipamento.

No aspecto físico, pretende-se desenvolver uma alimentação por bateria integrada à case, proporcionando maior autonomia e flexibilidade de instalação. Também serão realizados aprimoramentos na estrutura mecânica e no circuito eletrônico, incluindo filtros e proteções que aumentem a resistência do sistema às condições encontradas em ambientes industriais.

Por fim, a implementação do Wi-Fi para compartilhamento remoto dos **dados** permanece como uma melhoria futura, não tendo sido incorporada ao protótipo desenvolvido nesta etapa.

REFERÊNCIAS

- BALDISSARELLI, Luciano; FABRO, Elton. **Manutenção Preditiva na Indústria 4.0**. *Scientia Cum Industria*, v. 7, n. 2, p. 12–22, 2019.
- HELTEC AUTOMATION. **WiFi LoRa 32 V3.2: LoRa Node Development Kit**. Heltec Automation, 2022.

MEIRINHO, Christian Joezer. **Estudo do acionamento do motor síncrono de ímãs permanentes utilizando regulador linear quadrático e controle vetorial via modulação por vetores espaciais**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2015.

MOOG. **Fastact W: Liquidcooled Brushless Servomotors**. Moog Inc., 2003.

RODRIGUES, David Luiz Silva; DANTAS, Caio do Carmo; CRUZ, Lucas Botelho da; LARA, Hygor Santiago; SILVA, Vinicius Augusto Diniz; BRITO, Jorge Nei. **Experimental analysis of rotor unbalance using low-cost instrumentation based on the MPU-6050**. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, v. 23, n. 8, p. 01–19, 2025.

SCHWAB, Anderson Luis. **Criação de uma rede LoRa para projetos de pesquisa e desenvolvimento**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) – Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17094-1: Máquinas elétricas girantes - Parte 1: Motores de indução trifásicos - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

CUNHA, Alexandre Abrahami Pinto da. **Sistema de Internet das Coisas para Monitoração de Motores Elétricos Industriais**. 2023. 85 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10816-1: Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 1: General guidelines**. Geneva: ISO, 1995.

KUMAR, Jatinder et al. An Adaptive Evolutionary Neural Network Model for Load Management in Smart Grid Environment. **IEEE Transactions on Network and Service Management**, v. 22, n. 1, p. 242-254, 2024.

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 17.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 11., 2025, São João del-Rei. **Anais...** São João del-Rei: UFSJ, 2025.

VELOZO, Hugo Alves et al. (org.). **Internet das Coisas: soluções tecnológicas**. São Paulo: Pimenta Cultural, 2026



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.