

# Análise da viabilidade de um sistema de aquisição e monitoramento remoto de dados para manutenção preditiva (Dezembro 2021)

Rafael de Oliveira Barboza, Vanessa Caroline Parpineli, Fabiano Luz Cardoso

Centro Universitário Católica de Santa Catarina, Jaraguá do Sul – SC, Brasil

E-mail: rafael.barboza@catolicasc.edu.br, vanessa.parpineli@catolicasc.edu.br, fabiano@catolicasc.org.br

**Resumo**—O grande avanço tecnológico presente nas indústrias juntamente da busca por redução de custo e eliminação de falhas nos processos produtivos tem incentivado a utilização cada vez mais dos recursos de monitoramento contínuo na manutenção preditiva, um dos pilares da Indústria 4.0. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e análise da viabilidade de um sistema para a monitoração de dados de vibração em motores elétricos, através de uma placa de aquisição de dados. Para fins de validação do sistema, foram realizadas simulações de desbalanceamento no motor, coletando dados através da placa desenvolvida e através de um equipamento de medição comercial. Desta maneira, foi determinada a eficácia do sistema desenvolvido comprovando apresentar resultados confiáveis para medição de valores em velocidade RMS, normalmente utilizado para comparação com limites especificados em normas. A vantagem deste sistema é a redução de custo investido quando comparado ao equipamento convencional, resultando em uma maneira mais simples para realizar a manutenção preditiva dos equipamentos dentro das indústrias.

**Palavras-chave**—Monitoramento contínuo, manutenção preditiva, vibração em motores elétricos, análise online.

## FEASIBILITY ANALYSIS OF A REMOTE DATA ACQUISITION AND MONITORING SYSTEM FOR PREDICTIVE MAINTENANCE

**Abstract**—The great technological advances present in industries, together with the search for cost reduction and elimination of failures in production process, it has more encouraged the use of continuous monitoring resources in predictive maintenance, one of the pillars of Industry 4.0. In this context, this work was made to develop and analyze the feasibility of a system for monitoring vibration data in electric motors through an acquisition board data. For system validation purposes, simulations of unbalance in the engine were performed, collecting these data through the developed board and a commercial measuring equipment. In this way, the effectiveness of the developed system was determined, proving to present reliable results for measuring values at RMS speed, normally used for comparison with limits specified in standards. The advantage of this system is the reduction of invested cost when compared to conventional equipment, resulting in a simpler way to carry out predictive maintenance of equipment within industries.

**Keywords**—Continuous monitoring, predictive maintenance, vibration on electric motors, online analysis.

### I. INTRODUÇÃO

DESDE a primeira revolução industrial, a definição de indústria vem se modernizando e mais recentemente incluindo as transformações digitais relativas à Indústria 4.0. Essa nova

forma de realizar o processo produtivo permite a comunicação de máquinas e computadores possibilitando maior eficiência, precisão nas análises, otimização de processos e fortalecimento na relação de negócios com os clientes [1].

O sistema desenvolvido neste artigo realiza um teste de conceito de evolução tecnológica em linhas de produção, a qual se dá através da implementação de manutenção preditiva aliada ao monitoramento remoto em tempo real, que são alguns dos preceitos da Indústria 4.0. Esta por sua vez, impulsionou também o desenvolvimento de diversas tecnologias, como protocolos de comunicação mais simples, permitindo sua implementação em dispositivos com pouca capacidade de processamento, como é o caso de sensores.

A justificativa para elaboração desta análise se deve ao fato do grande avanço tecnológico que possibilita detectar e prevenir falhas em equipamentos durante sua operação, levando à redução de custos desnecessários e paradas inesperadas ao processo produtivo, prejudicando a eficiência da fábrica.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade de um sistema de monitoramento e aquisição de dados de vibração, desenvolvido através de um acelerômetro disposto em uma placa de aquisição de dados fixada em um motor, para acompanhamento e análise em tempo real dos dados através de uma plataforma remota. A eficácia do projeto é validada através da comparação com equipamentos de medição específicos para esse fim.

### II. MANUTENÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0

A manutenção é o termo utilizado com a intenção de evitar ou corrigir falhas, restabelecendo as condições de funcionamento dos equipamentos [2], comumente são classificadas em três tipos, definidas como manutenção preventiva, a qual necessita ser realizada seguindo critérios e intervalos estabelecidos previamente, manutenção corretiva que acontece para correção da falha apresentada e a manutenção preditiva onde utiliza sistemas e técnicas de análise que visam acompanhar a atividade de forma centralizada ou por amostragem, antecipando falhas [3].

O desenvolvimento da Indústria 4.0 está relacionado à unificação entre os mundos físicos e digitais. Neste sentido a manutenção preditiva se destaca por possuir capacidade de prever falhas e encontrar defeitos em estado inicial para planejar intervenções e correções, a fim de evitar o agravamento deste defeito [4].

#### A. Monitoramento Preditivo no Setor Industrial

A manutenção preditiva possui a estratégia de monitorar

aspectos de funcionamento com o intuito de coletar informações detalhadas para analisar o estado dos equipamentos. Uma vez que os principais objetivos da manutenção preditiva nestes ambientes estão relacionados em prever falhas, minimizar paradas forçadas de máquinas, evitar a desmontagem e reparo de equipamentos, além de aumentar o tempo de vida útil dos mesmos [5].

Este acompanhamento pode ser feito de três formas de acordo com [6], a primeira delas é a forma subjetiva através dos sentidos humanos (visão, olfato e audição), em seguida de forma objetiva que pode ser obtida através dos instrumentos de medição, sendo necessário sempre utilização do mesmo procedimento e parâmetros durante a coleta para uniformidade dos dados, e por fim, tem-se a forma contínua, a qual consiste no monitoramento contínuo dos parâmetros especificados nos equipamentos.

As indústrias, movidas pelo crescimento das demandas relacionadas a produtos e serviços, se mostram incentivadas a apostar no uso de novas tecnologias através do monitoramento contínuo dos processos, com foco principalmente nos processos mais críticos, tornando assim a manutenção preditiva imprescindível na era da Indústria 4.0 [4].

Um dos principais equipamentos presentes nas indústrias são os motores elétricos, pois possuem papel fundamental na produção industrial realizando a conversão de energia elétrica em energia mecânica, portanto, se faz necessário a operação com confiabilidade [7].

### B. IoT e Protocolo MQTT

Conhecida como IoT (*Internet of Things*), a internet das coisas traz a ideia de transformar objetos utilizados diariamente para o mundo digital, modernizando e possibilitando novas experiências. É através da utilização de protocolos de comunicação que se torna possível a interação entre todos os dispositivos num determinado sistema utilizando uma linguagem comum entre eles [8], conforme Figura 1.

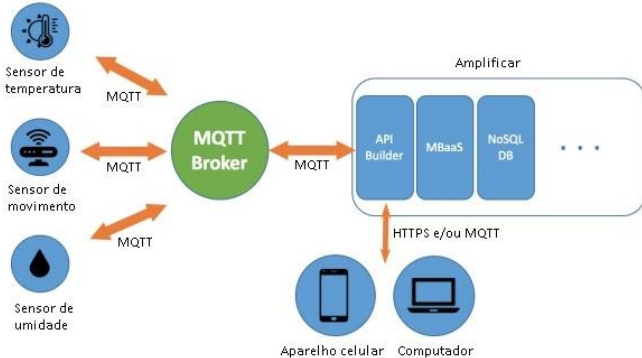


Figura 1 – Protocolo MQTT e a IoT, adaptado de [8].

Para realizar esta interligação, o sistema na Figura 1 utiliza o protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), que é o protocolo mais utilizado atualmente para enviar fluxos de dados de sensores para outros aplicativos. Ele se destaca dos outros protocolos pela sua forma leve e robusta, sendo a melhor escolha para redes sem fio que podem possuir conexões não confiáveis ou alguma restrição. Já o *broker* é um servidor com a função de receber as mensagens e direcionar para os destinatários. A partir dos dados recebidos dos sensores é possível processar e exibi-los através de painéis de controle na

internet desenvolvidas para computadores e *smartphones*, conhecidos como *dashboards* [8].

## III. ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

Diferentes maneiras podem ser utilizadas para quantificar a amplitude de um sinal, dentre elas o parâmetro mais utilizado para se obter dados sobre vibrações em carcaças de máquinas é o valor eficaz ou amplitude RMS (*Root Mean Square*), que se relaciona com a energia do sinal.

### A. Frequência e Análise Espectral

A análise de vibração pode ser considerada uma das técnicas mais importantes e completas para detecção de falhas, pois quando ocorre em algum dos componentes da máquina afeta o coeficiente de transmissão do sinal, gerando alteração na frequência global do sistema. Normalmente, defeitos de desalinhamento e folgas em máquinas rotativas alteram ou emitem novas frequências, então detectar estes sinais pode indicar uma deficiência específica de acordo com a frequência e amplitude alcançada. Como exemplo disso tem-se a condição de desbalanceamento de um motor, que pode ser percebido com picos de vibração medidos em velocidade, na frequência de rotação da máquina [9].

Baseado no teorema de Fourier, qualquer função periódica pode ser decomposta em série de ondas sinusoidais puras com frequências distintas e múltiplas harmônicas na frequência fundamental, resultando no espectro da frequência de vibração. Neste sentido ressalta-se que a confiabilidade do espectro de frequência em representar o sinal original depende da frequência de amostragem, a qual deve-se respeitar o teorema de Nyquist [10].

### B. Parâmetros de Medição

As forças internas não compensadas resultam na vibração em uma máquina e estes movimentos podem ser medidos em termos de deslocamento, velocidade e aceleração. Conforme Silva (2010) [11], cada um deles é indicado para uma situação específica em uma máquina rotativa. O deslocamento é normalmente utilizado para detectar a vibração relativa entre eixo e mancal por apresentar grandes amplitudes em baixas frequências, a aceleração pode ser utilizada para detectar problemas ocasionados em rolamentos devido apresentar grandes amplitudes em altas frequências, e por último, a velocidade é geralmente o parâmetro mais utilizado para verificar o limite da severidade das vibrações em máquinas elétricas girantes presente em normas de valores admissíveis, bem como também para análise de espectros para detectar diversas falhas que geram vibrações específicas, visto que a velocidade possui um comportamento homogêneo tanto em baixas quanto em altas frequências.

### C. Limites e Normas para Detecção de Falhas

Existem normas específicas que determinam os parâmetros de medição e os valores aceitáveis de vibração em motores elétricos. Para situações de operação no campo, de acordo com [12], é indicado a avaliação dos motores em carga através de diferentes zonas com respectivos valores, entretanto para configuração de alertas em sistema de monitoramento é

recomendado que seja considerado o valor de 25% além dos limites das zonas B e C. Estes valores são vistos na Figura 2.

Velocidade de Vibração RMS [mm/s]	Potência $\leq 300$ kW Grupo 2 da ISO 10816-3	
	Base Rígida	Base Flexível
$V \leq 2,8$	Normal	Normal
$2,8 < V \leq 5,6$	Alerta	Normal
$5,6 < V \leq 8,9$	Crítico	Alerta
$8,9 < V \leq 13,8$	Crítico	Crítico
$V > 13,8$	Crítico	Crítico

Figura 2 – Limites de vibração para monitoramento, adaptado de [13].

Observando os níveis apresentados na Figura 2 é possível verificar que para potência inferior ou igual a 300 kW as categorias são subdivididas em três, havendo uma pequena mudança nos limites em relação a forma da base do motor [13]. Todavia, quando os níveis estipulados por normas forem ultrapassados é necessário identificar a causa do nível excessivo de vibração e quais ações corretivas podem ser tomadas [11]. As principais causas das falhas podem ser vistas na Tabela I.

TABELA I  
PRINCIPAIS FALHAS E CAUSAS DE VIBRAÇÃO

Tipo de falha	Componentes espectrais	Descrição
Desbalanceamento	1xRPM	É produzida pela força centrífuga
Desalinhamento angular	$1x > 2xRPM$	É caracterizado por uma alta vibração na direção axial
Desalinhamento paralelo ( <i>off-set</i> )	$1x < 2xRPM$	É caracterizado por uma alta vibração na direção radial
Folga na fixação da base	1xRPM (2, 3, 4, 5 e 6)	Causada por folgas estruturais ou falta de rigidez na fundação
Folgas no mancal	1xfrpm	Causada pela bucha-cubo, anel interno e externo cubo
Rolamentos	Frequências elevadas 20 a 60 kHz	Apresentam quatro estágios de deterioração
Vibração duas vezes frequência da rede elétrica	Anormal em 2xFL	O campo magnético produz uma força de atração eletromagnética entre o estator e o rotor
Excentricidade estática	1xfrpm < 2xFL	Causado pelo estator ovalizado ou rotor mal posicionado
Excentricidade dinâmica	2xfl em 1xRPM	Excentricidade variável do entreferro entre o rotor e o estator
Barras do rotor interrompidas	fp com picos em 3, 4 e 5 da frpm	As forças magnéticas serão diferentes, resultando uma força desbalanceada
Problemas na alimentação	2FL com bandas 1/3 da FL	Causadas por conexões frouxas ou linhas desbalanceadas

Onde:

RPM: pico na frequência de rotação;

frpm: pico de frequência de rotação mecânica;

FL: Frequência de linha da rede;

fp: Frequência de passagem de polos.

O diagnóstico e acompanhamento das falhas indicadas na Tabela I podem ser realizados através dos espectros de sinais de vibração, causados tanto por falhas mecânicas quanto elétricas.

#### D. Sensores de Medição

A medição dos dados de vibração pode ser feita através de sensores, detectores e transdutores, o qual gera um sinal de saída proporcional a aceleração de um corpo permitindo

quantificar a vibração e sendo conhecido como acelerômetro. O modelo mais comum é o piezoelétrico [11].

Com a evolução dos dispositivos, a tecnologia MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) consiste na construção de dispositivos eletromecânicos em escalas menores que  $1 \mu m$  para funções de controle e medição, a qual vem sendo muito utilizada na fabricação de acelerômetros [14].

#### IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos adotados foram determinados de modo analisar a viabilidade em desenvolver um sistema de monitoramento remoto de vibração em um motor elétrico através do uso de componentes comerciais de baixo custo.

##### A. Sistema de Monitoramento

O sistema de monitoramento proposto é constituído de uma placa de aquisição de dados, comunicação *Wi-Fi* e interface gráfica para acompanhamento dos dados, mostrado na Figura 3.



Figura 3 – Monitoramento proposto [Autores].

Assim sendo conforme Figura 3, o acelerômetro localizado na placa de aquisição realiza as medições de aceleração triaxial, processa os dados e os envia para o *broker* utilizando o módulo *Wi-Fi*. Os dados recebidos através do *broker* tornam-se acessíveis a partir de gráficos gerados na interface gráfica desenvolvida. Os detalhes deste sistema são dispostos a seguir.

##### 1) Placa de Aquisição de Dados

A placa utilizada foi o modelo B-L475E-IOT01A, fabricante ST Microelectronics, a qual apresenta um sistema com sensores e opções de conectividade. A Figura 4 apresenta a placa utilizada e destaca os principais componentes utilizados.

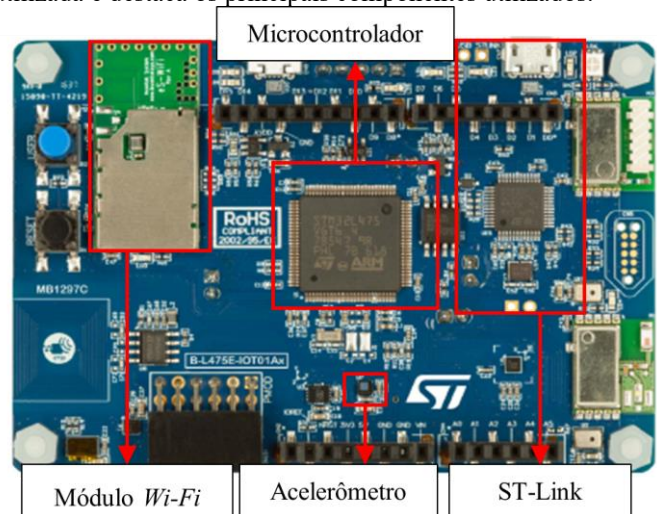


Figura 4 – Placa B-L475E-IOT01A, adaptado de [15].



Para realização dos ensaios, foi utilizado o sensor de aceleração LSM6DSL, fabricante ST Microelectronics, indicado na Figura 4, ele é um SiP (*System in Package*) que contém acelerômetro, giroscópio e sensor de temperatura integrados no mesmo encapsulamento. Ele possui armazenamento interno de 4 kB, se comunicando com o microcontrolador através da interface I2C (*Inter-Integrated Circuit*) e suporta modo de leitura de múltiplos registradores, tornando possível a recepção de várias amostras com apenas uma requisição.

Neste projeto, a escala de aceleração utilizada foi  $\pm 2$  g com sensibilidade de 0,061 mg, conforme indica o fabricante [15], sendo 1 g igual a  $9,8065 \text{ m/s}^2$ . Além disso, o dispositivo foi configurado para armazenar 512 amostras por eixo e a taxa de aquisição de dados foi definida como 833 Hz.

A placa também possui integrado o módulo de gravação de microcontrolador ST-link, dessa forma não é necessário utilizar um gravador externo. Este gravador possui a função de disponibilizar uma porta COM virtual quando conectado a um computador, realizando a transmissão dos bytes enviados pelo microcontrolador através de uma porta serial.

O microcontrolador utilizado na placa foi o modelo STM32L475VGT6, fabricante ST Microelectronics, o qual possui unidade de cálculo de ponto flutuante FPU (*Float Pointing Unit*) permitindo a utilização de todo o conjunto de instruções DSP (*Digital Signal Processor*), as quais foram utilizadas nos cálculos da FFT (*Fast Fourier Transform*). Este componente possui periféricos de comunicação, dentre os quais foram utilizados o SPI (*Serial Peripheral Interface*) e a I2C.

O módulo Wi-Fi utilizado foi o ISM43362-M3G-L44, do fabricante Inventek, que consiste num microcontrolador ARM Cortex M3 com uma antena integrada e um dispositivo Wi-Fi do fabricante Broadcom. Esse módulo pode utilizar uma comunicação UART (*Universal Asynchronous Receiver and Transmitter*) ou uma comunicação SPI. Utilizando esse módulo, não é necessário que o microcontrolador possua um sistema operacional, já que o módulo possui uma pilha TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) integrada e requer apenas comandos AT [16] para estabelecer comunicação Wi-Fi no protocolo IEEE 802.11 b/g/n [17].

## 2) Transmissão de Dados

Neste estudo, o microcontrolador foi programado para enviar os dados do dispositivo monitorado a cada cinco segundos via MQTT, conforme *payloads* no formato JSON (*JavaScript Object Notation*) [18], vistos na Figura 5 e Figura 6.

```
{ "data": {
  "speedRMS_x": 1.587252,
  "speedRMS_y": 0.939468,
  "speedRMS_z": 1.502666,
  "motor_state": "Vibração normal"} }
```

Figura 5 – Payload para valores RMS [Autores].

Conforme pode ser observado na Figura 5, o primeiro *payload* contém os parâmetros “speedRMS\_x”, “speedRMS\_y”, “speedRMS\_z” e “motor\_state” seguidos de seus respectivos valores, os quais variam a cada aquisição de dados. Os três primeiros parâmetros referem-se aos valores RMS da vibração medida em velocidade, na unidade mm/s nos eixos X, Y e Z respectivamente. Já o último parâmetro refere-se à condição de vibração do motor, a qual pode ser “Vibração normal”, “Vibração moderada” ou “Vibração crítica”, essa avaliação é

realizada conforme parâmetros descritos na Figura 2 considerando motores com fixação em base flexível.

O segundo *payload* visto na Figura 6 é enviado pela placa de aquisição e contém dados referentes ao espectro de frequência da vibração no eixo X, medida em velocidade em mm/s.

```
{ "data": {
  "ampl_peak_x_1": 0.977044,
  "ampl_peak_x_2": 1.241508,
  "ampl_peak_x_3": 1.490421,
  "ampl_peak_x_4": 0.836342,
  "ampl_peak_x_5": 0.336197,
  "freq_peak_x_1": 9.987571,
  "freq_peak_x_2": 13.316761,
  "freq_peak_x_3": 16.64595,
  "freq_peak_x_4": 19.975142,
  "freq_peak_x_5": 23.304333}}
```

Figura 6 – Payload para valores de frequência e amplitude [Autores].

Como pode ser visto na Figura 6, os parâmetros de “ampl\_peak\_x\_1” à “ampl\_peak\_x\_5” contém os valores referentes à vibração em mm/s, nas frequências descritas pelos parâmetros de “freq\_peak\_x\_1” à “freq\_peak\_x\_5” respectivamente. Esses valores são os primeiros pontos do espectro de frequência que ultrapassam 0,1 mm/s. Além disto são enviados também outros dois *payloads* com a mesma estrutura, no entanto referindo-se aos eixos Y e Z.

## 3) Sistema de Monitoramento Remoto

A plataforma IoT escolhida para monitoramento deste estudo foi a WEGnology, que é uma ferramenta baseada em *cloud computing* desenvolvida para criação de soluções conectadas, possibilitando a criação de sistemas colaborativos especialmente para aumento de eficiência e digitalização de processos [19].

Nessa plataforma podem ser criados interfaces gráficas de controle, conhecidos também como *dashboards*. Neste estudo foi configurada de acordo com aplicação de um sistema de monitoramento de dados, a fim de visualizar os valores medidos de vibração em velocidade mm/s, para que seja indicado o status de vibração durante a operação do motor.

## B. Processamento dos Dados para Medição

Para realização dos ensaios foram necessários realizar ajustes internos na placa de aquisição de dados para medição adequada conforme o objetivo estipulado inicialmente. As etapas que foram executadas são demonstradas conforme segue.

### 1) Aquisição dos Dados

A coleta de dados foi realizada com 512 amostras por eixo e com 0,6 s de tempo de amostragem, com isso é possível definir a frequência de amostragem desta coleta através da Equação (1), e então aplicar a Equação (2) considerando o teorema de Nyquist, para assim obter o valor da largura de faixa máxima deste sinal.

$$f_s = \frac{Qtd \text{ amostras}}{Tempo \text{ amostras}} = \frac{512}{0,6} = 853,33 \text{ Hz} \quad (1)$$

$$B_w = \frac{f_s}{2} = \frac{853,33}{2} = 426,667 \text{ Hz} \quad (2)$$

Onde:

$f_s$ : frequência de amostragem do sinal;

$B_w$ : largura de faixa máxima do sinal.

Além desses dados, é enviado a frequência de amostragem, para posteriormente realizar os cálculos da FFT.

## 2) Filtro de Aceleração da Gravidade

Para remover a influência da aceleração da gravidade sobre os dados analisados foi necessário a remoção do nível DC (*Direct Current*) dos mesmos, esse processo pode ser feito de diversas formas, porém tendo em vista o desempenho do sistema optou-se por implementar um filtro passa alta sugerido pelo fabricante [20], conforme Equação (3).

$$Acc2[n] = 0,975 \cdot Acc[n-1] + 0,975 \cdot (Acc[n] - Acc[n-1]) \quad (3)$$

Onde:

$Acc2[n]$ : n-ésimo termo da aceleração corrigida;

$Acc[n]$ : n-ésimo termo da aceleração antes da correção.

Dessa forma, a cada amostra recebida a aceleração é automaticamente corrigida, resultando em um melhor desempenho do *software* do que se fosse realizada a correção através de pós-processamento.

## 3) Determinação da Velocidade

A velocidade foi determinada pela integração numérica nos dados de aceleração, a partir da Equação (4).

$$Speed[n] = Speed[n-1] + \frac{1}{2} \cdot \Delta_t \cdot (Acc[n-1] + Acc[n]) \cdot \beta \quad (4)$$

Onde:

$Speed[n]$ : velocidade da n-ésima amostra;

$\beta$ : constante para converter a leitura de velocidade em mm/s, valor 100000;

$\Delta_t$ : Período de aquisição de dados.

Este período de aquisição foi obtido conforme Equação (5).

$$\frac{1}{f_s} = \frac{1}{853,33} = 1,173 \text{ ms} \quad (5)$$

Os dados da Equação (5) estão associados a taxa de amostragem e podem sofrer alterações se a velocidade de aquisição for alterada.

## 4) Cálculo do Espectro de Frequência

Para o cálculo do espectro de frequência da aceleração através da placa, foram utilizadas também bibliotecas de processamento digital de sinais disponibilizadas pelo fabricante ST Microelectronics. O cálculo foi feito com 512 *bins*, que resultou em uma resolução em frequência vista na Equação (6).

$$fr_{res} = \frac{B_w}{FFT_{bins}} = \frac{426,667}{512} = 0,833 \text{ Hz} \quad (6)$$

Onde:

$FFT_{bins}$ : amostras por eixo;

$fr_{res}$ : resolução em frequência.

Para obter o resultado, ao realizar os cálculos utilizando as bibliotecas foi necessário dividir os valores das amplitudes pela quantidade de amostras.

## C. Método de Validação dos Dados

Para a análise dos dados gerados pela placa de aquisição de dados foram realizados ensaios de vibração simulando duas condições de operação do motor elétrico. A primeira delas foi realizada com o motor operando a vazio e a segunda com o motor operando com a inclusão de massa em um dos discos acoplados em seu eixo, causando desbalanceamento.

Durante os ensaios o motor foi monitorado tanto pelo acelerômetro da placa quanto por um equipamento de medição calibrado e utilizado para análise de vibração em campo. Além disto, para tornar possível a comparação dos dados nos dois sistemas simultaneamente foi desenvolvida uma interface em Python, a qual recebia os dados gerados pela placa, exibia os

gráficos na tela e os salvava em formato de planilha eletrônica. A bancada e dispositivos utilizados são vistos na Figura 7.

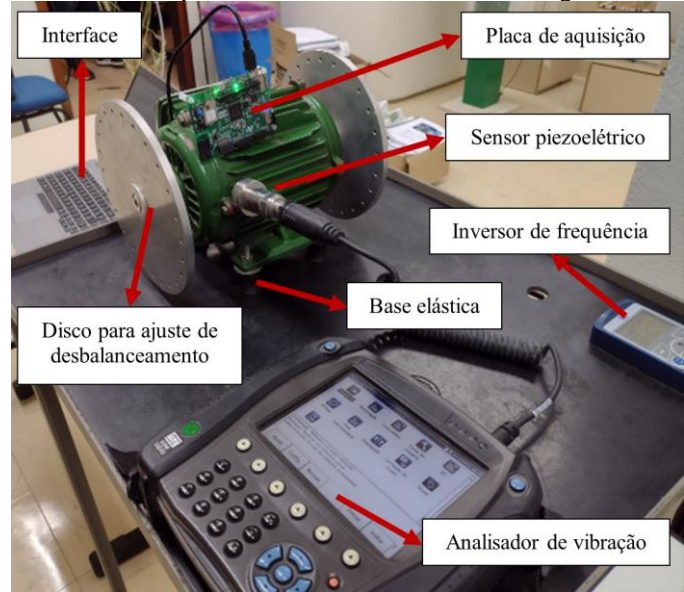


Figura 7 – Bancada de testes [Autores].

Verifica-se na Figura 7 os itens utilizados nos ensaios. As funcionalidades destes dispositivos são descritas a seguir.

### 1) Dispositivos Utilizados

Os ensaios foram realizados em uma bancada composta por um motor W22 Premium do fabricante WEG, com discos metálicos acoplados em cada ponta de eixo, os quais possuem furos roscados simétricos possibilitando a alteração de desbalanceamento de massa através da inserção de parafusos. O motor possui uma base elástica a fim de se obter o método de suspensão livre [12] durante a medição dos valores nos ensaios, possibilitando um isolamento adequado das vibrações do ambiente de medição. O acionamento dele foi feito por um inversor de frequência CFW11 do fabricante WEG, ajustado na frequência de 60 Hz para operação em rotação síncrona.

A placa de aquisição de dados foi fixada através de um parafuso em uma das aletas do motor próximo ao mancal dianteiro e para efeito de comprovação destes valores foi utilizado o analisador de vibração modelo Microlog AX CMXA 80 do fabricante SKF. Para realizar esta medição utilizou-se um acelerômetro piezoelétrico CMSS 793-CA do fabricante SKF, conectado a um dos canais do analisador de vibração e fixado na carcaça do motor no sentido radial através de uma base magnética sobre o mancal dianteiro.

O cálculo do espectro de frequência feito pelo analisador de vibração é realizado utilizando 3000 *bins*. Dessa forma, a resolução em frequência do analisador de vibração é vista a partir das Equações (7), (8) e (9).

$$f_s = \frac{8192}{1,6} = 5120 \text{ Hz} \quad (7)$$

$$B_w = \frac{f_s}{2} = \frac{5120 \text{ Hz}}{2} = 2560 \text{ Hz} \quad (8)$$

$$fr_{res} = \frac{B_w}{FFT_{bins}} = \frac{2560}{3000} = 0,853 \text{ Hz} \quad (9)$$

O analisador de vibração AX CMXA 80 disponibiliza um *software* integrado que permite gerar gráficos e exportar os valores medidos.

## 2) Interface em Python

Para que a interface de validação em Python pudesse exibir corretamente os valores, foi programada para receber os dados conforme fluxograma demonstrado na Figura 8.

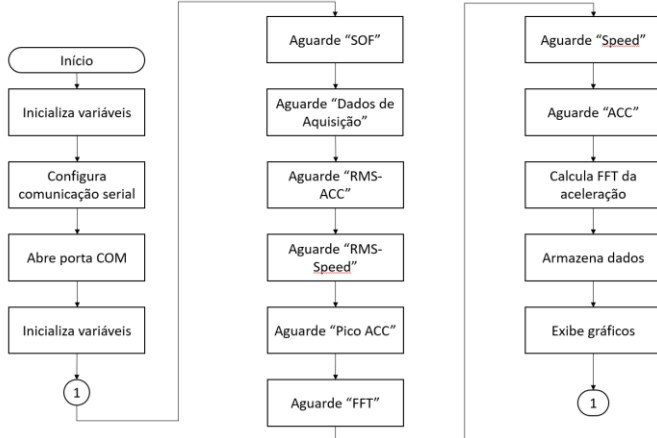


Figura 8 – Fluxograma Python [Autores].

Dessa forma, ao receber o texto “SOF” (*Start of File*), a interface aguarda o texto “Dados de aquisição”. Ao receber o texto “RMS-ACC”, a interface aguarda os valores RMS da aceleração para os eixos X, Y e Z. Ao receber o texto “RMS-Speed”, são aguardados os valores RMS da velocidade para os três eixos. Para o texto “Pico-ACC”, são recebidos os valores de pico em aceleração para os três eixos. Em seguida é recebido o texto “FFT”, onde a interface aguarda os próximos 256 valores referentes ao espectro de frequência, calculado com base nos dados de velocidade enviados.

Por fim, ao receber o texto “ACC”, é aguardado que os próximos 512 valores sejam referentes às amplitudes de cada amostra de aceleração coletada. O mesmo ocorre quando é recebido o texto “Speed”, mas tratando-se de velocidade. Não sendo recebidos os dados do espectro de frequência da aceleração, a interface em Python realiza os cálculos com base nos dados de aceleração e os exibe na tela a cada pacote de dados recebido, como pode ser visto na Figura 9.

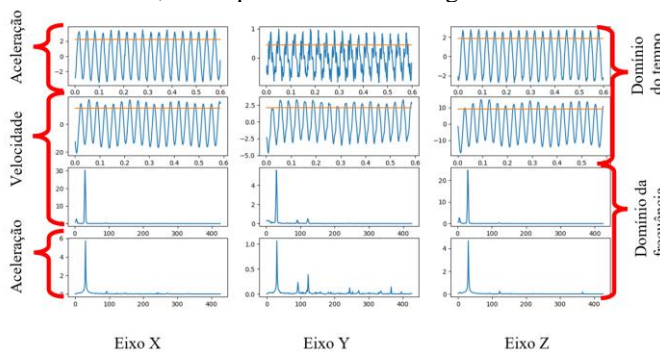


Figura 9 – Gráficos gerados pela interface em Python [Autores].

Além da imagem gerada na Figura 9, são geradas quatro planilhas contendo os dados da FFT da velocidade, dados da FFT da aceleração, dados da velocidade em função do tempo e os dados da aceleração em função do tempo, para realizar a comparação com dados gerados pelo analisador de vibração.

Na primeira e a última linha da Figura 9, está representada os sinais de aceleração no domínio do tempo e da frequência, da mesma forma a segunda e a terceira linha, representa o sinal de

velocidade no domínio do tempo e da frequência. Para este estudo foi utilizado apenas o eixo Z, que é o eixo paralelo ao acelerômetro no analisador de vibração.

## D. Lista de Materiais

Para a realização dos ensaios determinados foi necessário a utilização de materiais específicos, os quais são demonstrados na Tabela II, junto de suas características.

TABELA II  
MATERIAIS UTILIZADOS

Material	Descrição
Placa de aquisição	Modelo B-L475E-IOT01A
Desenvolvimento microcontroladores	Ferramenta STM32CubeIDE STM32
Motor de indução trifásico	Potência 1 cv, quatro polos, 220/380 V, modelo W22
Inversor de frequência	Modelo CFW11-110007T2SZ
Discos metálicos	Fabricado em alumínio com furos roscados simétricos
Parafusos	Sextavado externo M4x20, peso de 2 g
Base elástica	Apoios em borracha fixos nos pés do motor com parafusos
Analisador de Vibração	Modelo Microlog AX CMXA 80
Acelerômetro piezoelétrico	Modelo CMSS 793-CA, sensibilidade de 100 mV/g $\pm 5\%$ , faixa de medição 80 g (pico)
Ferramenta para análise de vibração	Microlog module suite
Ferramenta para linguagem de programação	Software Python com linguagem de alto nível, modular e dinâmica

Os itens indicados na Tabela II contribuíram no desenvolvimento dos ensaios e análise dos dados apresentados neste estudo.

## V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o propósito de validar se o sistema de medição e monitoramento elaborado através da placa de aquisição de dados B-L475E-IOT01A possui repetibilidade, confiabilidade e precisão na demonstração dos dados obtidos para análise de vibração para permitir a detecção de falhas em motores elétricos, são apresentados os resultados realizando uma comparação com os dados obtidos pelo sistema convencional do analisador de vibração AX CMXA 80.

### A. Ensaios Realizados

Para verificação da confiabilidade, os ensaios para análise dos dados foram realizados com o motor elétrico operando em duas condições, sendo elas a situação do motor operando a vazio e operando com falha de desbalanceamento, o qual foi feito de forma controlada, inserindo as massas sempre nos mesmos furos demarcados para evitar interferência entre os testes devido a mudança de posição. A medição dos dados foi feita para valores de aceleração e velocidade em ambos os sistemas de medição.

Apesar da placa de aquisição de dados gerar dados nos eixos X, Y e Z, apenas os dados do eixo Z foram utilizados para comparação, já que este era o eixo paralelo ao eixo de medição do sensor do analisador de vibração.

Simultaneamente aos ensaios para coleta dos dados, foi possível verificar se os dados publicados no *dashboard*



elaborado correspondiam aos dados da placa de aquisição de dados publicados na interface de validação em Python.

Os ensaios propostos foram realizados três vezes e os resultados foram posteriormente comparados a fim de atestar a repetibilidade do sistema. Dessa forma, a sequência dos ensaios ficou conforme descrito na Tabela III.

TABELA III  
ENSAIOS REALIZADOS

Nº ensaio	Medição	Condição do motor
1, 5, 9	Velocidade	Vazio
2, 6, 10	Aceleração	Vazio
3, 7, 11	Velocidade	Desbalanceado
4, 8, 12	Aceleração	Desbalanceado

Visando a redução de erros sistemáticos e garantir a precisão das medições, os ensaios foram realizados de forma alternada. Após cada ensaio ocorria o desligamento, ajuste dos parafusos nos discos de desbalanceamento para cada condição, a parametrização da medição do analisador de vibração e em seguida o religamento do motor.

### B. Comparação dos Valores RMS

Através dos arquivos eletrônicos com os dados obtidos nos dois sistemas de medição durante os ensaios foi possível analisar os valores de velocidade e aceleração em RMS, que correspondem as médias quadráticas dos sinais.

#### 1) Sinal em Velocidade

A velocidade é a medida utilizada pelas principais normativas para definir os valores de limites de vibração aceitáveis. Assim, é possível visualizar a comparação dos dados entre os sistemas de medição nas condições determinadas e seus respectivos erros. Os valores obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela IV.

TABELA IV  
RMS DO SINAL EM VELOCIDADE (MM/S)

Teste	Condição	Analisador de vibração	Placa de aquisição	Erro (%)
1	Vazio	7,08	9,00	27,12
3	Vazio	5,99	7,80	30,22
5	Vazio	6,28	8,60	36,94
7	Desbalanceado	15,20	19,00	25,00
9	Desbalanceado	20,00	23,00	15,00
11	Desbalanceado	21,20	22,00	3,77

É possível observar que o erro diminui conforme aumenta o nível de vibração da máquina, isso pode ocorrer por conta da sensibilidade do sensor da placa de aquisição de dados. Quando o motor está desbalanceado, o nível de vibração em algumas harmônicas pode estar abaixo de 0,061 mg, que é a vibração mínima detectável por ele. Quando o nível global aumenta, a vibração em todas as frequências também pode aumentar, resultando acima desse valor mínimo detectável.

#### 2) Sinal em Aceleração

Igualmente ao caso anterior em velocidade, o erro em aceleração na vibração diminui conforme a vibração aumenta, o que pode também estar relacionado com a sensibilidade dos sensores. Além disto é possível perceber que o erro é menor na medição em aceleração do que em velocidade, isto pode ser ocasionado devido ao processo de discretização que necessita ser feito para se obter o valor em velocidade, visto que a placa fornece os dados em aceleração.

Para a medida em aceleração foi realizada a análise da mesma forma, onde são apresentadas na Tabela V comparando os valores entre os sistemas de medição e seus respectivos erros.

TABELA V  
RMS DO SINAL EM ACELERAÇÃO (M/S<sup>2</sup>)

Teste	Condição	Analisador de vibração	Placa de aquisição	Erro (%)
2	Vazio	1,43	1,80	26,00
4	Vazio	1,31	1,50	14,50
6	Vazio	1,35	1,70	25,90
8	Desbalanceado	3,05	3,50	14,80
10	Desbalanceado	4,01	4,30	7,23
12	Desbalanceado	4,23	4,50	6,38

Logo, devido a redundância dos dados obtidos nessa análise, este estudo se restringirá apenas à análise da resposta em velocidade. Soma-se também ao fato de que as normas trazem os parâmetros de análise em velocidade, e que a faixa de frequência medida pela placa é limitada a 426,67 Hz, onde se recomenda análise dos dados em velocidade, visto que a análise em aceleração é recomendada para a visualização em frequências mais altas.

### C. Comparação do Espectro de Frequência

Para todas as condições de ensaio propostas foram obtidos os dados possibilitando a comparação entre os valores da placa de aquisição de dados e o analisador de vibração.

#### 1) Análise dos Dados

Utilizando a interface de validação de dados criada em Python foi possível avaliar se os gráficos e os valores RMS entre a placa de aquisição de dados e o analisador de vibração eram similares, conforme Figura 10.

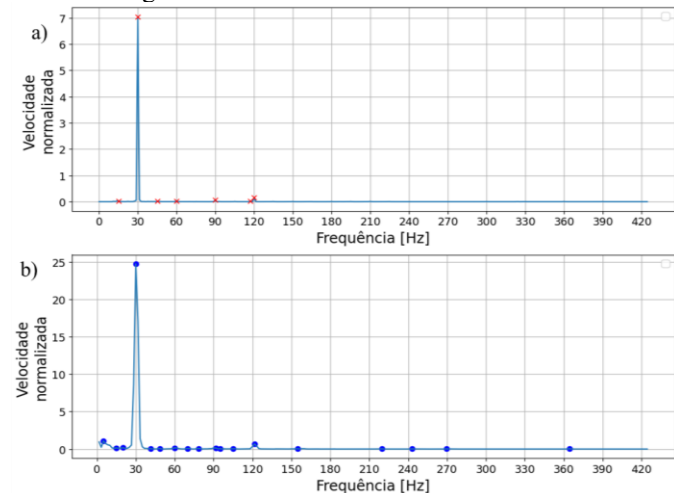


Figura 10 – Espectro de frequência em velocidade: a) Dados do analisador de vibração, b) Dados da placa de aquisição de dados [Autores].

Durante os testes verificou-se que os gráficos do espectro de frequências da velocidade da placa de aquisição de dados apresentavam amplitudes maiores que os gráficos do analisador de vibração, no entanto os picos de frequência ocorriam em pontos semelhantes conforme visto na Figura 10.

Em vista disso optou-se por analisar os gráficos em pu (por unidade) e em base logarítmica, pois foi levado em consideração que esta diferença de amplitude pode ser ajustada através de calibração da placa de aquisição de dados. Então, a partir dos dados obtidos foram recriados os gráficos utilizando

a ferramenta Python para ser possível prosseguir com a análise de comparação entre os sistemas de medição para os ensaios.

## 2) Motor a Vazio com Medição em Velocidade

Este item apresenta a análise gráfica entre o resultado dos sistemas com o motor a vazio com medição de velocidade, com os dados normalizados, apresentado na Figura 11.

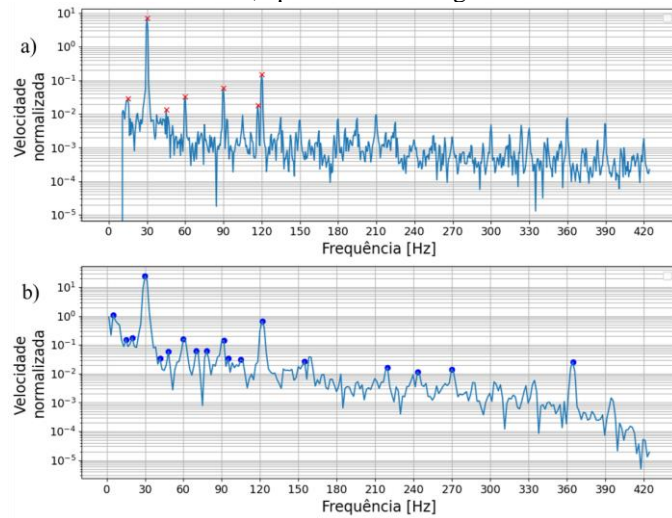


Figura 11 – Espectro de frequência em velocidade a vazio: a) Dados do analisador de vibração, b) Dados da placa de aquisição de dados [Autores].

Desta maneira é possível observar na Figura 11 que o analisador de vibração mede picos de velocidade acima de 0,01 pu em 30 Hz e em 120 Hz, já a placa de aquisição de dados consegue também medir esses mesmos picos, porém ela mede um pico a mais na frequência de 5 Hz. Este pico não é retratado pelo analisador de vibração porque ele estava configurado com um filtro passa alta de 10 Hz, o qual pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 11-a que é a frequência onde os sinais começam a ser coletados.

Além disso pode ser observado na Figura 11 é que a placa de aquisição de dados apresenta uma atenuação significativa em torno de 60 Hz. Uma das causas dessa diferença pode ser a fixação da placa no motor, onde a fixação por apenas um parafuso pode não garantir a rigidez mecânica necessária para garantir o processo de medição em todas as faixas de frequência. Outra causa ainda é que os dois sistemas não estão fixados exatamente nos mesmos pontos do motor. Dessa forma, a própria estrutura do motor pode causar a atenuação ou amplificação de algumas frequências, através da frequência natural e frequências modais da estrutura mecânica.

Através da Figura 11-a e Figura 11-b percebe-se que há uma diferença nas curvas, o gráfico gerado pelo analisador de vibração apresenta mais variações em frequência e em amplitude que o gráfico gerado pela placa de aquisição de dados. Investigando-se as causas dessas diferenças levantou-se a hipótese de que a resolução de frequência desses gráficos possa ser a causa. No entanto, conforme demonstrado nas seções IV.B.4) e IV.C.1), esse valor é de 0,833 Hz para a placa e 0,853 Hz para o analisador de vibração, dessa forma, essa não deve ser a causa dessa diferença, visto que os valores são muito próximos.

O gráfico apresentado na Figura 12 foi gerado para realizar uma análise dos dados no domínio do tempo, sendo possível observar que há uma diferença entre a quantidade de dados que

os dois sistemas coletam, o que resulta na diferença na resolução do espectro de frequência, pois quantos mais pontos se tem para análise, mais resolução se tem para a curva gerada [10].

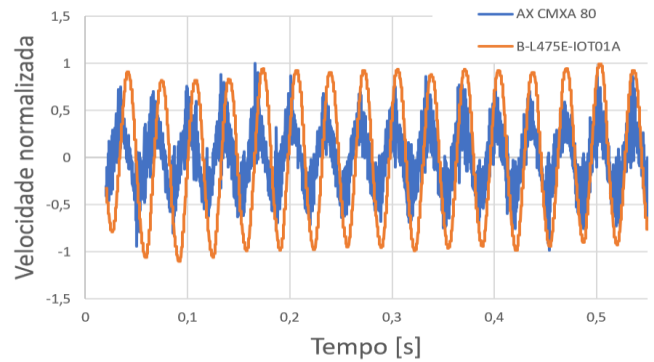


Figura 12 – Velocidade normalizada pelo valor de pico no domínio do tempo [Autores].

Outro ponto que pode causar diferença de valores das curvas no gráfico da Figura 12 é a sensibilidade dos sensores. Com baixa sensibilidade e baixa resolução do conversor AD, a resolução dos sinais de baixa amplitude pode ser comprometida, tornando-se evidente ao gerar os gráficos com a amplitude em eixo logarítmico.

## 3) Motor Desbalanceado com Medição em Velocidade

Neste ensaio observa-se na Figura 13, que ocorrem picos à cada 30 Hz na medição realizada pelo analisador de vibração, no entanto a placa conseguiu medir apenas 2 picos elevados.

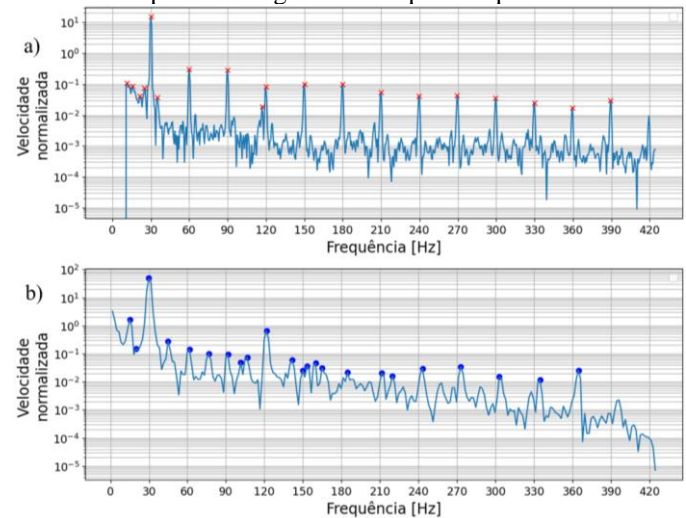


Figura 13 – Espectro de frequência em velocidade condição desbalanceado: a) Dados do analisador de vibração, b) Dados da placa de aquisição de dados [Autores].

Percebe-se que através da Figura 13 a frequência de 60 Hz também não é verificada nesse gráfico, sendo as possíveis causas as mesmas do item anterior. A aparente baixa sensibilidade nas harmônicas de frequências mais altas pode ser atribuído a baixa velocidade de aquisição.

## D. Análise de Repetibilidade dos Ensaios

Para verificação dos resultados dos ensaios e tornar possível sua reprodução, os dados dos testes em condições iguais foram comparados, fazendo a sobreposição dos valores obtidos pelo analisador de vibração, conforme Figura 14.



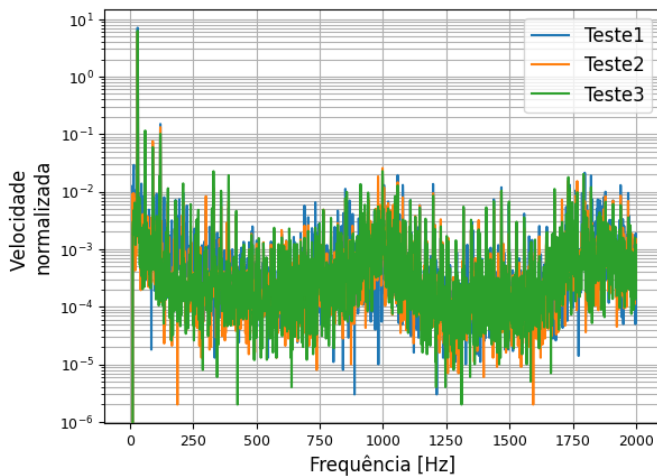


Figura 14 – Verificação da repetibilidade entre os testes realizados com o analisador de vibração [Autores].

Da mesma forma foi feita a análise para os dados recebidos pela placa de aquisição de dados, resultando na Figura 15.

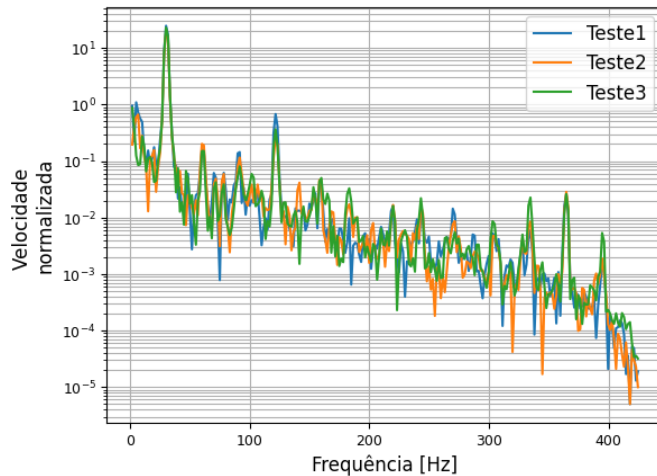


Figura 15 – Testes realizados com a placa de aquisição de dados [Autores].

Em ambos os casos, apresentado na Figura 14 e Figura 15, observa-se que os gráficos das medições se sobrepõem, demonstrando estabilidade no processo de ensaio e repetibilidade. Desta forma, é seguro afirmar que as análises aqui feitas podem ser reproduzidas a qualquer momento, confirmando que o sistema é confiável para uma possível análise preditiva.

### E. Interface Gráfica

Para facilitar a análise e visualização dos dados foi utilizada o *dashboard* da plataforma WEGnology conforme mencionado na seção IV.A.3).

Neste estudo foi configurado um *dashboard* conforme descrito na Figura 16. Essa tela pode ser visualizada em qualquer navegador de internet no computador ou na versão *mobile* para *smartphones*, desde que estejam conectados na internet. Desta maneira torna-se uma ferramenta útil para análise da manutenção preditiva devido ao acompanhamento remoto em tempo real dos equipamentos.

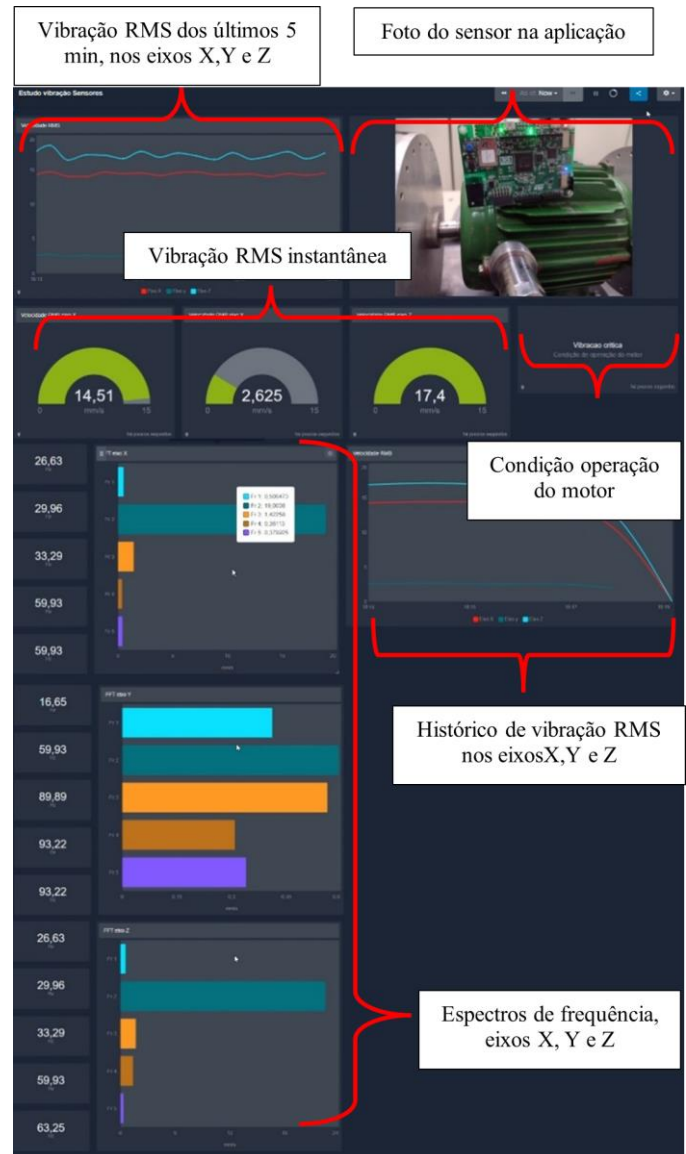


Figura 16 – *Dashboard* desenvolvida [Autores].

Conforme exibido na Figura 16, o *dashboard* consolida as informações enviadas pela placa de aquisição de dados e os exibe em forma gráfica, facilitando a compreensão dos mesmos. Os gráficos das vibrações RMS e o campo indicativo de condição de operação do motor exibem os dados recebidos pelo *payload* descrito na Figura 5.

Já os espectros de frequência exibem os valores recebidos pelo *payload* descrito na Figura 6. No *dashboard* também é possível visualizar um gráfico contendo as amplitudes para as cinco primeiras frequências que ultrapassam a amplitude de 0,1 mm/s. Estes espectros auxiliam um especialista em vibração a analisar essas frequências e decidir se é necessário se deslocar ao local para intervenção.

A validação do *dashboard* se deu através da comparação dos dados exibidos na Interface de Validação em Python.

## VI. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou avaliar e estudar a implantação de um sistema de monitoramento remoto para vibrações em máquinas elétricas na indústria, a fim de prever defeitos através do

histórico de medição de espectros de frequência de vibrações. A análise de vibração pode ser utilizada para detecção de diversos tipos de defeitos em máquinas elétricas, tanto mecânicos quanto elétricos. Neste artigo optou-se por trabalhar somente com a situação de desbalanceamento, sendo uma das falhas mecânicas mais comuns em processos industriais.

Neste estudo foi desenvolvido um sistema de medição utilizando a placa de aquisição de dados B-L475E-IOT01A da ST Microelectronics, a qual realiza as medições de vibração e publica os valores via internet no *broker* WEGnology, através de uma conexão *Wi-Fi*. O sistema demonstrou-se capaz de lidar tanto com essa publicação de dados quanto com o tratamento dos mesmos, o que inclui integração numérica, cálculo de valor RMS e de espectro de frequência.

Para validação dos dados, o sistema desenvolvido foi submetido a medição de vibração em um motor elétrico e foi feita uma comparação com o analisador de vibração Microlog AX CMXA 80 utilizado como sistema de referência, posicionado próximo à placa de aquisição de dados.

Na medição de valores RMS das vibrações, observou-se que, tanto em aceleração quanto em velocidade, os valores medidos apresentavam erros de no máximo 37,0% em vibrações consideradas normais à moderadas conforme padrão estabelecido na norma ISO 10816-3. Observou-se que esse erro diminui conforme a vibração global do motor aumenta, chegando a até 3,77% na condição de vibração crítica. Dessa forma, o sistema proposto poderá ser utilizado em medição de vibração remota, desde que para identificar condição de criticidade de operação. Para a medição de valores absolutos, é necessário realizar uma curva de ajuste, através de um processo de calibração da placa, de forma a corrigir os erros de medição.

Já nas medições em frequência foi observado que o sistema apresenta uma atenuação significativa na faixa de frequências em torno de 60 Hz, o que é um indicativo de que o método de fixação da placa utilizada ou o local de medição não são adequados às medições de vibração. Foi observado também que a sensibilidade do acelerômetro e a baixa velocidade de aquisição de dados utilizados na placa aumentavam significativamente o erro em medições de harmônicas com pequenas amplitudes. Dessa forma, a análise de falhas com base no espectro de frequência utilizando o sistema proposto fica limitada às condições em que as amplitudes analisadas sejam elevadas.

Por fim conclui-se que analisando o ponto de vista do consumidor, investir em sensores de menores custos possuindo um acompanhamento remoto apresentará bons resultados em sua empresa em relação a necessidade de um técnico e um equipamento portátil de custo elevado, implementando-se assim as novas tecnologias da Indústria 4.0.

#### PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados e conclusões obtidas neste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros a utilização de microcontroladores com maior memória RAM, ou então utilizar o mesmo microcontrolador, mas com memória RAM e *Flash* externas para possibilitar o cálculo da FFT com mais pontos. Sugere-se também realizar otimizações nos cálculos do espectro de frequência, realizando-os a cada amostra recebida, dessa forma os dados não precisariam ser armazenados na

memória e poderiam ser enviados diretamente para nuvem assim que processados. Outra sugestão ainda é desvincular o acelerômetro da placa de aquisição de dados, já que o método de fixação da placa no motor pode ter influenciado na medição de uma faixa de frequência do espectro.

#### REFERÊNCIAS

- [1] C. D. Anjos - ABINEE, "O futuro digital é aqui e agora", in Firjan - Indústria 4.0 no Brasil: oportunidades, perspectivas e desafios, Rio de Janeiro, Jan. 2019, pp. 30-32. [Online]. Disponível: <<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-inovacao/industria-4-0-no-brasil-oportunidades-perspectivas-e-desafios.htm>>.
- [2] S. B. Righetto, "Manutenção Preditiva 4.0: Conceito, Arquitetura e Estratégias de Implementação", Florianópolis, 2020. [Online]. Disponível: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/204345>>.
- [3] Confiabilidade e Manutenibilidade, NBR 5410, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1994.
- [4] Logique, "Indústria 4.0: A revolução dos dados na sua indústria", Indústria 4.0. Disponível: <<https://www.logiquesistemas.com.br/blog/industria-4-0/>>. (acessado Out. 11, 2021).
- [5] TOTVS. "Manutenção Preditiva: o que é, como funciona, vantagens e dicas", Gestão Industrial. Disponível: <<https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/manutencao-preditiva/>>. (acessado Ago. 21, 2021).
- [6] A. K. Pinto e J. A. N. Xavier, "Manutenção: função estratégica", 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009, pp. 235-267.
- [7] CHAPMAN, Stephen, J., "Fundamentos de máquinas elétricas", 5ªed., Ed. Verônica de Abreu Amaral: Porto Alegre, 2013, pp. 1-2. [Online]. Disponível: <<http://www.paftech.com.br/gallery/fundamentos%20de%20maquinas%20eletricas%20chapman.pdf>>.
- [8] Alfacom, "O que é IoT?" IoT – Internet of Things. Disponível: <<https://alfacom.net/portfolio-item/iot-internet-of-things/>>. (acessado Nov. 14, 2021).
- [9] R. F. M. Marçal, "Um método para detector falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibrações e lógica fuzzy", D.R. thesis, UFRGS, Porto Alegre, 2000. [Online]. Disponível: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1969/0/00362586.pdf?sequence=1>>.
- [10] B. P. Lathi, "Sinais e sistemas lineares", 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008, pp. 73; 483-484; 678-680.
- [11] H. P. Silva, "Vibrações em Máquinas Elétricas Girantes", WEG Equipamentos Elétricos S/A, Jaraguá do Sul, Curso de curta duração QPET, 2010.
- [12] Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by measurements on non-rotating parts – Part 3, ISO 10816-3, International Organization for Standardization, Suíça, 2009.
- [13] Medição de Vibração, "Motor Scan", WEG Equipamentos Elétricos S/A, Nota Técnica, 2021.
- [14] S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, A. House, "MEMS Mechanical Sensors", 1. ed. London, 2004, cap. 8. - Inertial Sensors.
- [15] "Datasheet LSM6DSL iNEMO inertial module: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope." Fabricante ST Microelectronics. Disponível: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6dsl.pdf>>. (acessado Set. 3, 2021).
- [16] "AT Commands." Activexperts Softwares. Disponível: <<https://web.archive.org/web/20110815214002/http://www.activexperts.com/mobile-messaging-component/at/>>. (acessado Set. 3, 2021).
- [17] T. Cooklev, "Wireless communication standards: a study of IEEE 802.11, 802.15 and 802.16", 1. ed. Nova Iorque: IEEE, 2004, pp. 98-103; 113-116.

- [18] “Introducing JSON”. JSON. Disponível em: <<http://www.json.org/json-en.html>>. (acessado Out. 2, 2021).
- [19] WEG Digital Solution. “Plataforma IoT da WEG”. WEGnology. Disponível: <<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/digital-solutions/wegnology>>. (acessado Nov. 14, 2021).
- [20] “Sensor and motion algorithm software expansion for STM32Cube.” X-CUBE-MEMS1. Disponível: <[https://www.st.com/resource/en/data\\_brief/x-cube-mems1.pdf](https://www.st.com/resource/en/data_brief/x-cube-mems1.pdf)>. (acessado Set. 3, 2021).



**Rafael de Oliveira Barboza** cursa o último semestre da graduação em Engenharia Elétrica no Centro Universitário Católica de Santa Catarina. Atua como Projetista de Firmware na seção de Engenharia de Segurança e Sensores do departamento Critical Power, da empresa WEG Automação S/A, situada na cidade de Jaraguá do Sul, SC.

Formações: Mecânico automobilístico pelo SENAI Almirante Tamandaré (2005) e Tecnólogo em mecatrônica Industrial pela Faculdade de Tecnologia Termomecânica (2008).



**Vanessa Caroline Parpineli** cursa o último semestre da graduação em Engenharia Elétrica no Centro Universitário Católica de Santa Catarina. Atua como Assistente Técnico na seção de Assistência Técnica Mercado Externo do departamento Assistência Técnica, da empresa WEG Equipamentos Elétricos

S/A, situada na cidade de Jaraguá do Sul, SC.

Formações: Aprendizagem Industrial em Eletrotécnica pelo SENAI SC (2016) e Inglês Intermediário pela Escola de Idiomas Yázigi em Jaraguá do Sul (2018).