



ANÁLISE DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS UTILIZANDO SENSORES DE BAIXO CUSTO, COMO MÉTODO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA.

Matheus Mattei Vavassori¹

Elvys Isaias Mercado Curi²

Richard de Medeiros Castro³

Douglas de Medeiros Deolindo⁴

Guilherme Bampi Righeto⁵

Resumo: A manutenção preditiva é um método de manutenção que prediz o risco de falhas avaliando o estado de funcionamento de uma máquina, no qual se utiliza diferentes técnicas para extrair informações, dentre a principais estão, vibração e temperatura. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um dispositivo que colete dados, usando sensores analógicos e microcontrolador de baixo custo que funcionem com conceito de *IoT*, ou seja, Internet das coisas. O protótipo foi projetado para realizar atividades de manutenção preditiva, por meio da técnica de análise de vibração e de temperatura. No projeto foram escolhidos sensores que se comunicam com um microcontrolador ESP32, sendo o de vibração um acelerômetro capacitivo ADXL 335 e o de temperatura um termistor LM35. Os sensores enviam sinais em tempo real para observar o estado de funcionamento de uma máquina, onde é possível visualizar no domínio do tempo e da frequência, através do software LabVIEW®. A comunicação entre o ESP32 e o computador será realizada através do sinal *Wireless*, utilizando o protocolo ModBus, com esse tipo de comunicação não haverá a necessidade da utilização cabos entre o componente que envia os dados e o que processa. Os ensaios para avaliação de desempenho do protótipo se realizaram em laboratório, comparando os sinais obtidos com os sinais dos sensores convencionais. O principal desafio do protótipo foi manter estável as suas medições, já que foi observado que estes sensores não são tão precisos quanto aos sensores padrões. Porém, o desenvolvimento deste protótipo foi o mais econômico do mercado, com custo de R\$295,10, tornando o mesmo viável para ser executado.

Palavras-Chave: Acelerômetro. ESP32. Vibrações. Manutenção preditiva.

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: matheusm.vavassori@hotmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: elvys.curi@satc.edu.br

³ Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: richard.castro@satc.edu.br

⁴ Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: douglas.deolindo@satc.edu.br

⁵ Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: guilherme.righeto@satc.edu.br



1 INTRODUÇÃO

Atualmente as empresas necessitam que seus equipamentos tenham manutenção mais eficientes, com uma produção de qualidade e com baixo custo de operação. Os objetivos para garantir produtividade é baseado na análise de quatro pontos, que são: qualidade, custos, tempo e confiabilidade. Uma área que engloba esses quatro pontos é a manutenção, e quando aplicada com eficiência é possível obter o correto funcionamento das máquinas, aumentando sua disponibilidade e obtendo retorno financeiro.

A manutenção preditiva é um método que, através de ferramentas, é possível detectar indícios de falhas em equipamentos, que podem ser, com estetoscópio eletrônico, onde se tem a possibilidade de realizar a detecção de ruídos, com câmera termográfica, onde é possível detectar aquecimento ocasionado por rolamentos desgastados, e por fim, outra ferramenta utilizada é a análise de vibrações, que por meio de sinais da aceleração é possível identificar defeitos ocasionados pelas forças dinâmicas exercidas pelo equipamento.

Um dos aspectos que dificulta o uso da manutenção preditiva, nas pequenas ou médias empresas, é o alto custo, por exemplo, para realizar análises de falha usando sinais de vibração, empresas especializadas cobram entre 20 e 50 reais por cada componente a ser analisado, se for um motor elétrico e dois mancais, são no mínimo quatro elementos a analisar, se o equipamento estiver em bom estado, seria apenas um custo para monitorar a saúde instantânea do equipamento.

A indústria 4.0 promove o uso de inteligência artificial, sendo elas, *IoT*, *machine learning*, *big data*, e entre outros. A barreira que ainda é encontrada para a aplicação da indústria 4.0 é a resistência que os investidores possuem em relação ao investimento necessário, que abrange as modificações/adaptações de equipamentos.

Nos últimos anos, a literatura técnica e acadêmica realizou estudos com sensores alternativos, entre eles alguns de baixo custo, porém sem software que complementasse as atividades de coleta e processamento de dados. A opção de ter um sensor de baixo custo ligado de maneira permanente em um componente crítico, permitiria estabelecer o estado de saúde do equipamento, com a vantagem de antecipar-se à falha e programar sua manutenção, tornando-se benéfico econômico.



O programa que coleta e processa os dados é um desafio a ser enfrentado, já que a informação de sinais de vibração ou temperatura, sem um sistema ou programa de análise da falha não seria útil para as atividades de manutenção.

O objetivo geral do projeto é desenvolver um sistema de monitoramento do estado de uma máquina exemplo, usando sinais de vibração e de temperatura, com sensores de baixo custo. Para processar os dados será utilizado o software LabVIEW®, gerando os gráficos dos dados coletados pelo acelerômetro no domínio do tempo e da frequência, e a temperatura em tempo real.

2 DEFINIÇÃO DE MANUTENÇÃO

A norma ABNT NBR 5462 define a manutenção como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. Classifica em nível de intervenção as ações de manutenção sendo os mais comuns a manutenção corretiva, preventiva e a manutenção preditiva. Existem outros tipos de intervenções tais como a programada, não programada de campo, remota, automática e diferida.

2.1 MANUTENÇÃO PREDITIVA

A manutenção preditiva permite o acompanhamento do equipamento através de medições realizadas quando ele estiver em pleno funcionamento, o que possibilita uma maior disponibilidade, já que se realizaria a intervenção, somente quando estiver próximo de um limite estabelecido pela equipe de manutenção. A ABNT NBR 5462, por sua vez define a preditiva como uma manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

A manutenção preditiva prediz a falha do equipamento e quando se resolve fazer a intervenção para o reparo dele, o que acontece, é na verdade uma manutenção corretiva programada. (NOGUEIRA; GUIMARÃES; SILVA, 2012).



2.1.1 Parâmetros para análise da manutenção preditiva

Os parâmetros medidos, devem fornecer informação que permitam a inspeção de elementos específicos da máquina ou do tipo de falha, o método comum de medição é por análise de vibrações. Através dos dados e correta análise pode-se indicar a natureza da falha. Pode-se, ainda, montar um histórico do equipamento que permitirá estabelecer quais os elementos de falha mais frequentes e o tempo decorrido entre falhas (RITTER, 1996).

Segundo Marçal (2000), cada força excitadora existente em diferentes pontos da máquina gerará uma harmônica da vibração determinando um certo deslocamento, uma certa velocidade e uma dada aceleração.

Classifica-se as componentes harmônicas da vibração em dois grupos, estabelecendo a divisão pelo valor da frequência de rotação do eixo:

- Conjunto de baixa frequência (valores de frequência até cinco vezes a rpm do eixo);
- Componentes de alta frequência (valores de frequência maiores que cinco vezes a rpm do eixo).

2.1.2 Análise vibracional no monitoramento de equipamentos

As máquinas em operação, geram vibrações que informam o processo de deterioração. Ao acompanhar o progresso do nível de vibração, é possível obter informações sobre a condição da máquina. Essa vibração se transmite a todo o conjunto da máquina e produzem espectro de frequências. A análise dessa assinatura possibilita verificar se o equipamento está em condições normais de funcionamento ou com algum defeito incipiente que pode levar a uma falha (MARAN, 2012).

Todo equipamento rotativo que possui um sistema rotor-mancal pode ser avaliado através das forças dinâmicas que estão atuando sobre ele quando ele se encontra em operação. Condições tais como instabilidade, desbalanceamento, desalinhamento, mudanças no ajuste, desgaste e até mesmo fadiga em seus componentes, geram vibrações específicas e características. A vibração característica mais comum ocorre na frequência de rotação da máquina.



De acordo com Dos Reis (2016), o monitoramento da condição de máquinas rotativas usando sinais de vibração são realizados em dois níveis:

- Medição global dos níveis de vibração;
- Análise do espectro de frequência.

2.2 FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO

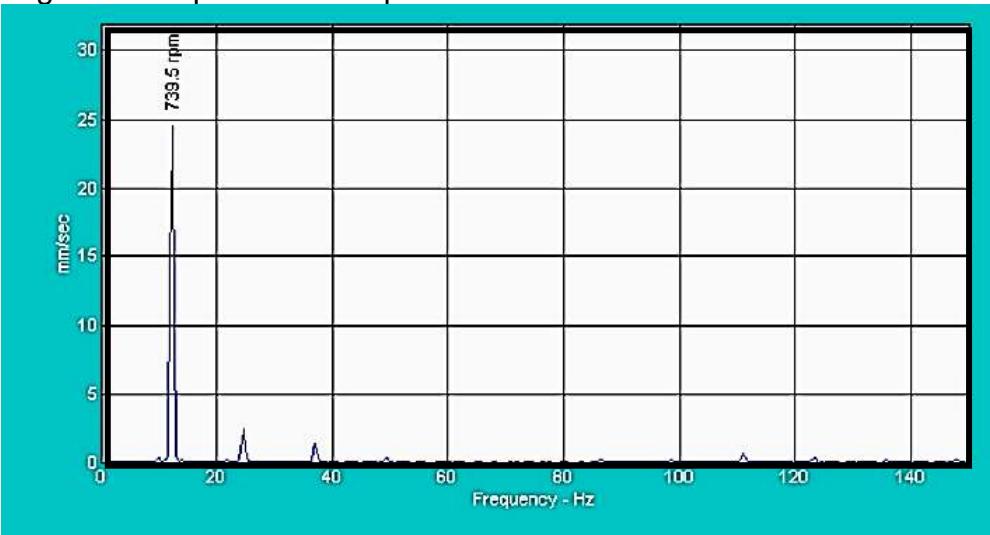
Essa análise permite que se faça uma avaliação “global” do problema, conforme ele evolui, não apenas uma determinada frequência aumenta sua amplitude, mas também se aumenta o número de frequências que possuem mais energia, e com isso o valor RMS aumenta. Esse tipo de medição é muito utilizado na avaliação da evolução da falha (Martins, 2012).

2.2.1 Parâmetro para análise de vibração

É a análise do gráfico de Amplitude de vibração X Frequência, que é gerado aplicando-se a transformada rápida de Fourier (FFT) no sinal de vibração no domínio do tempo. Este gráfico é chamado de espectro de frequência e possibilita identificar a amplitude de cada frequência de vibração e assim é possível identificar quais são as frequências mais relevantes para uma determinada medição e relacionar as frequências observadas em destaque com as fontes que geram aquelas frequências e assim detectar se existe e onde é o defeito na máquina (DOS REIS, 2016).

Conforme Marçal (2000), o método de análise de frequências, baseado no teorema de Fourier, estabelece que qualquer função periódica pode ser decomposta por uma série de ondas sinusoidais puras com frequências distintas e múltiplas harmônicas de frequências fundamentas. Ao se utilizar de transdutores sensores, pode-se chegar a um diagnóstico do estado de funcionamento ou alterabilidade do curso do sistema. Na Figura 1 está representada um espectro de frequência.

Figura 1 - Espectro de frequência



Fonte: Mantenimiento Mundial (2012)

2.2 NOVAS TECNOLOGIAS PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Um dos fatores que impulsionou o desenvolvimento de novos métodos para análise de vibrações é o custo para a aquisição de um equipamento. O valor por equipamento em geral pode variar muito, de acordo com a complexidade do equipamento e da análise, periodicidade de medição e até mesmo custo de deslocamento de pessoal, porém, para contratos de médio à grande porte, pode-se estimar que o custo por ponto medido esteja por volta de R\$15,00. (MARTINS, 2012)

Com a evolução da tecnologia tais como o aumento da capacidade de processamento e da memória, o armazenamento na nuvem e a comunicação *wireless* (sem fio) se incrementaria o desenvolvimento tecnológico dos instrumentos de aquisição e técnicas de processamento. Pelo que se visualiza que a tecnologia de análises de sinais de vibração vai evoluir tanto na parte de opções de instrumentos assim como das técnicas de processamento de dados, disponibilizando informação em tempo real com maior eficiência na predição de falha (RODRIGUES, 2018).

Em caso de motores de indução com falhas mecânicas e/ou elétricas requerem alguns cuidados especiais tais como o processamento de dados. Vitor (2015) realiza uma pesquisa para analisar a falha de curto-círcuito de estator, de motores de indução, neste caso o método de análises de sinais de corrente estatórica usando a técnica de processamento de transformada *wavelet*, *rms* e de medida de



potência, permitem detectar este tipo de falha. Por outro lado, o tipo de acelerômetro interfere na detecção de falha nestes motores de indução.

A predição de falha de máquinas estacionárias em muitos casos são aplicados a técnica de análises de vibrações, mas também podem ser realizadas com outras tecnologias. Algumas destas tecnologias são implementadas monitorando utilizando diferentes tipos de sensores. No estudo de predição de falha realizado por Böesch (2011), monitora sinais de vibração e sinais do torque de um sistema motor atuador, e realiza um análises de correlação cruzada entre os sinais para identificar assinatura de sinais de falha.

2.2.1 Sensores de baixo custo

González (2014) desenvolveu um equipamento de análise de vibração de baixo custo, usando um microcontrolador *Arduino DUE*, e acelerômetros *MEMS Microelectromechanical Systems*, para estabelecer um programa de Manutenção Preditiva padrão. O acelerômetro digital MEMS tem um custo muito inferior ao sensor piezo elétrico padrão. Este equipamento foi avaliado em um laboratório e em campo. As principais deficiências do protótipo são instabilidade nas medições ou medições diferentes em dias diferentes, os espectros de frequências apresentam variações de amplitude e impossibilidade de realizar uma análise em tempo real.

Segundo Pedotti (2019) dispositivos de baixo custo para medição de vibrações são transdutor acelerômetro tri axial MEMS (*Microelectromechanical Systems*) que operam até 4000 RPM. Estes mostram espetro com qualidade até a sexta ordem, fácil instalação, com conectividade sem fio, facilitando sua inserção à internet das coisas (IoT - *Internet of Things*) e totalmente *opensource*. Foi testado em um motor BLDC e uma bomba centrífuga, detectando-se desbalanceamento, carga, cavitação, entre outros. Permitiu utilizar em diversas técnicas de análise de dados foram utilizadas, tais como análise de gráfico tipo *waterfall*, regressão logística, linear SVM e redes neurais artificiais, e em todas delas foi possível diagnosticar as perturbações inseridas. Neste caso também foram usados pré-processados em um microcontrolador ESP 32 de baixo custo.

Para Linessio (2016), os acelerômetros comuns são afetados pela interferência do campo magnético, nesse caso recomenda usar acelerômetro óticos

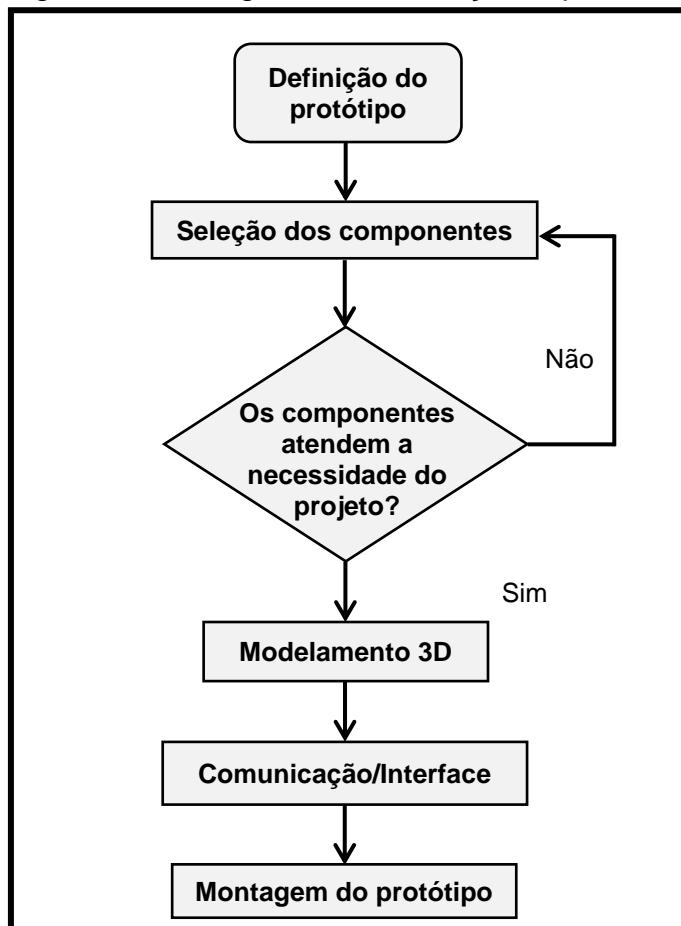
biaxiais, que não seriam afetados pelo campo magnético, possibilitando a detecção de alguns tipos de falhas usando sinais de vibração. A maior desvantagem seria o custo, já que a instrumentação de motores de baixa capacidade não é viável economicamente, mas em equipamentos maiores é o único método confiável.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A primeira parte do projeto, almeja desenvolver um equipamento que realize um sistema de monitoramento de estado de uma máquina, consiste na identificação de parâmetros importantes que forneça informação das tendências de falhas das máquinas rotativas.

O Fluxograma da Figura 2 descreve a sequência de estruturação do projeto, e a tabela 1 mostra o tipo de energia utilizada para cada sensor escolhido.

Figura 2 – Fluxograma de execução experimental



Fonte: Do autor (2021).



Quadro 1 – Energia avaliada no funcionamento da máquina e o sensor escolhido.

Parâmetro	Método de análise	Sensor
Vibração	Comportamento das ondas de vibração avaliando frequência e amplitude.	Acelerômetro
Radiação térmica	Identificação das fontes de calor e temperatura.	Termistor

Fonte: Do autor (2021).

O projeto se estrutura na ideia de implementar um equipamento de fácil instalação, contendo poucos componentes eletrônicos, ocupando pouco espaço físico, utilizando comunicação sem cabo na interface e ser de baixo custo.

3.1 COMPONENTES UTILIZADOS NO SISTEMA DE MEDIDA

Os sensores escolhidos são analógicos, os quais fornecem sinais a serem processados por um microcontrolador. A comunicação entre os sensores e o equipamento registrador de dados foi projetado com base no protocolo de comunicação Modbus TCP/IP que nesse caso utilizou o sinal *Wireless* para transmitir os dados, de modo que a comunicação seja sem cabo entre o elemento captador de sinal e o elemento registrador de dados.

Os componentes utilizados para confecção do protótipo, foram:

- Microcontrolador ESP32: utiliza-se na comunicação entre a interface e os sensores. A escolha desse componente, foi definida através de alguns pontos, sendo elas: interface de comunicação simples, baixo consumo de energia e um processador de resposta rápida. Dentre todas as especificações do microcontrolador, a que se destaca é a sua taxa de operação de frequência de 2,4 GHz, com possibilidade de comunicação *Bluetooth* ou *Wireless*. No projeto utilizou-se a comunicação *Wireless* tornando o mesmo mais eficiente e robusto.

- Acelerômetro ADXL335: este sensor fornece sinais de vibração nos três eixos retangulares (X, Y e Z) e mede a aceleração de até 3g. Tem como função detectar a aceleração estática da gravidade assim como a aceleração dinâmica, e possui a capacidade de limitar a banda nos pinos X, Y e Z.

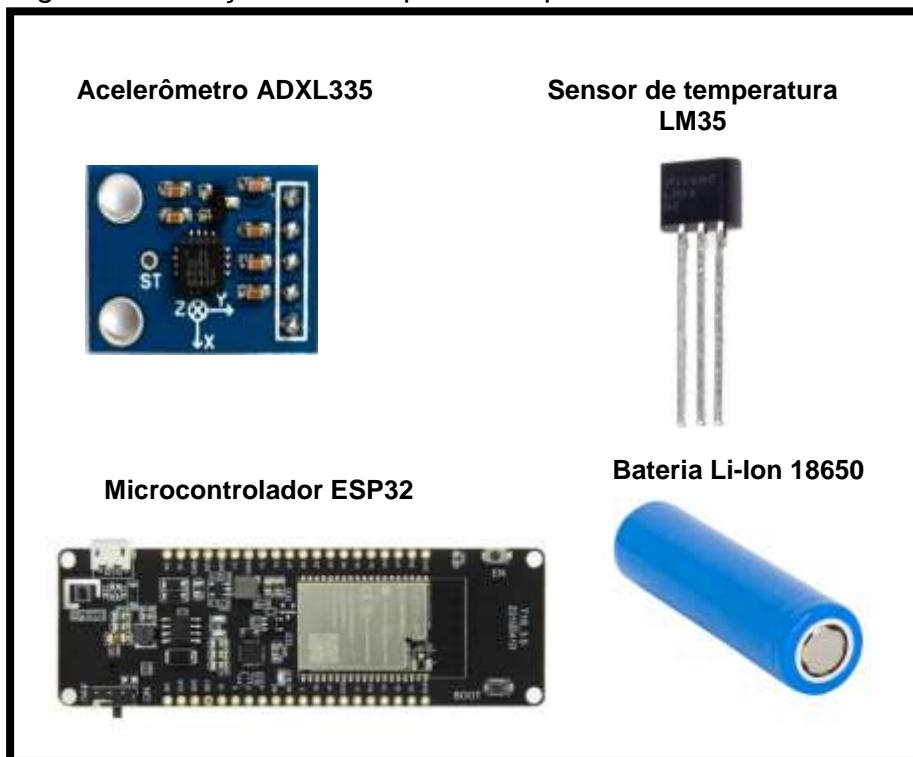
- Sensor de temperatura LM35: este tipo de sensor tem uma tensão de saída linearmente proporcional à temperatura em graus Celsius. Uma das vantagens desse componente é de não precisar de outro dispositivo de condicionamento de sinal,

reduzindo o custo do projeto. A sensibilidade é de 10 mV/°C e a faixa de medida é de -55 a 150°C e sua tensão de operação é de 4 a 20V.

- Bateria Li-Ion 18650: As baterias recarregáveis de Lítio se apresentam basicamente em duas configurações, as de Lítio-Polímero (Li-Po) e as chamadas de Lítio-Ión (Li-Ion). Para o protótipo foi utilizado a configuração do tipo Li-Ion, do modelo 18650 e com capacidade de 2200 mAh.

Os sensores são conectados dentro de um pequeno espaço com o microcontrolador. Na Figura 3 está representado os componentes utilizados, nela se observa a imagem do acelerômetro, do termistor, do microcontrolador e da bateria de Li-Ion.

Figura 3 - Relação dos componentes para coleta de dados



Fonte: Do autor (2021).

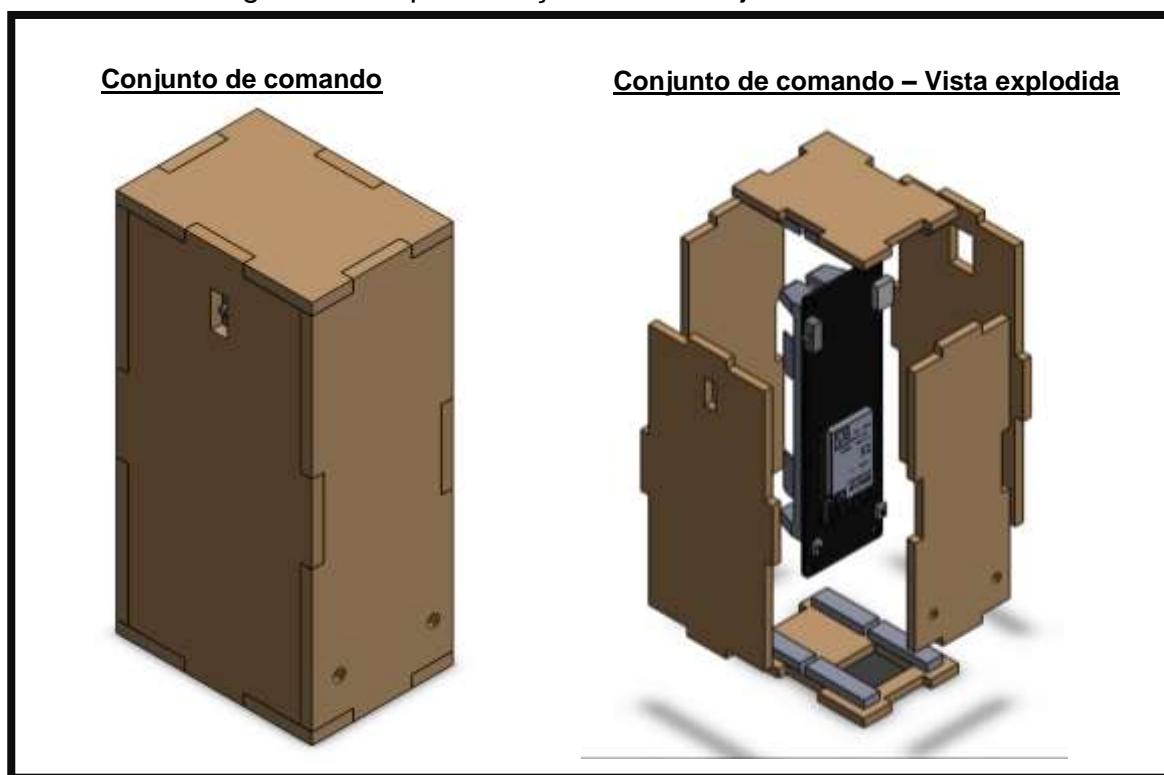
3.2 MODELAMENTO 3D

Para disposição, montagem e proteção dos componentes, utilizou-se um invólucro de MDF de espessura 3 mm, onde foram separados em dois conjuntos, que

são o de comunicação ou comando e o conjunto de sensores. No conjunto de comando, foi colocado o microcontrolador ESP32 juntamente com a bateria e já o conjunto dos sensores foram alocados o acelerômetro ADXL 335 e o sensor de temperatura LM35.

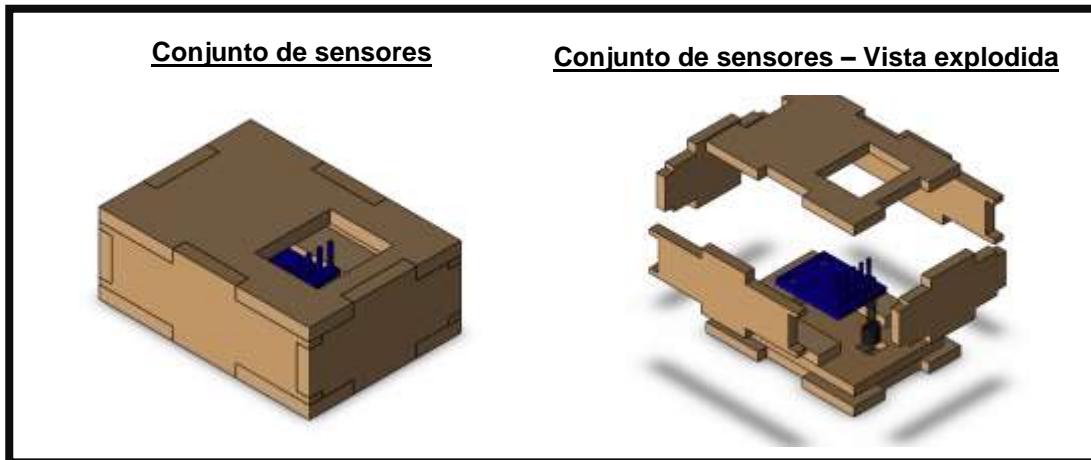
Ao executar o modelamento 3D, alguns cuidados foram necessários, como por exemplo, respeitar um espaçamento frontal entre o microcontrolador ESP32 e a estrutura de MDF, para que seja possível realizar as conexões elétrica dos sensores, e o outro cuidado, seria em realizar a fixação do microcontrolador, que nesse caso foi utilizado calços em MDF, que também funcionam como guias. Na Figura 4 está representada o conjunto de comando e na Figura 5 o conjunto dos sensores.

Figura 4 – Representação 3D do conjunto de comando



Fonte: Do autor (2021).

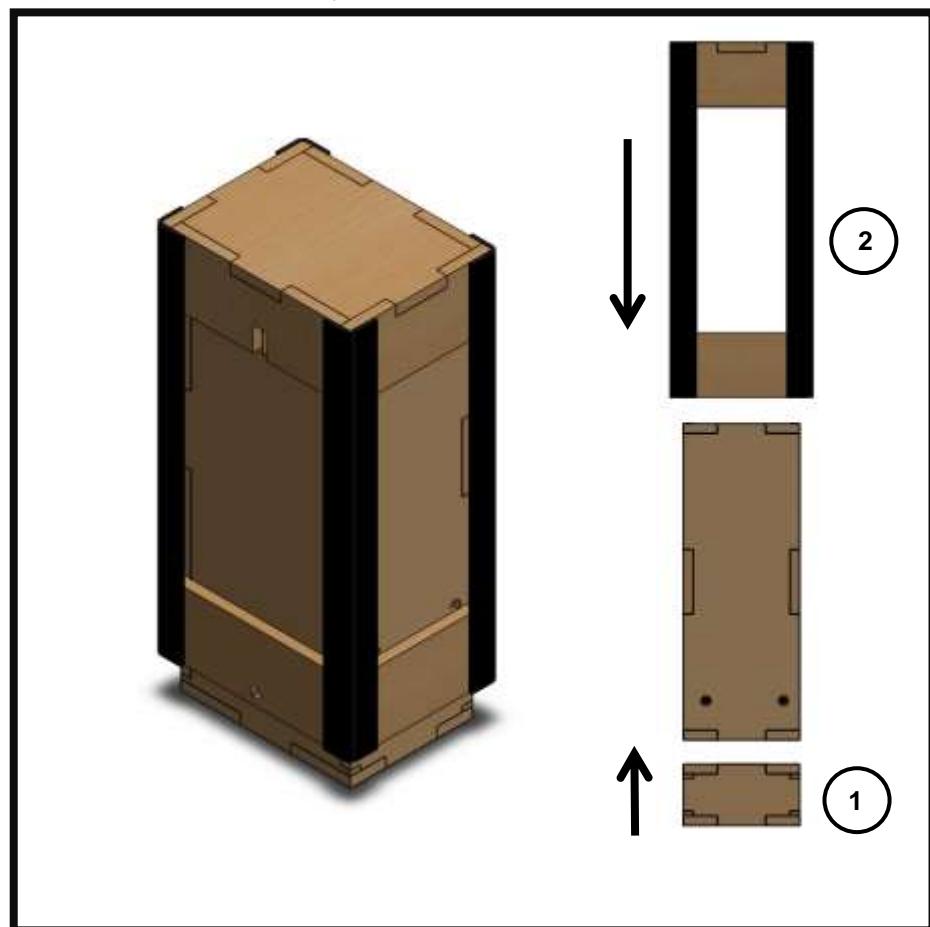
Figura 5 – Representação 3D do conjunto de sensores



Fonte: Do autor (2021).

Para realizar a fixação entre os dois conjuntos, foi utilizado uma estrutura de MDF e cantoneiras de alumínio, com parafusos nas laterais. O intuito com esse suporte, é não precisar de fixação com parafusos entre os dois conjuntos, facilitando assim a troca da bateria e troca dos sensores, caso necessário. Outro ponto importante desse esse método de montagem é a facilidade na ligação via cabos elétricos para conexão dos sensores. Na Figura 6 está representada a montagem, bem como a sequência, onde o item 1 apresenta o conjunto de sensores e o item 2 o suporte de fixação.

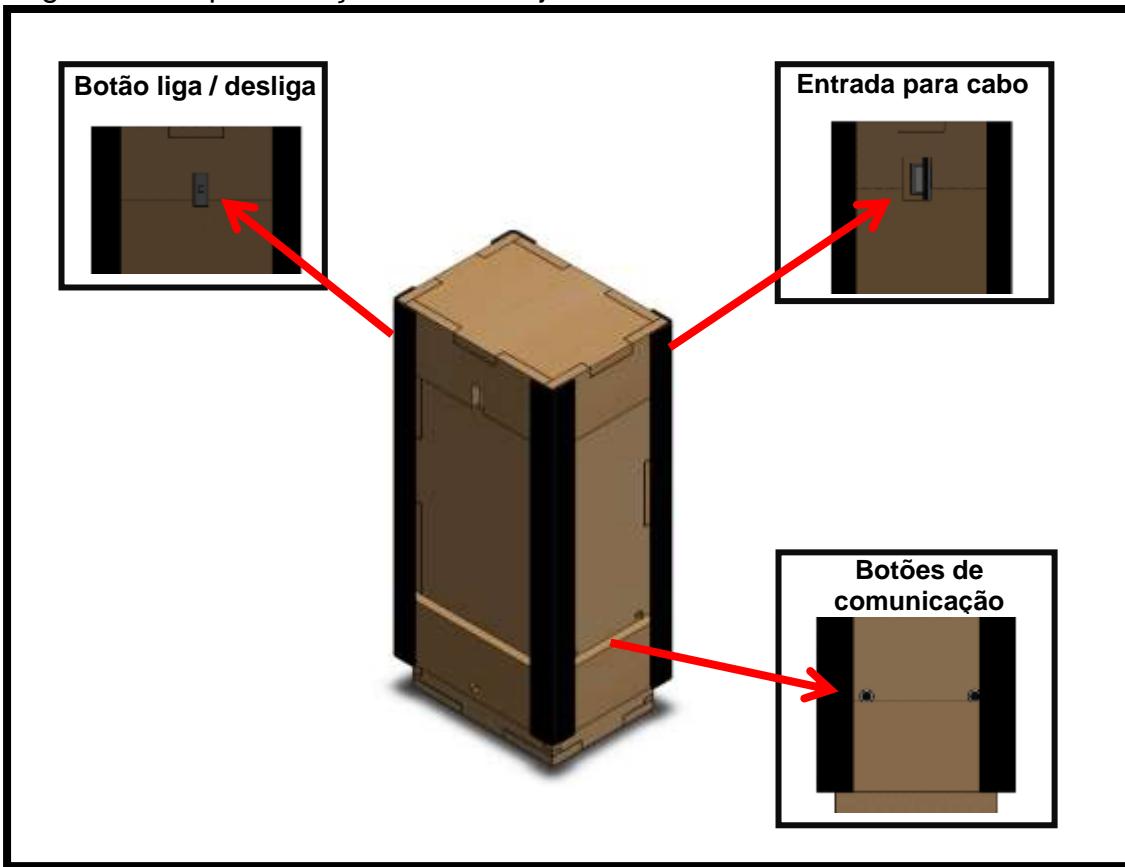
Figura 6 – Representação 3D do conjunto de sensores



Fonte: Do autor (2021).

Para o projeto foi necessário prever alguns locais de acesso, um deles tem por finalidade realizar a conexão do cabo MicroUSB, que é utilizado para transferir o programa para o microcontrolador ESP32 e além de carregar a bateria. O outro local é utilizado para ter acesso ao botão de liga e desliga do conjunto, por fim dois pontos foram acrescentados para ter acesso aos botões de comunicação. Na Figura 7 está representado os locais.

Figura 7 – Representação 3D do conjunto de sensores



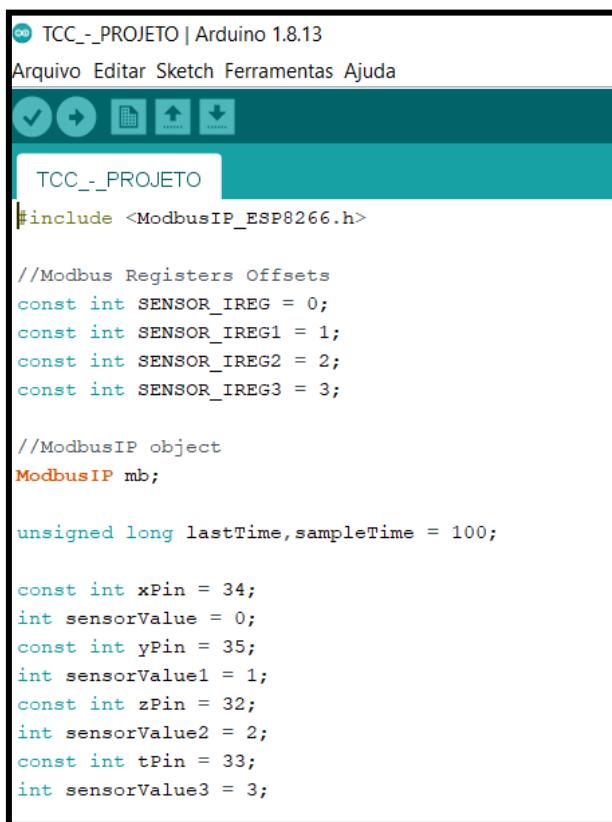
Fonte: Do autor (2021).

3.3 COMUNICAÇÃO E INTERFACE

Após a finalização do modelamento 3D, foi estudado qual o melhor protocolo de comunicação para tal situação. A escolha pelo Modbus TCP/IP, foi devido à simplicidade de implementação, já que o software de comunicação de dados apresenta todas as configurações necessárias, bem como a fácil integração entre outros softwares, permitindo o uso do trabalho em projetos futuros.

Para a visualização/análise dos dados obtidos, utilizou-se o software LabVIEW® como sistema supervisório. A programação do ESP32, realizou se no software Arduino IDE, que tem a função própria para o microcontrolador. Onde criou-se todas as instâncias necessárias para a obtenção dos dados de aceleração e temperatura. Definiu-se uma taxa de intervalo de amostragem de dados de 100 milissegundos, evitando assim, erros nas medições, e uma maior taxa no volume de dados que chegam até o computador. Na Figura 8 está representada a interface do Arduino IDE.

Figura 8 – Arduino IDE



The screenshot shows the Arduino IDE interface with the title bar "TCC_-_PROJETO | Arduino 1.8.13". Below the title bar is a menu bar with "Arquivo", "Editar", "Sketch", "Ferramentas", and "Ajuda". The main workspace is titled "TCC_-_PROJETO" and contains the following code:

```
#include <ModbusIP_ESP8266.h>

//Modbus Registers Offsets
const int SENSOR_IREG = 0;
const int SENSOR_IREG1 = 1;
const int SENSOR_IREG2 = 2;
const int SENSOR_IREG3 = 3;

//ModbusIP object
ModbusIP mb;

unsigned long lastTime,sampleTime = 100;

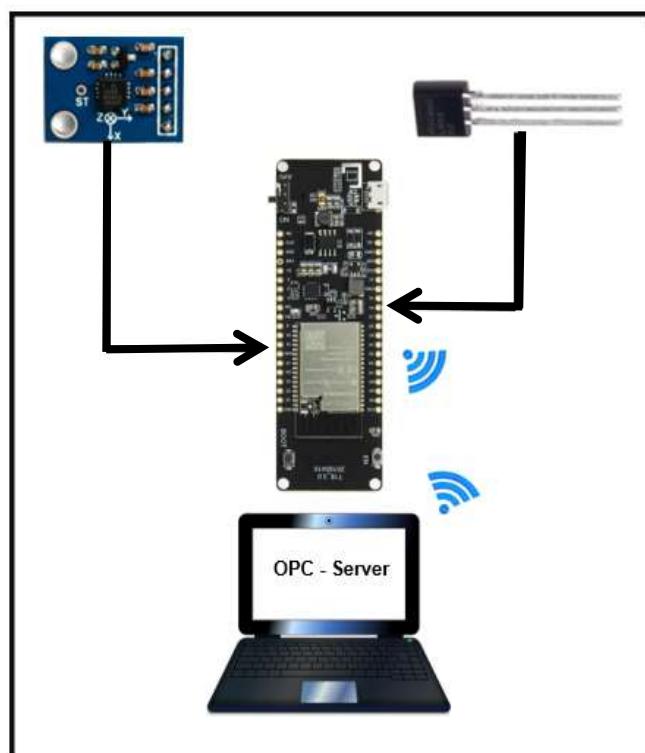
const int xPin = 34;
int sensorValue = 0;
const int yPin = 35;
int sensorValue1 = 1;
const int zPin = 32;
int sensorValue2 = 2;
const int tPin = 33;
int sensorValue3 = 3;
```

Fonte: Do autor (2021).

A vantagem na utilização do ESP32, devesse ao fato dele possuir um ponto Wireless embutido, fazendo com que o computador comunicasse em poucos milissegundos com uma rede privada. O projeto atende aos requisitos necessários para o bom funcionamento, bem como o alcance da rede sem fio. Como também, seria possível enviar informação a um dispositivo móvel que contenha um sistema operacional compatível.

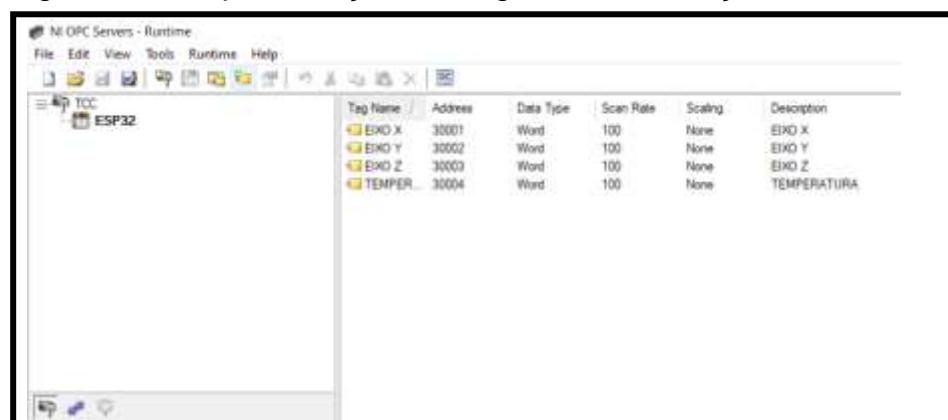
Após a disponibilidade de todos os recursos, estipulou-se o modo de comunicação entre o supervisório e a Arduino IDE que tem como função enviar os dados de programação e comunicar o microcontrolador ESP32 com o sinal Wireless. Após a comunicação estabelecida criou se um servidor com o uso do protocolo Modbus TCP/IP, através do software NI OPC Servers, que é um software do mesmo fornecedor do LabVIEW®, e tem a vantagem de possuir os diversos protocolos de comunicação. Na Figura 9 está representada o esquema de comunicação.

Figura 9 – Esquema de comunicação do projeto



Fonte: Do autor (2021).

Dentro do menu de configurações do servidor, foi criado quatro tags sendo chamadas “*eixo X*, *eixo Y*, *eixo Z* e *temperatura*” com o endereço de comunicação do microcontrolador ESP32. Na Figura 10 está representada as tags de comunicação.

Figura 10 – Representação das *tags* de comunicação.

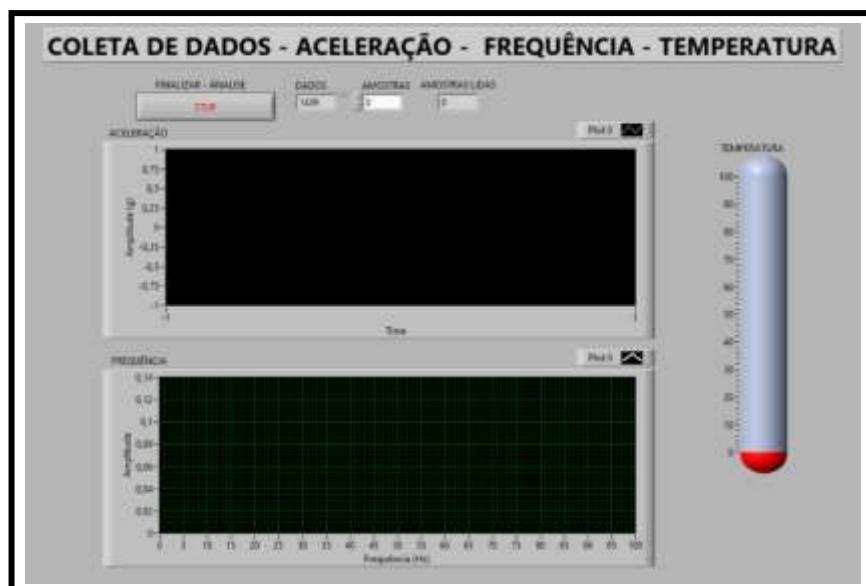
Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
EIXO X	30001	Word	100	None	EIXO X
EIXO Y	30002	Word	100	None	EIXO Y
EIXO Z	30003	Word	100	None	EIXO Z
TEMPERATURA	30004	Word	100	None	TEMPERATURA

Fonte: Do autor (2021).

Com toda a base estabelecida, iniciou-se o *layout* de visualização no LabVIEW®, pensando em todos os campos que seriam necessários para a correta

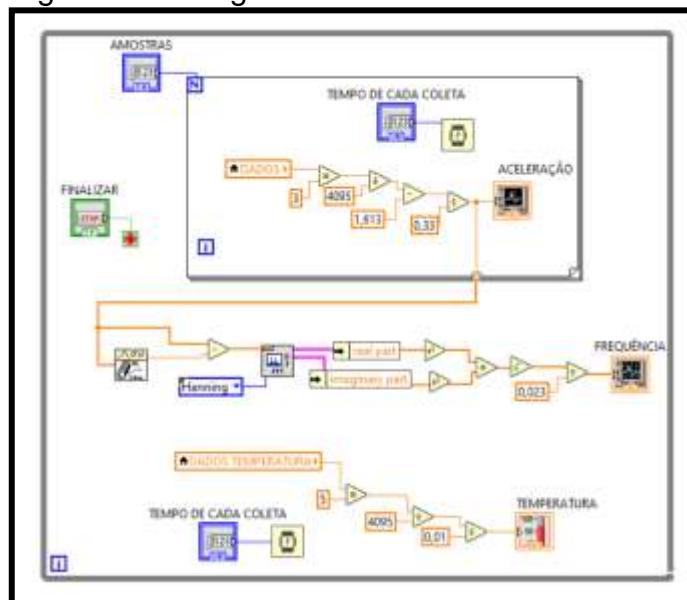
obtenção dos dados. Para análise e apresentação dos resultados foi criado um gráfico de aceleração em função do tempo e da frequência (utilizando o bloco transformada rápida de Fourier), e mais um gráfico para a exibição dos dados de temperatura. Na Figura 11 está representada a interface de análise e na Figura 12 o diagrama de blocos de programação.

Figura 11 – Interface LabVIEW®



Fonte: Do autor (2021).

Figura 12 – Diagrama de blocos LabVIEW®



Fonte: Do autor (2021).



No programa do LabVIEW®, foram colocados os valores que convertem o sinal elétrica de aceleração, que ingressa como tensão elétrica e divulgam em aceleração nas unidades de m/s^2 . Também foram colocados os valores que convertem tensão elétrica do termistor em temperatura em °C. Os valores de conversão foram extraídos do catálogo do fabricante, mais precisamente expressado como valor de sensibilidade do sensor.

3.4 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

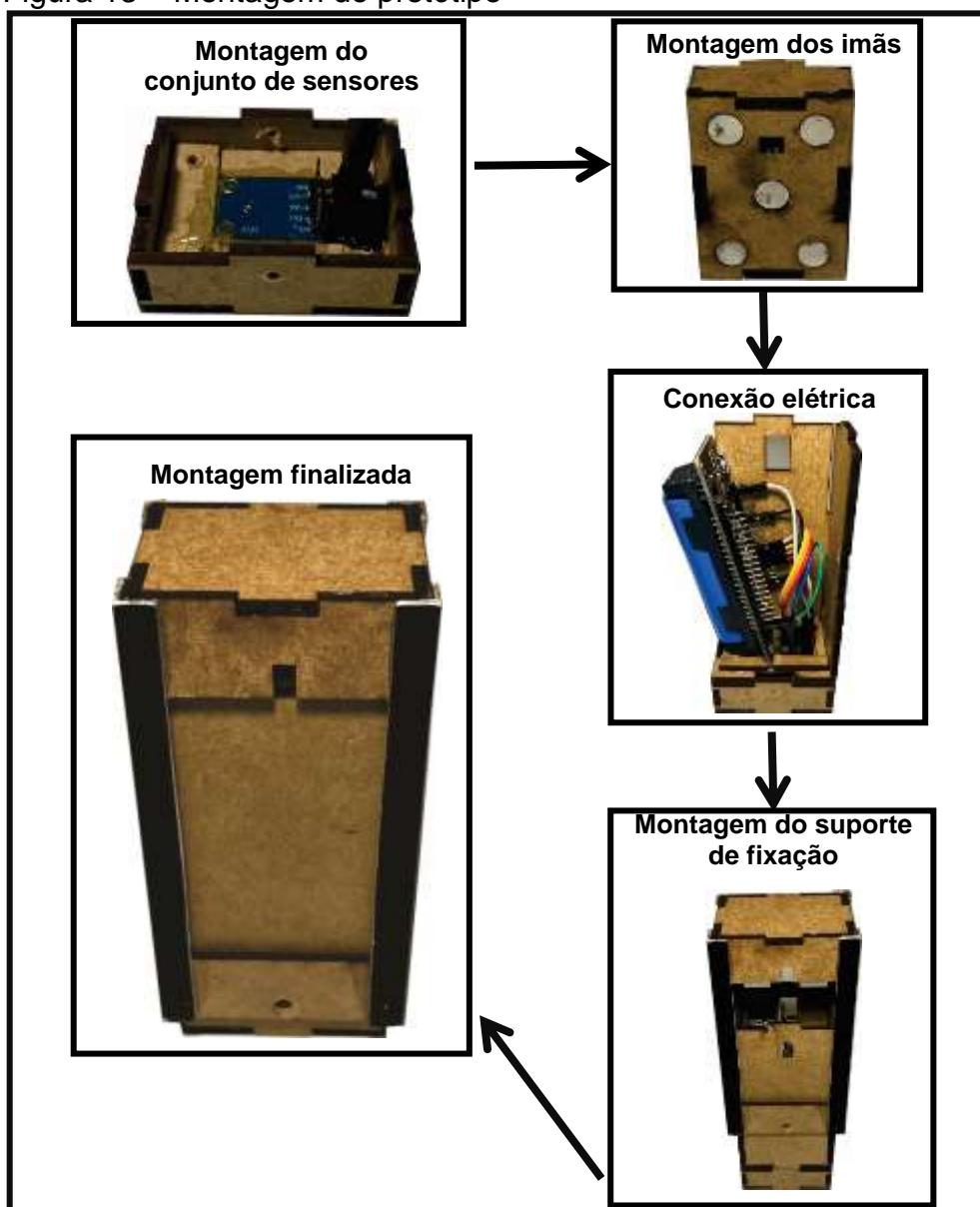
Após todas os processos anteriores definidos, iniciou se a montagem física do protótipo, e esse processo foi dividido em etapas, que foram:

- Montagem do conjunto de sensores: nessa etapa, foi realizada a montagem utilizando cola epóxi para fixação dos componentes em MDF e para os sensores. O acelerômetro foi um dos pontos críticos da fixação, pois ele deve estar bem fixo e nivelado para que não haja variações nos dados obtidos. O conjunto de sensores será a parte que haverá contato com a superfície do componente onde será obtido as análises, então para que ocorra a fixação do protótipo colocou-se cinco imãs na parte inferior do conjunto, de modo a colear os dados de vibrações com o menor amortecimento possível.
- Conexões elétricas: nessa etapa realizou-se as conexões via cabo dos sensores para a placa de comunicação, e a conexão da bateria.
- Montagem final: nessa etapa, realizou-se a montagem dos fechamentos laterais e do suporte de fixação, para essa última, também foi utilizado resina epóxi. E por fim, realizou se a união dos dois conjuntos.

A montagem do protótipo física é de suma importância para a funcionalidade do projeto, pois os modos de fixação devem ser idealizados de forma que facilitem a montagem e que se torne algo simples e prático.

Na Figura 13, está representada os processos de montagem do protótipo, assim como a sequência realizada durante a montagem. O equipamento pode ser desmontado por meio das laterais de proteção para manutenção ou conserto.

Figura 13 – Montagem do protótipo



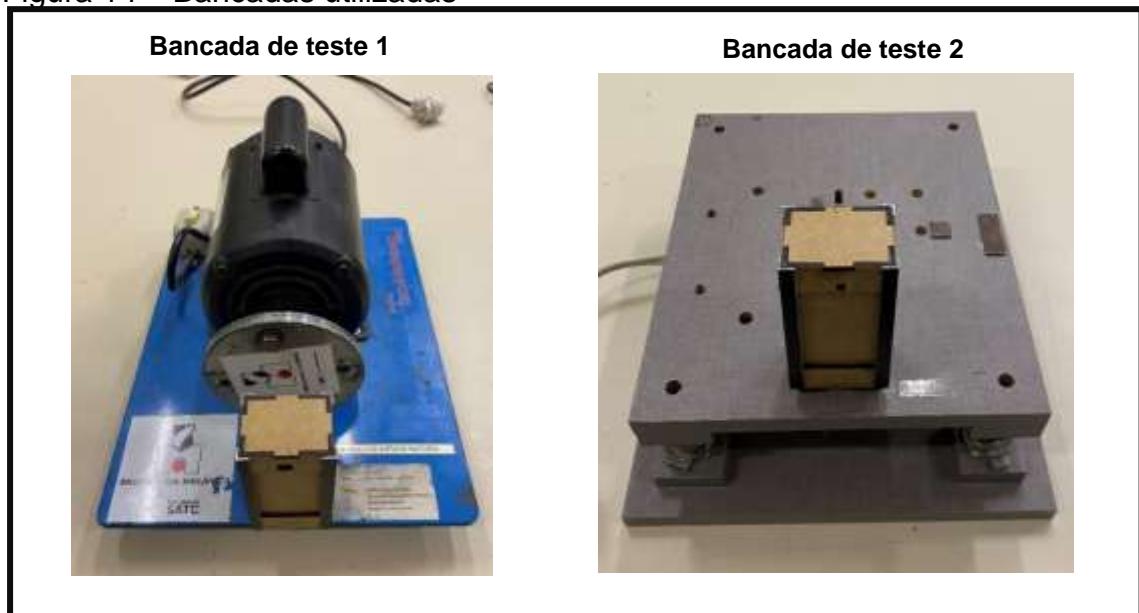
Fonte: Do autor (2021).

Após da instalação do equipamento foram realizados ensaios de captação de dados com equipamentos com falha de desbalanceamento, colocando-se dois sensores juntos recepcionando as vibrações do equipamento. A comparação se realizou com o acelerômetro piezoelétricos ICP da marca PCB®, modelo 603C01, cuja faixa de medição é de 4 a 10.000,00 Hz. Os sinais extraídos foram comparados no domínio da frequência, avaliando os picos de amplitude e o valor destas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após ter cada módulo do projeto desenvolvido, os testes realizados para obtenção dos dados de vibração foram em bancadas que simulam falhas de desbalanceamento. Estas bancadas utilizam motores elétricos, com a opção de acrescentar um dispositivo que tem como função alterar a velocidade de giro. Os motores utilizados são do tipo monofásico, que são amplamente utilizados em indústrias e pequenos projetos e operam numa tensão nominal de 220 V (60 Hz). Na Figura 14 está representada as bancadas utilizadas.

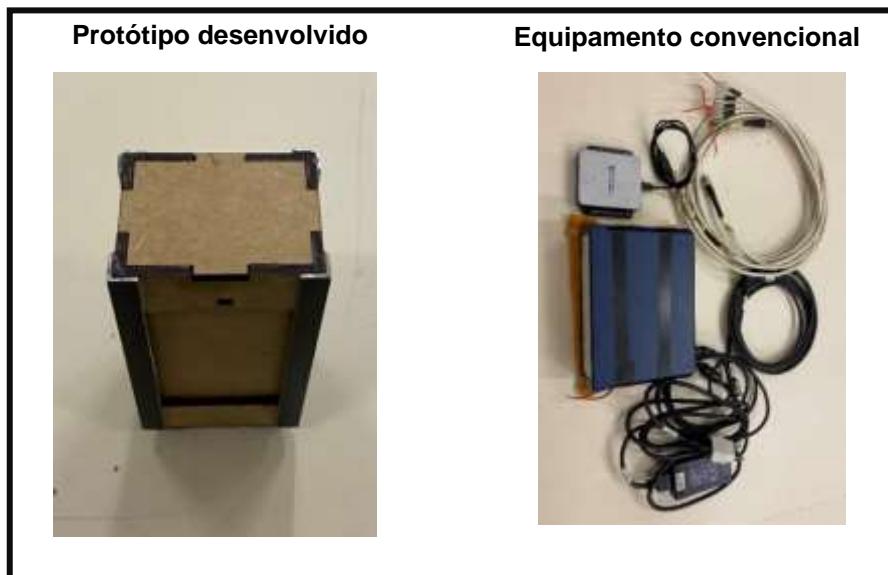
Figura 14 – Bancadas utilizadas



Fonte: Do autor (2021).

O protótipo de análise foi posicionado paralelamente, na base da bancada, sem utilizar nenhum tipo de fixação entre eles, a não ser os próprios imãs, que foram empregados intencionalmente para não prejudicar a captação da vibração por parte do sensor. Primeiramente, buscou-se a obtenção dos dados da bancada utilizando-se de um sensor convencional, disponível no mercado, cuja marca é PCB Piezotronics e modelo 603C01. Com os dados obtidos, serão realizadas as comparações deste com o protótipo desenvolvido. Na Figura 15 está representada a comparação entre os modelos.

Figura 15 – Comparação entre os modelos



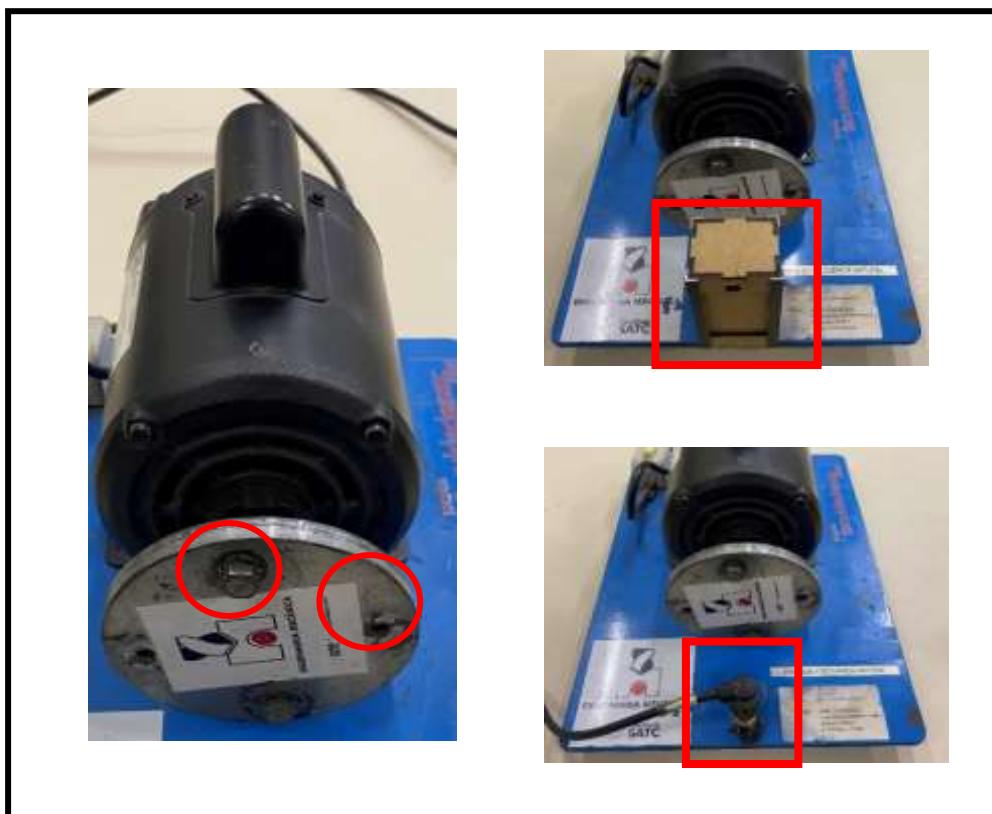
Fonte: Do autor (2021).

As diferenças mais notáveis entre o protótipo desenvolvido e o equipamento convencional é a dimensão entre eles, e a quantidade de cabos necessários. Enquanto o protótipo desenvolvido necessita de cabos somente para transferência o programa, o equipamento convencional tem a necessidade de ficar sempre com as conexões via cabo para realização das análises.

4.1 ENSAIO EXPERIMENTAL 1 - VIBRAÇÃO

A primeira análise foi realizada na bancada de teste 1, que mostra sinais de vibração com desbalanceamento. Para deixar o rotor do motor desbalanceado, foi acrescentando dois parafusos que impõem as forças centrifugas e produz sinais notáveis na velocidade de giro do motor. Nessa primeira análise de sinal, os parafusos foram posicionados a 90 graus um em relação ao outro. Para esse ensaio foi utilizado a velocidade de rotação máxima de motor, que é de 1750 rpm. O ensaio foi realizado a fim de verificar a diferença entre os valores de amplitude e frequência de dois equipamentos diferentes que avaliam a vibração de espectros ou amplitudes no domínio da frequência. Na Figura 16 está representada a bancada com os parafusos posicionados e bem como a posição de ambos os sensores.

Figura 16 – Posição dos parafusos e dos sensores



Fonte: Do autor (2021).

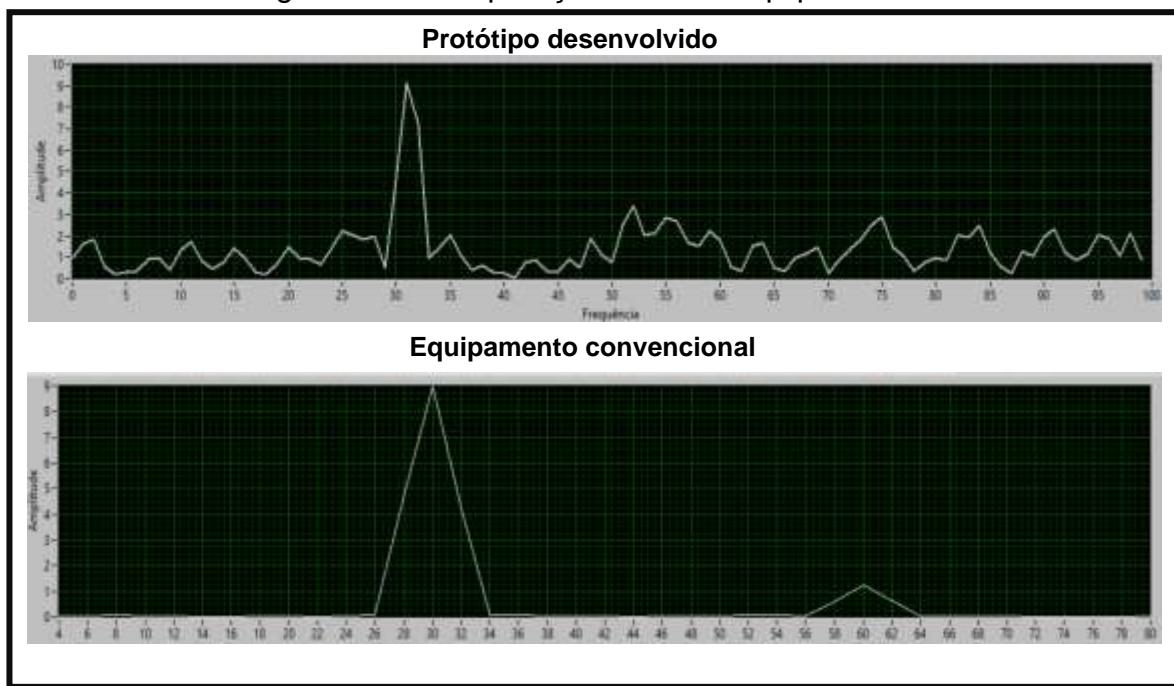
Para iniciar as análises, no protótipo desenvolvido é necessário informar a quantidade de amostras a ser coletada, bem como o tempo entre cada coleta. Para o primeiro conjunto de dados foi utilizado um valor de 200 amostras e um tempo de 250 milissegundos.

Na Figura 17 está representada a comparação dos ensaios dos sinais de amplitude no domínio da frequência, processando-se os sinais originais do tempo com a transformada rápida de Fourier, que o software LabVIEW® processa internamente e mostra o sinal em tempo real.

O sinal do equipamento convencional mostra um sinal sem interferências ou picos menores. Enquanto o equipamento desenvolvido mostra sinais com um pico que se destaca e outros menores picos, identificando como uma desvantagem por parte do equipamento em desenvolvimento.

Comentar por que aparece um pico na frequência de giro da velocidade de rotação citando algum trabalho de análise de desbalanceamento

Figura 17 – Comparação entre os equipamentos 1



Fonte: Do autor (2021).

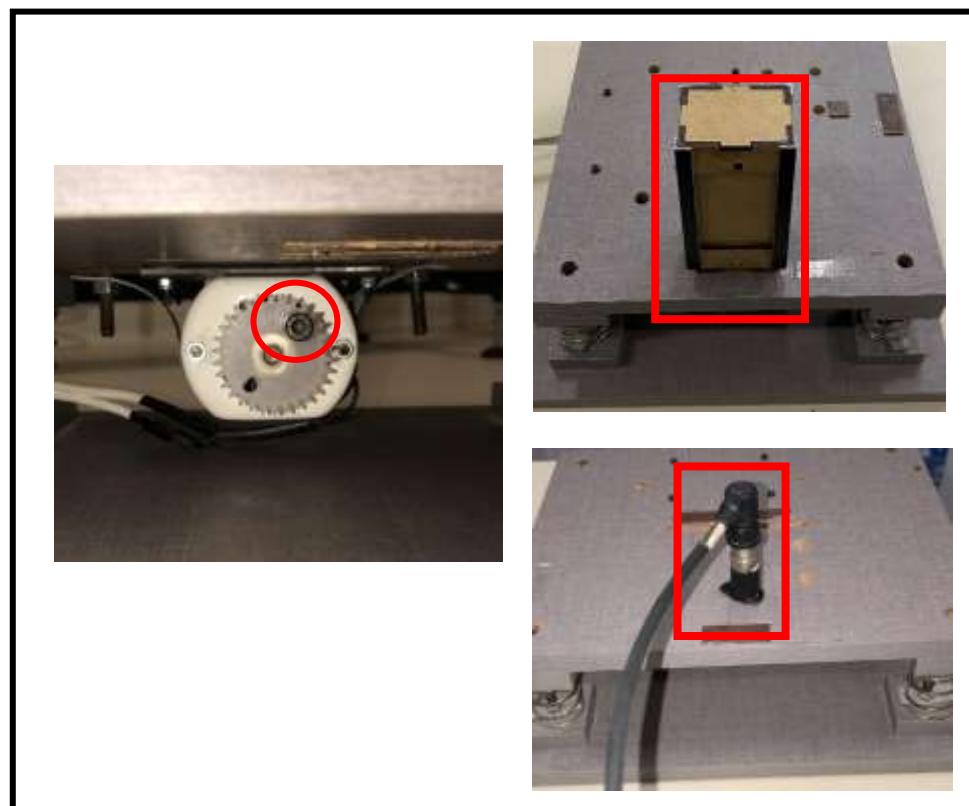
Após a realização do primeiro ensaio, é possível notar que o pico em destaque de 30 Hz acontece em ambos os ensaios, validando o protótipo desenvolvido para leituras nessa frequência. Os picos que aparecem com amplitudes de 3Hz no protótipo desenvolvido, são ruídos gerados pela baixa precisão do sensor de baixo custo.

4.2 ENSAIO EXPERIMENTAL 2 - VIBRAÇÃO

A segunda análise foi realizada na bancada de teste 2, e o desbalanceamento ocorreu do mesmo modo que aconteceu na bancada de teste 1, porém acrescentando somente um parafuso na polia do motor. Para esse ensaio, foi utilizado o RPM mínimo do motor, em torno de 1500 RPM, controlado através do dimmer sendo possível modificar a tensão elétrica que alimenta o motor, mudando a velocidade de rotação, consequentemente, alterando a amplitude de vibração.

Na Figura 18 está representada a bancada com o parafuso posicionado e bem como a posição de ambos os sensores.

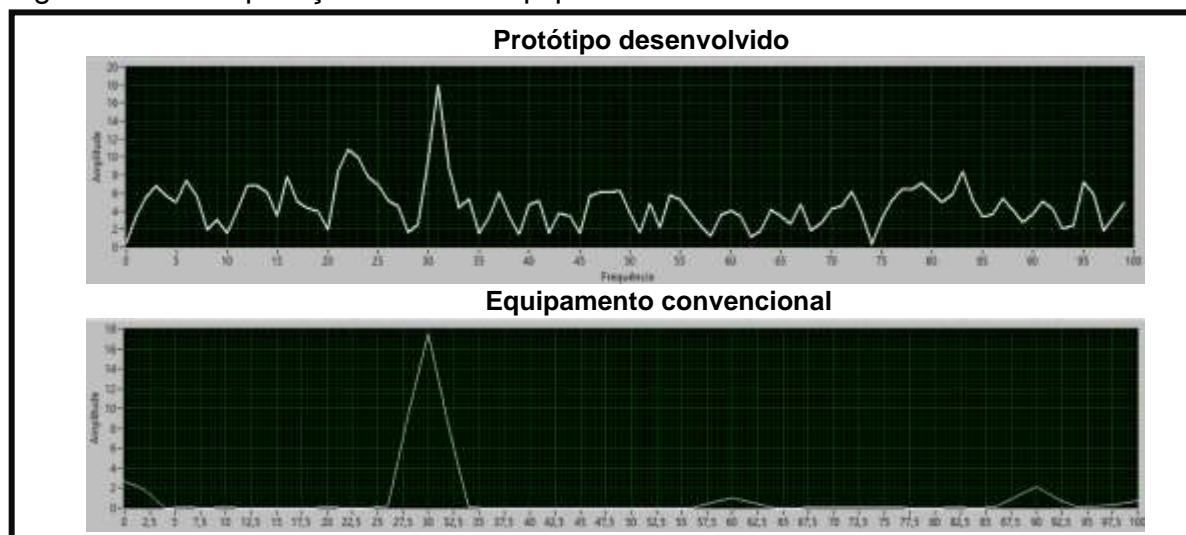
Figura 18 – Posição dos parafusos e dos sensores



Fonte: Do autor (2021).

Para iniciar as análises, no protótipo desenvolvido foi utilizado os mesmos parâmetros do ensaio anterior, um valor de 200 amostras e um tempo de 250 milissegundos. Na Figura 19 está representada comparação dos ensaios.

Figura 19 – Comparação entre os equipamentos 2

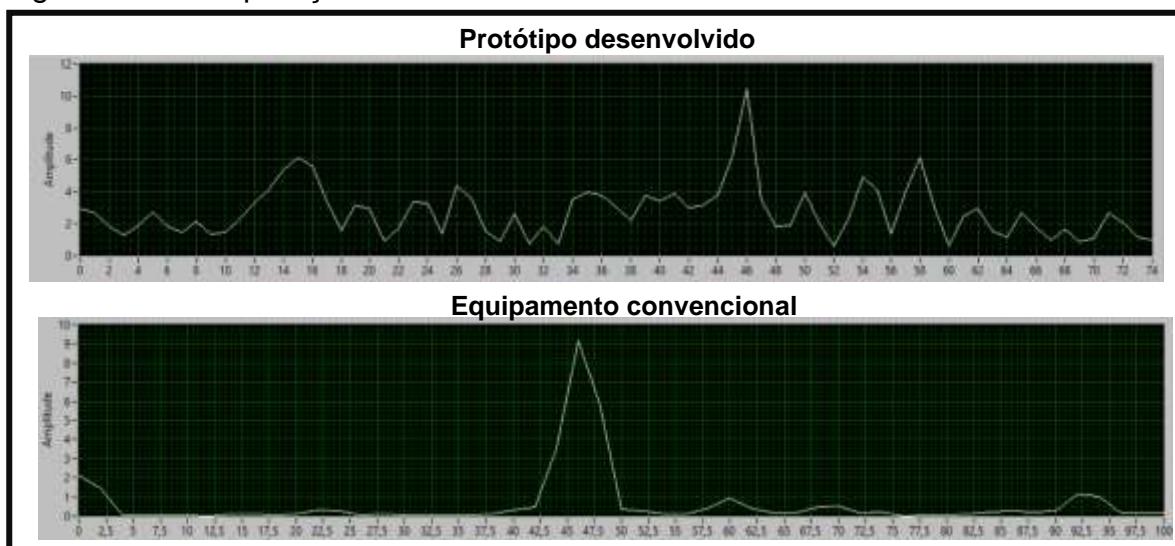


Fonte: Do autor (2021).

Após a realização do segundo ensaio, é possível notar que o pico em destaque de 31 Hz acontece no projeto desenvolvido e no equipamento convencional de 30 Hz, uma pequena diferença de 1 Hz, sendo validado o protótipo desenvolvido para leituras nessa frequência. As amplitudes praticamente têm os mesmos valores. Os picos que aparecem com amplitudes de 10Hz são os ruídos já mencionados.

A terceira análise foi realizada na bancada de teste 2, e o desbalanceamento ocorreu do mesmo modo. Para esse ensaio foi utilizado o RPM médio do motor, em torno de 2500 RPM, controlado através de Dimmer. Na Figura 20 está representada a comparação dos ensaios.

Figura 20 – Comparação entre os ensaios 3

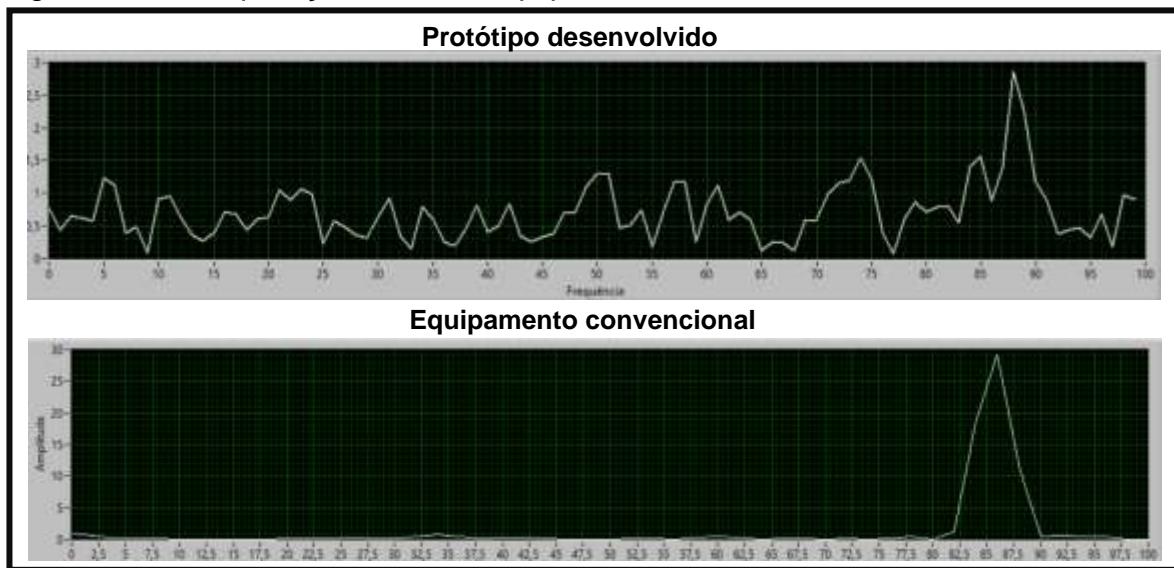


Fonte: Do autor (2021).

Após a realização do terceiro ensaio, é possível notar que o pico em destaque de 46 Hz acontece no projeto desenvolvido e no equipamento convencional, validando o protótipo desenvolvido para leituras nessa frequência. Outros picos, tais como os que aparecem com amplitudes de 6 Hz no protótipo desenvolvido, são os ruídos gerados pela baixa precisão do sensor e bem como pela transmissão utilizada, que é via *Wireless*.

A quarta análise também foi realizada na bancada de teste 2, e o desbalanceamento ocorreu do mesmo modo. Para esse ensaio foi utilizado o RPM máximo do motor, em torno de 3600. Na Figura 21 está representada a comparação dos ensaios.

Figura 21 – Comparação entre os equipamentos 4

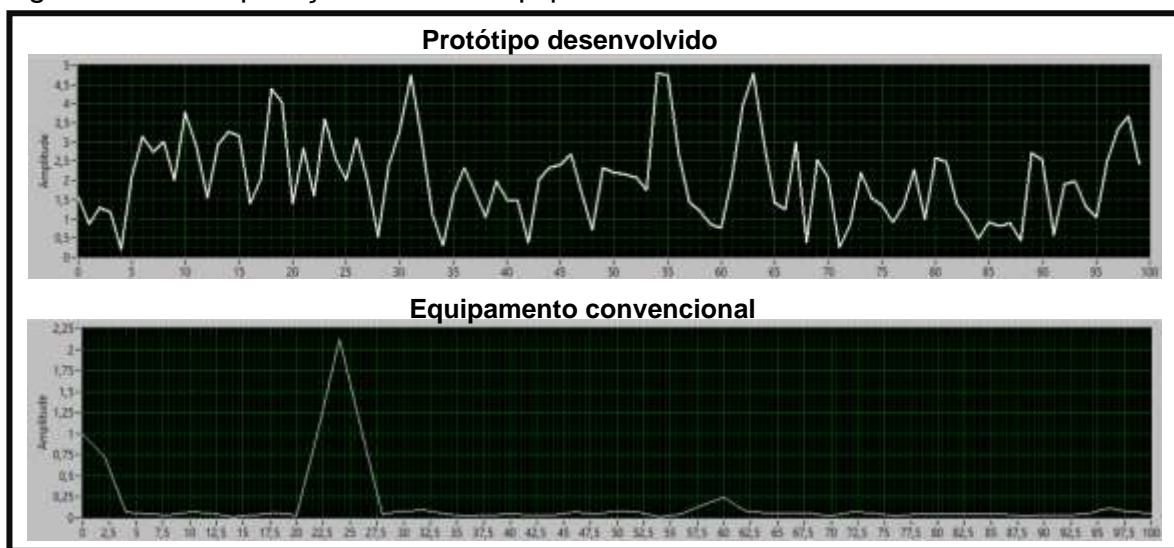


Fonte: Do autor (2021).

Após a realização do quarto ensaio, é possível notar que o pico em destaque de 86 Hz acontece no projeto desenvolvido e no equipamento convencional, porém a amplitude ficou com uma diferença em torno de 17 pontos positivos. Nessa faixa de frequência já é possível notar a limitação do sensor de baixo custo.

A quinta análise também foi realizada na bancada de teste 2, e o desbalanceamento ocorreu do mesmo modo. Para esse ensaio foi utilizado o RPM mínimo do motor, em torno de 1000. Na Figura 22, está representada comparação.

Figura 22 – Comparação entre os equipamentos 5



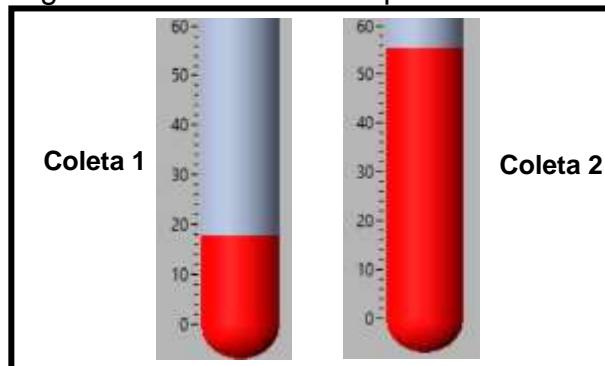
Fonte: Do autor (2021).

Após a realização do quinto ensaio, é possível notar que o pico em torno de 24 Hz aparece em destaque no equipamento convencional, porém no protótipo desenvolvido não é possível identificar. Nessa faixa de frequência já pode se observar a limitação por parte do sensor em análise.

4.3 ENSAIO EXPERIMENTAL 3 – TEMPERATURA

Os ensaios para teste do sensor de temperatura, aconteceram de duas maneiras, em um primeiro momento, que foi na própria bancada de desbalanceamento 1 e no segundo momento em um ambiente onde foi possível realizar o controle de temperatura. Na Figura 23 está representada as temperaturas nos dois momentos.

Figura 23 – Coleta de temperatura



Fonte: Do autor (2021).

Na coleta 1 a temperatura medida foi a do próprio laboratório onde foi realizado os ensaios, cujo qual possuía em torno de 18 °C, e na segunda coleta de dados foi realizada em um ambiente com temperatura controlada em torno de 50 °C, apresentando um resultado com oscilação de 5°C para essa coleta. Ao analisar as coletas, é notável que em temperaturas baixas, as leituras são estáveis, porém ao elevar a temperatura, começa a apresentar oscilações.



5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi desenvolvido um protótipo analisador de sinais de baixo custo para uso em Manutenção Preditiva, onde através das novas tecnologias foi possível projetar um equipamento com custo de R\$ 295,10.

O protótipo desenvolvido apresentou uma série de desafios, do ponto de vista técnico, que são: utilização de outros métodos de programação dos parâmetros, utiliza a comunicação *Wireless* entre os dispositivos e software de análise, e por último utiliza sensores de aceleração e temperatura com um custo bem inferior aos convencionais, podendo ter resultados coerentes ou inconsistência nas leituras.

Considerando todas as análises do protótipo desenvolvido, pode-se concluir que o protótipo apresenta, leituras de amplitude precisas em algumas faixas de frequência assim como diferenças nas leituras de amplitude da aceleração em outras faixas de frequências, quando comparadas com as geradas pelo equipamento convencional. Essas diferenças são oriundas da própria precisão do sensor, que é baixa, e com isso ocorre a variação na taxa de amostragem do acelerômetro, e as variações de tempo de envio das amostras, que é um ponto de extrema importância.

E quanto a projetos futuros, o protótipo desenvolvido é o começo de um projeto que possibilita estudos em relação a análise de falhas. Os estudos serão continuados para que se possa obter um equipamento da mesma qualidade que os convencionais, e para isso deverá ser utilizado acelerômetros que atenda uma faixa maior de frequência e microcontrolador com uma taxa de amostragem superior. E outro ponto importante, é a necessidade do desenvolvimento de um software para leitura e processamento dos dados, pois os utilizados na realização desse projeto possuem um custo elevado

REFERÊNCIAS

BÖESCH, Klaus. **Detecção de falhas por fusão de sensores em atuadores elétricos: correlação entre sinais de torque e vibração.** 2011

DOS REIS FARIAS, MARCELO et al. **Avaliação de técnicas não convencionais de análise de vibração, para detecção de defeitos em máquinas rotativas horizontais.** IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Conem 2016



GUIMARÃES, Leonardo Miranda; NOGUEIRA, Cássio Ferreira; DA SILVA, Margarete Diniz Brás. **Manutenção industrial: implementação da manutenção produtiva total (TPM).** e-xacta, v. 5, n. 1, 2012

LINESSIO, Rafael Pomorski et al. **Caracterização de um acelerômetro óptico biaxial para monitoramento de vibrações em máquinas elétricas.** 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MANTENIMIENTO MUNDIAL. **Manutenção Preditiva – Análise de vibração.** 2012

MARAN, Marcos. **Manutenção baseada em condição aplicada a um sistema de ar condicionado como requisito para sustentabilidade de edifício de escritórios.** 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MARCAL, Rui Francisco Martins. **Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibração e lógica Fuzzy.** 2000.

MARTINS, Carlos Pedroso. **Análise de defeitos em motores através de vibração mecânica: estudo de caso. Trabalho de Graduação,** Universidade Estadual Paulista, 2012.

RITTER, M. A. **Análise vibracional aplicada ao monitoramento de máquinas rotativas.** Trabalho final de Graduação em Eng. Mecânica UFRGS, Porto Alegre, 1996.

RODRIGUES, Handerson. **Estudo da influência do fator de recobrimento na detecção de falhas em engrenagens por análise de sinais vibratórios.** 2018.

VITOR, Avyner Lorran de Oliveira et al. **Detecção de falhas de estator em motores de indução trifásicos utilizando transformada wavelet, medida RMS e potência de previsão.** 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos de que forma direta ou indireta contribuíram para a elaboração desse artigo. De modo especial ao professor Elvys Isaias Mercado Curi que esteve presente na execução de todo o trabalho e a professora Pamela Milak que auxiliou constantemente na elaboração do texto.