

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

GUILHERME PIMENTEL SILVA

VBR

Uma solução de baixo custo para monitoramento online de vibração

**São Leopoldo
2018**

Guilherme Pimentel Silva

VBR

Uma solução de baixo custo para monitoramento online de vibração

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia elétrica, pelo Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof Me Eduardo Augusto Martins

São Leopoldo

2018

“Na conclusão de mais uma etapa, dedico este trabalho
Aos meus pais e minhas irmãs pelo apoio e carinho
durante toda esta jornada.
Sem o apoio de vocês nada disso teria sido possível.
Sou eternamente grato.”
- Guilherme Pimentel Silva

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto de diversas contribuições e discussões que tive ao longo da minha jornada acadêmica e profissional. Por conta disso, deixo aqui registrado o meu sincero agradecimento a aqueles que apontaram os caminhos a serem trilhados, os possíveis erros que aconteceriam e os obstáculos que eu encontraria pela frente. Em especial:

Agradeço a minha mãe LISIANE PIMENTEL SILVA pelo carinho, apoio, todo o cuidado e dedicação oferecidos a mim, tu és incrível e não poderia ser melhor.

Agradeço ao meu pai, DANIEL DOS SANTOS SILVA, por ter sido meu guia nesta caminhada, pela preocupação e pela motivação desde o princípio. Tu és aquele em quem me espelho.

Agradeço a minha irmã ISADORA PIMENTEL SILVA pela atenção, pelos ótimos momentos de descontração e ponderação, também foste parte integrante desta construção.

Agradeço a minha irmã LUISA PIMENTEL SILVA pelos bons conselhos e por ser a pessoa que equilibra meus planos e minha vida, sem a tua presença esta construção não seria possível.

Aos meus avós por todo o carinho e sabedoria, obrigado.

Ao meu professor orientador EDUARDO AUGUSTO MARTINS pelo apoio, pelas dicas técnicas dadas, por acreditar desde o princípio no sucesso da ideia quando tudo ainda era apenas uma incerteza e por ter se mostrado disposto a resolver todas as dúvidas e obstáculos impostos pelo caminho trilhado.

RESUMO

A análise de vibração é uma poderosa ferramenta na manutenção preditiva e sua aplicação está associada ao uso de acelerômetros e *softwares* de análise específicos que interpretam e apresentam aos usuários informações referentes a frequências de oscilação dos elementos de máquina ou estruturas. Este trabalho propõe-se a apresentar uma solução completa, desde implantação do *hardware* até o *software* de análise. Aborda-se conceitos de eletrônica, processamento digital de sinais, microcontroladores, redes, e aplicativos supervisórios. O principal enfoque dado ao protótipo final foi baseado em três pilares: custo, escalabilidade e qualidade de análise. Como referência, foram utilizados outros trabalhos semelhantes desenvolvidos na área e ferramentas comerciais de análise para confronto de dados e análise de ganhos com a implementação.

Palavras-chave: Análise de vibração. Manutenção preditiva. Processamento digital de sinais. Custo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oscilador Linear	15
Figura 2 - Ilustração sobre graus de liberdade	16
Figura 3 - Vista em corte longitudinal de um motor de indução.	17
Figura 4 - Esquema genérico de um rolamento de esferas.....	19
Figura 5 - Ilustração de um rolamento de rolos	19
Figura 6 - Esquemático para modelamento de um acelerômetro.....	23
Figura 7 - Diagrama de bode do modelo da resposta de um acelerômetro	25
Figura 8 - Diferentes modelos, dimensões e sensibilidades	27
Figura 9 - Representação da estrutura interna de dispositivo IMEMS	28
Figura 10 - Métodos de fixação usuais e resposta de frequência	29
Figura 11 - Sinal de entrada de exemplo	31
Figura 12 - Sinal da figura 11 após amostragem.....	31
Figura 13 - Espectro de frequência obtido na saída de um filtro passivo	34
Figura 14 - Diagrama de blocos de função	35
Figura 15 - Esquemático da solução final	36
Figura 16 - Modelo TCP/IP com alguns protocolos	37
Figura 17 - Esquemático do protocolo MQTT.....	38
Figura 18 - Montagem de um supervisor para sistema WinCC, Siemens	39
Figura 19 - Exemplo de sistema desenvolvido no ScadaBR.....	40
Figura 20 - Resposta em frequência a passagem de carga na ponte ensaiada	41
Figura 21 - Supervisor desenvolvido por (SILVA et al., 2014).	42
Figura 22 - Esquema geral do fluxo de trabalho.....	44
Figura 23 - Fluxograma da definição do propósito do produto	45
Figura 24 - Acelerômetro SKF comercial	46
Figura 25 - <i>Software</i> de análise SKF	47
Figura 26 - Esquema do protótipo físico.....	48
Figura 27 - Esquema geral do algoritmo no microcontrolador.....	49
Figura 28 - Dimensão do protótipo em comparação com mão humana	52
Figura 29 - Vista superior do protótipo	52
Figura 30 - Esquemático do funcionamento	54
Figura 31- Visão no smartphone	55

Figura 32 - Visão no supervisor mqtt-spy	55
Figura 33 - Fluxograma do algoritmo	58
Figura 34 - Esquema para zeramento do acelerômetro	60
Figura 35 - Dispositivo usado para ensaio	61
Figura 36 - Posicionamento para ensaio das sondas.....	62
Figura 37 - Posicionamento para ensaio das sondas.....	63
Figura 38 - Falha de posicionamento da pastilha.....	66
Figura 39 - Nuvem de pontos no supervisor.....	67
Figura 40 - Raias espectrais dos dados do protótipo	68
Figura 41 - Espectro dos dados do protótipo.....	69
Figura 42 - Espectro dos dados do instrumento calibrado	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de modelos e características	50
Tabela 2 - Características de resposta do acelerômetro	59
Tabela 3 -Custo do módulo experimental.....	70

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Tema	10
1.2 Delimitação do Tema	11
1.3 Objetivo	11
1.4. Justificativa.....	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 Análise de vibração	13
2.1.1 Mecânica Vibratória.....	14
2.1.2 Vibração em máquinas elétricas rotativas	17
2.1.3 Falhas em mancais	18
2.1.4 Normas para análise	21
2.2 Instrumentação	22
2.2.1 Acelerômetros	22
2.2.2 Parâmetros e características	25
2.2.3 Cuidados com a fixação	28
2.3 Análise de sinal	30
2.3.1 Processamento digital de sinais	30
2.3.2 A série de Fourier	32
2.3.3 FFT, DFT e espectro	33
2.4 Estratégias de interface	34
2.4.1 Microcontrolador ESP32.....	34
2.4.2 Redes de computadores	36
2.4.3 Protocolo MQTT	37
2.4.4 Aplicação Supervisório	38
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	41
4 METODOLOGIA	44
4.1 Propósito geral	44
4.2 Pesquisa e observação.....	45
4.3 Viabilidade	47
4.4 Protótipo	48
5 IMPLEMENTAÇÃO	50

5.1 Acelerômetros	50
5.2 Carcaça do protótipo	51
5.3 Comunicação.....	53
5.4 Estratégia de funcionamento	56
6 ANÁLISE DE RESULTADOS	59
6.1 Primeiros ajustes e zeramento.....	59
6.2 Condições de teste	61
6.3 Resposta em frequência.....	63
6.4 Transformada de Fourier	64
6.5 Cuidados no protótipo.....	65
6.6 Comparativo prático com dispositivo calibrado	66
8 CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

Uma grande planta industrial conta com centenas ou milhares de equipamentos instalados. Com o intuito de manter todos funcionando e atingir as metas de produção, tem-se as equipes de manutenção trabalhando para que as máquinas não parem. Desse propósito geral surge o conceito da manutenção corretiva, preditiva e preventiva.

Este trabalho concentra o estudo no modelo da preditiva, que consiste basicamente de ficar um passo à frente da falha fazendo uso de artifícios tecnológicos para observação de fenômenos físicos, que costumam ser fiéis indicadores de futuros problemas.

A análise de vibrações remonta ao fim do século XX. No entanto, com os recentes avanços na eletrônica e computação, a observação e análise do assunto tornaram-se acessíveis e espalharam-se pelas indústrias.

Grandes fabricantes de componentes de máquina criaram divisões especializadas, fornecendo soluções completas desde *hardware* até *software* para tal fim.

Vibrações em componentes mecânicos diversos, em máquinas rotativas e estruturas são temas da Engenharia Mecânica. Este trabalho concentra-se em apresentar um produto, uma solução economicamente viável e eficiente, para análise de vibrações tomando como referência sistemas já existentes e promover melhorias para aplicações específicas já consolidadas.

1.1 Tema

A análise de vibrações é parte fundamental da manutenção preditiva e ampara a programação das equipes de manutenções preventivas e corretivas, evitando quebras repentinas e grandes paradas de linha de produção.

A instalação de instrumentação em equipamentos, principalmente máquinas rotativas, nem sempre é fácil e depende de investimentos em infraestrutura de comunicação e alimentação. Existe uma janela de tempo considerável entre a avaliação da necessidade e implantação. Por este motivo, muitas vezes, deixa-se de

avaliar tais parâmetros executando-se manutenções desnecessárias ou ainda gerando prejuízos por quebras e grandes períodos de máquina parada.

1.2 Delimitação do Tema

No caso de estudo, o foco é a aplicação em indústrias do setor siderúrgico com elevado número de equipamentos e, em especial, máquinas rotativas em áreas de difícil acesso devido a altas temperaturas (condições insalubres) ou mesmo em casos onde a estrutura da máquina impossibilita coleta manual de dados de vibração por uma pessoa.

O protótipo pretende solucionar o problema da acessibilidade e das dificuldades de instalação usando tecnologias desenvolvidas para IoT (*Internet of Things*). Estas apresentam baixo consumo de energia e tamanho reduzido, o que é desejável para instalação em um invólucro resistente para aplicação em campo.

1.3 Objetivo

O objetivo é apresentar uma ferramenta completa de análise de vibrações, utilizando componentes de baixo custo e fornecendo uma qualidade de análise de dados compatível com as necessidades impostas pelo mercado mais abrangente da manutenção preditiva.

1.4. Justificativa

Na manutenção de uma planta industrial costuma-se ter duas principais preocupações, tempo de máquina parada e custo de manutenção. Estes dois itens geralmente aparecem como indicadores de desempenho e o equilíbrio dos mesmos pode resultar em prêmios na remuneração das equipes. Contudo, determinar o momento exato de realizar uma intervenção em um equipamento não é tarefa fácil e pode afetar negativamente um dos itens ou comprometer os dois citados anteriormente. Para aumentar esta assertividade aplica-se os conceitos da manutenção preditiva, atuando continuamente para conferir certa previsibilidade a atuação das equipes de manutenção.

Com a evolução da eletrônica e computação, o uso de sistemas online cada vez mais sofisticados vem sendo empregados na busca da determinação precisa da intervenção e qual componente está no mapa das falhas. Com este aparato instalado as empresas tendem a operar os equipamentos até o limite e em capacidade plena. Como o corpo de um ser humano as máquinas apresentam sinais de eventuais anomalias, com a instrumentação correta é possível chegar antes da falha e verificar somente o necessário em uma inspeção.

Cada tipo de componente responde de forma diferente a vibrações e toda a análise baseia-se neste comportamento, por isso, trata-se de uma ferramenta pertinente no monitoramento de status de máquinas.

Há diversas soluções no mercado, de diferentes fabricantes, o projeto em questão procura reunir as melhores características a um custo acessível. Hoje essas soluções giram em torno de alguns milhares de reais e tornam-se inviáveis para empresas de pequeno porte ou experimentos de pequena escala.

Este projeto justifica-se pelo custo e facilidade de instalação, sem cabos especiais e sem a necessidade de quadros elétricos para instalação de equipamentos em ambientes inóspitos. Propõe-se uma solução de custo inferior aos quatro dígitos, menos de mil reais com *software* e *hardware*, custo relativamente baixo, simples, rápido e confiável são as palavras de ordem.

Trata-se da concepção de uma cápsula autônoma com um microcontrolador e um módulo de acelerômetros responsável por capturar as informações de análise e enviar a um servidor sem utilização de fiação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os dispositivos de análise de vibração utilizam meios eletrônicos para análise de variações mecânicas. Posteriormente avaliadas no domínio das frequências para encontrar pontos específicos de interesse.

Faz-se uso de uma instrumentação refinada e análise matemática através do uso de transformadas para tratar todo o dado coletado.

2.1 Análise de vibração

A análise de vibração é o principal objeto de estudo deste trabalho que une conhecimentos relacionados a engenharia mecânica com os da engenharia elétrica. A elétrica nesta área é responsável por traduzir os movimentos mecânicos palpáveis em sinais elétricos que posteriormente são tratados revelando diversas tendências.

Trata-se de um extenso ramo da manutenção preditiva, esta, engloba além da vibração a análise da temperatura de componentes, ruídos emitidos e ainda outros usando uma vasta gama de sensores.

A manutenção preditiva permite uma análise das condições reais de operação de uma máquina baseando-se nos fenômenos físicos observados durante seu funcionamento. Utilizando estas técnicas pode-se determinar paradas e trocas de componentes com maior precisão. (ALMEIDA,2015)

Um monitoramento contínuo permite que os equipamentos sejam aproveitados em seu potencial pleno, eliminando desmontagens de inspeção desnecessárias ou trocas prematuras (ALMEIDA,2015)

A determinação da periodicidade de trocas e inspeções é baseada em dados históricos de falhas, fazendo-se necessário o registro de eventos em algum local. Na ausência de computadores e pequenos sistemas portáteis as empresas costumavam utilizar pranchetas com tabelas que na sequência alimentavam um sistema de ERP responsável por gerar ordens de manutenção. (ALMEIDA,2015)

A evolução dos sistemas digitais, o computador e os dispositivos cada vez mais poderosos e compactos, possibilitaram uma crescente utilização da área aplicando conceitos de inteligência artificial para avaliação autônoma de falhas.

2.1.1 Mecânica Vibratória

A mecânica vibratória é a base científica para todo desenvolvimento deste trabalho, há uma infinidade de fenômenos observáveis em sistemas oscilatórios e uma complexa análise matemática compõe esta área de estudo.

Avaliar os deslocamentos sofridos em peças ou conjuntos de peças excitados por forças que variam com o tempo é o principal objetivo desta parte da mecânica dos meios contínuos. (Groehs,2001)

Vibrações ocorrem em sistemas elásticos e estes são compostos por alguns elementos clássicos associados.

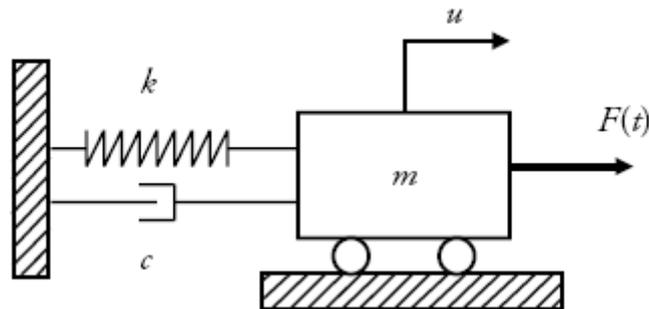
O elemento elástico responsável por estabelecer uma força de restituição do sistema é usualmente representado por uma mola no contexto mecânico. Deste elemento surgem modelamentos matemáticos que estabelecem regiões de operação lineares e não lineares, onde torna-se desejável operar na região que pode ser modelada por um sistema linear (SAVI,2017).

O elemento dissipador, dissipa a energia e não promove nenhuma restituição no movimento em questão, é representado por um amortecedor nos sistemas mecânicos e compartilham algumas características de linearidade com os elementos elásticos em seus modelos matemáticos. Em um complexo sistema mecânico o projeto de cada elemento é unido e modelado para o ajuste ideal da resposta. (SAVI,2017).

O elemento de inércia é, propriamente, o elemento em oscilação que tende a manter-se em movimento caso nenhuma força atue sobre o mesmo, conceito explicado pela segunda Lei de Newton que trata da conservação da quantidade de movimento. (SAVI,2017)

Na Figura 1 apresentam-se os componentes anteriormente comentados montados na estrutura de um oscilador linear, que é um modelo clássico para estudo de fenômenos oscilatório ou mesmo modelos matemáticos dinâmicos. Estes modelos contemplam as variadas formas de transformação e transferência de energia, são largamente utilizados na área de controle da Engenharia Elétrica para fins de modelamento.

Figura 1 - Oscilador Linear



Fonte: SAVI(2017, p 14)

No modelo do oscilador linear:

$k =$ Constante elástica da mola $\left(\frac{N}{m}\right)$

$c =$ Coeficiente de amortecimento $\left(N \cdot m \cdot \frac{s}{rad}\right)$

$m =$ Massa do corpo de estudo (Kg)

$u =$ Deslocamento total (m)

$F(t) =$ Representação da força atuante F no tempo (N)

Pode-se classificar tipos de movimento que dependem das características do sistema, de modo geral classificam-se em determinísticos e não determinísticos (Groehs,2001).

Os movimentos determinísticos são aqueles que podem ser descritos por um modelo matemático explícito, como o oscilador linear apresentado. Estes ainda se dividem em periódicos e não periódicos.

Os determinísticos periódicos são aqueles que ocorrem em períodos definidos, um sistema simples massa mola, sem atrito, apresentará um movimento do tipo senoidal indefinidamente. (Groehs,2001)

Os movimentos não periódicos, não se repetem, embora sejam passíveis de um modelamento. O golpe de um martelo na cabeça de um prego é um exemplo, será observado um momento transiente de grande vibração no momento do impacto e no momento subsequente não haverá mais vibrações oriundas da ferramenta.

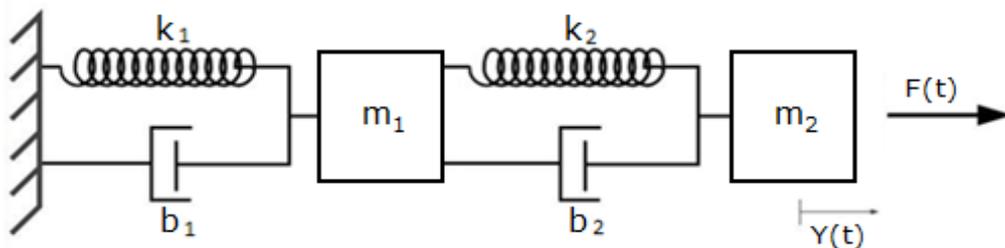
Os movimentos não determinísticos ou aleatórios não podem ser descritos por relações matemáticas explícitas por que cada momento é único e não pode ser reproduzido por um modelo matemático. Na prática, a oscilação de um conjunto de

suspensão de um veículo em uma estrada de terra. O perfil do solo altera-se a cada passagem de veículo, mesmo que sensivelmente, impossibilitando a previsão matemática. (Groehs,2001)

Para análise da dinâmica dos movimentos vibratórios é importante considerar-se os graus de liberdade e o sistema de coordenadas utilizado no elemento em questão. As coordenadas são diferentes dos graus de liberdade. As coordenadas dizem respeito ao sistema de eixos coordenados que regem o espaço do sistema, ou seja, os eixos nos quais o sistema pode deslocar-se.

Os graus de liberdade, por sua vez, referem-se aos pontos considerados na análise do sistema, um sistema massa mola com duas massas, podendo mover-se nos eixos x, y, z , contém no total seis graus de liberdade Figura 2, uma vez que neste sistema hipotético, cada massa pode deslocar-se nos três eixos, somando três graus de liberdade de cada massa tem-se os seis. (Groehs,2001)

Figura 2 - Ilustração sobre graus de liberdade



Fonte: adaptado de <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/26708/introducao.html>

onde:

$k_1 =$ Constante elástica da mola $\left(\frac{N}{m}\right)$

$b_1 =$ Coeficiente de amortecimento $\left(N \cdot m \cdot \frac{s}{rad}\right)$

$m_1 =$ Massa 1 do oscilador (Kg)

$k_2 =$ Constante elástica da mola $\left(\frac{N}{m}\right)$

$b_2 =$ Coeficiente de amortecimento $\left(N \cdot m \cdot \frac{s}{rad}\right)$

$m_2 =$ Massa 2 do oscilador (Kg)

$F(t) =$ Representação da força F no tempo (N)

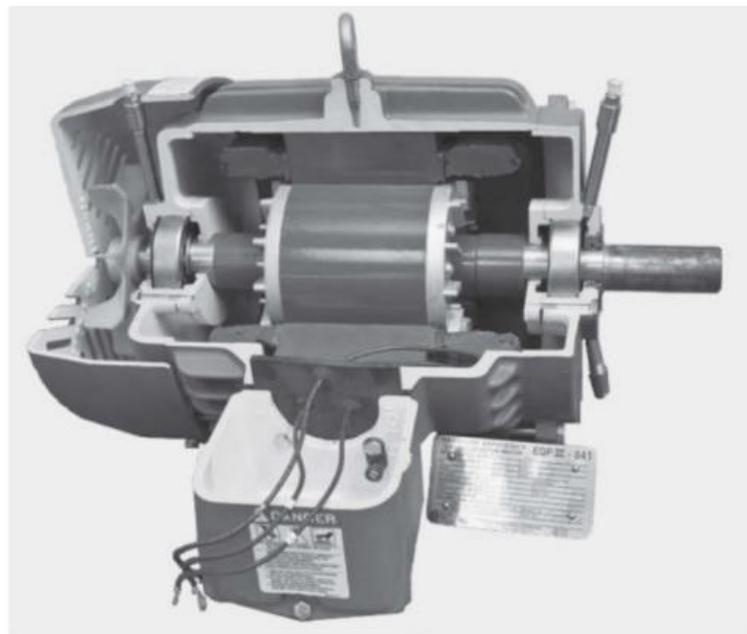
$Y(t) =$ Representação do deslocamento no tempo (m)

2.1.2 Vibração em máquinas elétricas rotativas

A análise de vibração engloba diversas topologias de sistemas mecânicos e é muito extensa, este trabalho concentra-se em um estudo direcionado a máquinas elétricas rotativas.

Os motores elétricos, largamente empregados na indústria, são dispositivos que convertem a energia elétrica em energia mecânica e podem ser encontrados em diversas configurações com diferentes potências e estratégias de funcionamento. São máquinas extremamente eficientes, principalmente se comparadas aos tradicionais motores a combustão, com eficiências em torno de 90%, a Figura 3 mostra a vista em corte de um motor elétrico de indução (FITZGERALD,2014).

Figura 3 - Vista em corte longitudinal de um motor de indução.



Fonte: (FITZGERALD, 2014)

As extremidades dos eixos do motor elétrico estão suportadas por mancais. Sempre que há um movimento relativo entre duas partes constitui-se um mancal, por definição, independente dos aspectos construtivos do mesmo. (NORTON, 2013).

No caso dos motores elétricos a análise de vibração concentra-se em avaliar os níveis de vibração nos mancais dianteiro e traseiro.

Na maioria dos motores de corrente alternada na faixa de um quarto até algumas dezenas de cavalos de potência os mancais são tradicionalmente de elementos rolantes (NORTON, 2013).

A detecção de anomalias através da manutenção preditiva, o monitoramento dos níveis de vibração periodicamente ou online em tempo real garante a previsão de falhas prematuras e eventuais quebras. Em um motor de grande porte com mais de mil cavalos por exemplo, os danos podem ser desastrosos com o colapso de um mancal. Além disso, encontrar as peças para reposição de máquinas de grande porte envolve grandes custos logísticos e tempo.

Fica, portanto, evidente a relevância do monitoramento de alguns parâmetros para este tipo de equipamento.

2.1.3 Falhas em mancais

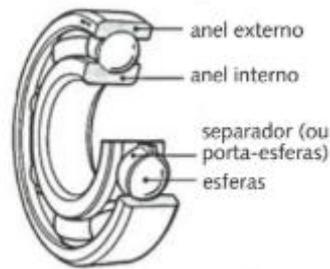
O motor elétrico de indução tem em suas extremidades o que se denomina mancal, responsáveis por permitir o giro relativo entre o eixo principal e a carcaça.

Pode-se ter um mancal que rola ou que escorrega, no caso de um motor elétrico apresenta-se um mancal de elementos rolantes, mancais de escorregamento são encontrados em outras aplicações como guias deslizantes (NORTON, 2013).

Os rolamentos apresentam as mais variadas composições e tipos, genericamente são construídos com dois anéis de aço concêntricos com canais, cada anel destes constitui uma pista, deste modo tem-se a pista interna, o anel mais interno, e a pista externa, o anel externo. (NORTON, 2013).

A Figura 4 apresenta o esquema genérico de um rolamento de esferas que é utilizado nos mancais da maioria dos motores elétricos de pequeno e médio porte encontrados no mercado.

Figura 4 - Esquema genérico de um rolamento de esferas



Fonte: (NORTON, 2013)

Este tipo de mancal de rolamento é padronizado pelas normas *American Bearing Manufactures Association (ABMA)*, *American National Standards Institute (ANSI)* e *Internacional Standards Organization (ISO)*.

A padronização permite uma intercambialidade de modelos e fabricantes uma vez que as normas estabelecem os parâmetros para utilização e diretivas dimensionais. A padronização também aumenta a confiabilidade no produto, uma previsão de falha por métodos da manutenção preditiva é facilitada.

Os mancais com elementos rolantes ou buchas são itens de desgaste, a análise do comportamento de tais componentes em motores é extremamente importante.

Os rolamentos são projetados especificamente para cada aplicação, podem ser concebidos para suportarem cargas radiais, axiais ou combinadas, além disso tem especificações para temperaturas de operação relacionadas as folgas construtivas.

Os de esferas comumente encontrados nos motores elétricos são recomendados para cargas baixas e médias, rolamentos de rolo Figura 5 são usados em aplicações com cargas pesadas. (NORTON, 2013).

Figura 5 - Ilustração de um rolamento de rolos



Fonte: (ALMEIDA, 2016)

A análise de vibração permite determinar precisamente falhas analisando as amplitudes verificadas no espectro de frequências obtido. Para cada componente do rolamento tem-se uma frequência especificada que revela comportamento anômalo. (N.TANDON e CHOUDHURY, 1999).

A frequência de passagem dos elementos rolantes por um ponto da pista interna, BPF_I (*Ball Pass Frequency Inner*) é dada pela equação (1), ω_{id} é a frequência referente a passagem de elementos por um ponto da pista interna, $Z\omega_s$ é o número de elementos rolantes, d é o diâmetro do elemento rolante, D é o diâmetro da gaiola e α é o ângulo de contato do elemento rolante com a pista.

$$\omega_{id} = \frac{Z\omega_s}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right). \quad (1)$$

No caso da pista externa a frequência de passagem dos elementos rolantes por um ponto da pista externa (ω_{od}) BPF_O (*Ball Pass Frequency Outer*) é dada pela equação (2):

$$\omega_{od} = \frac{Z\omega_s}{2d} \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right). \quad (2)$$

Os elementos rolantes têm uma frequência de rotação específica (ω_b) (*Ball Spin Frequency*), dado pela equação (3):

$$\omega_b = \frac{D\omega_s}{2d} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2(\alpha)\right). \quad (3)$$

A gaiola por sua vez também tem uma frequência fundamental (ω_g) a FTF (*Fundamental Train Frequency*), dada pela equação (4).

$$\omega_g = \frac{\omega_s}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha)\right) \quad (4)$$

onde:

ω_{id} = Frequência de passagem dos elementos rolantes por ponto da pista interna;

ω_{od} = Frequência de passagem dos elementos rolantes por ponto da pista externa;

ω_b = Frequência de rotação dos elementos rolantes;

ω_g = Frequência de rotação da gaiola;

Z = Número de elementos rolantes;

d = Diâmetro do elemento rolante;

D = Diâmetro da gaiola

ω_s = É a velocidade angular de rotação do eixo, dado em $\frac{rad}{s}$;

α = Ângulo de contato

2.1.4 Normas para análise

Há normas que tratam da análise de vibração, as estratégias para medição das grandezas e quais as medidas que devem ser verificadas nos elementos de interesse.

A norma ISO 20816-1:2016 abrange todas as explicações básicas sobre o conceito de frequências de vibração e quais são os intervalos de frequências de interesse.

Além disso, aborda as medidas, parâmetros para realização das coletas e técnicas, englobando os aspectos físicos dos dispositivos mais adequados para fazer a medição.

Na parte final ainda são abordados critérios de decisão baseados na análise vibratória, isto é, em que condições a magnitude das vibrações estão sendo originadas pelo mancal da máquina realmente ou trata-se de uma condição ambiente que polui a grandeza mensurada.

Parametrização de alarmes também é uma seção tratada na norma e amplamente aplicada no meio industrial.

A norma **“NBR 10082:2011 – Ensaio não destrutivo – Análise de vibrações – Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidade de operação de 600 rpm a 15000 rpm”** engloba as técnicas utilizadas para aquisição de dados de vibração em máquinas que operam em um dado intervalo de rotação, especificado pela norma em uma faixa de 600 RPM a 15000 RPM, englobando uma grande gama dos equipamentos industriais mais comuns.

Sobre os motores elétricos que são objeto de estudo neste trabalho em específico tem-se a **“NBR 10272:2011 – Medição e avaliação da severidade das vibrações mecânicas de máquinas elétricas rotativas”** que trata exatamente sobre o tratamento e coleta de dados em máquinas elétricas rotativas. Motores elétricos são equipamentos extremamente comuns na indústria. Em alguns casos, tem-se exemplares de grande porte, sendo o equipamento principal em processos específicos

relacionados ao mercado de extração de minério, grandes correias transportadoras, trituradores de sucata e laminação de aço.

A norma “**NBR 10273:2013 - Ensaios não destrutivos - Análise de vibrações - Requisitos para instrumentos de medição de severidade de vibração de máquinas**” é responsável por padronizar e indicar as características que um instrumento deve ter para fazer a correta aquisição dos dados de vibração em uma máquina.

Este trabalho trata de uma estratégia de coleta de dados de vibração através de instrumentação, sendo estas normas os princípios norteadores para especificação técnica do protótipo.

2.2 Instrumentação

Para analisar todas as variações das grandezas mecânicas envolvidas há uma vasta gama de instrumentos disponível no mercado.

Diferentes estratégias são encontradas, há alguns métodos experimentais desenvolvidos predominantemente no meio acadêmico.

A técnica mais difundida e amplamente empregada é o uso de acelerômetros instalados nas proximidades dos mancais do motor.

As normas da área sugerem os locais ideais para instalação dos sensores, há uma série de critérios e cuidados quanto a estratégia de fixação.

2.2.1 Acelerômetros

Sensores que medem a aceleração e entregam na saída um sinal proporcional a vibração, choque ou a aceleração são os acelerômetros. Encontra-se com funcionamento baseado em princípios piezoresistivos, piezoelétricos, capacitivos ou ainda os acelerômetros integrados, dispositivos concebidos através de técnicas de microeletrônica e denominados MEMS (*microelectromechanical systems*). (BALBINOT, 2011)

Para a aplicação deste trabalho escolheu-se um acelerômetro integrado, dadas as dimensões favoráveis a concepção de um invólucro de proporções reduzidas, favorecendo a portabilidade e instalação em locais de difícil acesso.

Os acelerômetros baseiam-se na segunda lei de Newton em (5), onde a força é o produto da massa pela aceleração e a lei de Hooke em (6) sobre o comportamento de dispositivos elásticos.

$$F = m \cdot a, \quad (5)$$

$$F = k \cdot X, \quad (6)$$

onde:

F = Força dada em Newtons (N);

m = Massa do corpo de deslocamento dada em quilogramas (kg);

a = Aceleração dada em m/s^2 ;

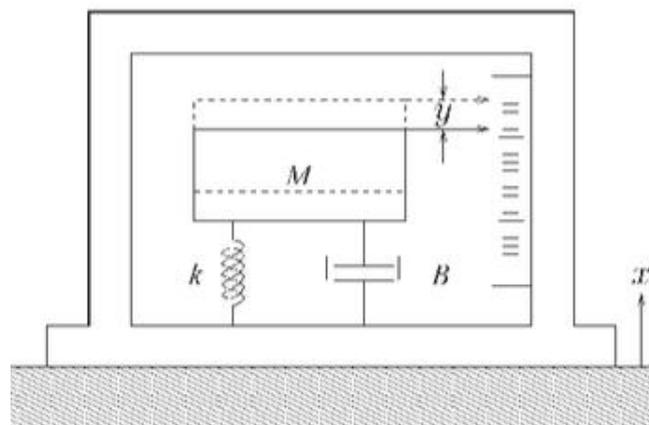
k = Constante elásticidade da mola;

X = Deslocamento da mola;

Os acelerômetros podem medir variações em mais de um eixo em um mesmo corpo, o acelerômetro integrado geralmente dispõe de medição em três eixos (X, Y e Z), deste modo é possível diagnosticar folgas em todas as direções em um mancal, radial, axial ou combinada. (BALBINOT, 2011)

Pode-se modelar matematicamente o funcionamento de um acelerômetro aplicando alguns conceitos de análise de circuitos. Trata-se de um modelo de equações diferenciais, a transformada de Laplace é uma poderosa ferramenta para solução de tais problemas. A Figura 6 apresenta um esquemático para modelamento de um acelerômetro.

Figura 6 - Esquemático para modelamento de um acelerômetro



Fonte: (AGUIRRE,2012)

onde:

$M =$ Massa do elemento de deslocamento; (kg)

$k =$ Constante elástica da mola ; $\left(\frac{N}{m}\right)$

$B =$ Coeficiente de amortecimento; $\left(N.m.\frac{rad}{s}\right)$

$x =$ Deslocamento do corpo de interesse; (m)

$y =$ Representação da grandeza de avaliação; (m)

Para tal método de medição percebe-se que não há uma relação direta entre o deslocamento real do corpo de prova “ x ” e a magnitude do sinal “ y ” conforme o esquemático, não sendo possível a obtenção de uma equação linear do tipo $y = ax + b$. (AGUIRRE, 2012)

Define-se a relação entre o sinal de interesse y e o deslocamento x usando a figura 6 conforme equações (7) e (8). Onde M representa a massa do corpo de oscilação, X é o deslocamento real do corpo do sensor inteiro, Y é o deslocamento do corpo oscilante no interior do sensor, k é a constante elástica da mola que suporta o sistema e B é o coeficiente de amortecimento do conjunto que amortece os movimentos. Trata-se de uma equação diferencial que pode ser modelada utilizando o conceito da transformada de Laplace que facilita as operações nos regimes das frequências complexas.

$$MX(s)s^2 = Y(s)[k + Bs + Ms^2], \quad (7)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{M}{k} \frac{s^2 k/M}{s^2 + \left(\frac{B}{M}\right)s + k/M}. \quad (8)$$

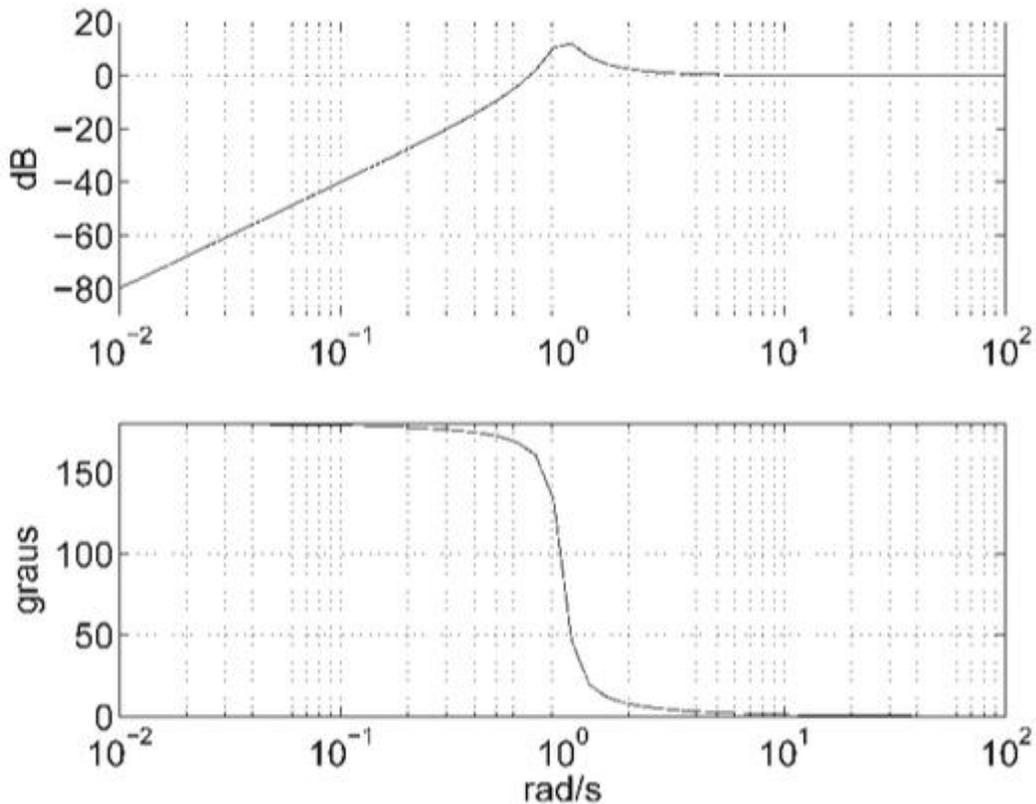
Neste contexto, substituindo-se s por $j\omega$, percebe-se a relação direta do modelo com a frequência na qual o sistema opera, a resposta obtida é bem linear. Em um diagrama de bode é possível verificar a resposta do acelerômetro a altas frequências que mostra-se estável.

O comportamento acima de frequências baixas, próximas a frequência natural torna-se praticamente uma reta. (AGUIRRE,2012).

Na Figura 7 é possível verificar o comportamento em frequência da resposta dos sensores e a linearização da resposta acima da frequência crítica onde ainda há

ganho, observa-se um pequeno pico de ressonância centrado na frequência de interesse que pode ser compensado com estratégias de filtros, até mesmo digitais, todo implementado em *software*.

Figura 7 - Diagrama de bode do modelo da resposta de um acelerômetro



Fonte: (AGUIRRE,2012).

Estruturalmente os acelerômetros contam com uma massa acoplada a um transdutor piezoelétrico, piezoresistivo ou capacitivos.

2.2.2 Parâmetros e características

Escolher o modelo e os parâmetros corretos do dispositivo para medir as grandezas em campo exige conhecimento das características e os parâmetros essenciais para obtenção de um resultado coerente.

Estão disponíveis no mercado diversos modelos comerciais com: tamanhos, massas, sensibilidades e número de eixos de medição diferentes.

A sensibilidade de um acelerômetro genérico é dada por

$$S = \frac{m}{k}, \quad (9)$$

onde:

$m =$ massa do elemento de deslocamento do acelerômetro(kg);

$k =$ constante de elasticidade da mola ($\frac{N}{m}$).

Como o valor da sensibilidade é uma função da massa e da constante k , observa-se as sensibilidades mais elevadas nos maiores acelerômetros devido a maior massa oscilante contida em seus interiores. Acelerômetros de princípios capacitivos apresentam valores de sensibilidade menores se comparados aos outros, no entanto, o avanço nos circuitos condicionadores vem mudando este fato e eles têm sido aplicados a casos onde necessita-se de uma sensibilidade maior (BALBINOT, 2011).

A indicação dos sistemas de análise é geralmente dada em g , embora o Sistema Internacional utilize m/s^2 . Um g corresponde a $9,8m/s^2$, deste modo, pode-se verificar seus múltiplos que são as formas mais usuais em *softwares* e relatórios da área conforme exemplificam as equações (10) e (11) (BALBINOT, 2011)

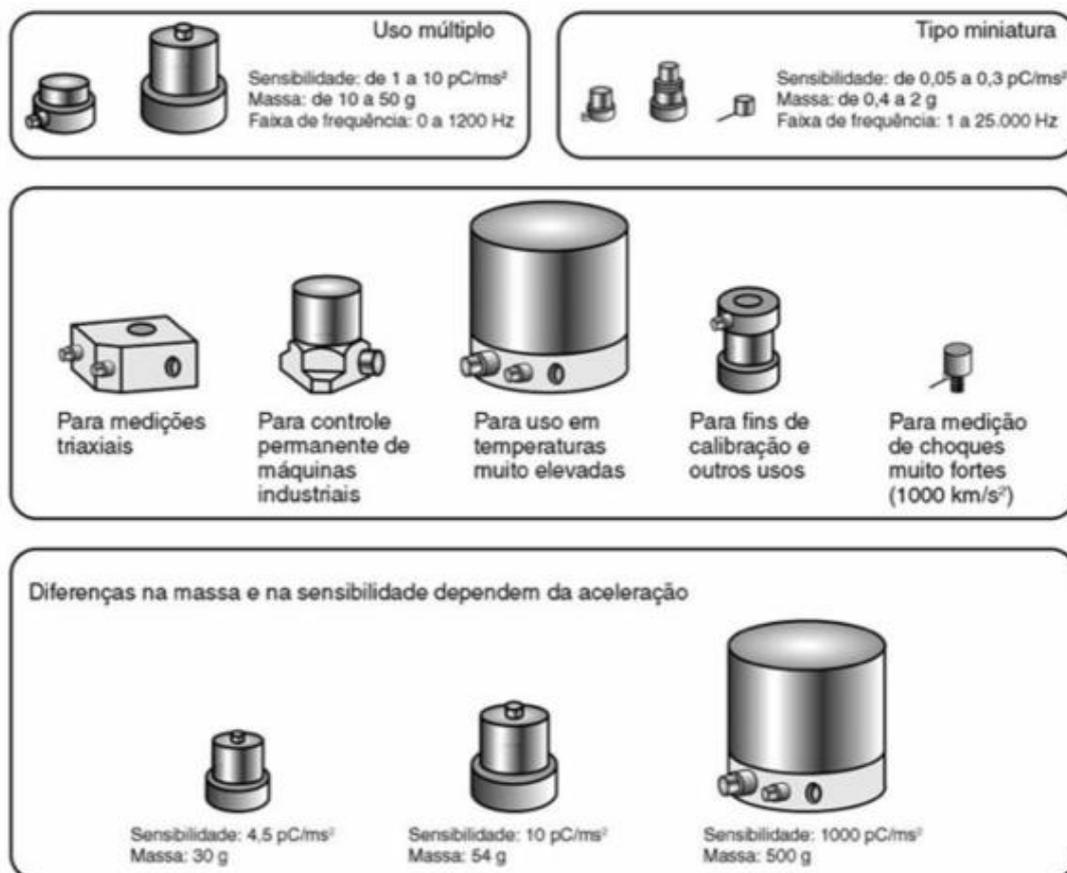
$$10g = 10 * \frac{9,8m}{s^2} = \frac{98m}{s^2} \quad (10)$$

$$1mg = 1x10^{-3} * \frac{9,8m}{s^2} = 0,098m/s^2 \quad (11)$$

A Figura 8 apresenta uma variedade de modelos de acelerômetros encontrados no mercado. São tipos diversos que se encaixam em diferentes demandas, dependendo da temperatura ambiente, eixos de interesse, modo de uso, amplitude de sinal e sensibilidade.

Há uma preocupação com a relação de massa entre o corpo de prova e o acelerômetro. A massa do acelerômetro não deve ser superior a dez por cento da massa do corpo de prova. Isto deve-se ao fato de que com valores superiores podem haver distorções do comportamento real devido a adição de massa no corpo de prova. (BALBINOT, 2011).

Figura 8 - Diferentes modelos, dimensões e sensibilidades



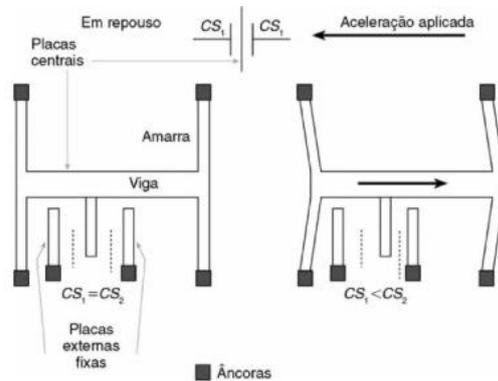
Fonte: BALBINOT, 2011.

Este trabalho concentra-se nos acelerômetros capacitivos. Por serem os menores, mais baratos e apresentarem uma resposta satisfatória para a aplicação.

Observa-se um esforço tecnológico na concepção dos acelerômetros capacitivos devido a sua estabilidade de resposta, tamanho e peso.

A estrutura miniaturizada com pequenas capacitâncias é um desafio de instrumentação pois como trabalha-se com sinais de baixíssimas amplitudes o condicionamento deve ser cuidadoso e é uma parte bem aprimorada em tais sensores. Essas pequenas células ancoram-se em substratos de silício e respondem a aceleração nos três eixos fazendo-se a topologia correta no encapsulamento. A Figura 9 tem a representação dos microdispositivos da família ADXL.

Figura 9 - Representação da estrutura interna de dispositivo IMEMS



Fonte: BALBINOT, 2011.

O modelo entrega uma variação de capacitância em função da movimentação das placas no interior do dispositivo, funciona como um capacitor variável.

O valor da alteração da capacitância é dado em função da permissividade do dielétrico utilizado, área entre as placas, distância entre as placas e a variação de distância entre placas do sensor capacitivo diferencial, conforme equação (12) (BALBINOT, 2011).

$$\Delta C = \frac{2\varepsilon A}{d^2} x, \quad (12)$$

onde:

$\Delta C =$ Variação da capacitância(F);

$\varepsilon =$ Permissividade do dielétrico($\frac{F}{m}$);

$A =$ Área entre as placas(m);

$d =$ Distância entre as placas(m);

$x =$ Variação da distância entre as placas do sensor capacitivo diferencial(m).

Tal variação é inserida na função de transferência do elemento e convertida a uma grandeza tratável que posteriormente é condicionada e entregue ao usuário.

2.2.3 Cuidados com a fixação

A fixação dos acelerômetros é um dos aspectos mais críticos sobre sua utilização, uma vez que se trata da medição de um deslocamento mecânico, qualquer

folga ou meio de atenuação entre o acelerômetro e o corpo de teste mascara a medição real.

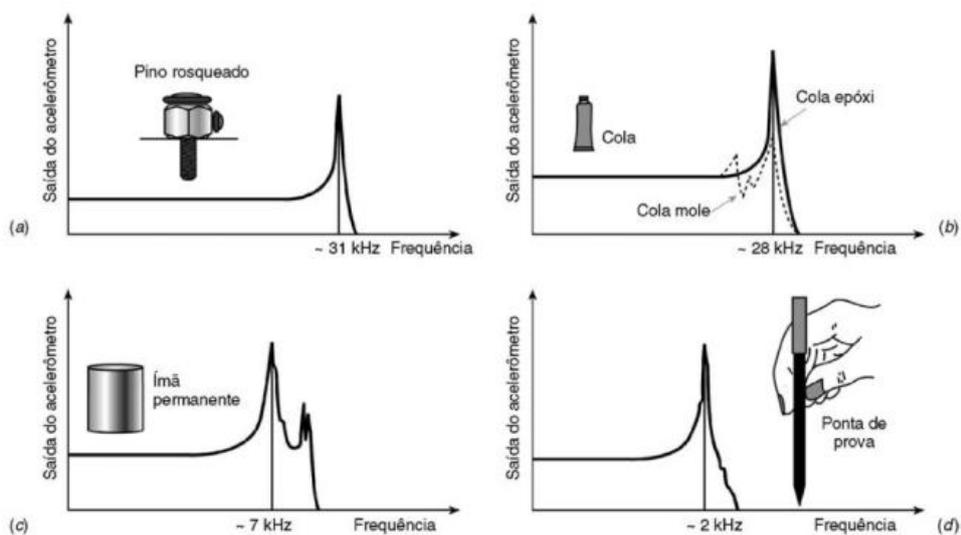
Além disso, o sensor deve ser posicionado de acordo com a direção de deslocamento desejada observando-se o principal eixo de sensibilidade, é comum dispositivos que tem sensibilidades diferentes para cada eixo (BALBINOT, 2011).

Há quatro principais meios de obter-se uma medição confiável. Através da fixação por Imã permanente, rosca ou cola. Há uma quarta opção geralmente usada em equipamentos móveis que é o uso de uma ponta de prova que em contato com o elemento em teste recebe a vibração emitida (BALBINOT, 2011).

Para qualquer método de aquisição, é importante limpar a superfície impedindo qualquer interface de perturbação. Fixação com rosca ou cola são confiáveis, mas exigem alterações no equipamento em análise, nem sempre isso é possível, a ponteira magnética é mais versátil embora não se aplique em casos onde o objeto é constituído de um paramagnético.

A Figura 10 ilustra a resposta em frequência para os sistemas de fixação mais usuais. Em “a” tem-se a fixação por pino rosqueado e percebe-se no gráfico uma resposta estável até 31 kHz. Em “b” na Figura 10 tem-se a fixação por cola e uma resposta estável até 28 kHz. Em “c” tem-se a fixação por imã aplicada neste projeto, com resposta estável até 7 kHz e por fim em “d” a caneta que coleta apenas por pressão de contato, respondendo bem até 2 kHz.

Figura 10 - Métodos de fixação usuais e resposta de frequência



Fonte: (BALBINOT, 2011).

2.3 Análise de sinal

Para avaliação da vibração faz-se uso de um instrumento para aquisição dos dados, um circuito condicionador, que na maior parte dos sensores já está integrado ao corpo do instrumento.

Selecionada ao *hardware* da instrumentação, a resposta será um valor numérico qualquer dado em um eixo específico em m/s^2 ou g . No entanto este dado isolado é pouco útil por que não permite a observação clara dos espectros de frequência, picos de magnitude de frequências e evolução no tempo. Por este motivo, aplica-se uma série de tratamentos matemáticos a fim de obter-se os dados em uma forma padronizada que seja simples detectar e avaliar um problema.

O sinal tratado para acelerômetros é periódico e, portanto, pode ser expresso como uma combinação de sinais senoidais. Esta técnica chama-se análise espectral e é muito útil neste meio por que permite conhecer o conteúdo das frequências contidas no sinal analisado (AGUIRRE,2012).

2.3.1 Processamento digital de sinais

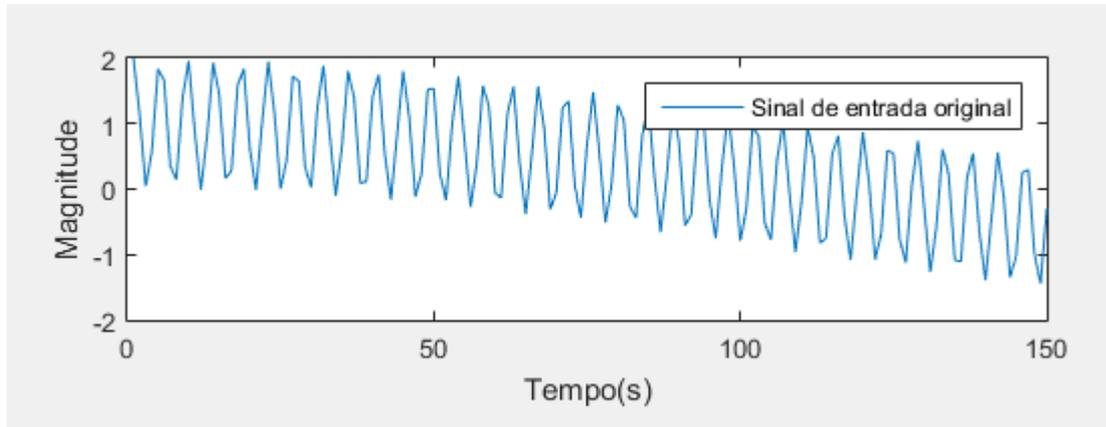
Trazer um sinal do mundo real, que é analógico para um *software* ou qualquer sistema digital que se apresenta, atravessa o conceito do processamento digital de sinais, no caso da análise de vibrações, não é diferente.

Quando se diz que o mundo é analógico, significa que os sinais e fenômenos costumam ocorrer de modo contínuo no tempo, no entanto, no contexto digital é necessário uma limitação destes dados por que sinais contínuos contém um número infinito de informações (WEEKS, 2012).

Neste contexto, é preciso compreender o conceito de amostragem, a Figura 11 mostra um sinal contínuo no tempo e na Figura 12 o mesmo sinal discreto no tempo.

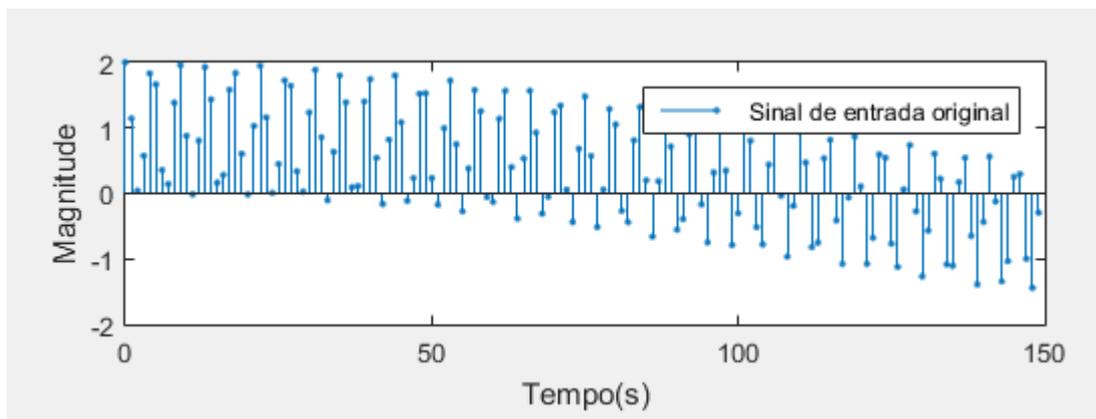
Um sinal real contínuo no tempo passa por um processo de amostragem para posterior tratamento em um sistema digital. Trata-se da coleta de pontos específicos do sinal no tempo, são pequenas janelas com tamanho definido pela frequência de amostragem. (WEEKS, 2012).

Figura 11 - Sinal de entrada de exemplo



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 12 - Sinal da figura 11 após amostragem



Fonte: Elaborado pelo autor

O período de um sinal é o tempo que o mesmo leva para se repetir. É possível extrair-se a frequência do período e vice-versa através da equação (16) (WEEKS, 2012).

$$f = 1/T. \quad (16)$$

onde:

f = frequência em Hertz;

T = período em segundos;

Usa-se T_s para denotar o período de amostragem e f_s para denotar a frequência de amostragem. A frequência de amostragem é a frequência na qual são realizadas as capturas do sinal amostrado, trata-se da frequência na qual captura-se

“fotos” da situação do sinal amostrado. Genericamente um sinal amostrado é matematicamente definido pela equação (17):

$$x[n] = x(nTs). \quad (17)$$

onde:

n = Representa o número da amostra na sequência em análise;

Ts = Período de amostragem;

$X[n]$ = Função amostrada

2.3.2 A série de Fourier

O matemático e físico *Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830)* provou que é possível decompor um sinal periódico qualquer na soma de uma série de sinais senoidais com amplitudes e frequências específicas que somados correspondem exatamente ao sinal de origem ou chegam muito próximos dependendo da qualidade da análise desejada e necessária. (AGUIRRE,2012).

A série de Fourier é definida como um somatório de senos e cossenos em múltiplas frequências, conforme expresso na equação (18):

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos nx + b_n \cdot \sen nx) . \quad (18)$$

onde:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dx \text{ é a componente DC do sinal}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos(nx) dx \text{ é componente do sinal}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \sen(nx) dx \text{ é componente do sinal}$$

A transformada de Fourier é uma ferramenta muito útil quando deseja-se avaliar um sinal que é dado no domínio do tempo, no domínio das frequências. Tal ferramenta é regida pela integral de Fourier e pode ser obtida para sistema discretos. (KREYSZIG, 2008).

A transformada é formalmente definida pela equação (19). No entanto, essa abordagem matemática não é aplicada nesta notação para tratamento de sinais

digitais. No caso de sistemas digitais faz-se aproximações por algoritmos iterativos que usam os princípios dos somatórios ocultos sob o conceito da integração (SADIKU, 2014):

$$F(\omega) = F[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt . \quad (19)$$

No contexto discreto a transformada de Fourier é dada pela expressão (20) (WEEKS, 2012):

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \left(\cos\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) - j \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) \right). \quad (20)$$

onde:

n e m são índices do espaço amostral, $(n, m = 1, 2, \dots, N - 1)$.

O formato com o uso dos somatórios é facilmente tratado do ponto de vista de programação com o uso de laços de repetição e incremento dos índices pertinentes (WEEKS, 2012). Por conta deste aspecto, esta é a estratégia matemática aplicada no trabalho para análise do sinal de entrada do sistema.

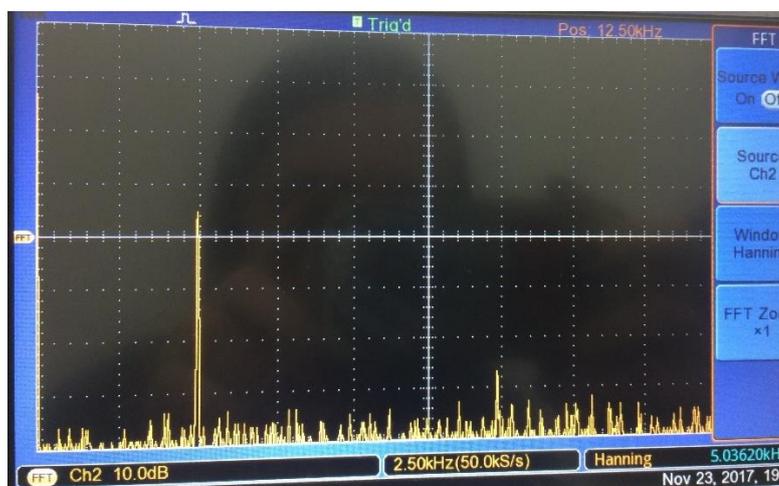
2.3.3 FFT, DFT e espectro

As ferramentas utilizadas no mercado que lidam com grandezas de frequência trazem, na maioria dos casos, uma função denominada *FFT (Fast Fourier Transform)*. A transformada rápida de Fourier aplica o mesmo conceito matemático da equação (19), no entanto, utiliza um algoritmo otimizado para realizar a tarefa. A transformada discreta de Fourier ou DFT, é um método direto não otimizado

Em grandes montantes de dados o custo computacional torna-se muito alto inviabilizando uma análise em tempo razoável em campo. (WEEKS, 2012)

A Figura 13 traz uma imagem de um exemplo de espectro de frequência obtido no osciloscópio da universidade.

Figura 13 - Espectro de frequência obtido na saída de um filtro passivo



Fonte: Elaborado pelo autor

Na representação espectral verifica-se a energia total do espectro, no contexto das vibrações corresponde ao nível global de vibração. Na Figura 13 o eixo vertical representa o ganho em decibéis e o horizontal a frequência em Hz. Esta energia é dada pelo cálculo de uma integral conforme enunciado na equação (21). (KREYSZIG, 2008).

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\hat{f}(\omega)|^2 d\omega \quad (21)$$

A energia total vai depender dos limites da integral considerada e da frequência ω avaliada, deste modo pode-se calcular a energia em cada raia espectral. (KREYSZIG, 2008).

2.4 Estratégias de interface

Para coletar, transformar e apresentar os dados há diversas estratégias possíveis. O uso de microcontroladores é cada vez mais frequente, ferramentas como o Arduino foram concebidos com um viés educacional e um enfoque na solução final.

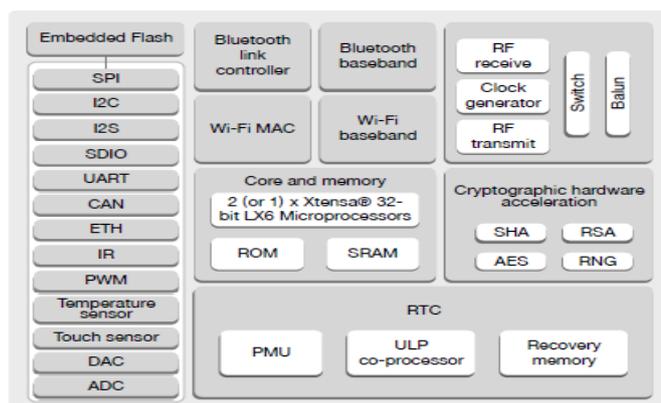
Alguns destes microcontroladores vem integrados em soluções com recursos de conectividade como é o caso do ESP32, selecionado para esta solução.

2.4.1 Microcontrolador ESP32

O ESP32 integra diversos aspectos extremamente úteis para soluções de monitoramento e automação. O conjunto com microprocessador da Espressif agrega

módulo *Wi-fi*, *bluetooth*, modos de operação de baixo consumo de energia e um sistema *dual-core Harvard Architecture Xtensa LX6 CPU*. A figura 14 apresenta um diagrama de blocos das funções do microprocessador, trata-se de uma poderosa ferramenta extremamente flexível para a solução proposta e outras que envolvam comunicação e sensoriamento (*Espressif,2017*).

Figura 14 - Diagrama de blocos de função



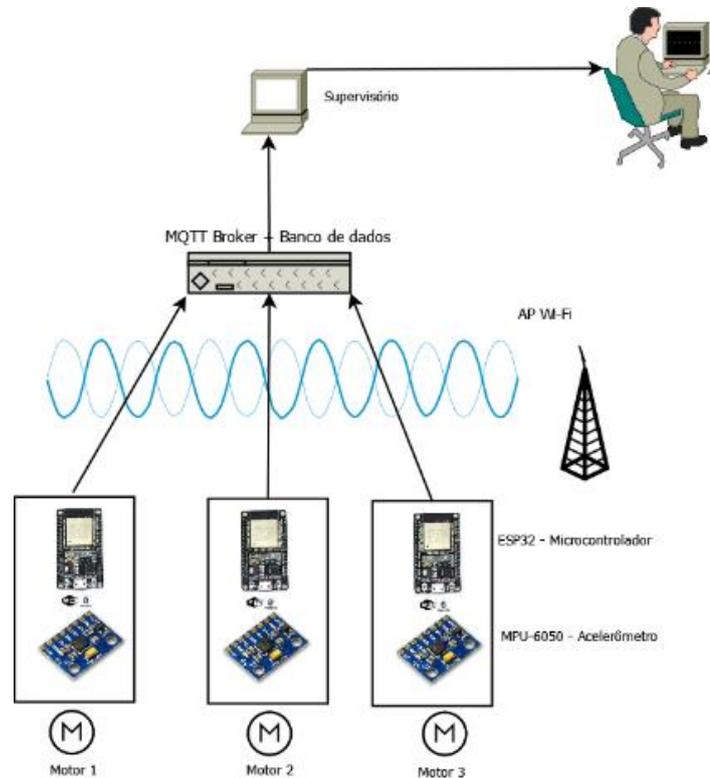
Fonte: (<https://www.espressif.com/en/support/download/documents>)

O dispositivo escolhido dispõe de trinta e quatro GPIOs programáveis. São mais de dezoito conversores ADC de doze bits, entrada para sensores de toque, sensor de temperatura e interfaces de comunicação I2C, SPI, UART, CAN. (*Espressif,2017*).

Além disso o microcontrolador conta com um núcleo de coprocessamento de baixo consumo, para operações em áreas remotas onde o sistema seja alimentado apenas por baterias esta funcionalidade é essencial para otimização do algoritmo responsável por coletar os dados e manter os serviços de comunicação funcionais.

A arquitetura do sistema final proposto é apresentada na Figura 15 onde tem-se na parte inferior três módulos, representando três protótipos, enviando os dados ao servidor MQTT chamado *Broker*. Os dados passam por um supervisor e então ficam disponíveis para um usuário final representado por um indivíduo sentado no desktop.

Figura 15 - Esquemático da solução final



Fonte: Elaborado pelo autor

2.4.2 Redes de computadores

No século XX a indústria e as tecnologias nela embarcadas concentravam-se em coletar, armazenar e tratar dados de processo, muitas vezes de modo isolado. No século XXI este processo tem se tornado um só e com sistemas integrados a linha que separa os sistemas especializados em cada uma dessas etapas fica cada vez mais apagada. (TANENBAUM, 2008).

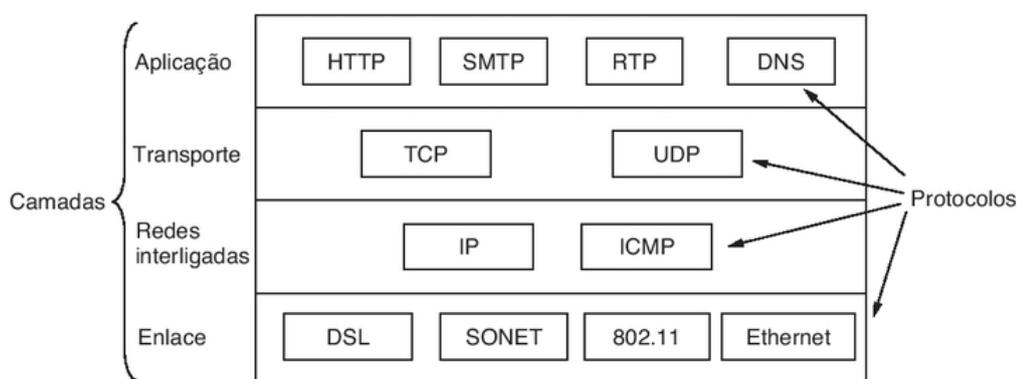
A análise de vibração traz a necessidade da coleta, armazenamento e análise e por isso usa sistemas computacionais. Há disponibilidade de equipamentos de diversos fabricantes no mercado e geralmente os custos são altos e a instalação de sistemas fixos demanda muito trabalho e equipes qualificadas.

Com o advento das tecnologias sem fio surge a possibilidade de unir-se a necessidade do uso das ferramentas de análise ao conceito de redes de computador, sistemas conectados a uma rede corporativa enviando informações aos mantenedores através de um sistema supervisório.

Diz-se que a origem das redes de computadores como estão postas hoje foi com um projeto denominado ARPANET, uma rede de pesquisas patrocinada pelo Departamento de Defesa do governo dos estados unidos. Com esta rede surgiram muitas outras e percebeu-se a necessidade da criação de um padrão para que houvesse comunicação entre todas. (TANENBAUM, 2008).

Surge então o modelo de referência TCP/IP que carrega diversos padrões distribuídos em camadas, muito semelhante ao tradicional modelo OSI. A Figura 16 traz um modelo TCP/IP com alguns protocolos de camada.

Figura 16 - Modelo TCP/IP com alguns protocolos



Fonte: (TANENBAUM, 2008).

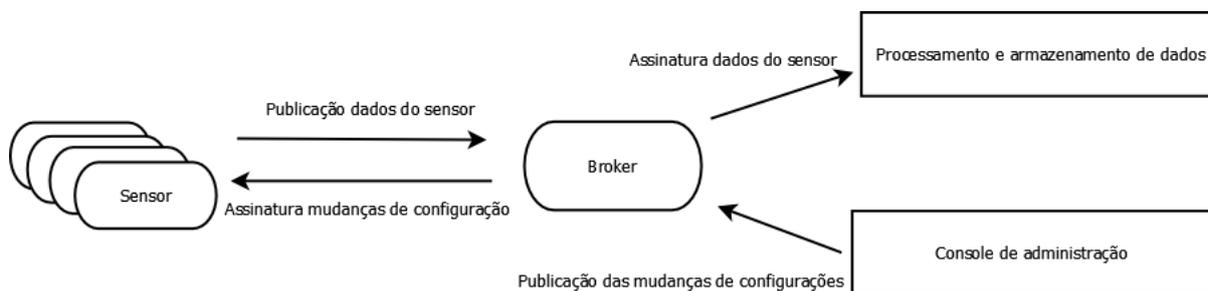
Com a chegada dos notebooks e mais recentemente dispositivos *IoT* (*Internet of Things*) as redes sem fio ganharam grande atenção. Regidas pelo padrão IEEE 802.11, LAN sem fio, ocupam a preferência nas aplicações onde a passagem de cabos é desnecessária, difícil ou inviável e, portanto, foi a tecnologia mais adequada para a solução apresentada.

2.4.3 Protocolo MQTT

O protocolo MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*) foi desenvolvido pela IBM no final dos anos 90. Seu propósito inicial era a conexão de sensores em *pipelines* de petróleo a satélites (YUAN, 2017).

Tal protocolo suporta comunicação assíncrona e é perfeito para aplicações com acesso a rede intermitente ou de baixa qualidade por que desacopla o emissor do receptor. (YUAN, 2017). A Figura 17 traz um esquemático sobre o protocolo MQTT.

Figura 17 - Esquemático do protocolo MQTT



Fonte: Elaborado pelo autor

A interface feita pelo *broker* é a de administrar as mensagens, fazendo-se uma analogia com um processo mais simples, trata-se de um entregador de jornal. Os sensores fazem o papel da editora que gera e organiza a informação, o entregador leva até o destinatário que recebe, processa e armazena a informação. O console de administração é representado pelo gestor da assinatura do jornal que eventualmente muda de endereço ou deseja receber uma sessão a mais ou a menos no jornal (YUAN, 2010).

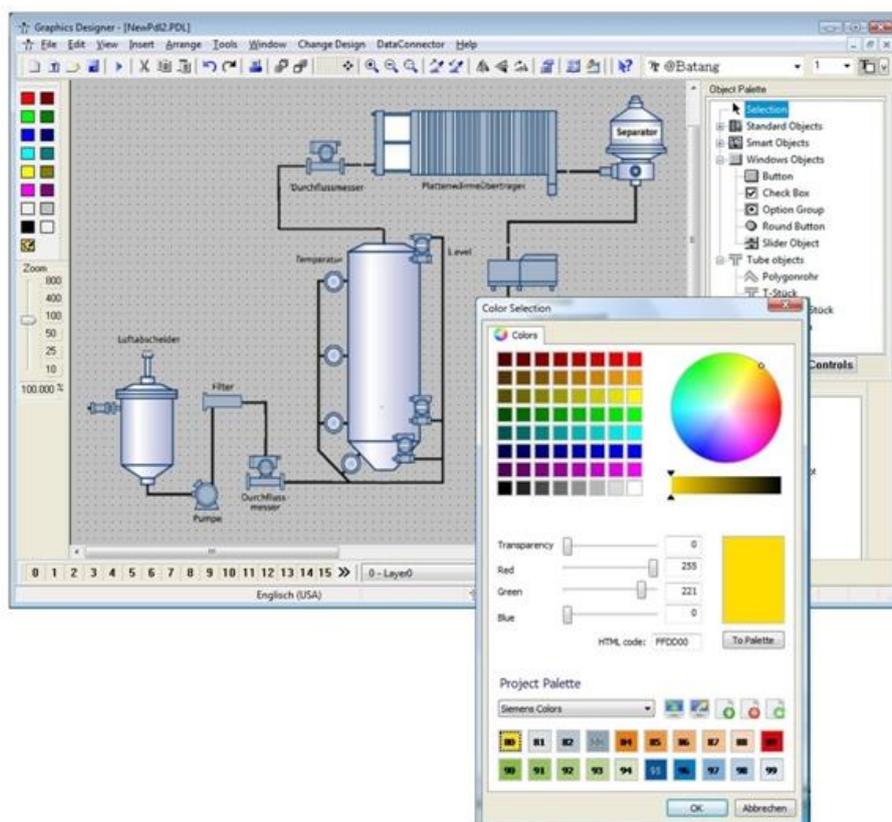
Uma das grandes vantagens do MQTT além da flexibilidade de uso em diversos ambientes e arquiteturas de rede não tão confiáveis, é sua simplicidade e baixo custo computacional possibilitando o uso em dispositivos de baixo consumo (documentação oficial MQTT, 2018)

2.4.4 Aplicação Supervisório

Na ponta gerencial do processo está o supervisório. Um sistema que reúne as informações de campo e permite o comando de equipamentos, configuração de alarmes e supervisão geral (BOYER, 2010).

A Figura 18 mostra o editor de um sistema supervisório da fabricante Siemens chamado *WinCC*. Os dados obtidos em campo pelo Controlador Lógico Programável são conectados aos espaços reservados no *software*. Neste contexto cada variável no *software* costuma ser denominada TAG.

Figura 18 - Montagem de um supervisorio para sistema WinCC, Siemens

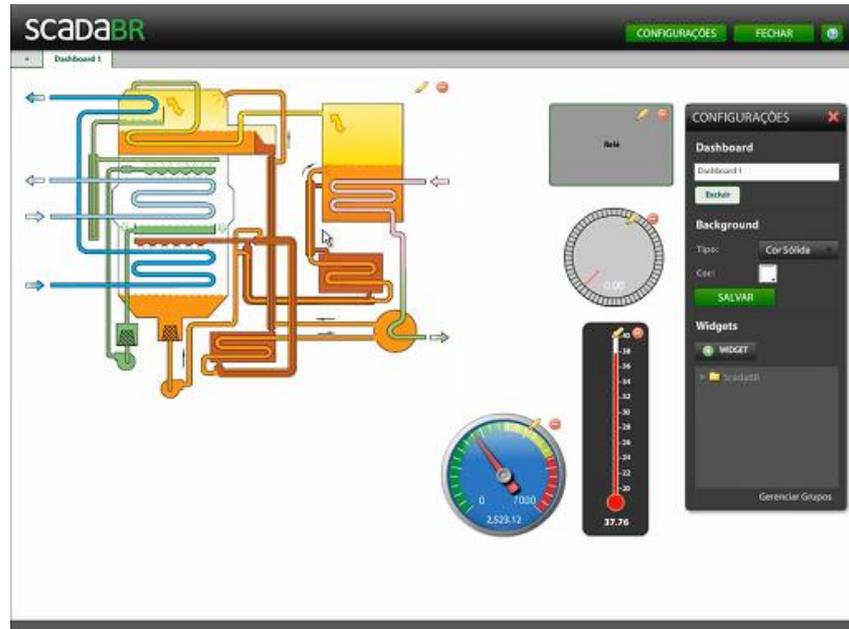


Fonte: Siemens

Os supervisórios são comumente referidos como SCADA, do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*, sistemas de supervisão e aquisição de dados.

Como o foco do trabalho está em sistemas de baixo custo agregando conceitos de código aberto e *software* livre o SCADABR foi um dos *softwares* selecionados por oferecer sistema de alarmes e eventos parametrizáveis, ambiente de desenvolvimento, acesso via navegador, aquisição de dados via diversos protocolos, visualização de dados em tempo real, registro contínuo em banco de dados, construção de telas gráficas de IHM ou Sinópticos. A figura 19 mostra um exemplo de sistema supervisorio livre, SCADABR.

Figura 19 - Exemplo de sistema desenvolvido no ScadaBR



Fonte: Elaborado pelo autor

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

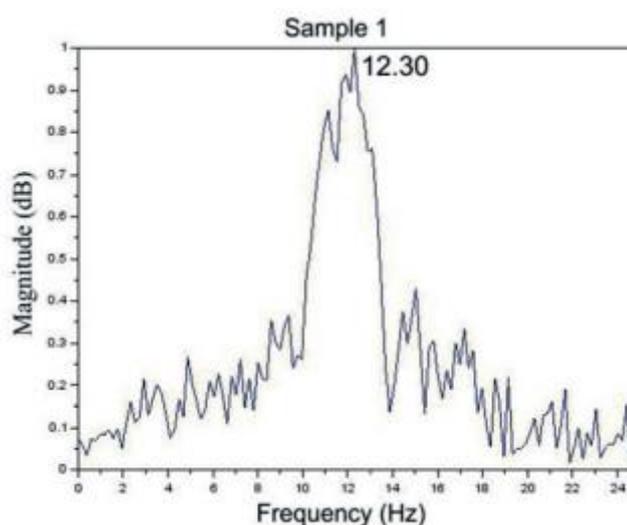
Para o desenvolvimento do trabalho foram feitos estudos de caso de aplicações semelhantes publicadas em artigos e trabalhos de dissertação de mestrado ou doutorado.

Em uma abordagem voltada ao estudo dinâmico de estruturas, especificamente, pontes em (PRAVIA, Z. M. C. e BRAIDO 2015, J. D.. *Measurements of bridges' vibration characteristics using a mobile phone.*), os autores fazem a amostragem do sinal através de um aparelho *Smartphone*.

Neste estudo citado de PRAVIA e BRAIDO adotam um *smartphone* Motorola equipado com um acelerômetro triaxial, um instrumento comum nesses dispositivos responsável pelo comportamento dinâmico do *software* como girar a tela automaticamente, detectar movimentos ou quedas.

Com o posicionamento do aparelho em três pontos distintos da ponte, foi possível traçar o comportamento das frequências de oscilação da ponte quando era submetida a uma carga em movimento, por exemplo, um caminhão. Os resultados da resposta em frequência obtida com o aparelho após aplicação da transformada rápida de Fourier, FFT (*Fast Fourier Transform*) podem ser verificados na Figura 20.

Figura 20 - Resposta em frequência a passagem de carga na ponte ensaiada



Fonte: (PRAVIA, Z. M. C. e BRAIDO 2015)

Em outro projeto (SILVA et al., 2014), a abordagem é genérica para análise de vibração em equipamentos e em estruturas, porém, com um sistema sem fio.

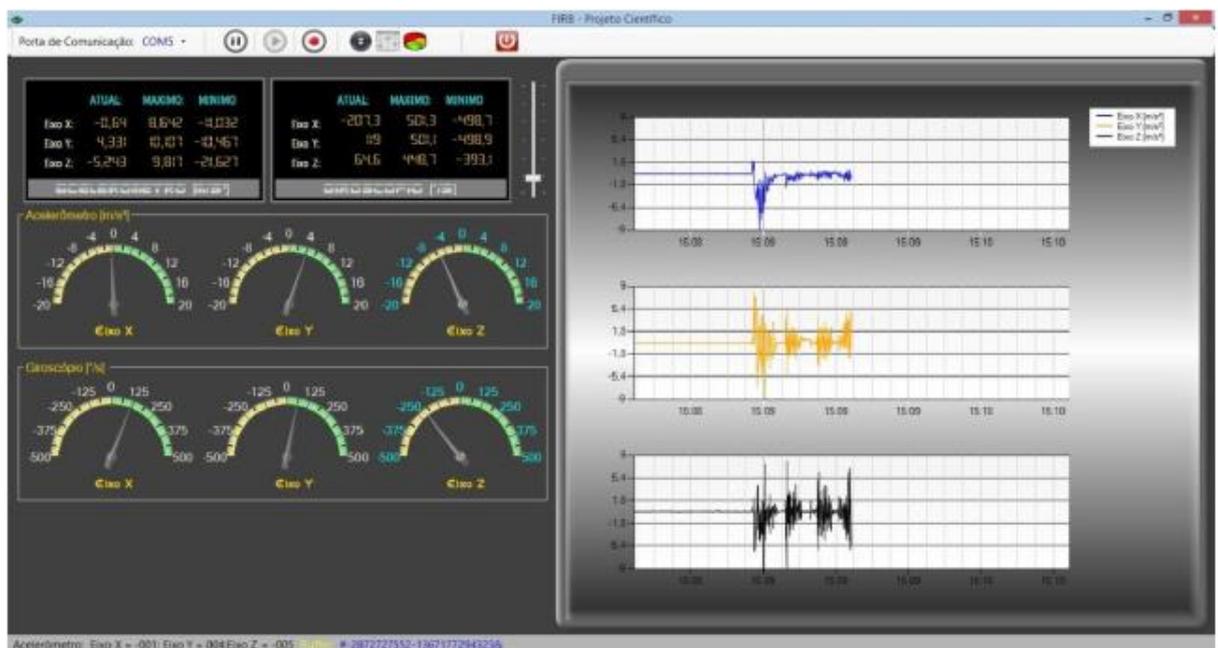
Os autores utilizaram um acelerômetro MPU6050, mesmo escolhido inicialmente para o desenvolvimento deste projeto por ter uma boa relação custo benefício e oferecer uma resposta em frequência satisfatória para aplicação.

No sistema de (SILVA et al., 2014), a coleta de dados é feita pelo acelerômetro, interpretado por um dispositivo Arduino, um microcontrolador semelhante ao empregado neste trabalho só que mais limitado em alguns aspectos. O microcontrolador transmite os dados através de um rádio comunicador, 2,4 GHz, modelo NRF24L01. Na outra extremidade há outro dispositivo rádio comunicador que recebe os dados e envia a um segundo microcontrolador.

O microcontrolador na outra extremidade de comunicação é responsável por receber os dados e inseri-los em um servidor de banco de dados para posterior consulta e análise. Neste trabalho o autor não faz um tratamento do sinal com transformadas ou qualquer técnica semelhante, focando-se nas leituras apenas das acelerações em cada eixo. (SILVA et al., 2014).

O supervisório foi desenvolvido em *Visual Basic* e o banco de dados utilizado foi o MySQL. A Figura 21 mostra a aplicação final desenvolvida.

Figura 21 - Supervisório desenvolvido por (SILVA et al., 2014).



Fonte: (SILVA et al., 2014).

Em uma terceira abordagem por (SILVEIRA et al., 2011), o foco é centrado nos mancais de rolamento e análise por envelope de aceleração.

Neste estudo os autores utilizam um analisador de vibração MICROLOG GX para coleta de dados, um acelerômetro com uma sensibilidade considerável, da ordem de 100 mV/g . Para análise dos dados os autores fazem uso de um software de análise de vibração denominado MACHINE ANALYST, o mesmo, é responsável por avaliar os dados brutos coletados e exibir os gráficos de análise.

Os autores não abordam profundamente aspectos da coleta de dados e aplicação da transformada por que utilizam uma solução comercial para tal, no entanto fazem uma abordagem específica nos defeitos apresentados na seção 2.1.3, cada falha é identificada.

O método do envelope de aceleração é aplicado na maior parte dos casos em que se avalia rolamentos, depende de um conjunto de fatores como a estrutura do rolamento, disposição e velocidade de rotação. Em suma, o envelopamento segregava as grandes amplitudes do espectro causadas por falhas mais graves como desalinhamento ou desbalanceamento e assim fornecem um espectro para análise muito mais limpo, que facilita a identificação de anomalias. (SILVEIRA et al., 2011),

Os autores fizeram a análise dos dados através da aplicação de filtros passa banda em diferentes intervalos de frequência, sendo:

- Primeiro intervalo (filtro 1): de 5 Hz a 100 Hz;
- Segundo intervalo (filtro 2): de 50 Hz a 1 kHz;
- Terceiro intervalo (filtro 3): de 500 Hz a 10 kHz;
- Quarto intervalo (filtro 4): de 5 kHz a 40 kHz;

O estudo dos autores demonstrou que a aplicação do filtro 3 configurado no terceiro intervalo nas frequências de 500 Hz a 10 kHz mostrou-se o mais eficiente para a análise de falhas em termos de magnitude e observação espectral (SILVEIRA et al., 2011).

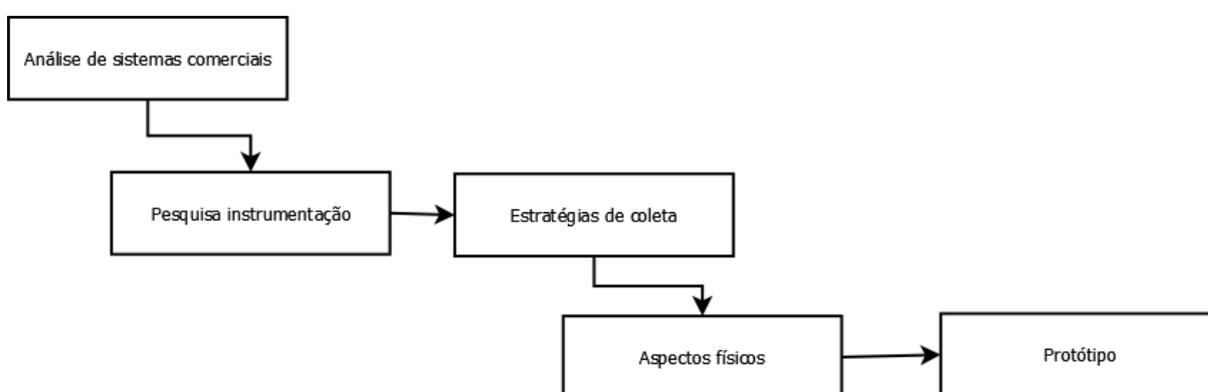
Os autores e estudos mencionados contribuem de forma positiva para o desenvolvimento deste trabalho pois demonstram metodologias já utilizados e norteiam os aspectos de análise mais importantes no sistema final, como a faixa de frequências onde deve-se centrar a análise de rolamentos de mancais para obtenção dos melhores resultados possíveis, mencionado por (SILVEIRA et al., 2011).

4 METODOLOGIA

Para realização do trabalho e alcance dos resultados esperados definiu-se uma estratégia baseada em pesquisas e vivências práticas com soluções comerciais da área.

No contexto industrial o segmento é liderado por *hardware* e *software* das fabricantes SKF e IFM, tais *software* e metodologias de aquisição foram usadas como referência neste trabalho. A Figura 22 ilustra o fluxo geral empregado neste trabalho.

Figura 22 - Esquema geral do fluxo de trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 Propósito geral

O propósito geral deste trabalho é entregar um produto comercial acabado de baixo custo que atenda a demanda de análise de vibrações em mancais de máquinas elétricas ou sistemas mecânicos diversos com simplicidade e portabilidade.

No mercado já existem soluções semelhantes entregues, consolidadas e confiáveis, porém, com um alto custo a usuários com baixo poder aquisitivo. Além disso, soluções portáteis tem custos maiores e não se integram a ferramentas do dia a dia como *smartphones* e *tablets*, geralmente utilizam um *software* proprietário para análise em PC e um coletor de dados especialmente projetado para o fim. Este tipo de equipamento dificulta a integração com serviços e *softwares* de ERP usados nas grandes indústrias além de agregarem custos indiretos com *software* e configuração do mesmo.

O trabalho foi desenvolvido ao longo de um ano, sendo a primeira etapa destinada a análise de viabilidade e pesquisa e a segunda com enfoque na experimentação e refino de protótipo.

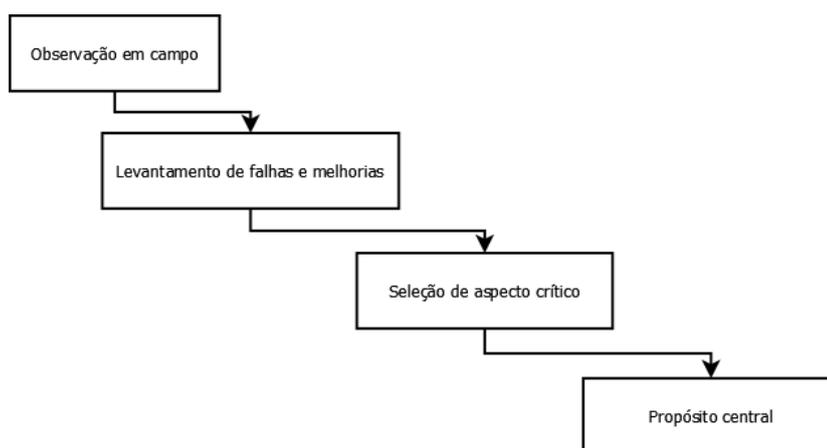
O princípio norteador do protótipo foi, desde o início, prover uma solução simples de baixo custo, quando comparado a equipamentos de mercado, e com escalabilidade.

4.2 Pesquisa e observação

Na etapa de pesquisa, iniciou-se verificando as opções de mercado e as estratégias utilizadas pelos fabricantes de equipamentos de análise consolidados. Escolheu-se IFM e SKF como *benchmarking* em termos de qualidade de *hardware* e qualidade de *software* de análise.

O ambiente de aplicação foi analisado para levantar as dificuldades com os sistemas comerciais e possibilidade de resolução de tais dificuldades. Neste aspecto o principal problema levantado foi o custo com *hardware* e infraestrutura para recepção dos módulos de controle. Há a necessidade de chegada de pontos de rede lógica e elétrica para alimentação, custoso e pouco prático para a aplicação alvo. A Figura 23 ilustra o fluxo geral aplicado para encontrar o propósito central.

Figura 23 - Fluxograma da definição do propósito do produto



Fonte: Elaborado pelo autor

Os sistemas de análise disponíveis no mercado são muito completos e dispõem de diversas metodologias de aquisição. Os dados podem ser inseridos de uma fonte portátil com um coletor específico, ou, de um sistema online onde os sensores estão

fixos no equipamento e comunicam-se com um módulo conectado à rede de automação que envia os dados para um servidor.

Os acelerômetros fazem parte da solução completa oferecida pelos fabricantes e são construídos especificamente para os mais diversos segmentos, sendo muito robustos e com sistemas de fixação por rosca ou magnéticos. O acelerômetro apresentado na Figura 24 é um acelerômetro comercial oferecido pela SKF.

Figura 24 - Acelerômetro SKF comercial



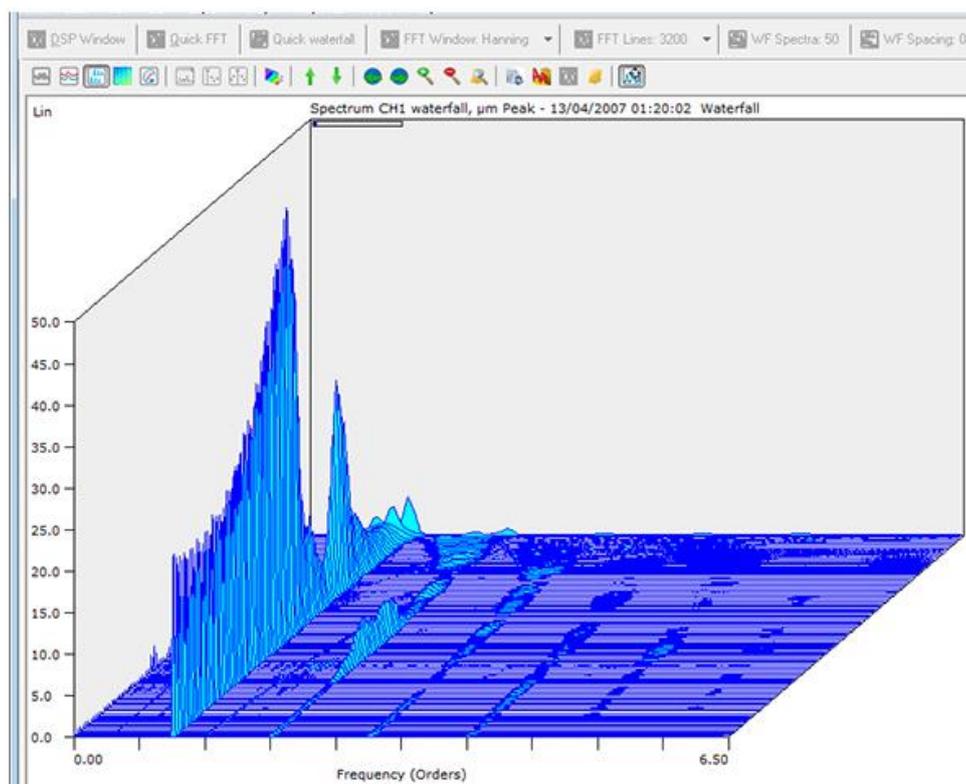
Fonte:SKF

A SKF tem os *softwares* SKF @ptitude Analyst e SKF @ptitude Inspector responsáveis por fazer a interface com o usuário final e tem poderosas capacidades de análise e diagnóstico. A Figura 25 traz uma breve demonstração da plataforma de análise do fabricante mencionado.

Neste software é possível fazer a importação de dados de coletores específicos da marca, monitorar sistemas conectados a módulos instalados na área que monitoram redes de sensores além da criação de alarmes.

A geração de alarmes e correta configuração deve levar em consideração aspectos levantados na seção 2.1 sobre a natureza da mecânica vibratória.

Figura 25 - Software de análise SKF



Fonte: Página do fabricante SKF

Tais *softwares* e *hardware* serviram de referência para o desenvolvimento deste trabalho.

4.3 Viabilidade

Posteriormente é necessária uma cuidadosa análise da viabilidade de construção de um protótipo que responda em uma faixa de frequências razoável para a aplicação em motores elétricos.

Em termos de software a solução é muito genérica e pode ser desenvolvida desde a base ou podem ser usadas ferramentas livres de supervisão já consolidadas, trata-se de um segmento amplo para definição.

O microcontrolador escolhido foi desenvolvido para aplicações de internet das coisas e, portanto, tem as características perfeitas para trabalhos em regiões de difícil alcance, baixo consumo de energia e conectividade.

O acelerômetro capacitivo ADXL335 é uma boa alternativa para aplicação por que apresenta um preço acessível e relativamente baixo, uma resposta em frequência

adequada para validação do conceito e uma integração com microcontrolador simples de rápida construção e satisfatória confiabilidade.

Os aspectos dimensionais deste componente favorecem sua instalação no interior de um invólucro e fazem da solução como um todo um produto compacto e portátil.

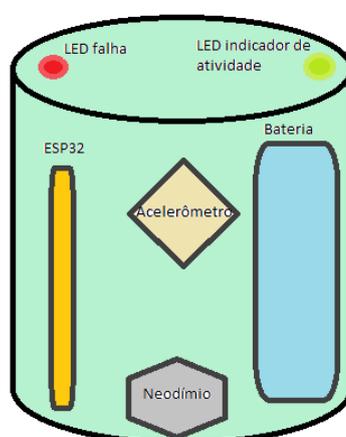
4.4 Protótipo

Para a confecção do protótipo deve-se tomar as condições do ambiente de operação como item determinante do material a ser utilizado e disposição interna dos componentes. A ideia é embarcar toda a eletrônica em um único invólucro com a instrumentação e controle.

A unidade será suprida por uma fonte de energia recarregável que será uma bateria de 3,7 V de *Ion-lítio*, uma célula frequentemente encontrada em pacotes de diversos equipamentos do mercado. O intuito é que o dispositivo funcione por mais de uma semana sem que haja a necessidade de carregamento, para casos mais extremos haverá uma conexão específica para expansão da autonomia com uma unidade de bateria externa.

As dimensões reduzidas do par controlador e acelerômetro favorecem a instalação no interior de um corpo cilíndrico com um ímã de neodímio em uma das pontas para aderência do instrumento a carcaça dos equipamentos. O esquema físico geral está apresentado na Figura 26.

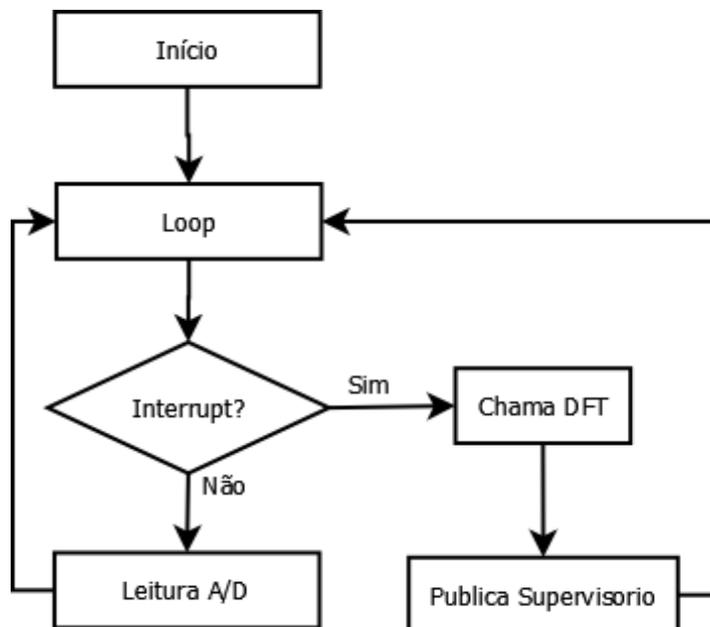
Figura 26 - Esquema do protótipo físico



Fonte: Elaborado pelo autor

A implementação do algoritmo no protótipo será feita usando o fluxograma simplificado apresentado na Figura 27. Será coletado o dado do acelerômetro continuamente preenchendo um vetor com número de amostras a definir por questões de desempenho ainda a serem ensaiadas. Uma interrupção de tempo comandará a frequência de amostragem e a cada interrupção do timer o microcontrolador aplica a transformada no dado, enviando os dados referentes ao deslocamento e transformado para o domínio das frequências. Este dado será interpretado por um supervisor que apresentará de forma gráfica, abrindo a possibilidade de análise de espectro ou simplesmente a aceleração no corpo de prova.

Figura 27 - Esquema geral do algoritmo no microcontrolador



Fonte: Elaborado pelo autor

5 IMPLEMENTAÇÃO

5.1 Acelerômetros

Para seleção do acelerômetro utilizado no protótipo utilizou-se como critério a faixa de frequência na qual o dispositivo responde, limite de aceleração admissível, estratégia de comunicação, isto é, SPI (*Serial Peripheral Interface*), I²C (*Inter-Integrated Circuit*) ou leitura analógica direta.

Neste contexto, o mercado entrega uma extensa gama de soluções, então a análise do custo torna-se crucial e fator determinante na escolha.

A grande diferenciação de preço ocorre devido a faixa de frequências de resposta do sensor, sensores que respondem a altas frequências tem custos bem mais elevados.

A Tabela 1 mostra dados do fabricante *Analog Devices* que foi utilizada como norteadora na escolha. Este fabricante é consagrado no mercado das aplicações com microcontroladores por possuir dispositivos de dimensões reduzidas e geralmente vem em módulos com filtros embutidos específicos para uso com Arduino e outros semelhantes. O preço também é convidativo diante de sensores específicos encontrados no mercado.

Tabela 1 - Lista de modelos e características

Modelo	Intervalos	Vs+	Largura de banda	Saída	Preço
		(min)	(Hz)		(\$ US)
ADXL1005	100 g	3	23k	Analog	\$39.41 (ADXL1005BCPZ)
ADXL1004	500 g	3,3	24k	Analog	\$35.85 (ADXL1004BCPZ)
ADXL1001	100 g	3,3	11k	Analog	\$29.66 (ADXL1001BCPZ)
ADXL1002	50 g	3,3	11k	Analog	\$29.66 (ADXL1002BCPZ)
ADXL251	120 g, 240 g, 480 g, 60 g	3,135	400	PSI5, SPI	
ADXL356	10 g, 20 g, 40 g	2,25	1.5k	Analog	\$28.68 (ADXL356BEZ)
ADXL357	10 g, 20 g, 40 g	2,25	1k	I ² C, SPI	\$31.87 (ADXL357BEZ)
ADXL372	200 g	1,6	3.2k	I ² C, SPI	\$6.33 (ADXL372BCCZ-RL7)
ADXL354	2 g, 4 g, 8 g	2,25	1.5k	Analog	\$25.50 (ADXL354BEZ)
ADXL355	2 g, 4 g, 8 g	2,25	1k	I ² C, SPI	\$28.33 (ADXL355BEZ)
ADXL151	120 g, 240 g, 480 g	4,5	400	PSI5	
ADXL316	16 g	1,8	1.6k	Analog	\$3.76 (ADXL316WBCSZ)
ADXL700	14g,2g	3,135		SPI	

ADXL363	2 g, 4 g, 8 g	1,6	200	SPI	\$4.57 (ADXL363BCCZ-RL7)
ADXL375	200 g	2	1.6k	I ² C, SPI	\$4.52 (ADXL375BCCZ)
ADXL313	1 g, 2 g, 4 g	2	1.6k	I ² C, SPI	\$3.70 (ADXL313WACPZ-RL)
ADXL288	120 g	3,135	408	SPI	
ADXL295	120 g	3,135	408	SPI	
ADXL344	16 g, 2 g, 4 g, 8 g	1,7	1.6k	I ² C, SPI	\$1.15 (ADXL344ACCZ-RL7)
ADXL350	1 g, 2 g, 4 g, 8 g	2	1.6k	I ² C, SPI	\$4.57 (ADXL350BCEZ-RL)
ADXL362	2 g, 4 g, 8 g	1,6	200	SPI	\$3.97 (ADXL362BCCZ-RL)
ADXL377	200 g	1,8	1.6k	Analog	\$4.38 (ADXL377BCPZ-RL)
ADXL343	16 g, 2 g, 4 g, 8 g	2	1.6k	I ² C, SPI	\$1.15 (ADXL343BCCZ)

Fonte: Adaptado de *Analog Devices* (<http://www.analog.com/en/parametricsearch/11175>)

Observando-se a Tabela 1 verifica-se que apenas os modelos no topo da tabela atendem as especificações e responderão na frequência esperada. Os demais modelos abaixo têm custos inferiores e podem ser utilizados para fins onde as frequências de interesse são mais baixas, barateando os custos do dispositivo.

O modelo selecionado para a versão final do protótipo é o ADXL1001, por ter características de resposta em alta frequência. O microcontrolador dispõe de uma saída de tensão contínua de 3,3V, tornando o modelo o mais adequado para a aplicação.

5.2 Carcaça do protótipo

O invólucro do protótipo foi fabricado inicialmente em alumínio com tampas de plástico. Foram escolhidos materiais reciclados de outros dispositivos sendo necessários poucos ajustes nos componentes utilizados pois as dimensões pareciam perfeitas para a aplicação.

Para o primeiro protótipo o único requisito foi uma certa resistência mecânica para transporte e um volume interno adequado para acomodar o microcontrolador, acelerômetro, baterias e duas pastilhas de neodímio para fixação.

A intenção é que a fixação do dispositivo seja apenas por meio magnético, há uma preocupação a respeito da resposta do sistema em altas frequências ou grandes amplitudes, de modo que por uma fração de tempo o invólucro não acompanhe a movimentação do corpo de prova.

A Figura 28 mostra a comparação dimensional do protótipo utilizado.

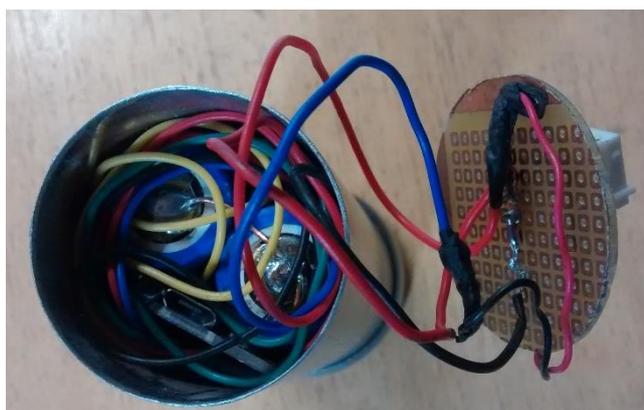
Figura 28 - Dimensão do protótipo em comparação com mão humana



Fonte: Elaborado pelo autor

O invólucro pareceu adequado a aplicação e apresentou espaço suficiente para acomodar os componentes, de modo que a dimensão limitada favoreceu o travamento dos conjuntos no corpo do volume. A figura 29 mostra a vista superior do dispositivo em sua primeira versão para testes. Pode-se observar a fiação que conecta o microcontrolador ao módulo do acelerômetro, junto ao sistema de alimentação por baterias, todos acomodados de forma justa no interior.

Figura 29 - Vista superior do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

As baterias utilizadas foram retiradas de um conjunto de baterias de uma lanterna para acampamento por possuir dimensões e capacidades adequadas. O consumo teórico do microcontrolador seria de 250 mA usando os recursos de rede sem fio, células de 2500 mA/h suportariam o sistema por 10 horas, sua associação proporcionaria o uso por ao menos dois dias sem o uso de um *Power Bank* externo.

A concepção original usava duas células de 3,7 V, porém, em análise posterior, verificou-se uma disponibilidade maior no mercado de baterias recarregáveis do tipo AA e fez-se testes unindo três delas em série. O invólucro comporta bem três baterias que em série fornecem 3,6 V suficientes para o funcionamento correto do microcontrolador e o módulo dos acelerômetros.

5.3 Comunicação

O protocolo MQTT possui características destinadas a utilização em pequenos dispositivos que precisam consumir pouca energia e comunicar-se de modo simples com um servidor ou outro dispositivo. Neste contexto foi a solução mais adequada encontrada para funcionamento do sistema.

Há diversas ferramentas para trabalhar com tal protocolo, neste caso, optou-se por um *Broker* denominado **mosquitto**®. O mesmo foi implementado em uma máquina *Windows* apenas para validação do funcionamento de todo o sistema e a fim de facilitar os testes durante os ajustes do algoritmo.

Uma biblioteca específica desenvolvida para o ESP32 foi utilizada neste trabalho, a mesma foi adaptada pela comunidade do microcontrolador e um conjunto de universidades de uma biblioteca nativa do ESP8266, versão que antecedeu o microcontrolador utilizado.

Com o uso da biblioteca, a implementação torna-se mais amigável, necessitando-se fornecer a especificação dos parâmetros de conexão com o *Broker* e criando as rotinas de publicação e monitoramento nos momentos pertinentes.

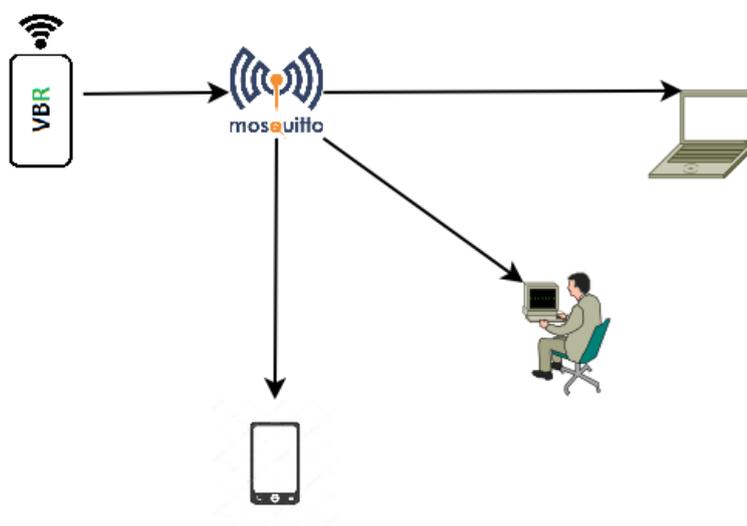
O algoritmo conecta-se inicialmente a uma rede sem fio especificada, os parâmetros de SSID e senha ficam dentro do código, mas poderiam ser perfeitamente disponibilizados via *software* supervisor para interação com o usuário final.

Estabelecida a comunicação com a rede sem fio o micro procura pelo *Broker* e estabelece um vínculo enviando uma mensagem de conexão e aguardando uma confirmação. Este processo pode ser detalhado abrindo-se todos os parâmetros trocados entre *Broker* e *Publisher*, na arquitetura do *software* desenvolvido tudo fica na biblioteca "PubSubClient.h", onde a magia acontece, no entanto, as minúcias do processo tornam-se transparentes ao fazer uso da biblioteca.

Este sistema publica em um servidor *broker* e pode-se consultar os tópicos através de um *smartphone* ou um supervisorio em um computador comum que tenha acesso ao servidor através da rede.

A Figura 30 elucida a arquitetura da implementação onde o dispositivo autônomo envia os dados para o servidor principal através da rede sem fio e então este fica disponível para consulta nos tópicos criados, “/vbr/leiturax”, que é a tag correspondente as leituras de aceleração para o eixo x e “/vbr/leituray”, para as leituras oriundas do eixo y.

Figura 30 - Esquemático do funcionamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 30 o ícone com a inscrição VBR representa o protótipo, o ícone da aplicação **mosquitto**® representa o servidor e então os usuários finais que são capazes de se conectar ao *Broker* para obter as informações.

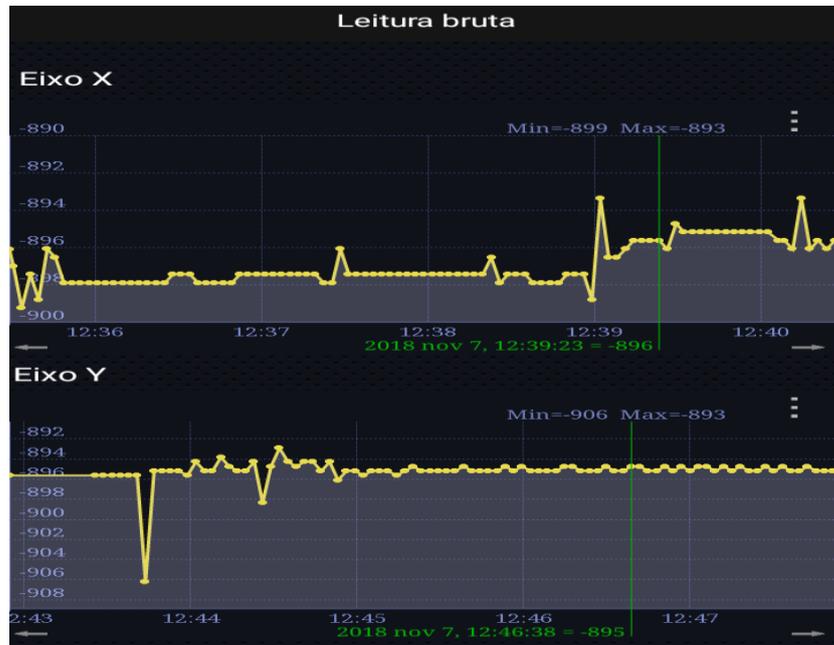
Na arquitetura deste protocolo, os dados são publicados em tópicos, os clientes “assinam” tais tópicos e então são capazes de verificar as alterações nestes. Para os dois eixos analisados e a bateria, gerou-se os seguintes tópicos.

- “/vbr/leiturax”;
- “/vbr/leituray”;
- “/vbr/bateria”;

Na extremidade de supervisão, utilizou-se o virtuino no smartphone para obtenção dos dados e no computador fez-se uso de uma ferramenta muito simples e

funcional chamada mqtt-spy. A figura 31 mostra os dados obtidos no smartphone onde o eixo vertical é magnitude em mg (mili-g) e o eixo horizontal é o tempo.

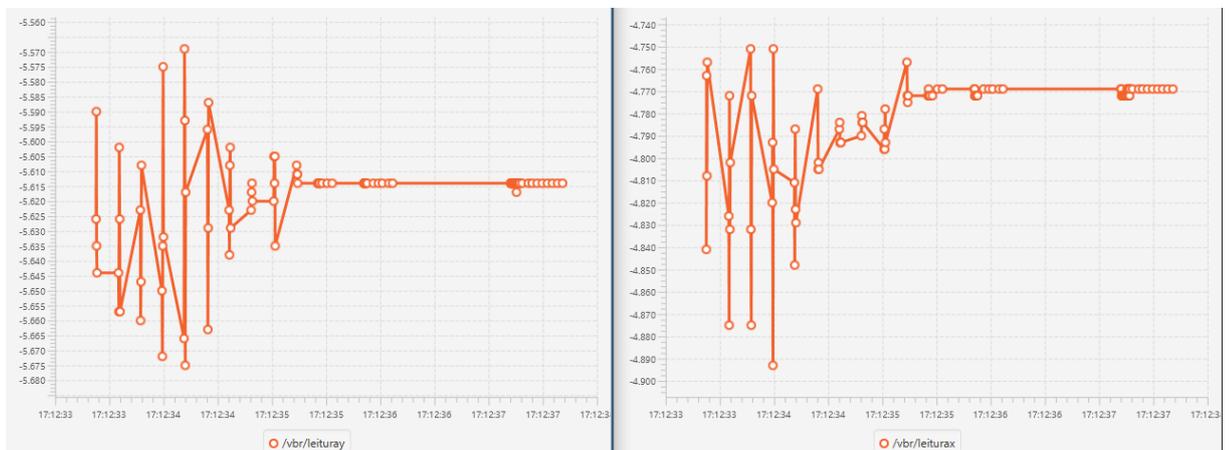
Figura 31- Visão no smartphone



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 31 mostra as leituras efetuadas no smartphone ainda sem ajustes com a escala, validando apenas sua resposta aos estímulos externos. Na figura 32 tem-se a leitura em um cliente MQTT rodando dentro do próprio servidor, onde o eixo vertical é aceleração em mg e o horizontal é o tempo.

Figura 32 - Visão no supervisor mqtt-spy



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 32 tem-se a esquerda o tópico referente ao eixo Y e na direita o tópico referente ao eixo X, uma perturbação é visível logo no princípio da aquisição dos dados e após há uma estabilização. Vale ressaltar que nestes gráficos o dispositivo já se apresentava funcional, porém sem nenhum zeramento ou calibração com padrão de referência. As amplitudes não representam uma unidade de aceleração ou deslocamento de padrão internacional.

Porém, mesmo sem escala real os picos já são uma resposta coerente dos movimentos realizados com o módulo.

5.4 Estratégia de funcionamento

O funcionamento do sistema como um todo está baseado em uma arquitetura de comunicação sem fio, com a figura de um cliente, um *Publisher* e um *broker*. Nesta implementação a inteligência da análise dos dados está contida no microcontrolador, o que facilita o uso de clientes diversos sem grandes capacidades de processamento.

O fluxo de funcionamento baseia-se basicamente no conceito das interrupções. O programa funciona como um *loop* infinito, a cada ciclo o mesmo realiza as leituras nos canais de A/D e então equaliza os valores para algo palpável e armazena em um vetor.

A saída do módulo ADXL com acelerômetro embutido é da ordem de milivolts.

Dada a sensibilidade do acelerômetro, especificada em mV/g, é possível determinar exatamente a qual aceleração o dispositivo está exposto usando g ou a aceleração em m/s^2 .

Quando uma interrupção de tempo é gerada o algoritmo usa o vetor de leituras da porta analógica para aplicar a função de transformada rápida de Fourier e determinar as raias espectrais dominantes nesta janela de coleta.

As frequências onde ocorrem as maiores amplitudes após a aplicação da transformada são então enviadas aos respectivos tópicos no *broker*. Para que estes dados fiquem disponíveis aos usuários e sejam passíveis de análise em um momento posterior.

Em tempo de execução, o microcontrolador envia dinamicamente os valores lidos para o *broker* a fim de possibilitar uma visualização em tempo real do que ocorre. Esta funcionalidade é particularmente interessante quando pretende-se verificar a

presença de choques em equipamentos ou em estruturas, nem sempre ocorre em ciclos periódicos e podem ocorrer ocasionalmente sem apresentar qualquer padrão.

Uma preocupação no momento da concepção do projeto foram os tempos investidos em cada operação dentro do microcontrolador para que não houvessem problemas com perdas de dados durante a aquisição por conta de demasiadas esperas no processamento.

Para isto, foram medidos os tempos das principais operações executadas, e determinou-se um período crítico para inviabilização do projeto. O acelerômetro utilizado responde em frequências de até 1,6 kHz, pelo critério de Nyquist para uma amostragem adequada, deve-se aplicar nos cálculos uma largura de banda de 3,2 kHz, deste parâmetro faz-se através da equação (16).

$$T = \frac{1}{3200 \text{ Hz}}$$
$$T = 0,00063 = 315\mu\text{s}$$

O período de 315 μs será o menor período possível de um sinal observado pelo acelerômetro da aplicação. Qualquer operação adjacente no algoritmo deve ser mais rápida que isso para que não haja prejuízo na aquisição dos dados.

Dentro do código fez-se uso da função “*micros()*” para mensurar o tempo em microssegundos das funções e verificar a viabilidade da implementação, a Tabela 2 mostra os dados medidos em tempo de execução para validação, a implementação da transformada de Fourier é um capítulo à parte que será discutido na análise dos resultados. Os tempos avaliados foram para as operações mais críticas que fazem uso das bibliotecas e não utilizam o código puro, essas operações são mascaradas por uma outra série de operações que são efetuadas nas bibliotecas.

Para implementação as bibliotecas são ótimas para a entrega rápida e já consolidada da solução, no entanto, do ponto de vista de desempenho nem sempre são a melhor solução.

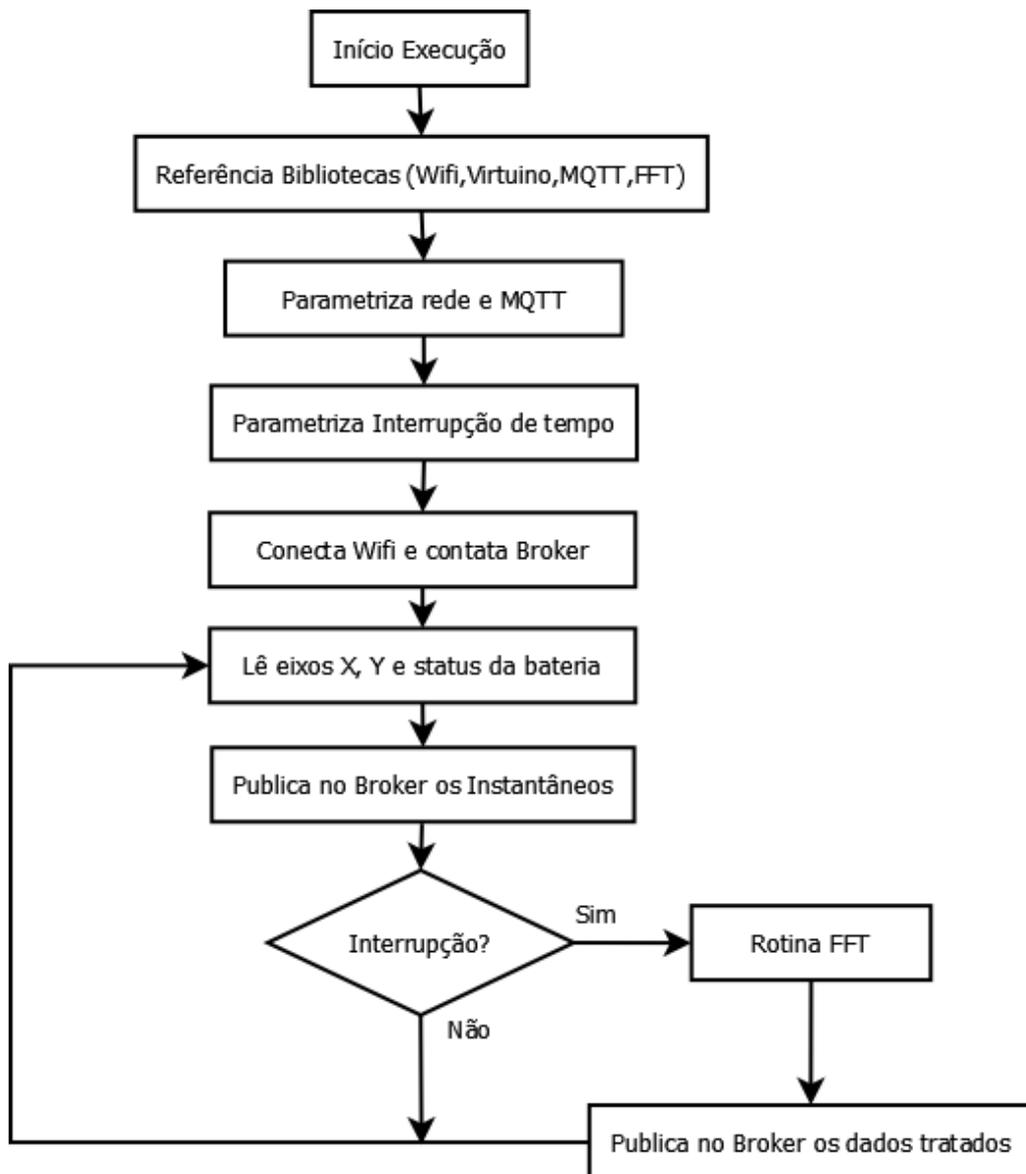
A primeira função avaliada, foi a principal utilizada em tempo de execução, a leitura do canal analógico, que em média apresentou um tempo de 11 μs , como são três canais, totaliza-se um gasto de 33 μs para leitura dos canais. Este valor está ainda distante dos 315 μs críticos.

A parte mais crítica avaliada foi o tempo de publicação no servidor MQTT, este totalizando aproximadamente 100 μs por tópico na publicação. Por este motivo, a

publicação do status da bateria foi colocado dentro da rotina de publicação de FFT que não é executada a todo momento, somente durante a interrupção.

O fluxograma detalhado do algoritmo na Figura 33 apresenta o esquemático dos blocos funcionais, em termos de código, tratam-se das funções codificadas.

Figura 33 - Fluxograma do algoritmo



Fonte: Elaborado pelo autor

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

Para validação do dispositivo optou-se por uma comparação direta com uma ferramenta profissional de referência em um ambiente controlado.

Os primeiros ensaios informais foram feitos apenas avaliando-se a resposta do dispositivo a impactos ou oscilações forçadas, a fim de validar seu funcionamento apenas de forma qualitativa.

Foram necessárias muitas horas para o ajuste fino do protótipo e foram feitas diversas observações de fenômenos não considerados na concepção inicial do projeto. Os detalhes observados só puderam ser verificados na prática, uma vez que, mesmo com as pesquisas a validação prática é o único meio de observar as minúcias do funcionamento e do processo.

6.1 Primeiros ajustes e zeramento

A leitura dos canais do acelerômetro fornece um valor de tensão dada em milivolts (mV), a sensibilidade do instrumento representa a relação entre o estímulo e a resposta de tensão na saída, a relação é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 - Características de resposta do acelerômetro

Sensibilidade	Condições	Min	Típico	Max	Unidade
Sensibilidade em Xout, Yout, Zout	Vs=3V	270	300	330	mV/g
Sensibilidade e temperatura	Vs=3V	±0.01			%/°C
Nível zero g					
Tensão 0g Xout, Yout	Vs=3V	1.35	1.5	1.65	V
Tensão 0g Zout		1.2	1.5	1.8	V
Tensão offset temperatura		±1			mg/°C

Fonte: Adaptado de folha de dados da *Analog Devices*

Nos primeiros ensaios verificou-se uma oscilação no valor da tensão lida, no entanto, para os 12 bits de resolução do canal A/D trata-se de uma variação muito pequena de aproximadamente $810 \mu V$, conforme calculado.

$$2^{12} = 4096$$

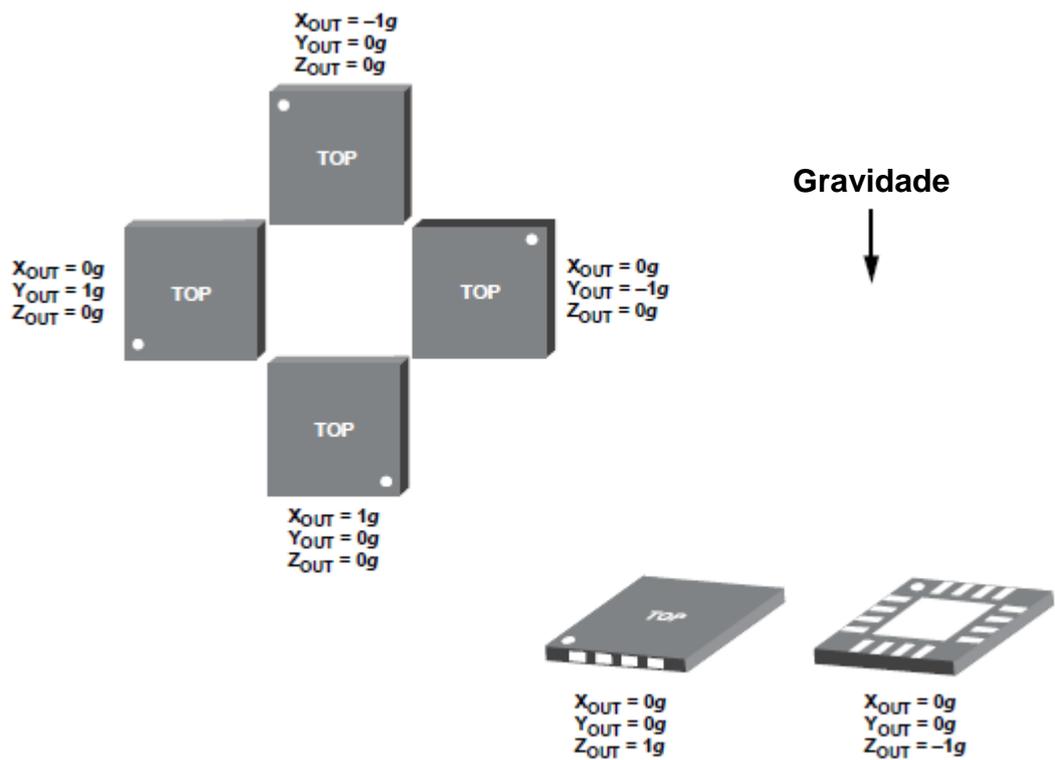
Trata-se de 4096 divisões no canal, pode-se então estimar a variação esperada em volts por divisão, fazendo-se os 3 V da saída divididos pela resolução do canal.

$$\frac{3V}{4096} = 730\mu V$$

Isto significa que uma variação de $730\mu V$ será observada no canal do microcontrolador, o que explica uma certa oscilação na saída. Diante da sensibilidade do instrumento não é relevante para alteração do resultado da análise. A sensibilidade é de aproximadamente 300 mV/g, embora varie para cada eixo conforme a folha de dados do instrumento. Estes valores foram os utilizados para a equalização dos valores dentro do microcontrolador.

O zeramento foi realizado de forma experimental usando as instruções da folha de dados do dispositivo. Conforme pode-se observar na figura 34.

Figura 34 - Esquema para zeramento do acelerômetro



Fonte: Adaptado da folha de dados do instrumento *Analog Devices*

Optou-se por utilizar apenas dois eixos para exibição no tempo, deixando-se o eixo z segregado. A aplicação da transformada é feita também apenas para o eixo x,

apenas por uma questão de comodidade na calibração do dispositivo e custo de processamento.

O aprimoramento do algoritmo pode levar a diversos ganhos, no consumo de energia e na melhoria da resposta do equipamento, no entanto, não é o foco na primeira etapa de testes.

Ainda um segundo detalhe importante foi observado durante o uso do microcontrolador. Na estrutura do microprocessador há uma limitação quanto aos conversores A/D. São 18 canais distribuídos em dois conversores efetivamente.

Quando faz-se uso da rede sem fio, um destes conversores é ocupado bloqueando alguns canais para utilização, este problema custou algum tempo de testes e pesquisa até descobrir o conflito e mudar os canais de leitura do acelerômetro para o outro conversor.

6.2 Condições de teste

O teste de validação do dispositivo foi realizado em uma bancada especialmente projetada para ensaios na área de vibração instalada em um laboratório de testes em uma indústria que faz ampla utilização de equipamentos de análise em seu campo fabril.

Nesta bancada é possível simular falhas relacionadas a desbalanceamentos, erros de alinhamento de mancais, partes da estrutura solta e falhas em rolamentos. A figura 35 ilustra o ambiente de testes.

Figura 35 - Dispositivo usado para ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor

A bancada de testes é simples, trata-se de um motor elétrico acoplado por meio de uma correia de borracha e duas polias a um eixo suportado por dois mancais e com um volante na extremidade.

O volante da extremidade tem furações onde faz-se uma distribuição desigual de massas causando desbalanceamento, este desbalanceamento pode ser causado colocando-se parafusos nas extremidades do volante.

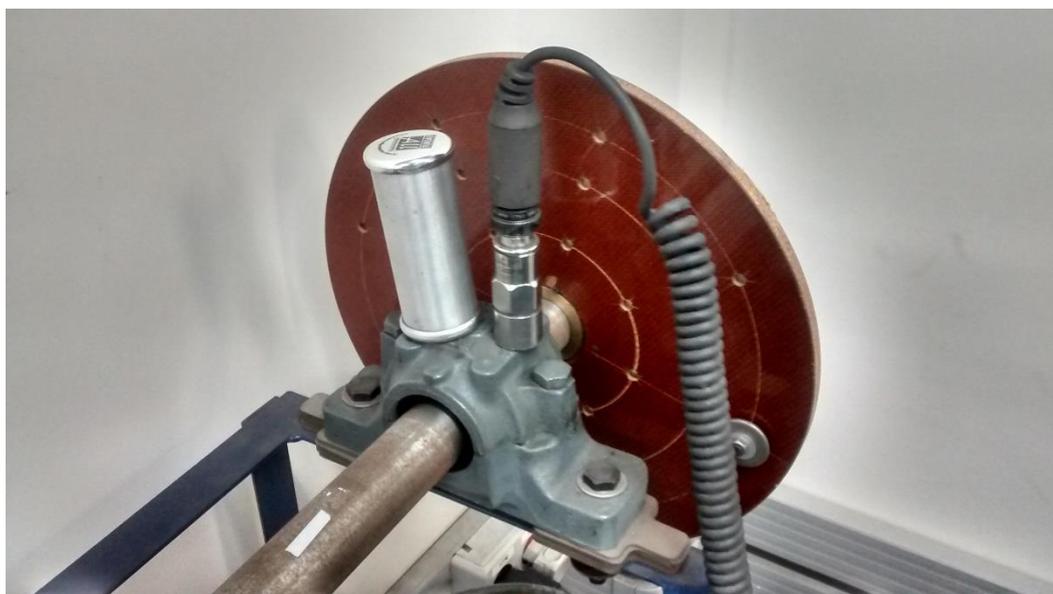
O motor é acionado por um inversor de frequência, uma botoeira de acionamento e um potenciômetro responsável por alterar a frequência de referência do inversor, acelerando ou diminuindo a rotação do motor elétrico.

Para o teste, colocou-se o dispositivo experimental junto a um módulo SKF calibrado e com a utilização já consolidada.

Trata-se de um modelo SKF *Microlog Analyser* CMXA 51-IS – ATEX, o dispositivo é conectado por meio de um cabo a uma sonda com ímã. Esta sonda opera em apenas um eixo, sendo necessário seu reposicionamento para medição de pontos em outros eixos.

Os dois dispositivos foram colocados lado a lado no mesmo mancal e com a mesma orientação para validação conforme figura 36.

Figura 36 - Posicionamento para ensaio das sondas



Fonte: Elaborado pelo autor

A extração de dados do *micrologger* depende de um software específico da SKF então fez-se uma comparação em tempo real do display do dispositivo com a

observação do supervisor no computador e no telefone, a validação matemática e determinação do erro global aproximado foi feita analisando o espectro e as frequências com maiores amplitudes encontradas. A Figura 37 ilustra a comparação feita no ambiente de validação.

Figura 37 - Posicionamento para ensaio das sondas



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 37 observa-se as leituras no supervisor de picos instantâneos dados em mg. No *micrologger* verifica-se no gráfico as raias espectrais com as maiores amplitudes além dos valores de pico encontrados.

6.3 Resposta em frequência

A resposta em frequência do dispositivo limita-se a 1,6 kHz, devido a utilização de um acelerômetro simples, a aplicação de um modelo ADXL1004 na mesma topologia e mesmo sistema fornece respostas na ordem de até 24 kHz, perfeito para aplicação em mancais de alta rotação que geram, conseqüentemente, espectros em frequências mais elevadas.

A aquisição de dados em alta frequência é também um desafio do ponto de vista de tratamento de sinal, cada operação dentro do microcontrolador leva um tempo para ser executada conforme analisado na seção de implementação.

O *clock* do microprocessador da *espressif* é de 160 MHz, o que é mais que suficiente para coleta de frequências de no máximo 24 kHz. No entanto, algumas operações que são tratadas por bibliotecas podem ser executadas por um tempo precioso na análise dos dados, onerando o processamento e atrasando a dinâmica como um todo.

Nos testes efetuados, o motor estava ligado a um inversor de frequência e foram aplicadas baixas rotações para garantir uma aquisição de dados confiável sem falhas de amostragem consideráveis.

O processo de publicação no *broker* foi classificado como o mais crítico em termos de consumo de tempo de processamento, sem avaliar a realização da FFT no dispositivo.

Considerando os $11 \mu s$ calculados para leitura do canal A/D, respeitando os critérios de Nyquist para amostragem e sem publicar valores instantâneos no *broker*, o limite teórico de análise do sistema limita-se a frequências na ordem de 45 kHz.

6.4 Transformada de Fourier

A transformada de Fourier foi implementada de duas formas distintas para testes. Inicialmente foi desenvolvido um algoritmo no *software* Matlab® responsável por ler um vetor de dados com uma frequência central conhecida e construir o espectro de frequências.

Este algoritmo experimental foi desenvolvido baseado na literatura de referência para processamento de dados. O algoritmo foi validado comparando-se o resultado com a função de transformada rápida de Fourier do Matlab®.

Após a validação experimental da rotina no *software* de simulação, fez-se sua adaptação para o microcontrolador criando-se uma função específica que seria requisitada toda vez que uma interrupção fosse disparada.

Verificou-se que há uma biblioteca específica para transformada rápida de Fourier, no entanto, como o uso de bibliotecas muitas vezes onera o processamento mais do que o desejável, decidiu-se por fazer um comparativo de desempenho entre as duas bibliotecas para decidir qual seria a melhor na aplicação final. Deste modo, fez-se uma análise de desempenho medindo-se os tempos usados pela função para entregar a análise. A transformada discreta de Fourier implementada baseando-se no modelo desenvolvido em *software* de simulação, demorou em média $41933 \mu s$.

Este tempo é demasiadamente elevado para a aplicação, percebe-se lacunas nas transmissões de dados do servidor ao utilizar-se a função da transformada. Neste caso são janelas de análise que são avaliadas, não há uma continuidade perfeita.

Do ponto de vista prático, mesmo com a função demorando mais que o esperado o funcionamento não é totalmente comprometido por conta disso, o resultado da transformada será dado em janelas.

A biblioteca implementada de FFT levou apenas $496 \mu s$ para computar o mesmo volume de dados. Trata-se, portanto, de uma escolha lógica, o uso da biblioteca já implementada de FFT diante da transformada discreta implementada experimentalmente.

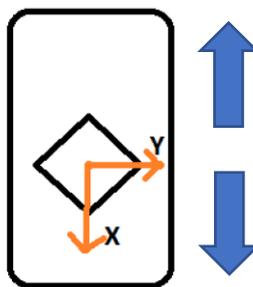
A biblioteca utilizada faz parte do conjunto fornecido para o Arduino dentro da própria IDE, é possível acessar a implementação da mesma através dos arquivos fonte encontrados nos diretórios da IDE.

6.5 Cuidados no protótipo

Durante a execução dos testes percebeu-se alguns detalhes importantes a respeito do posicionamento do módulo de acelerômetro no interior da cápsula. O módulo utilizado opera em 3 eixos e o padrão utilizado para comparação opera com apenas um. Nos primeiros confrontos de dados, observou-se uma diferença considerável na indicação do padrão e do protótipo, de mais de 20%, o que levantou uma grande preocupação quanto a validade da proposta como um todo usando um acelerômetro de baixo custo.

Observando-se mais detalhadamente verificou-se que o alinhamento do módulo do acelerômetro no interior do invólucro exercia uma influência crucial nos resultados, uma vez que a pastilha inclinada decompõe as forças em dois eixos conforme esquema apresentado na figura 38.

Figura 38 - Falha de posicionamento da pastilha



Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo apresentado na figura 38 demonstra a decomposição de um movimento da cápsula que teoricamente movimentar-se em apenas um eixo perpendicular à base. Porém as grandezas medidas são decompostas em dois eixos dada a inclinação da pastilha no interior do invólucro.

Este cuidado foi observado logo nas primeiras comparações com o dispositivo calibrado, porém este sutil detalhe só foi observado após a desmontagem do invólucro algumas vezes para testes e para fazer o zeramento. O deslocamento da pastilha altera o sentido da gravidade percebida no acelerômetro e muda a leitura, neste momento foi percebida a relevância do alinhamento.

O protótipo foi desenvolvido para utilização em ambientes de difícil acesso, com problemas para passagem de cabos ou instalação de infraestrutura. O propósito é possibilitar uma verificação ocasional das condições dos equipamentos e ainda ser acessível para usuários de pequeno porte.

Quanto ao ambiente de aplicação, a principal limitação fica por conta da temperatura limite de operação das baterias no interior da cápsula. Quanto a vedação contra água o dispositivo suportou poeira e respingos tranquilamente, sem apresentar qualquer formação de condensação no interior ou particulado nas superfícies interiores.

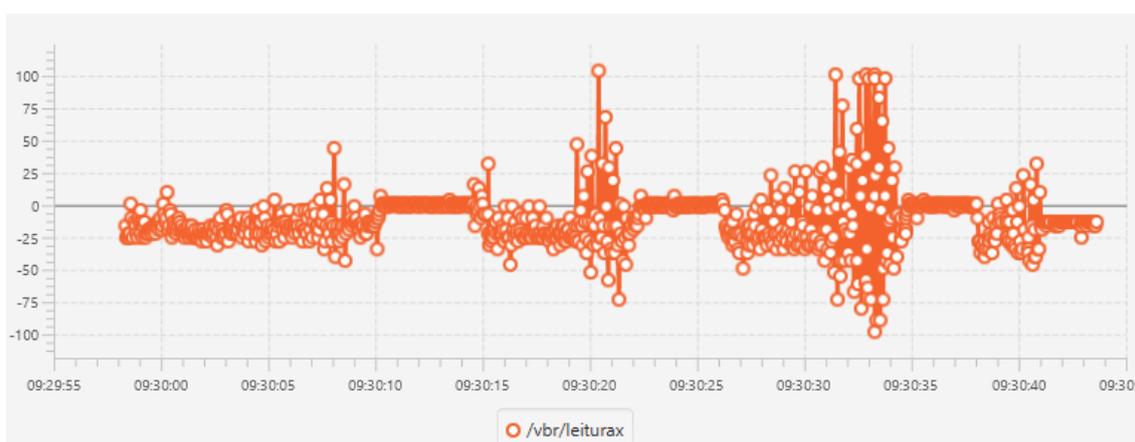
6.6 Comparativo prático com dispositivo calibrado

Para a validação final do dispositivo, fez-se uma comparação com um dispositivo calibrado modelo SKF *Microlog Analyser* CMXA 51-IS – ATEX® e o software SKF @ptitude Analyst® e SKF @ptitude Inspector®. A leitura do instrumento foi alterada para amplitude de pico a pico para que pudesse ser feita uma comparação

direta com o gráfico apresentado no supervisório e ajustado o coeficiente de multiplicação utilizado na conversão dos valores do A/D para os valores observados no indicador.

A extração de dados do equipamento foi feita após a coleta e os dados foram comparados analisando-se o espectro. A Figura 39 mostra a nuvem de pontos geradas no cliente MQTT conectado ao *broker*. Observa-se uma região inicial no gráfico com um deslocamento abaixo do zero, devido ao posicionamento do dispositivo em relação ao plano X,Y. São provocadas vibrações e então cessadas, fazendo o gráfico voltar ao nível de repouso, como era de se esperar. Este foi um teste preliminar antes de efetuar a validação final em busca da frequência central.

Figura 39 - Nuvem de pontos no supervisório



Fonte: Elaborado pelo autor

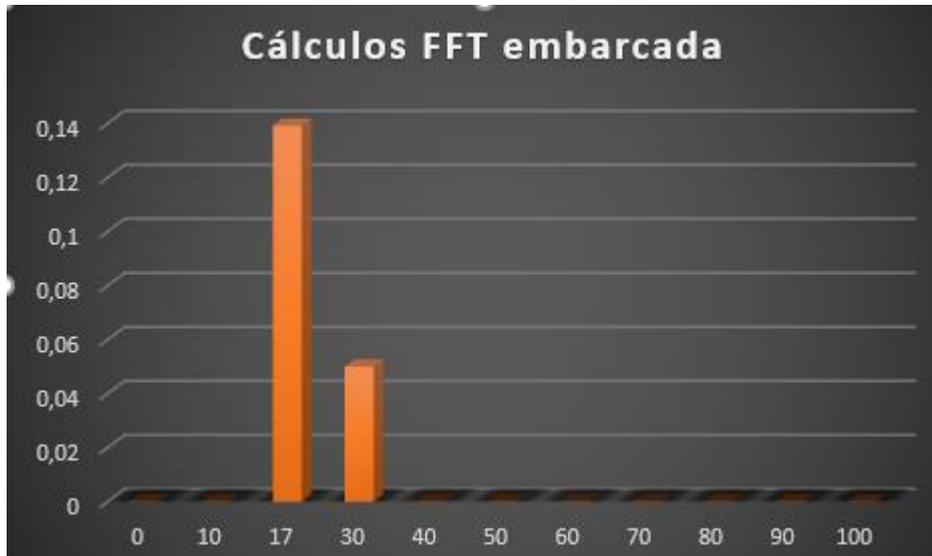
Dada a estrutura do protocolo, optou-se por escrever em tópicos as primeiras 3 frequências com as maiores amplitudes no espectro. Na prática, o inspetor usa uma técnica de envelope de vibração, para cada rolamento ou mancal específico há um configurado. Trata-se de uma janela onde o *software* avalia a amplitude da raia espectral e acusa um alarme ou não.

Deste modo, o microcontrolador envia direto as três frequências com maiores amplitudes ocorrendo, o inspetor só precisa avaliar os módulos e as frequências para perceber uma falha eminente ou um comportamento anômalo.

A Figura 40 mostra a saída dos dados computados pela FFT no ESP32 com a indicação da maior frequência avaliada pela transformada e amplitude na raia em g no eixo vertical, no horizontal tem-se a frequência em Hz. Para uma análise em campo, a amplitude na frequência central trata-se do principal dado utilizado na

análise, facilitando a interpretação de um usuário leigo, no entanto, as demais informações permanecem no servidor para posterior análise.

Figura 40 -Raias espectrais dos dados do protótipo



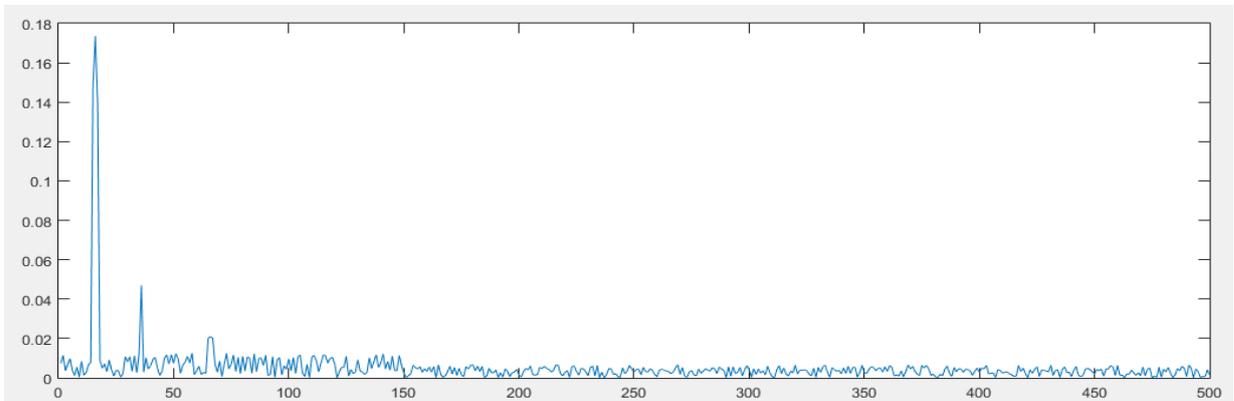
Fonte: Elaborado pelo autor

Para validação da dinâmica do sensor, exportou-se a resposta no tempo e fez-se a transformada rápida de Fourier no Matlab® para validação dos resultados encontrados. A Figura 41 mostra as raias espectrais obtidas experimentalmente coletando-se os dados lidos do supervisor conectado ao *broker*, observa-se grande semelhança com o espectro gerado pelo equipamento calibrado, com algum erro na amplitude, mas com um comportamento global muito bom para um acelerômetro de baixo custo, o eixo horizontal representa a frequência em Hz e o vertical a amplitude em g. Importante ressaltar que este resultado é ótimo em baixas frequências, para frequências mais altas um acelerômetro mais aprimorado e caro é necessário.

Na análise efetuada para validação do protótipo, verificou-se o espectro de resposta do sensor usando diretamente os dados lidos nos canais analógicos e aplicando a transformada.

Além disso, a validade da transformada foi verificada observando os tópicos no *broker* “/vbr/magnitudemax” e “/vbr/magnitude2” onde são publicados os valores das frequências e contidas as maiores amplitudes. Analisando a Figura 40 observa-se o valor dominante em torno dos 17 Hz, com uma amplitude aproximada em torno de 0,14g, o que se aproxima do resultado esperado do padrão calibrado.

Figura 41 - Espectro dos dados do protótipo

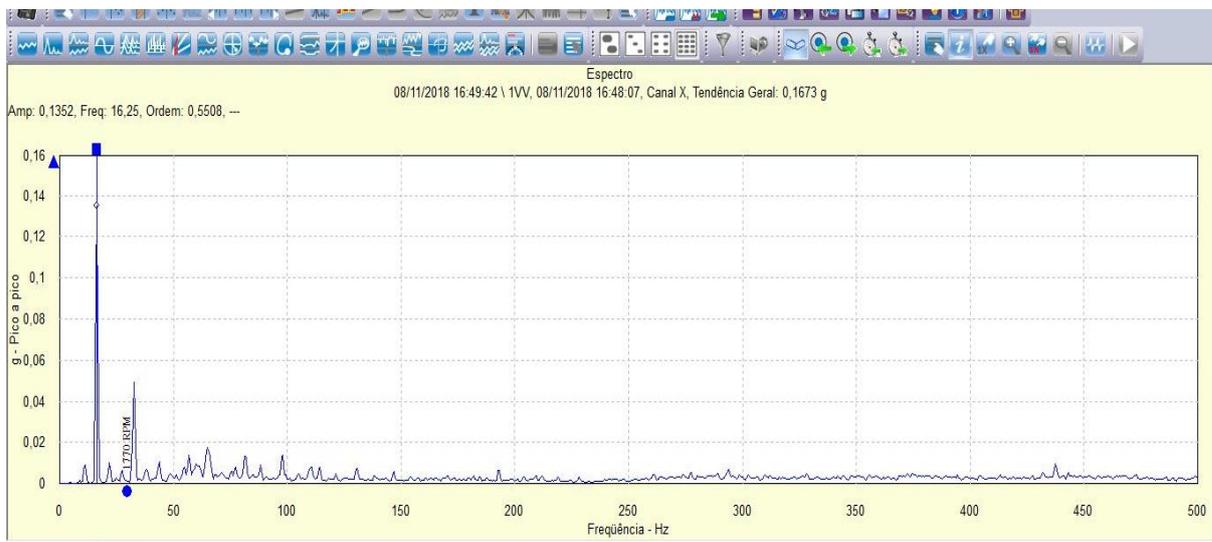


Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados foram carregados no Matlab® para aplicação da FFT de validação e para plotar a resposta de saída da transformada aplicada no microcontrolador. Observa-se grande semelhança entre a figura 41 que é a FFT experimental e a figura 42 que é a FFT gerada no *software* especialista.

As maiores magnitudes ocorrem aproximadamente nas mesmas frequências, para dispositivos totalmente diferentes o resultado foi considerado mais que satisfatório.

Figura 42 - Espectro dos dados do instrumento calibrado



Fonte: Elaborado pelo autor

Confrontando-se os dados verificados no espectro do software e na resposta dinâmica verificada in loco pode-se concluir que a solução correspondeu à expectativa e atendeu o propósito inicial do projeto.

Ofereceu-se afinal uma solução para análise de vibração de custo relativamente baixo, conforme tabela 3.

Tabela 3 -Custo do módulo experimental

Análise de custos para solução experimental e consolidada	
Item	Custo
ESP32	\$15,00
Bateria recarregável (4 unidades)	\$18,00
Módulo ADXL335	\$4,00
Imãs de neodímio	\$1,00
Tubo de alumínio	----
Software	----
Total	\$38,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Na análise apresentada na Tabela 3 não foram considerados os custos de desenvolvimento do *software* nem do tubo de alumínio reciclado de um segmento de antena encontrado na sucata. O custo de um equipamento como o utilizado neste ensaio no Brasil é de aproximadamente R\$ 20.000 alternativas portáteis semelhantes a canetas custam aproximadamente R\$ 9.000.

Os custos avaliados colocam a solução desenvolvida em uma posição muito favorável no mercado como um produto. Há similares que podem ser encontrados no exterior e mercado nacional, porém, além de serem mais caros, alguns destes não entregam uma solução para monitoramento instantâneo e alternativas de conectividade.

8 CONCLUSÃO

O desenvolvimento da solução atravessou diversas áreas de conhecimento de engenharia. Do ponto de vista de solução o protótipo desenvolvido mostrou-se adequado ao que se propunha inicialmente feitas as ressalvas sobre a banda de frequências de atuação.

No desenvolvimento do algoritmo foram testadas soluções já homologadas na comunidade de programação e foram desenvolvidas soluções experimentais para comparação. Na análise de desempenho, as soluções consolidadas mostraram-se mais eficientes e, portanto, foram aplicadas a solução final.

Diversos detalhes construtivos foram observados durante os testes e erros foram cometidos até que a resposta do sistema atingisse níveis satisfatórios.

A aplicação dos protocolos desenvolvidos com foco em IoT como o MQTT mostrou-se uma tendência e uma solução inegavelmente eficiente, o uso de tal estratégia por fabricantes como Siemens em seus controladores lógico programáveis de última geração já acusa a tendência.

A utilização de módulos de acelerômetros com múltiplos eixos acelera a aquisição dos dados nos pontos de coleta e foi um ganho percebido pelos operadores durante os testes. Trata-se de mais uma característica que diferencia a solução da ferramenta usada como referência.

As principais dificuldades encontradas foram relacionadas aos cuidados com a dinâmica do tempo no microcontrolador, há a necessidade da garantia de alguns tempos de execução para que a análise das frequências seja coerente. A frequência está ligada a ao tempo e portanto, erros causados por contagens erradas de tempo resultam em prejuízos de análise de dados.

Além disso, há uma limitação inerente a eletrônica em invólucros sem refrigeração que não permite a utilização do dispositivo em ambientes acima de 60 °C, e esta temperatura já é crítica para o sistema de baterias.

Como projeto futuro, a adaptação do supervisor para um sistema especialista que avalia as magnitudes e em tempo real condena o comportamento do corpo de prova ou dispara alertas automaticamente. A melhoria da autonomia das baterias pode ser feita otimizando o algoritmo e alterando-se sua estrutura de funcionamento para um código mais enxuto com aplicações mais diretas de rotinas de biblioteca.

No aspecto geral, o protótipo mostrou-se apto para a aplicação real e a praticidade e o baixo custo foram verificados na prática com a aprovação de usuários de sistemas mais complexos e elaborados. Conclui-se, portanto, que o objetivo foi alcançado com louvor e o protótipo é o ensaio de um produto com potencial de competitividade no mercado feitas algumas adaptações nas ferramentas de análise e otimizações na parte de consumo de energia

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Paulo Samuel de. Manutenção mecânica industrial princípios técnicos e operações. São Paulo Erica 2016 1 recurso online ISBN 9788536519807;
- SAVI, Marcelo Amorim. Vibrações mecânicas. Rio de Janeiro LTC 2017 1 recurso online ISBN 9788521634003;
- NORTON, Robert L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. xxx, 1028 p. ISBN 9788582600221;
- UMANS, Stephen D. Máquinas elétricas : de Fitzgerald e Kingsley . 7. ed. Porto Alegre: AMGH Ed., 2014. ISBN 9788580553741;
- THOMAZINI, Daniel. Sensores industriais fundamentos e aplicações. 8. São Paulo Erica 2011 1 recurso online ISBN 9788536520261;
- TANDON, N.; CHOUDHURY, A. , 1997. "Prediction of vibration amplitudes for defective rolling bearings". Int Sound Vibr Digest, Volume 3, Number 2, Pages 20-25;
- TANDON, N.; CHOUDHURY, A. , 1999. "A Review of Vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings". Tribol Int. Volume 32, Pages 469-480;
- BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. Instrumentação e fundamentos de medidas. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. ISBN 978-85-216-2130-0;
- LUIS ANTONIO AGUIRRE. Fundamentos de Instrumentação. Pearson 354 ISBN 9788581431833 ;

- GONÇALVES JÚNIOR, Armando Albertazzi; SOUSA, André Roberto de. Fundamentos de metrologia científica e industrial. Barueri, SP: Manole, 2008. xiv, 408 p. ISBN 9788520421161;
- KREYSZIG, Erwin. Matemática superior para engenharia, V.2. 9. Rio de Janeiro LTC 2008 1 recurso online ISBN 978-85-216-2335-9;
- WEEKS, Michael. Processamento digital de sinais utilizando MATLAB® e Wavelets. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. xx, 409 p. ISBN 9788521621416;
- SADIKU, Matthew N.O. Análise de circuitos elétricos com aplicações. Porto Alegre AMGH 2014 1 recurso online ISBN 9788580553031;
- <https://www.ibm.com/developerworks/br/library/iot-mqtt-why-good-for-iot/index.html>, Michael Yuan Entendendo o MQTT; (Acessado em 18/05/2018)
- <http://mqtt.org/documentation> (Acessado em 18/05/2018)
- BOYER, Stuart A. SCADA: supervisory control and data acquisition. 4th ed. Research Triangle Park, N.C.: ISA, 2010. x, 257 p. ISBN 9781936007097;
- Costa, Cesar da, Desenvolvimento de um sistema de instrumentação de medição de vibração mecânica em máquinas rotativas, em tempo real, embarcado em FPGA / Cesar da Costa – Guaratinguetá: [s.n.], 2011, 163f.;
- DH de Jesus Silva, Processamento de sinais para monitoramento de vibrações em Unidades geradoras hidrelétricas / Derick Henrique de Jesus Silva, Belo Horizonte 2013, dissertação de mestrado Universidade Federal de Minas Gerais, programa de pós graduação em Engenharia Elétrica;
- Ribeiro, Diogo Aranha. Análise de vibração em motores elétricos com mouse óptico / Diogo Aranha Ribeiro. -2016.68p;

- <http://www.skf.com/br/products/condition-monitoring/software/analysis-and-reporting-module/index.html> (Acessado em 20/05/2018);
- PRAVIA, Z. M. C. e BRAIDO, J. D.. Measurements of bridges' vibration characteristics using a mobile phone. Rev. IBRACON Estrut. Mater. [online]. 2015, vol.8, n.5, pp.721-743. ISSN 1983-4195;
- SILVA, M. A. et al. Sistema para monitoramento de vibrações utilizando Arduino. Revista InterAtividade, p. 142–153, 2014;
- SILVEIRA, F. F. et al. Previsão de falhas em mancais de rolamento por envelope de Aceleração. CIBEM p. 575-578,2011;
- <http://www.iotsharing.com/2017/05/how-to-use-mqtt-to-build-smart-home-arduino-esp32.html>(Acessado em 25/09/2018);