



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



GIANLUCCA BASQUI GARIGLIO

**ANÁLISE DE VIBRAÇÕES DE UM VENTILADOR DE
REFRIGERAÇÃO DE GABINETE**

**OURO PRETO - MG
2023**

GIANLUCCA BASQUI GARIGLIO
gian.basqui@gmail.com

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DE UM VENTILADOR DE
REFRIGERAÇÃO DE GABINETE**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Ronilson Rocha

OURO PRETO – MG
2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G232a Gariglio, Gianluca Basqui.
Análise de vibrações de um ventilador de refrigeração de gabinete.
[manuscrito] / Gianluca Basqui Gariglio. - 2023.
38 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Ronilson Rocha.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Processamento de sinais. 2. Aquisição de língua de sinais. 3.
Ventiladores - Refrigeração. 4. Vibração. 5. Teoria dos sinais
(Telecomunicações). I. Rocha, Ronilson. II. Universidade Federal de Ouro
Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gianluca Basqui Gariglio

Análise de vibrações de um ventilador de refrigeração de gabinete

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 08 de agosto de 2023

Membros da banca

Dr. Ronilson Rocha - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Diogo Antônio de Sousa (Universidade Federal de Ouro Preto)
M.Sc. João Carlos Vilela de Castro (Nome da instituição por extenso)

Ronilson Rocha, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/08/2023



Documento assinado eletronicamente por **Ronilson Rocha, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/08/2023, às 12:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0571371** e o código CRC **181C43EA**.

A Deus toda honra e toda glória para sempre!

À minha família e verdadeiros amigos, obrigado por todo apoio ao longo dessa etapa.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, pela graça de me permitir vivenciar toda essa etapa. Ao Espírito Santo, por me abençoar com sua sabedoria divina. À Nossa Senhora, pela proteção. E ao São Benedito por interceder nas minhas amizades.

À minha família, obrigado pelo suporte. Renan, Neide, Antônio Carlos, Miriam, Vó Luzia e Vô Zé, que seus nomes fiquem aqui registrados como singela homenagem de amor a vocês.

Obrigado também aos verdadeiros amigos que fiz em Ouro Preto e foram meu suporte ao longo do curso: Maicon, Danilo, Lorryne e Scott.

E LED, obrigado pelo suporte para que eu pudesse realizar esse trabalho.

Agradeço a República OxiGênios por terem proporcionado a vida ouro-pretana que vivi e por contribuir com a formação do meu caráter.

*“A suprema sabedoria é esta: pelo desprezo do mundo
tender ao reino dos céus”.*

Tomás de Kempis

RESUMO

A manutenção preditiva utiliza, dentre várias ferramentas, a análise de vibração de equipamentos por meio do processamento de sinais por eles produzidos com o intuito de detectar anomalias presentes. Apresenta-se neste trabalho os passos para realizar uma análise do perfil de vibração de um ventilador de refrigeração de gabinete, bem como a discussão de cada resultado obtido nos experimentos. A escolha desse equipamento levou em conta sua importância no funcionamento dos diversos sistemas que ele compõe, sendo que seu mal funcionamento pode acarretar em falhas graves desses sistemas. Assim, o trabalho objetiva a análise de anomalias que ocorrem comumente nesse equipamento. Já a metodologia aplicada foi da pesquisa explicativa, bibliográfica e experimental, que por meio de experimentos práticos com o ventilador de refrigeração em condições normais e com ele desbalanceado, buscou explicar e ilustrar o que é apresentado nas literaturas. Com isso, notou-se nos espectros de frequência dos experimentos: picos no harmônico fundamental 1X, no harmônico das pás (MX) e no dos polos (PX) para um funcionamento normal, aumento da amplitude do harmônico fundamental 1X para um rotor desbalanceado e aparecimento de picos sub-harmônicos, semi-harmônicos e múltiplos harmônicos para um ventilador com afrouxamento de elementos rotativos e estrutural. Desse modo, concluiu-se que o trabalho pode ser usado como um exemplo para a realização de análises de perfis de vibração de diversos equipamentos e para ajudar na assimilação entre o conhecimento prático e teórico das principais áreas do saber envolvidas.

Palavras-chave: Processamento de sinais. Aquisição de sinais. Ventilador de refrigeração. Vibrações.

ABSTRACT

Predictive maintenance uses, among various tools, the analysis of equipment vibration through the processing of signals emitted by them in order to detect present anomalies. This work presents the steps to perform an analysis of the vibration profile of a cabinet cooling fan, as well as the discussion of each result obtained in the experiments. The choice of this equipment took into account its importance in the functioning of the various systems it comprises, as its malfunction can lead to serious failures in these systems. Thus, the work aims at the analysis of anomalies that commonly occur in this equipment. The applied methodology was explanatory, bibliographic, and experimental research, which, through practical experiments with the cooling fan under normal conditions and when unbalanced, sought to explain and illustrate what is presented in the literature. As a result, it was observed in the frequency spectra of the experiments: peaks at the fundamental harmonic (IX), the blade harmonic (MX) and the pole harmonic (PX) for normal operation, an increase in the amplitude of the fundamental harmonic IX for an unbalanced rotor, and the appearance of sub-harmonics, semi-harmonics, and multiple harmonics for a fan with loosening of rotating and structural elements. Therefore, it was concluded that this work can be used as an example for performing vibration profile analyses of various equipment and to help in the assimilation between practical and theoretical knowledge in the main areas involved.

Key-words: Signal processing. Signal acquisition. Cooling fan. Vibrations.

LISTA DE SÍMBOLOS

LED – *Light Emitting Diode*

RMS – Valor quadrático médio

T – Período

FFT – *Fast Fourier Transform*

P – Número de polos

M – Número de Pás

ω_r ou w – Velocidade do rotor

1X – Harmônico fundamental

PX – Harmônico dos polos

MX – Harmônico das pás

d – Distância

m – Massa

BPFO – Frequência de passagem do rolamento da pista do anel externo

BPFI – Frequência de passagem do rolamento da pista do anel interno

BSF – Frequência de rotação da esfera

FTF – Frequência fundamental do trem

N_B – Número de elementos rolantes

B_D – Diâmetro da esfera

P_D – Diâmetro primitivo

β – Ângulo de contato dos corpos rolantes

D_1 – Diâmetro da superfície de contato externa

D_2 – Diâmetro da superfície de contato interna

PLX-DAQ – *Parallax Data Acquisition tool*

g – Força-g

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Valor quadrático médio	6
Equação 2: Transformada de Fourier	6
Equação 3: Frequência de passagem do rolamento da pista do anel externo (BPFO)	14
Equação 4: Frequência de passagem do rolamento da pista do anel interno (BPFI).....	14
Equação 5: Frequência de rotação da esfera (BSF).....	15
Equação 6: Frequência fundamental do trem (FTF).....	15

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de um sinal no domínio do tempo	6
Figura 2: Análise do domínio da frequência	7
Figura 3: Ventilador de refrigeração e suas harmônicas básicas no espectro da frequência.....	9
Figura 4: Força centrífuga associada com um rotor desbalanceado	10
Figura 5: Desbalanceamento do rotor.....	10
Figura 6: Desalinhamento e seu perfil de vibração	11
Figura 7: Dobramento de eixo e seu perfil de vibração.....	12
Figura 8: Afrouxamento estrutural e seu perfil de vibração	12
Figura 9: Afrouxamento de elementos rotativos e seu perfil de vibração	13
Figura 10: Defeitos em rolamentos de esferas: (a) Características geométricas dos rolamentos de esferas, (b) perfil de frequência para problemas na pista do anel externo, (c) perfil de frequência para problemas na pista do anel interno, (d) perfil de frequência para defeitos de esferas ou rolos e (e) perfil de frequência para defeitos na gaiola	14
Figura 11: Etapas de desenvolvimento do trabalho.....	17
Figura 12: Associação dos equipamentos para coleta de dados	19
Figura 13: Ventilador de refrigeração com eixos de medição do acelerômetro.....	20
Figura 14: Acelerômetro MMA7361.....	20
Figura 15: Arduino UNO R3.....	21
Figura 16: Código utilizado no Arduino.....	22
Figura 17: Explicação de cada linha do código utilizado no Arduino	23
Figura 18: Código utilizado para realizar a Transformada Rápida de Fourier e plotar gráficos no domínio da frequência de cada eixo	24
Figura 19: Explicação de cada linha do código utilizado no MATLAB®	25
Figura 20: Espectro de frequência na direção radial (eixo z)	28
Figura 21: Espectro de frequência na direção tangencial (eixo x)	29

Figura 22: Espectro de frequência na direção axial (eixo y)	30
Figura 23: Espectro de frequência de rotor desbalanceado na direção radial (eixo z)	31
Figura 24: Espectro de frequência de rotor desbalanceado na direção axial (eixo y)	31
Figura 25: Espectro de frequência de rotor desbalanceado na direção tangencial (eixo x).....	32
Figura 26: Espectro de frequência do ventilador de refrigeração mal fixado na direção radial (eixo z).....	33
Figura 27: Espectro de frequência do ventilador de refrigeração mal fixado na direção axial (eixo y).....	34
Figura 28: Espectro de frequência do ventilador de refrigeração mal fixado na direção radial (eixo x).....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis e indicadores.....	26
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	1
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	Geral	2
1.3.2	Específicos.....	2
1.4	Estrutura do Trabalho	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Arduino.....	4
2.2	Aquisição e processamento de sinais.....	5
2.2.1	Domínio do tempo e frequência	5
2.3	MATLAB®	8
2.4	Ventilador de refrigeração	8
3	METODOLOGIA.....	16
3.1	Tipo de Pesquisa.....	16
3.2	Materiais e métodos.....	17
3.2.1	Equipamentos utilizados para a coleta de dados dos testes	18
3.2.2	<i>Softwares</i> utilizados para a coleta de dados dos testes	21
3.3	Variáveis e indicadores.....	26
3.4	Instrumento de coleta de dados	26
3.5	Tabulação de dados	26
3.6	Considerações finais do capítulo	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1	Análise dos experimentos	28
4.1.1	Ventilador de refrigeração bem fixado e com rotor balanceado	28
4.1.2	Ventilador de refrigeração bem fixado e com rotor desbalanceado	30
4.1.3	Ventilador de refrigeração mal fixado.....	33
4.2	Considerações finais do capítulo	35
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	36
5.1	Conclusão	36
5.2	Recomendações	36

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....37

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Um sinal de vibração é um suporte físico para propagação de informação e seu processamento permite extrair as várias informações contidas nele a fim de analisar e, assim, entender o processo físico no qual ele faz parte.

De acordo com Fernandez (2022), a análise de vibração avalia as alterações de níveis e frequências das vibrações das máquinas, estruturas e equipamentos buscando identificar anomalias. Assim, a análise de vibração pode ser utilizada como um método de manutenção preditiva, pois por meio dela é possível prever problemas que possam vir a ocorrer nos maquinários e estruturas.

As máquinas emitem com constância determinadas frequências de vibrações e ao apresentar algum tipo de desgaste, sua energia vibratória apresenta uma mudança de distribuição espacial e de intensidade. Para identificar tal mudança e, conseqüentemente, o desgaste é necessário fazer a análise dos sinais de vibração. Por meio de um acelerômetro, instrumento que mede a aceleração de um objeto, junto com operações matemáticas de conversão dos sinais é possível realizar a aquisição e tratamento dos sinais de vibração.

Desse modo, a realização da aquisição e processamento dos sinais de vibração também é possível para peças isoladas como um ventilador de refrigeração de gabinete, objeto responsável por refrigerar os componentes dentro de um gabinete de computador. Ou seja, a peça é avaliada de forma independente dos componentes que compõem um computador e, portanto, há o seguinte questionamento:

Como realizar uma análise de vibração em um ventilador de refrigeração de gabinete e identificar as diferentes anomalias apontadas por meio do processamento de sinais?

1.2 Justificativa

Segundo Tian (2006), os ventiladores de refrigeração são uma das partes mais críticas do sistema de solução térmica da maioria dos equipamentos eletrônicos. Além disso, um ventilador pode apresentar falhas graves, onde ele não funciona ou falhas leves como diminuição da velocidade do rotor, aumento da entrada de corrente ou um maior nível de ruído. Para se ter um completo entendimento da sua confiabilidade é necessário considerar todas as

possíveis falhas de mecanismos e modos de falhas. Contudo, ainda que existam vários fornecedores desses ventiladores no mercado, alguns mecanismos e modos de falhas ainda não foram completamente compreendidos tanto pelos fornecedores. Sendo assim, diferentes fornecedores usam diferentes critérios de falha e métricas de confiabilidade nesses produtos. A maioria dos fornecedores usam o chamado ‘teste de vida acelerado’, no entanto, algumas dessas metodologias de teste foram mal utilizadas e os métodos de modelagem variam de fornecedor para fornecedor.

Miao *et al.* (2011) ressaltam que a falha do rolamento de um ventilador de refrigeração é um dos principais modos de falha que ocorrem nos sistemas de refrigeração dos computadores. A falha do rolamento desse tipo de ventilador pode resultar em instabilidade, mal funcionamento e danos ao sistema do computador.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar uma análise de vibração em um ventilador de refrigeração de gabinete para identificar as diferentes anomalias apontadas por meio do processamento de sinais.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre: Arduino, aquisição e processamento de sinais, MATLAB®, ventilador de refrigeração e ferramentas relacionadas a identificação de falhas em elementos que compõem um ventilador de refrigeração de computador;
- Descrever a metodologia adotada e apresentar a instrumentação utilizada para a coleta e posterior análise dos dados;
- Exemplificar por meio dos resultados obtidos a forma como os sinais gerados se relacionam com cada falha em questão.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo é apresentado a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos, do *software* e dos *hardwares* necessários para aquisição e processamento dos sinais. Abordando assim, Arduino, sinais, domínio do tempo e frequência, MATLAB® e ventilador de refrigeração. Também é relatado os comportamentos esperados de diversas anomalias no espectro de frequência.

O terceiro capítulo aborda a metodologia empregada no trabalho, classificando-a. Além disso, apresenta os materiais e métodos utilizados, as variáveis e indicadores adotados, os instrumentos de coleta de dados e o procedimento para a tabulação.

Já o quarto capítulo mostra os resultados obtidos dos experimentos realizados e a discussão de cada um. Sendo esses experimentos: utilização em condição normal do ventilador de refrigeração, com desbalanceamento do rotor e com afrouxamento estrutural.

Por fim, o quinto capítulo trata das conclusões tiradas em relação ao conjunto dos resultados dos experimentos alinhadas com a fundamentação teórica. E ainda, são feitas recomendações sobre possíveis futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda toda fundamentação teórica necessária para a identificação de falhas em elementos que compõem um ventilador de refrigeração de computador. Desse modo, é feito o estudo sobre vibração, a utilização de Arduino, aquisição e processamento de sinais, apresentação do software MATLAB® e do ventilador de refrigeração, sendo esse último abordando sua operação, módulos de falha, mecanismos e análises de efeito.

2.1 Arduino

Conforme aborda Badamasi (2014), Arduino é uma família de plataformas de código aberto usada para construção e programação de eletrônicos. Estas plataformas podem receber e enviar informações para a maioria dos dispositivos, e até mesmo através da internet para comandar o dispositivo eletrônico especificado.

Novamente, conforme Badamasi (2014), o Arduino é muito usado na programação de microcontroladores, entre outras coisas, devido à sua configuração amigável ou fácil de usar. Ele é uma placa de desenvolvimento com microcontrolador que pode ser programado para realizar inúmeras tarefas. Ele envia informações do programa de computador para o microcontrolador Arduino e finalmente para o circuito específico ou máquina com vários circuitos a fim de executar um comando específico.

Estando de acordo com a abordagem de Badamasi (2014), o site Arduino (2022) afirma que as placas de Arduino são capazes de receberem diversos sinais de entrada como identificação de luz por um sensor, um dedo pressionando um botão ou até uma mensagem em rede social, por exemplo. Assim, como sinal de saída ele pode ligar um LED, ativar um motor, publicar algo na internet etc.

Ainda de acordo com o site Arduino (2022), a escolha por sua utilização geralmente se dá pela sua plataforma fácil de utilizar por iniciante e por ser flexiva para os utilizadores avançados também. Além disso, professores e estudantes o utilizam para criar instrumentos científicos de baixo custo para as mais diversas áreas. Contudo, há uma vasta quantidade de outros microcontroladores e plataformas de microcontroladores, porém a simplificação do processo que é feita pelo Arduino o torna uma boa opção para professores, estudantes e amadores.

2.2 Aquisição e processamento de sinais

De acordo com Rao (2011), vibração é qualquer movimento que se repita em um intervalo de tempo, sendo também chamado de oscilação. A vibração de um sistema compreende a alternância de transferência de sua energia cinética para potencial e vice-versa. As vibrações mais simples são as de formas de onda senoidais. Já as vibrações mais complexas consistem na soma de várias vibrações simples.

Segundo Rachid *et al.* (2016), uma máquina possui um sinal de vibração complexo e característico que é formado pela soma dos sinais característicos individual de cada elemento que a compõe. Assim, uma forma de monitorar o funcionamento de uma máquina é fazer a aquisição, processamento e análise dos sinais de vibração, que fornecem as informações relacionadas ao estado operacional da máquina e seus componentes.

Conforme aborda em seu relatório, Rocha e Guimarães (2022, p.3):

Os sinais medidos usando sensores de vibração devem ser condicionados para ajustar as amplitudes dos sinais às faixas de entrada do sistema de aquisição, atenuar bandas de frequência indesejáveis, melhorar a resolução do sinal e aumentar imunidade a ruídos. O sistema de aquisição obtém amostra, discretiza e converte os sinais condicionados em palavras digitais para processamento em um sistema de computador, que executa rapidamente algoritmos e cálculos complexos usando *software* apropriado. A aquisição de dados introduz erros de amostragem e quantização no sinal adquirido, que dependem a resolução, faixa dinâmica e ganho do sistema de aquisição. Geralmente, apenas um conversor analógico-digital está disponível em um sistema de aquisição, que requer a multiplexação de canais para aquisição de múltiplos sinais. Nesse contexto, a taxa de amostragem efetiva para aquisição de um sinal geralmente corresponde à divisão da taxa de amostragem de sistema de aquisição pelo número de sinais amostrados.

Para se obter um processamento de sinal adequado é necessário que uma boa quantidade de amostras esteja disponível, caso contrário se torna difícil recuperar o sinal original do sinal amostrado. De acordo com o teorema de amostragem Nyquist/Shanon, uma interpolação adequada de um sinal de banda limitada de um sinal amostrado necessita que a taxa de amostragem seja pelo menos duas vezes a faixa de frequência mais alta do sinal original (OPPENHEIM e WILLSKY, 2013).

2.2.1 Domínio do tempo e frequência

Segundo Rao (2011) a primeira maneira de se representar a saída de um sinal de vibração de um sensor é pela função no tempo. A amplitude de uma onda em relação a uma posição de equilíbrio é a representação da medição da intensidade de vibração, sendo ela o

máximo deslocamento do elemento vibratório em questão e podendo ser expressa na forma de valores de pico ou pico a pico. Porém, a amplitude é costumeiramente considerada usando o valor quadrático médio (RMS) que está diretamente relacionado com a energia transportada pela forma de onda na função de tempo e é dado por:

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2.1)$$

Onde T é o período do ciclo completo em segundos.

A Figura 1 ilustra os valores apresentados.

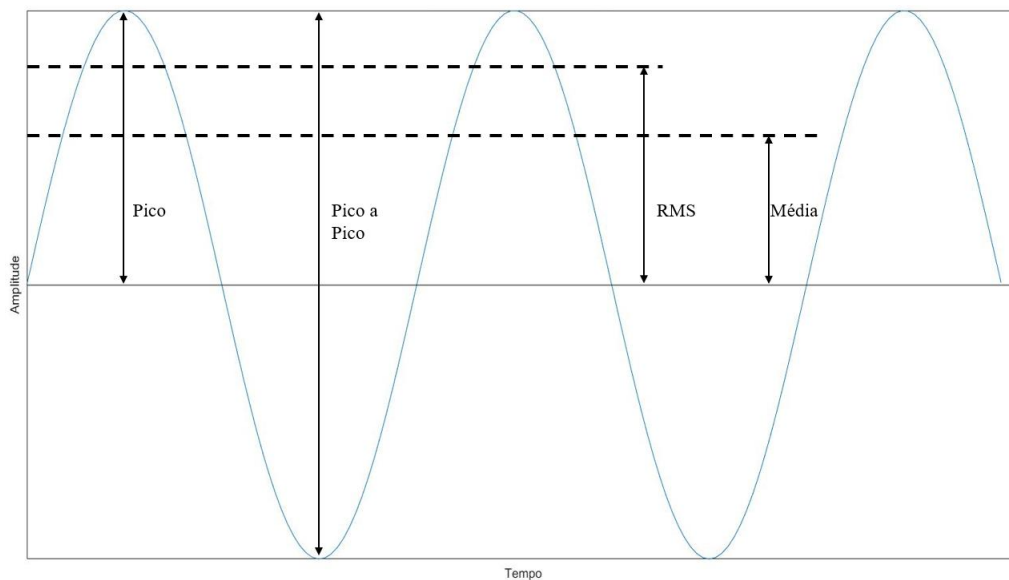


Figura 1 – Exemplo de um sinal no domínio do tempo.
Fonte: Pesquisa direta (2022).

Haykin e Van Veen (1998) ressaltam que a análise no domínio do tempo pode ser muito complicada, já que um sinal complexo pode carregar uma grande quantidade de informações. Desse modo, a análise no domínio da frequência é amplamente utilizada no processamento de sinais a fim de obter uma interpretação para os dados de forma simples e direta, diferentemente do que ocorre no domínio do tempo. Assim, essa abordagem decompõe um sinal de tempo em várias ondas senoidais usando a Transformada de Fourier, que é dada por:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.2)$$

A seguir, a Figura 2 mostra o espectro de frequência obtido pela Transformada de Fourier:

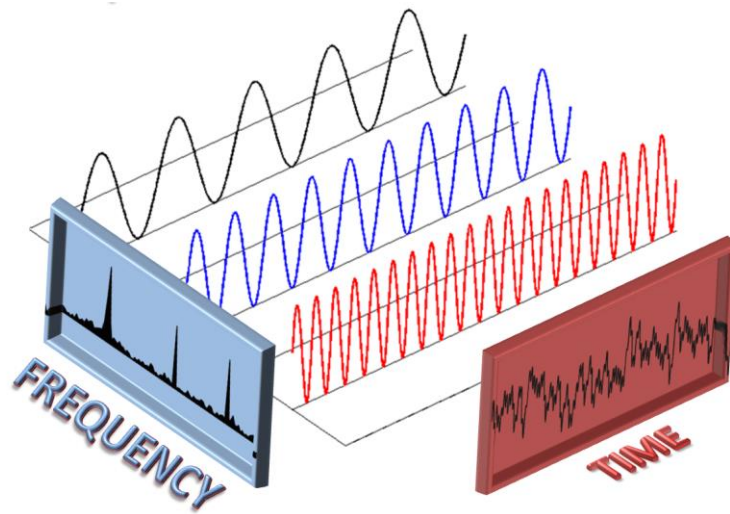


Figura 2 - Análise do domínio da frequência.
Fonte: Kalhara *et al* (2017).

De acordo com Kalhara *et al* (2017), a Figura 2 exemplifica como um sinal seria descrito graficamente no domínio do tempo e no domínio da frequência. O sinal no domínio do tempo é visto com a sobreposição de diversas ondas que o compõe. Já no domínio da frequência, esse mesmo sinal é visualizado com picos nas frequências das principais ondas que o compõe.

Em concordância com o expressado anteriormente, Girod *et al* (2001) afirma que essa decomposição do sinal permite realizar o isolamento e identificação da frequência característica de vibração que é associada a cada elemento que compõe um equipamento. A Transformada de Fourier é calculada computacionalmente usando um algoritmo chamado Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês), que fornece uma frequência média para o sinal medido com a finalidade de aumentar a performance desse algoritmo.

Por mais que a FFT seja apropriada para descrever sinais estacionários e obter a energia média em cada frequência, ela não fornece resultados corretos para sinais aleatórios estacionários onde a frequência de operação é desconhecido. A Frequência Espectral de Potência representa a densidade de potência para cada faixa de frequência e é mais adequado para análise de sinais aleatórios estacionários, pois diferente da FFT ela sempre fornece resultados reais (FAHY e PÉREZ, 1993). Correlacionando as afirmações de Rao (2011) e Oppenheim e Willsky (2013), pode-se inferir que a análise de fase pode complementar as

análises no domínio do tempo e da frequência para determinar gatilhos para pontos de vibração específicos e distinguir situações com espectros de frequência semelhantes.

2.3 MATLAB®

Conforme aborda Silva (2022), MATLAB® é um *software* e linguagem de programação interativa responsável por fazer cálculos numéricos, além de ter um conjunto próprio de bibliotecas (*toolboxes*). Sendo que essas bibliotecas fornecem funções especializadas que podem ser usadas em diversas áreas como: estatísticas, processamento de sinais, finanças etc.

Corroborando com o Silva (2022), o site MathWorks (2023), empresa responsável pelo *software*, ressalta a capacidade do MATLAB® em realizar a análise e aquisição de dados, plotagem de gráficos, interface com outros *softwares*, entre outras funções.

2.4 Ventilador de refrigeração

Rachid *et al* (2016) ressalta que a análise espectral é baseada em uma análise sistemática do sinal de vibração quanto à presença de imagens vibratórias de todos os defeitos que possam afetar a instalação considerada, o que necessita do conhecimento das características cinemáticas dos vários componentes, da velocidade de rotação ou, preferencialmente, da frequência de movimento.

Conforme aborda Oh (2010), para se ter uma avaliação da situação operacional do equipamento a partir da análise de vibração requer-se um estudo dos componentes com a finalidade de estabelecer um perfil de vibração para operação normal e realizar um levantamento das causas de possíveis problemas. Além disso, Fernandez (2022) afirma que a melhor forma de determinar qual o padrão de vibração apropriado para cada equipamento é coletar e registrar dados de vibração do dispositivo em diferentes períodos de seu histórico operacional para comparação com padrões estabelecidos com base em dados do fabricante, espectro de frequência de máquinas semelhantes e experiência de outras pessoas.

De acordo com o site National Instruments Inc. (2022), um ventilador de refrigeração de computador é um sistema eletromecânico que gera corrente de ar a partir do movimento rotativo de pás ou hélices para resfriamento ativo. Geralmente, um driver de motor de corrente contínua sem escovas modula as correntes elétricas nas bobinas do estator, com uma quantidade

P de polos, para gerar um campo magnético rotativo e, assim, interagir com os ímãs permanentes do rotor, que produz torque e rotação de uma quantidade M de pás.

Ainda de acordo com o site, o componente fundamental do sinal de vibração é a velocidade do rotor em ciclos por segundo, dado por ω_r . O sinal de vibração total neste dispositivo é a superposição de contribuições individuais do eixo, bobinas do estator e lâminas como mostrado na Figura 3, de modo que seu espectro de frequência tenha, primeiramente, um pico no harmônico fundamental 1X, sendo a frequência desse harmônico a mesma que a velocidade do rotor. Os outros picos que também aparecem são na frequência de passagem dos polos, representado pelo harmônico PX, e na frequência de passagem das pás, representado pelo harmônico MX.

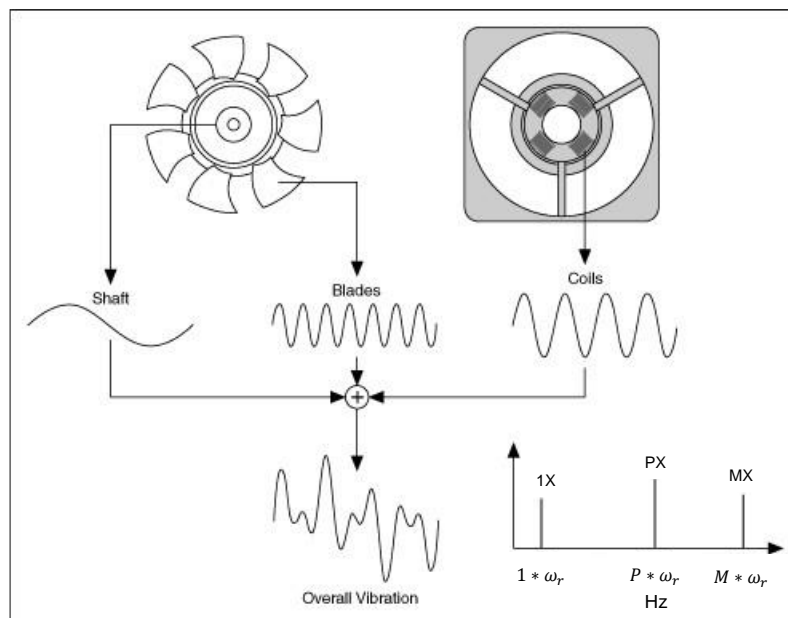


Figura 3 - Ventilador de refrigeração e suas harmônicas básicas no espectro da frequência.

Fonte: Adaptado de National Instruments Inc. (2002).

E ainda, conforme complementa Tian (2006), esse eletromecanismo também é composto por outros componentes como rolamentos, lubrificante, circuitos de controle, componentes eletrônicos e carcaça do ventilador, que também contribuem para o espectro de frequência do ventilador do computador.

Fernandez (2002) destaca que centro de rotação pode não coincidir com o centro de massa devido à distribuição não uniforme da massa rotativa, o que causa um desequilíbrio nas máquinas rotativas. Sendo assim, a Figura 4 ilustra a força centrífuga associada com um rotor desbalanceado.

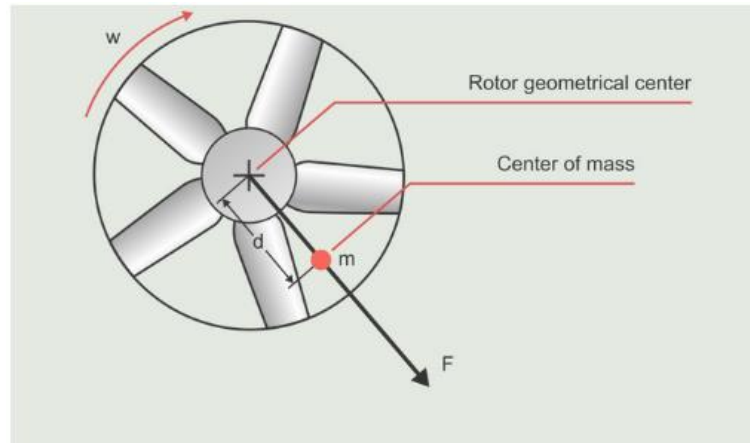


Figura 4 - Força centrífuga associada com um rotor desbalanceado.
Fonte: Fernandez (2022).

Ainda de acordo com Fernandez (2022), algumas das possíveis razões para a distribuição não uniforme da massa rotativa em ventiladores de refrigeração são: excentricidades, expansão desigual do rotor devido a efeitos térmicos, desgaste e corrosão de componentes, acúmulo irregular de material nas pás, como poeira, por exemplo, entre outras. Dessa forma, a distribuição não uniforme gera uma força radial que gira sincronicamente com o eixo causando vibração excessiva, que é caracterizada pelo aumento da amplitude do harmônico 1X no espectro de frequência do sinal de vibração principalmente na direção radial conforme mostrado abaixo pela Figura 5. O desequilíbrio do ventilador de resfriamento pode ser corrigido adicionando ou removendo massas em posições apropriadas do rotor para fazer com que ambos os centros coincidam.

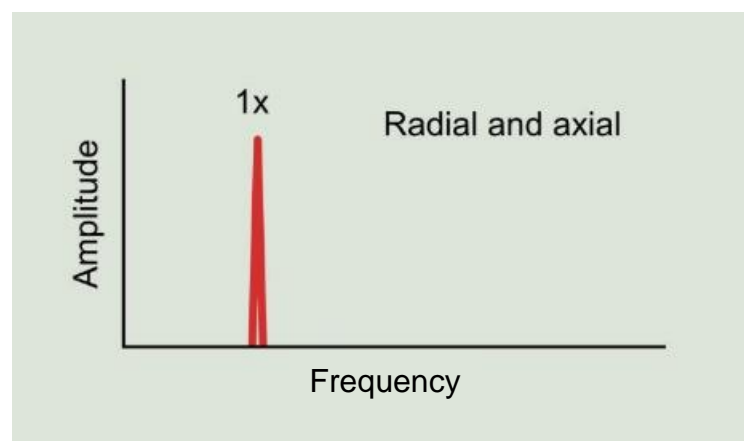


Figura 5 - Desbalanceamento do rotor.
Fonte: Adaptado de Fernandez (2022).

Por fim, segundo Rao (2011), desbalanceamento se caracteriza quando um rotor apresenta uma massa excêntrica em relação ao seu eixo, isto é, uma massa distribuída assimetricamente em relação ao eixo do rotor, deslocando o centro de gravidade na seção perpendicular do rotor.

De acordo com Blanco (2020), o desalinhamento em um ventilador de refrigeração ocorre quando o eixo de rotor não é colinear com o eixo de rotação do ventilador, ou seja, não está alinhado com os suportes ou mancais devido a distorções e deformações no ventilador de refrigeração, montagem inadequada, acoplamentos elásticos ou mancais autocompensados. Este problema resulta em altos níveis de vibração que podem acelerar a degradação de rolamentos e acoplamentos, além de causar quebras, superaquecimento, alto consumo de energia, etc. A caracterização do desalinhamento de um ventilador de refrigeração se dá pelo aumento da amplitude do harmônico 1X e o aparecimento dos harmônicos 2X e 3X no espectro de frequência do sinal de vibração. O desalinhamento entre o eixo e um rolamento geralmente aumenta apenas as amplitudes de vibração axial e radial nos harmônicos 1X e 2X (FERNANDEZ, 2022). A seguir, a Figura 6 apresenta o desalinhamento e seus efeitos no perfil de vibração.

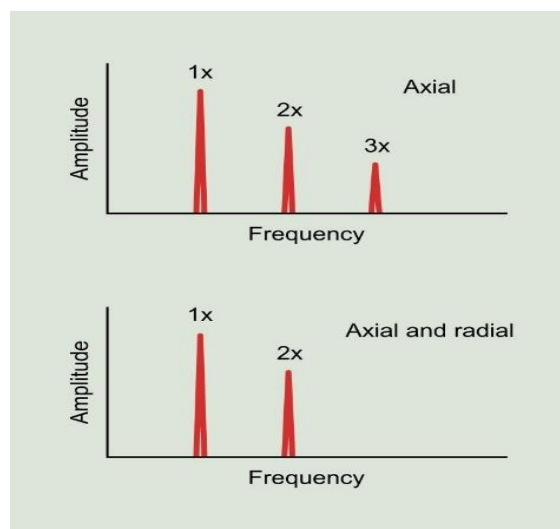


Figura 6 - Desalinhamento e seu perfil de vibração.
Fonte: Adaptado de Fernandez (2022).

Além disso, sobrecargas mecânicas ou dilatações térmicas podem dobrar o eixo de um ventilador de refrigeração. Dessa forma, há um aumento significativo da amplitude dos harmônicos 1X e 2X no espectro de frequência do sinal de vibração axial e radial devido à perda de simetria do eixo em relação ao eixo de rotação. É mostrado pela Figura 7 os efeitos causados pelo dobramento de eixo (FERNANDEZ, 2022).

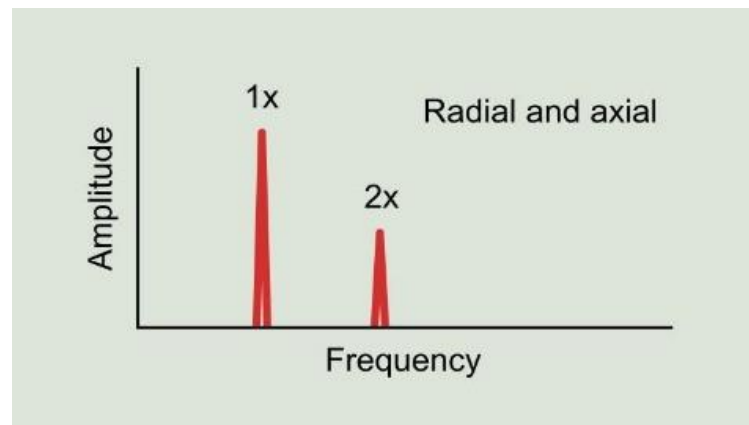


Figura 7 - Dobramento de eixo e seu perfil de vibração.
Fonte: Adaptado de Fernandez (2022).

Ainda conforme aborda Fernandez (2022), o afrouxamento estrutural está associado a elementos não rotativos e geralmente se manifesta na direção radial com a presença de múltiplos harmônicos no espectro de frequência do sinal de vibração. As amplitudes dos harmônicos 2X e, talvez também, 3X superam em 50% a amplitude do harmônico 1X no afrouxamento estrutural severo. O afrouxamento de elementos rotativos comumente se manifesta em direções radiais e são caracterizados pela presença de harmônicos, como: 1X, 2X, 3X, etc.; semi-harmônicos, como: 1,5X, 2,5X, 3,5X, etc.; e sub-harmônicos, como: 0,5X; no espectro de frequência do sinal de vibração. A seguir, o afrouxamento estrutural e o afrouxamento de elementos rotativos são ilustrados pela Figura 8 e Figura 9, respectivamente.

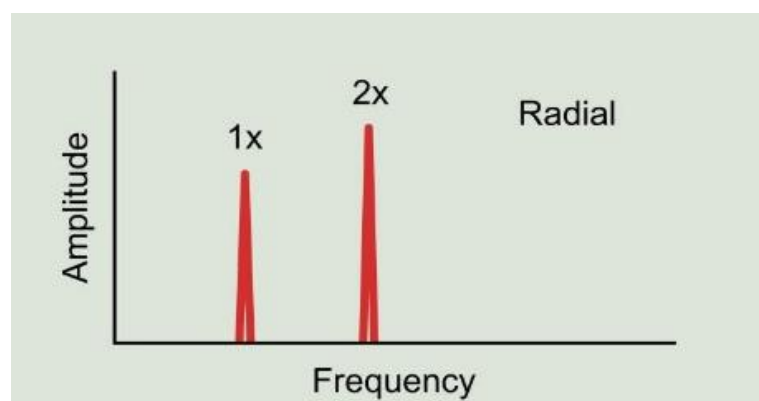


Figura 8 - Afrouxamento estrutural e seu perfil de vibração.
Fonte: Adaptado de Fernandez (2022).

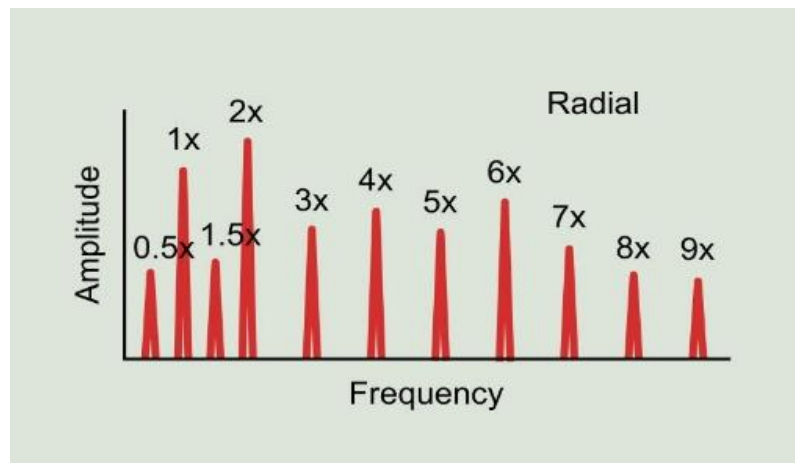


Figura 9 – Afrouxamento de elementos rotativos e seus perfis de vibração.
Fonte: Adaptado de Fernandez (2022).

Por fim, de acordo com Rocha e Guimarães (2022), a presença de múltiplos harmônicos com baixa amplitude no espectro de frequência indica um estágio inicial de afrouxamento. O afrouxamento é considerado grave quando surgem semi-harmônicos no espectro de frequência do sinal de vibração. A presença de harmônicos, semi-harmônicos e sub-harmônicos no espectro de frequências implica em um afrouxamento forte.

Saruhan *et al* (2014) ressaltam que defeitos no rolamento de esferas geram uma série de impactos que se repetem periodicamente toda vez que um rolo em movimento passa sobre o ponto danificado em taxas conhecidas como frequências características do rolamento, que inserem um ou mais picos assíncronos no espectro de frequência do sinal de vibração.

He *et al* (2014) destaca que existem quatro frequências características do rolamento de esferas: frequência de passagem do rolamento da pista do anel externo (BPFO), frequência de passagem do rolamento da pista do anel interno (BPFI), frequência de rotação da esfera (BSF) e frequência fundamental do trem (FTF), com as siglas acima vindo do inglês. Essas frequências dependem do número de elementos rolantes N_B , diâmetro da esfera B_D , diâmetro primitivo P_D , ângulo de contato dos corpos rolantes β , diâmetro da superfície de contato externa D_1 e diâmetro da superfície de contato interna D_2 .

Conforme aborda Miao *et al* (2011), Saruhan *et al* (2014) e He *et al* (2014), os parâmetros do rolamento de esferas e os espectros de frequência característica de defeitos em rolamentos de esferas são apresentados na Figura 10.

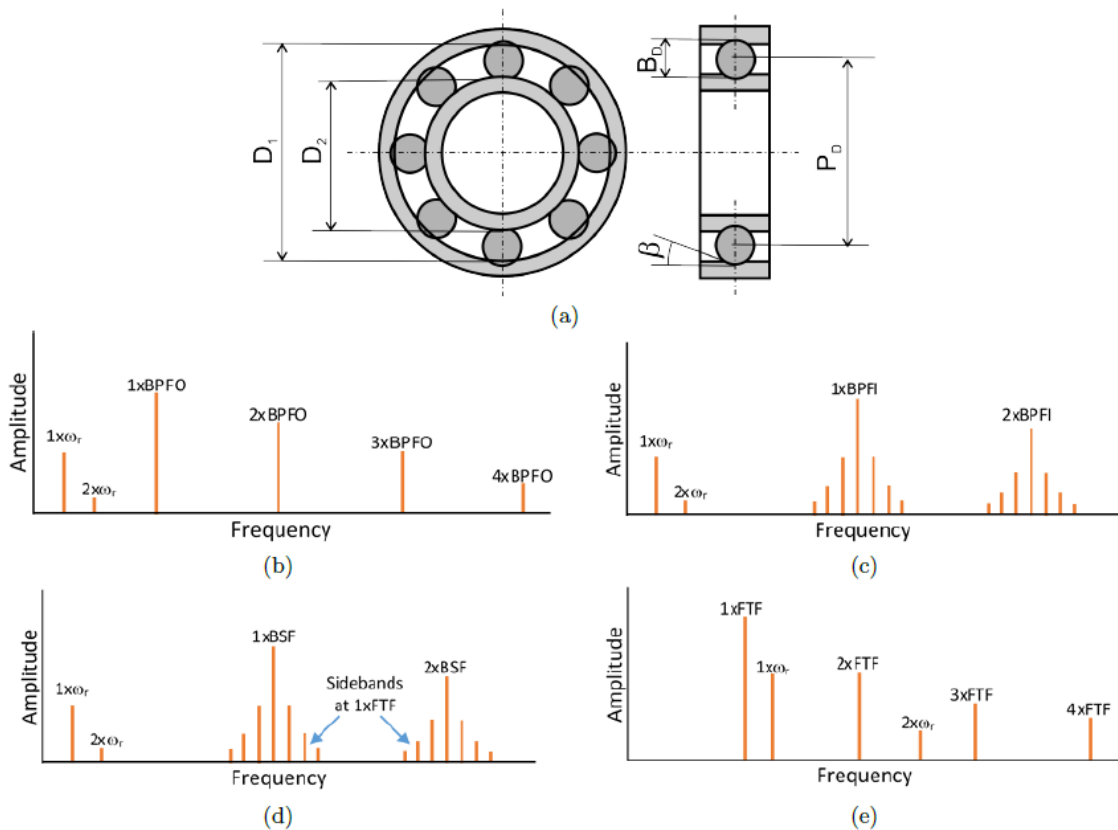


Figura 10 – Defeitos em rolamentos de esferas: (a) Características geométricas dos rolamentos de esferas, (b) perfil de frequência para problemas na pista do anel externo, (c) perfil de frequência para problemas na pista do anel interno, (d) perfil de frequência para defeitos de esferas ou rolos e (e) perfil de frequência para defeitos na gaiola.

Fonte: Rocha e Guimarães (2022).

De acordo com Saruhan *et al* (2014) e Le Besnerais *et al* (2014), o BPFO corresponde ao número de esferas ou rolos que passa em um determinado ponto da pista externa para cada revolução completa do eixo e é dado por:

$$\text{BPFO} = \frac{N_B}{2} \left(1 - \frac{B_D}{P_D} \cos(\beta) \right) \omega_r \approx 0,4N_B \omega_r \quad (2.3)$$

A presença de BPFO e seus múltiplos harmônicos no espectro de frequência do sinal de vibração indica problemas na pista do anel externo do rolamento de esferas. Le Besnerais *et al* (2014) e He *et al* (2015) ressaltam que o BPFI é o número de esferas ou roletes que passam em um determinado ponto da pista do anel interno para cada revolução completa do eixo e é dado por:

$$\text{BPFI} = \frac{N_B}{2} \left(1 + \frac{B_D}{P_D} \cos(\beta) \right) \omega_r \approx 0,6N_B \omega_r \quad (2.4)$$

Múltiplos harmônicos do BPFi modulados por bandas laterais no espectro de frequência do sinal de vibração caracterizam problemas na pista do anel interno de um rolamento de esferas. Miao *et al* (2011) e Le Besnerais *et al* (2014), afirmam que o BSF corresponde ao número de voltas que uma esfera ou rolo faz para cada revolução completa do eixo e é dado por:

$$\text{BSF} = \frac{P_D}{2B_D} \left(1 - \frac{B_D^2}{P_D^2} \cos^2(\beta) \right) \omega_r \approx 2,78\omega_r \quad (2.5)$$

A presença de harmônicos de BSF no espectro de frequência do sinal de vibração indica defeitos na esfera ou no rolo. Ainda de acordo com Miao *et al* (2011) e Le Besnerais *et al* (2014), a característica dos defeitos na gaiola é a presença de harmônicos do FTF no espectro de frequência do sinal de vibração, que é o número de voltas que a gaiola do rolamento faz para cada revolução completa do eixo e é dada por:

$$\text{FTF} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_D}{P_D} \cos(\beta) \right) \omega_r \approx 0,4\omega_r \quad (2.6)$$

Problemas no sistema de lubrificação ou uso de óleo inadequado podem originar uma vibração tangencial devido ao atrito entre rotor e parede do mancal, que normalmente é caracterizada por uma componente de alta frequência entre 1 kHz e 20 kHz no espectro do sinal de vibração que não está relacionado com a velocidade do rotor (FERNANDEZ, 2022).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia empregada no trabalho, de modo que é realizada a classificação da pesquisa e é exposto os materiais e métodos que serão utilizados. Em seguida, expõe-se as variáveis e indicadores adotados, os instrumentos de coleta de dados e o procedimento para a tabulação.

3.1 Tipo de Pesquisa

De acordo com Heerdt e Leonel (2007), para se realizar uma pesquisa com boa qualidade, faz-se necessário ter o conhecimento das possíveis variáveis e, dessa forma, classificá-las de modo que haja uma concordância com o objetivo almejado. Sendo assim, as pesquisas podem ser classificadas na forma em que são abordadas em qualitativa e quantitativa.

Lakatos e Marconi (2003) ressaltam que o método quantitativo se baseia na aquisição e análise de dados, e também na utilização de ferramentas estatísticas para o processamento das informações obtidas.

Silva (2004) complementa afirmando que a pesquisa qualitativa trabalha com as características e cenários que não podem ser analisados numericamente de imediato, sendo os dados coletados por meio da observação, descrição e gravação. No entanto, a pesquisa quantitativa caracteriza-se por todo o tipo de informação que pode ser exprimida em números utilizando métodos estatísticos, assim, a obtenção de dados é realizada por meio de uma pesquisa de campo ou bibliográfica.

Gil (2010), baseado nos objetivos, classifica a pesquisa em três diferentes grupos distintos:

- Pesquisa exploratória: tem como objetivo familiarizar com um problema pouco conhecido ou explorado. Sendo assim, pode envolver levantamentos bibliográficos, entrevistas e no fim da pesquisa pode-se levantar hipóteses;
- Pesquisa descritiva: tem como objetivo a descrição das características de fenômenos, experiências ou de determinada população. A utilização de técnicas padronizadas para coletas de dados, é sua maior característica;
- Pesquisa explicativa: tem como objetivo identificar os fatores que colaboram para que determinado fenômeno ocorra. E ainda, este método depende da análise subjetiva de seu autor.

E ainda Heerdt e Leonel (2007) afirmam que uma pesquisa no que diz respeito ao procedimento utilizado na coleta de dados, pode ser classificada em: bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso e estudo de campo.

Portanto, em relação ao objetivo que este trabalho em questão almeja, classifica-se o como uma pesquisa explicativa, bibliográfica e experimental com abordagem quantitativa. Essa classificação se dá pela pesquisa buscar ensinar uma forma de fazer a aquisição de sinais relativos à vibração de um ventilador de refrigeração e como analisá-los.

3.2 Materiais e métodos

Este trabalho é fundamentado de acordo com um estudo bibliográfico sobre Arduino e MATLAB® e seus respectivos modos de utilização, sobre como é feita a aquisição e processamento de sinais e, por fim, sobre as características de um ventilador de refrigeração de computador. O fluxograma da Figura 11 ilustra as etapas de desenvolvimento do trabalho.

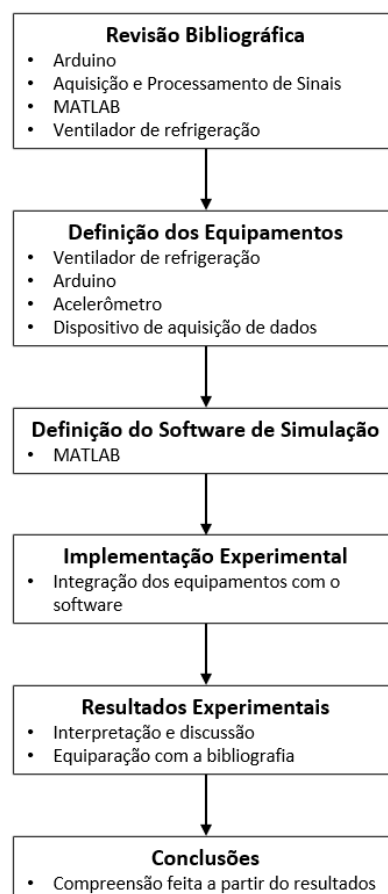


Figura 11 – Etapas de desenvolvimento do trabalho.
Fonte: Pesquisa direta (2022).

A etapa da revisão bibliográfica fundamenta a pesquisa a respeito dos elementos abordados neste trabalho, inferindo a característica bibliográfica. Assim, toda informação teórica necessária a respeito do funcionamento de um ventilador de refrigeração de computador e aquisição e processamento de sinais é abordada. E ainda, é exposto sobre o *hardware* Arduino e software MATLAB®, utilizados para as análises experimentais. Por fim, destaca-se que toda a apresentação do capítulo é referenciada com a literatura acerca dos temas tratados.

Em seguida, é definido os equipamentos que serão utilizados, destacando seu modelo e/ou características. Após definidos os equipamentos, é selecionado o *software* a ser utilizado, visando a escolha de um que consiga integrar de forma satisfatória todos os elementos e realizar as simulações com qualidade, bem como gerar uma base de dados e visibilidades. O *software* MATLAB® é selecionado por cumprir as condições citadas.

Depois, é feito a implementação experimental, onde se faz a montagem e integração dos equipamentos para realizar a análise do objeto de estudo em questão. Seguidamente, é feito testes com o ventilador de refrigeração de modo que ele apresente os diversos problemas mencionados na revisão bibliográfica, como: desbalanceamento, desalinhamento, dobramento do eixo, afrouxamento de estrutural e de elementos. Por fim, tem-se os resultados experimentais, onde são analisados, tabulados e discutidos os dados obtidos a fim de correlacionar com a bibliografia e, com isso, chega-se à conclusão deste trabalho.

3.2.1 Equipamentos utilizados para a coleta de dados dos testes

Para a coleta dos dados, primeiramente, foram utilizados três equipamentos, sendo eles: um ventilador de refrigeração, um acelerômetro e um Arduino UNO. A Figura 12 ilustra como esses equipamentos foram associados entre si.

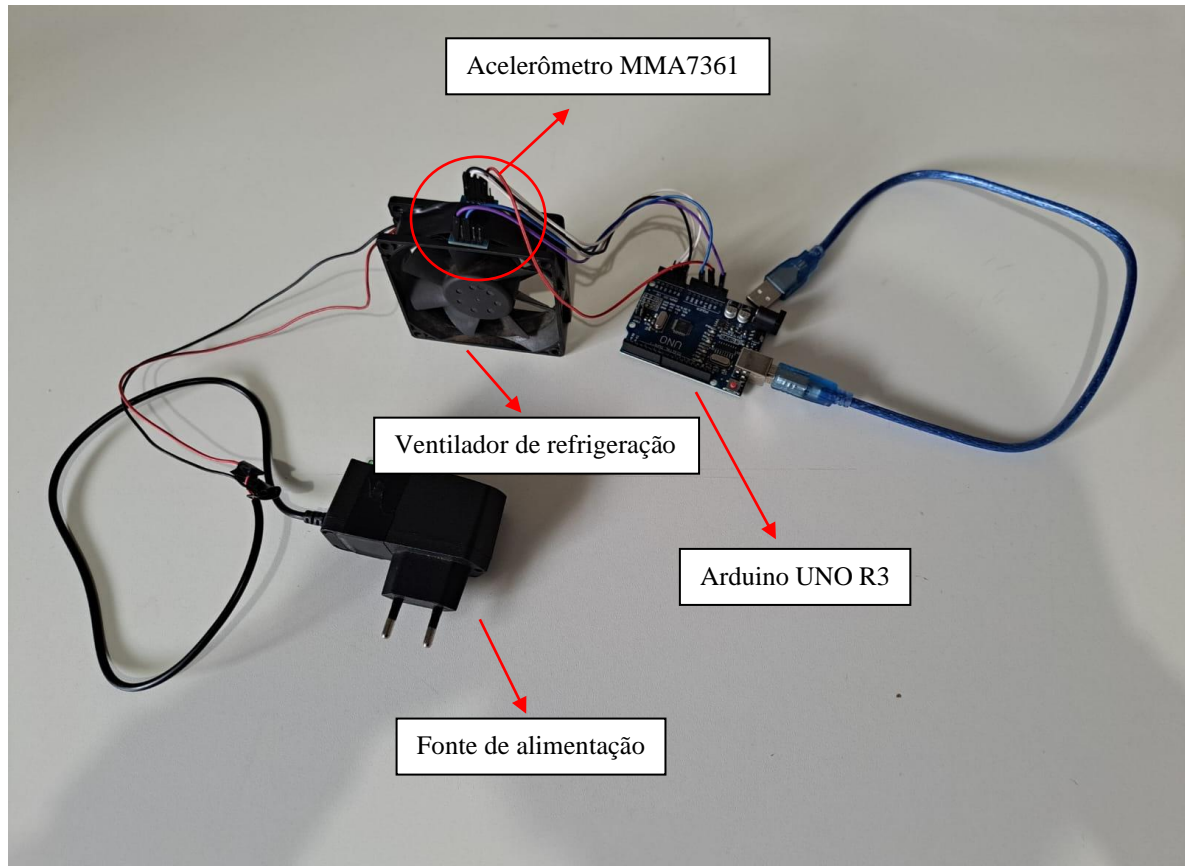


Figura 12 – Associação dos equipamentos para coleta de dados.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 12 mostra como o acelerômetro foi fixado no centro da parte superior do ventilador de refrigeração ao mesmo tempo que é conectado ao Arduino UNO.

De forma separada, as Figuras 13, 14 e 15 mostram os componentes.

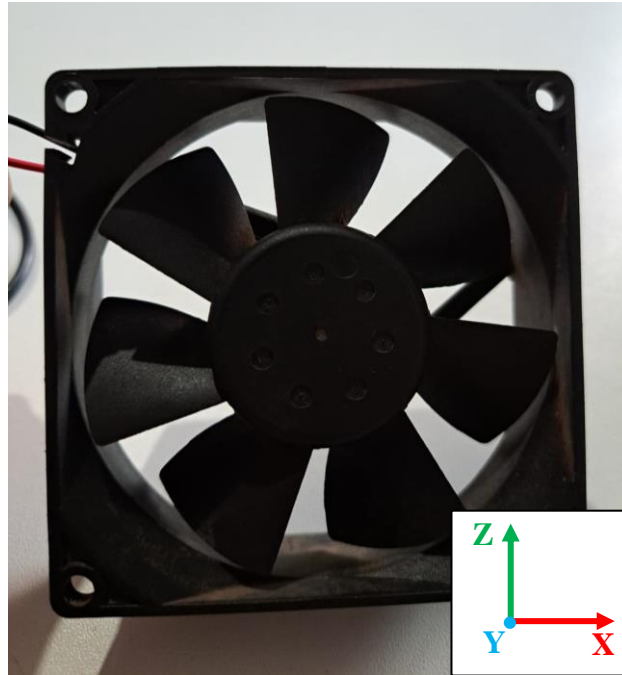


Figura 13 – Ventilador de refrigeração com eixos de medição do acelerômetro.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

O ventilador de refrigeração utilizado, mostrado na Figura 13, é do modelo *Craft Fan CH80S12M*. Ele apresenta 7 hélices e 4 polos em sua construção.



Figura 14 – Acelerômetro MMA7361.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Já o acelerômetro utilizado é do modelo MMA7361, conforme mostrado na Figura 14.

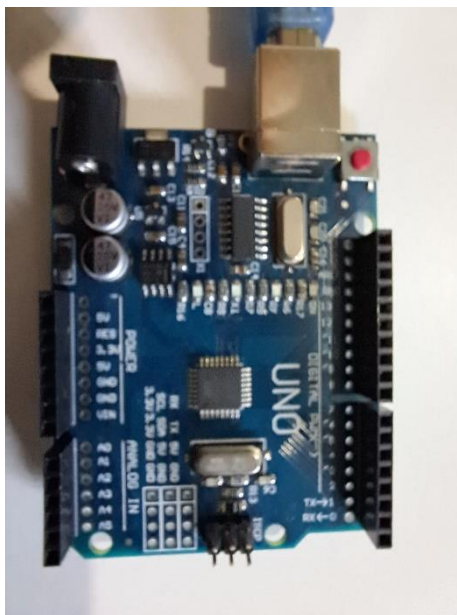


Figura 15 – Arduino UNO R3.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Por fim, como mostrado na Figura 15, foi utilizado também um Arduino modelo UNO R3.

3.2.2 *Softwares* utilizados para a coleta de dados dos testes

Feito a associação dos componentes, foi necessário a configuração do Arduino para a correta extração e armazenamento dos dados. A Figura 16 apresenta a programação utilizada para configurá-los.

```

#include <AcceleroMMA7361.h>

AcceleroMMA7361 accelero;
int x;
int y;
int z;
int linha = 0;
int LABEL = 1;
unsigned long mili;
void setup()
{
  Serial.begin(38400);
  accelero.begin(13, 12, 11, 10, A0, A1, A2);
  accelero.setSensitivity(HIGH);
  accelero.calibrate();
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL, Tempo, x, y, z, Milisegundo, linha");
}

void loop()
{
  x = accelero.getXRaw();
  y = accelero.getYRaw();
  z = accelero.getZRaw();
  mili = millis();
  linha++;
  Serial.print("DATA, TIME, ");
  Serial.print(x);
  Serial.print(", ");
  Serial.print(y);
  Serial.print(", ");
  Serial.print(z);
  Serial.print(", ");
  Serial.print(mili);
  Serial.print(", ");
  Serial.println(linha);
}

```

Figura 16 – Código utilizado no Arduino.
 Fonte: Pesquisa direta (2023).

O código mostrado na Figura 16, quando compilado e gravado em Arduino, faz a leitura dos dados de um acelerômetro MMA7361 e envia esses dados pela porta serial que é utilizada para armazenar esses dados em um dispositivo externo, no caso um *notebook*. E ainda, a Figura 17 contém a explicação de cada linha do código.

1. **#include <AcceleroMMA7361.h>**: Esta linha inclui a biblioteca AcceleroMMA7361, que é necessária para interagir com o acelerômetro MMA7361.
2. **AcceleroMMA7361 accelero**:: Cria um objeto 'accelero' do tipo 'AcceleroMMA7361' para interagir com o acelerômetro.
3. Declaração das variáveis x, y e z, que serão usadas para armazenar as leituras dos eixos X, Y e Z do acelerômetro.
4. Declaração da variável 'linha', que será usada para contar o número de linhas de dados enviadas.
5. Declaração da variável 'LABEL', que é inicializada com o valor 1 e será usada como rótulo para os dados enviados.
6. Declaração da variável 'mili', que será usada para armazenar o valor retornado pela função millis(), que retorna o número de milissegundos desde o início do programa.
7. **void setup()**: Esta função é chamada uma vez quando o Arduino é ligado ou reiniciado. É usada para configurar as configurações iniciais.
8. **Serial.begin(38400)**:: Inicializa a comunicação serial com uma taxa de transmissão de 38400 bits por segundo.
9. **accelero.begin(13, 12, 11, 10, A0, A1, A2)**:: Inicializa o acelerômetro MMA7361 nos pinos 13 (Sleep), 12 (Self Test), 11 (Zero-g detect), 10 (G-Select 1), A0 (XOUT), A1 (YOUT) e A2 (ZOUT).
10. **accelero.setSensitivity(HIGH)**:: Configura a sensibilidade do acelerômetro como alta.
11. **accelero.calibrate()**:: Realiza a calibração do acelerômetro.
12. **Serial.println("CLEARDATA")**:: Envia o comando "CLEARDATA" pela porta serial para limpar os dados existentes na planilha/gráfico onde os dados serão enviados.
13. **Serial.println("LABEL,Tempo,x,y,z,Milissegundo,linha")**:: Envia o cabeçalho da tabela para a planilha/gráfico, indicando as colunas dos dados que serão enviados.
14. **void loop()**: Esta função é executada continuamente após o **setup()**. É usada para realizar as ações principais do programa em um loop infinito.
15. **x = accelero.getXRaw()**:: Lê o valor bruto do eixo X do acelerômetro e armazena em x.
16. **y = accelero.getYRaw()**:: Lê o valor bruto do eixo Y do acelerômetro e armazena em y.
17. **z = accelero.getZRaw()**:: Lê o valor bruto do eixo Z do acelerômetro e armazena em z.
18. **mili = millis()**:: Obtém o valor atual retornado pela função millis() e armazena em mili.
19. **linha++**:: Incrementa o valor da variável 'linha' em 1 a cada iteração do loop. Essa variável é usada para contar o número de linhas de dados enviadas.
20. **Serial.print("DATA,TIME,")**:: Envia a string "DATA,TIME," para a porta serial. Isso será o prefixo dos dados que serão enviados.
21. **Serial.print(x)**:: Envia o valor atual da variável x para a porta serial.
22. **Serial.print(",")**:: Envia uma vírgula para separar os valores dos eixos X, Y e Z.
23. **Serial.print(y)**:: Envia o valor atual da variável y para a porta serial.
24. **Serial.print(",")**:: Envia uma vírgula para separar os valores dos eixos X, Y e Z.
25. **Serial.print(z)**:: Envia o valor atual da variável z para a porta serial.
26. **Serial.print(",")**:: Envia uma vírgula para separar os valores dos eixos X, Y e Z.
27. **Serial.print(mili)**:: Envia o valor atual da variável mili (milissegundos) para a porta serial.
28. **Serial.print(",")**:: Envia uma vírgula que separa o valor dos milissegundos da variável linha.
29. **Serial.println(linha)**:: Envia o valor atual da variável 'linha' para a porta serial, seguido de uma quebra de linha. Essa linha completa os dados que serão enviados.

Figura 17 – Explicação de cada linha do código utilizado no Arduino.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Essas linhas de código, explicitados pela Figura 17, são responsáveis por obter as leituras dos eixos X, Y e Z do acelerômetro, registrar o tempo em milissegundos e enviar todos esses valores para o Excel por meio de um *add-on* utilizado no Excel. Esse *add-on* chama-se *Parallax Data Acquisition tool (PLX-DAQ)*, um *software* que faz a transposição desses dados gerados pelo acelerômetro para o Excel, separados em colunas que facilitam a visualização e manipulação dos dados coletados.

Por fim, com a aquisição desses dados, eles foram tratados separando as medições de cada eixo em abas diferentes e colocando o tempo que foi feito a primeira medição em zero milissegundos e começando a contagem do tempo entre amostras a partir disso, para que fosse possível ser feita a Transformada Rápida de Fourier (FFT) no *software* MATLAB®. A Figura 18 apresenta de forma genérica a programação utilizada para realizar a FFT e plotar os gráficos com os espectros de frequência para análise.

```
clear;clc;
t = xlsread('Nome do arquivo Excel','Nome da aba que está o tempo de cada amostra');
x = xlsread('Nome do arquivo Excel','Nome da aba que está as amostras do eixo x');
y = xlsread('Nome do arquivo Excel','Nome da aba que está as amostras do eixo y');
z = xlsread('Nome do arquivo Excel','Nome da aba que está as amostras do eixo z');
N = length(x);
Fs = (N-1) / (t(16384) - t(1));
X = fft(x);
Y = fft(y);
Z = fft(z);
f = (0:N-1) * (Fs / N);
figure(1)
plot(f(2:N/2), abs(X(2:N/2)))
title('Vibrações no Eixo X')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Magnitudo x');
figure(2)
plot(f(2:N/2), abs(Y(2:N/2)))
title('Vibrações no Eixo Y')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Magnitudo y');
figure(3)
plot(f(2:N/2), abs(Z(2:N/2)))
title('Vibrações no Eixo Z')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Magnitudo z')
```

Figura 18 – Código utilizado para realizar a Transformada Rápida de Fourier e plotar gráficos no domínio da frequência de cada eixo.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

A utilização do MATLAB®, conforme a Figura 18 aborda, fez-se necessária pois o Excel não suporta a realização da FFT para mais que 4096 amostras, sendo essas amostras o conjunto de dados que contempla a leitura dos eixos x, y e z do acelerômetro ao longo do tempo. E para as análises dos experimentos que serão mostrados ao longo deste trabalho foram obtidas 16384 amostras para cada um deles. Esse número equivale a 2 elevado a 14ª potência e foi escolhido por questões de eficiência computacional, devido a forma que o algoritmo que realiza a FFT trabalha no MATLAB®. A Figura 19 apresenta a explicação de cada linha do código utilizado no MATLAB®.

clear;clc;: Esta linha limpa qualquer variável ou função previamente definida.

t = xlsread('Nome do arquivo Excel','Nome da aba que está o tempo de cada amostra');
Lê os dados do arquivo Excel especificado na primeira coluna (coluna do tempo) da aba especificada. Os valores são armazenados na variável **t**.

x = xlsread('Nome do arquivo Excel','Nome da aba que está as amostras do eixo x');
y = xlsread('Nome do arquivo Excel','Nome da aba que está as amostras do eixo y');
z = xlsread('Nome do arquivo Excel','Nome da aba que está as amostras do eixo z');
As linhas acima leem as amostras para o eixo **x**, **y** e **z**.

N = length(x); Calcula o comprimento do vetor **x** (ou seja, o número de amostras) e armazena o valor em **N**. Isso é feito para determinar o tamanho do vetor para as transformadas de Fourier subsequentes.

Fs = (N-1) / (t(16384) - t(1)); Essa linha calcula a frequência de amostragem média **Fs** com base nos valores de tempo em **t**. O valor **(N-1)** é o número de intervalos entre as amostras, e **(t(16384) - t(1))** é o intervalo de tempo entre a primeira amostra e a 16384ª amostra.

X = fft(x);

Y = fft(y);

Z = fft(z);

As linhas acima calculam a Transformada Rápida de Fourier do vetor **x**, **y** e **z** e armazenam o resultado em **X**, **Y** e **Z** respectivamente.

f = (0:N-1) * (Fs / N); Calcula os valores de frequência correspondentes aos bins (pontos de frequência discretos em que a transformada de Fourier é calculada) da Transformada Rápida de Fourier. Ela cria um vetor **f** que varia de 0 Hz até a frequência de Nyquist (metade da frequência de amostragem) com valores igualmente espaçados.

Essencialmente, a partir da linha 12, o código cria figuras separadas para cada eixo (**x**, **y** e **z**) e plota o espectro de frequência desses eixos com os respectivos rótulos e títulos apropriados.

Figura 19 – Explicação de cada linha do código utilizado no MATLAB®.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Na plotagem dos gráficos foi considerada valores a partir da frequência positiva mais baixa, a fim de realçar a visualização dos componentes de frequência distintas do sinal. Assim, conforme mostra a Figura 19, o código lê os dados do arquivo Excel que contém as informações de tempo e amostras nos eixos **x**, **y** e **z**. Em seguida, calcula a frequência de amostragem média e realiza a FFT para analisar o conteúdo de frequência dos sinais. Em seguida, ele plota três figuras diferentes para exibir as magnitudes dos coeficientes de Fourier em relação às frequências correspondentes para cada um dos eixos, ou seja, o espectro de frequência.

3.3 Variáveis e indicadores

Conforme aborda Gil (1999), variáveis podem ser consideradas como: uma medida ou classificação, uma quantidade variável, um conceito operacional que contém valores, propriedade, aspectos ou fatores que são identificados em um objeto de estudo e passíveis de verificação.

Tadachi e Flores (1997, p.19) ressaltam que “indicadores são formas de representação quantificáveis das características de produtos e processos”. Sendo usados para controlar e melhorar a qualidade de produtos e processos ao longo do tempo.

A seguir, a Tabela 1 apresenta as variáveis e indicadores deste trabalho.

Tabela 1 - Variáveis e indicadores.

Variáveis	Indicadores
Ventilador de Refrigeração	- Desbalanceamento - Desalinhamento - Dobramento de eixo - Afrouxamento estrutural - Afrouxamento de elementos - Número de pás - Número de polos - Dimensões e Geometria - Velocidade do Rotor
Software de integração	- Periodicidade de amostras

Fonte: Pesquisa direta (2022).

3.4 Instrumento de coleta de dados

Este trabalho é de natureza bibliográfica, experimental, quantitativa e explicativa, portanto, todos os dados necessários para o estudo são obtidos por meio de uma pesquisa bibliográfica e pelo *software* MATLAB® que registra os dados obtidos nos experimentos.

3.5 Tabulação de dados

Os *softwares* MATLAB® e Microsoft Word, Excel e PowerPoint são utilizados para o relato do estudo e para a discussão dos resultados obtidos, assim como a elaboração de gráficos, tabelas, cálculos analíticos e compilação de dados experimentais.

3.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo é possível classificar a abordagem, o objetivo e os procedimentos técnicos deste trabalho de acordo com a bibliografia citada anteriormente. Logo após, define-se os materiais e métodos utilizados para a elaboração deste estudo, que são apresentados no fluxograma da Figura 11, assim como as variáveis e os indicadores presentes no processo, apresentados na Tabela 1. Por fim, explicita-se os meios utilizados para a obtenção dos dados e sua tabulação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise dos experimentos

4.1.1 Ventilador de refrigeração bem fixado e com rotor balanceado

Buscando uma condição de funcionamento do ventilador de refrigeração considerada correta quando utilizada para refrigerar o gabinete de um computador, sendo essa condição a boa fixação do ventilador e correto balanceamento de seu rotor, nesse primeiro experimento, ele foi devidamente fixado e sem desbalanceamento do rotor. A Figura 20 mostra o espectro de frequência no eixo z do acelerômetro, que representa o eixo radial do ventilador.

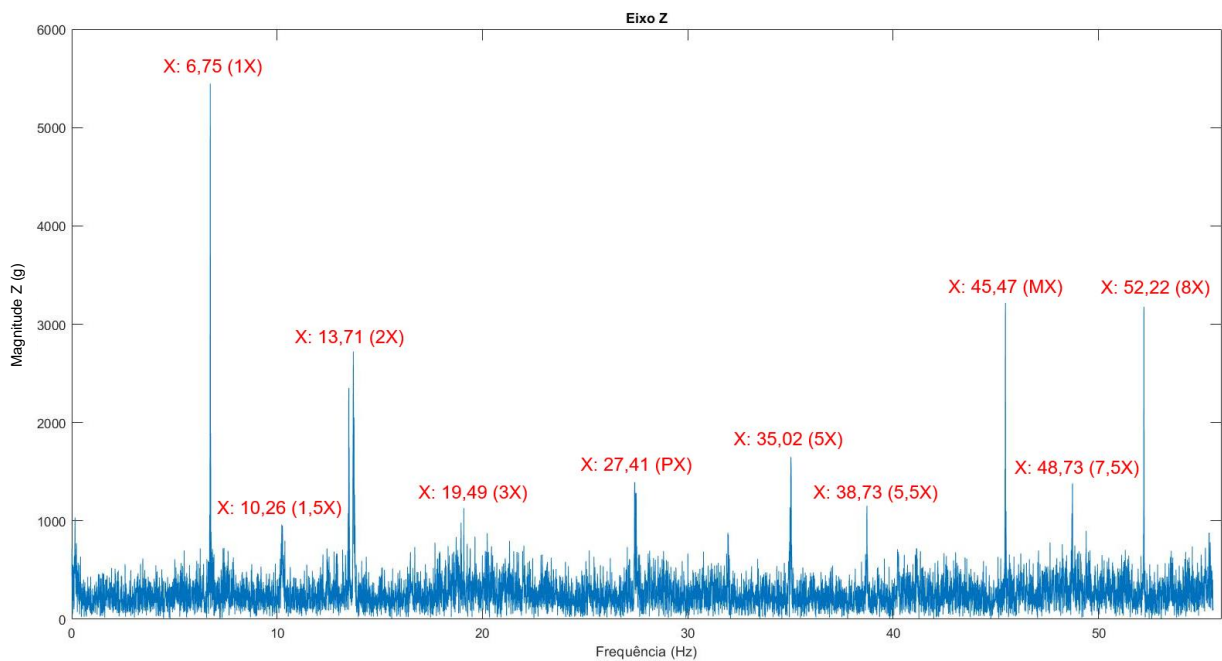


Figura 20 – Espectro de frequência na direção radial (eixo z).
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Primeiramente, para contornar a limitação do acelerômetro em registrar somente frequências até aproximadamente 60Hz, foi utilizado uma fonte de alimentação com voltagem de 5V que é menor do que a de 12V necessária para o funcionamento ideal do ventilador. Assim, a velocidade do rotor ficou em 405rpm ou 6,75cps. E conforme abordado teoricamente e mostrado na Figura 20, a frequência do harmônico fundamental 1X corresponde a velocidade do rotor em ciclos por segundos, sendo 6,75Hz.

Outra frequência a se considerar é a de passagem dos polos (PX), sendo o número de polos do rotor multiplicado pelo harmônico 1X. Desse modo, tendo o rotor 4 polos, seu

harmônico PX é apontada na Figura 20 sendo em aproximadamente 27,41Hz, ou seja, no harmônico 4X. Essa diferença com a frequência considerada ideal que é 27Hz, pode ter diversos fatores que explicam como a imprecisão do acelerômetro, ruídos externos na medição, pequenas diferenças geométricas das peças do componente etc.

Além disso, outra frequência a ser considerada é a de passagem das pás (MX), que é dada pela multiplicação do harmônico 1X pelo número de pás. Como o ventilador apresenta 7 pás, a frequência é representada pelo harmônico 7X que é apontado na Figura 20 sendo aproximadamente 45,47Hz. Novamente, a diferença entre a frequência ideal de 47,25Hz pode ter explicações nos mesmos motivos citados para a frequência de passagem dos polos do estator.

Por fim, pode-se deduzir que há um afrouxamento de elementos rotativos moderado, pois, nota-se a presença de vários múltiplos harmônicos (2X, 3X, 5X e 8X) e alguns semi-harmônicos (1,5X, 5,5X e 7,5X) no eixo radial.

A seguir, as Figuras 21 e 22 apresentam o espectro de frequência nos eixos x e y, respectivamente.

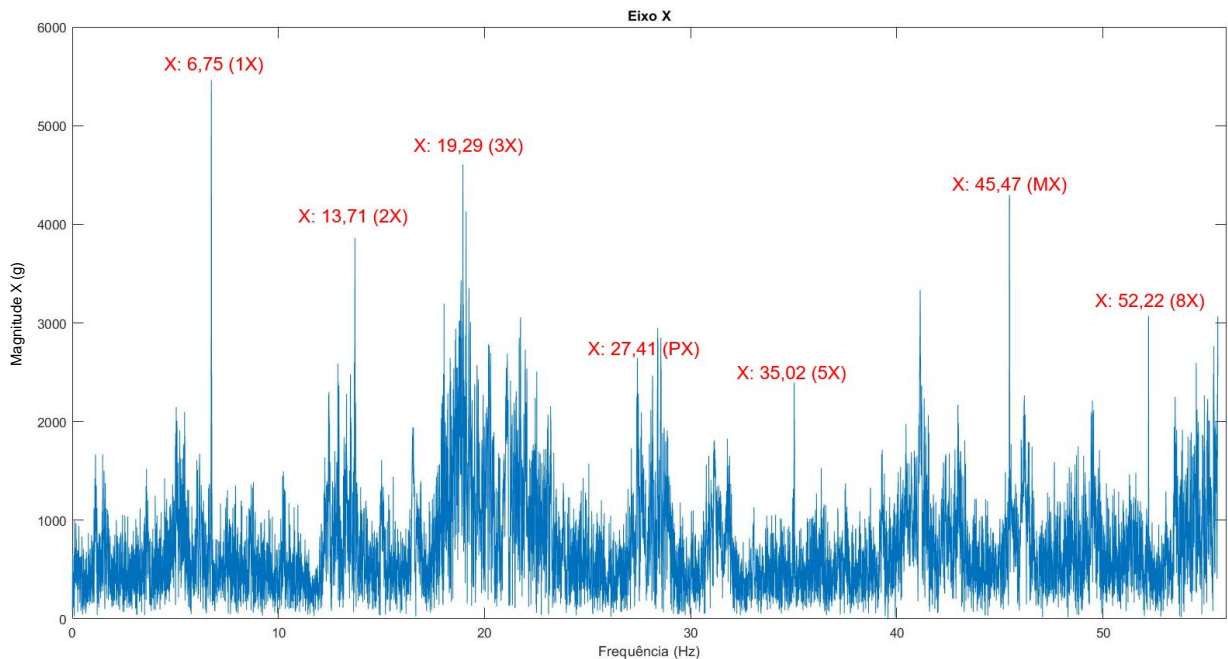


Figura 21 – Espectro de frequência na direção tangencial (eixo x).

Fonte: Pesquisa direta (2023).

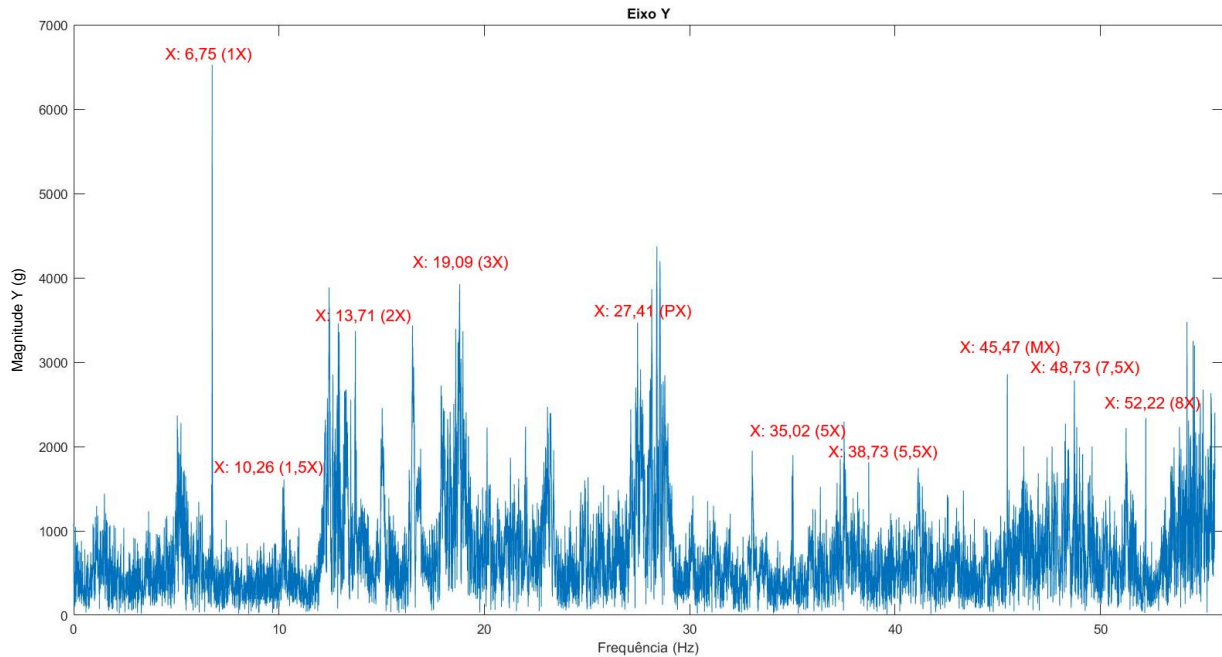


Figura 22 – Espectro de frequência na direção axial (eixo y).
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Analisando as Figuras 21 e 22, nota-se a semelhança das principais frequências nos eixos com exatidão. O aparecimento de outras frequências notáveis em cada eixo é devido a ruídos externos ou da própria característica de cada eixo. No entanto, percebe-se que os harmônicos 1X, PX e MX aparecem em todos os eixos e com a mesma frequência.

4.1.2 Ventilador de refrigeração bem fixado e com rotor desbalanceado

No segundo experimento foi acoplado em uma das pás uma massa de aproximadamente 2 gramas e cerca de 2,5 centímetros do centro de rotação de forma a simular um acúmulo severo de poeira ou outras sujeiras nelas e, assim, se ter uma distribuição não-uniforme de massa rotativa no ventilador. As Figuras 23 e 24 mostram o espectro de frequência desse experimento para os eixos z (radial) e y (axial), respectivamente. Ressalta-se que a análise do eixo x (tangencial) não é necessária conforme exposto na abordagem teórica, pois o mesmo não fornece uma visualização do espectro de frequência clara e com informações primordiais para esse tipo de experimento.

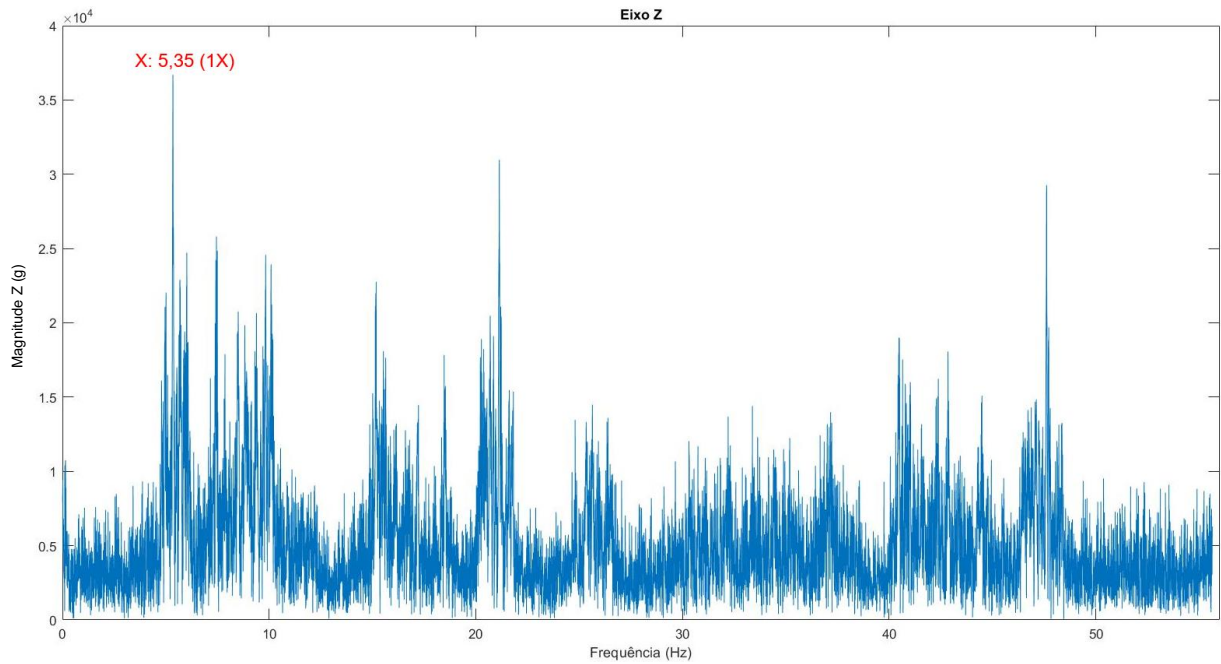


Figura 23 – Espectro de frequência de rotor desbalanceado na direção radial (eixo z).
Fonte: Pesquisa direta (2023).

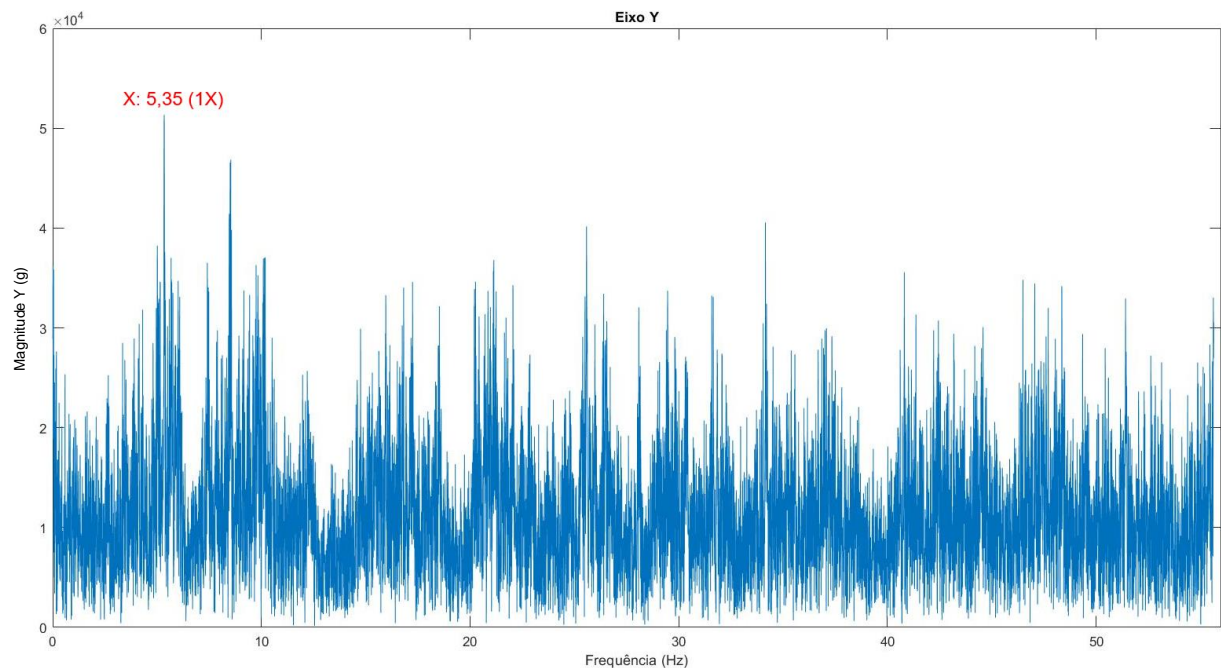


Figura 24 – Espectro de frequência de rotor desbalanceado na direção axial (eixo y).
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Conforme abordado teoricamente e visualizado pelas Figuras 23 e 24, percebeu-se o expressivo aumento da amplitude no harmônico fundamental 1X e também no espectro como um todo para os eixos axial e radial. Em um estado de funcionamento normal do ventilador a amplitude do harmônico fundamental 1X não ultrapassou o valor de 7000 em quaisquer que

fossem os eixos, mas com o desbalanceamento do rotor essa amplitude chega acima do valor de 50000. Além disso, devido à maior massa em uma das pás, a velocidade do rotor diminuiu para 5,35cps, pois não foi alterado as características da fonte de alimentação do ventilador. Assim, a frequência do harmônico fundamental 1X alterou de 6,75Hz para 5,35Hz.

E ainda, nota-se o aparecimento de grandes ruídos ao longo de todo espectro e em todos os eixos analisados. Pois, com o componente apresentando uma maior massa em uma de suas pás, gerou-se uma maior força centrípeta e, dessa forma, vibrações consideradas um pouco excessivas. Além disso, ao acoplar a massa na pá, ele próprio acaba interferindo no espectro de frequência do componente como um todo, já que ele também apresenta suas frequências de vibração características.

Por fim, a Figura 25 apresenta o espectro de frequência obtido no experimento para o eixo x (tangencial).

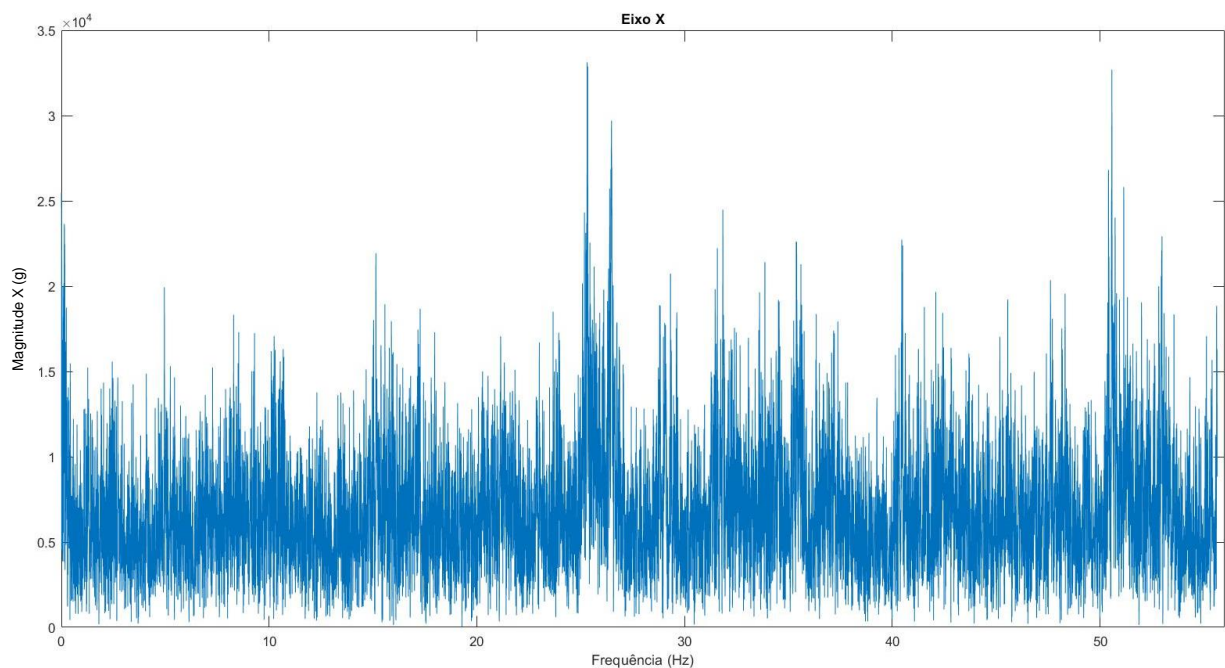


Figura 25 – Espectro de frequência de rotor desbalanceado na direção tangencial (eixo x).
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Como pôde-se observar na Figura 25, nesse eixo não foi possível obter informações que colaborassem com a análise do problema simulado desse experimento. Contudo, isso está de acordo com a base teórica apresentada. Na Figura 25 há um excesso de ruídos de grandes magnitudes e em variadas frequências, impedindo a visualização de qualquer informação significativa.

4.1.3 Ventilador de refrigeração mal fixado

No terceiro experimento o ventilador foi mal fixado de forma proposital. Dessa maneira, buscou-se simular a situação de afrouxamento. O ventilador foi fixado pela sua parte horizontal inferior a uma bancada, de forma similar ao mostrado anteriormente na Figura 12. Com isso, as Figuras 26 e 27 ilustram os resultados obtidos para os eixos z (radial) e y (axial), respectivamente.

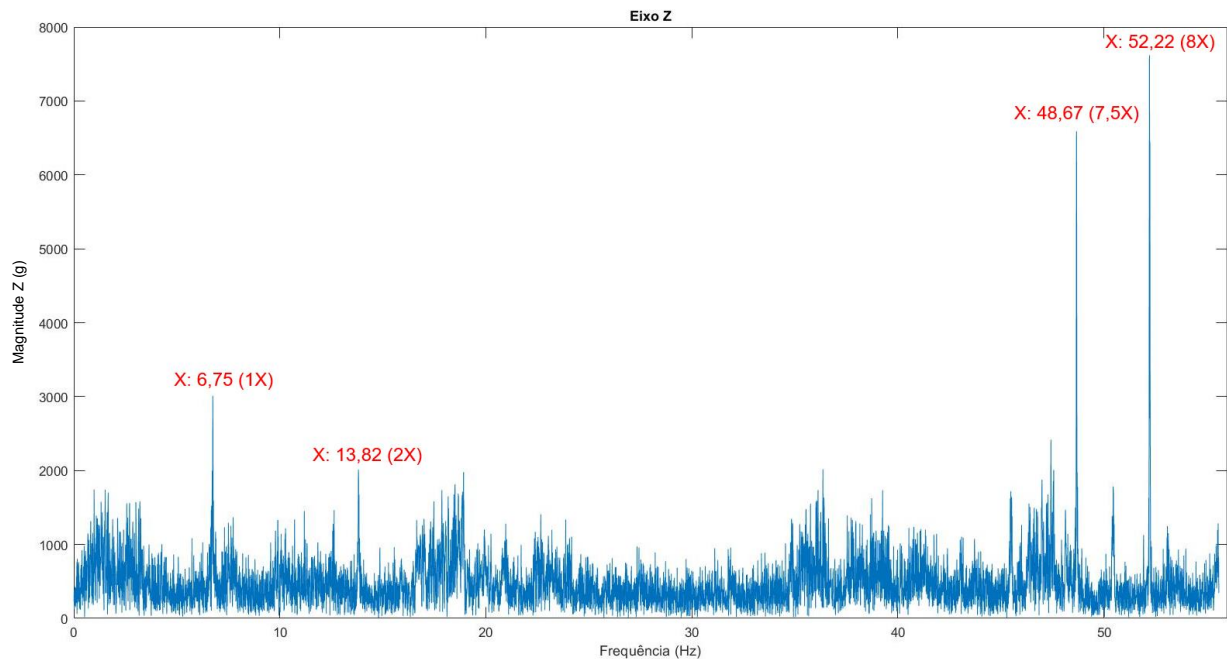


Figura 26 – Espectro de frequência do ventilador de refrigeração mal fixado na direção radial (eixo z).
Fonte: Pesquisa direta (2023).

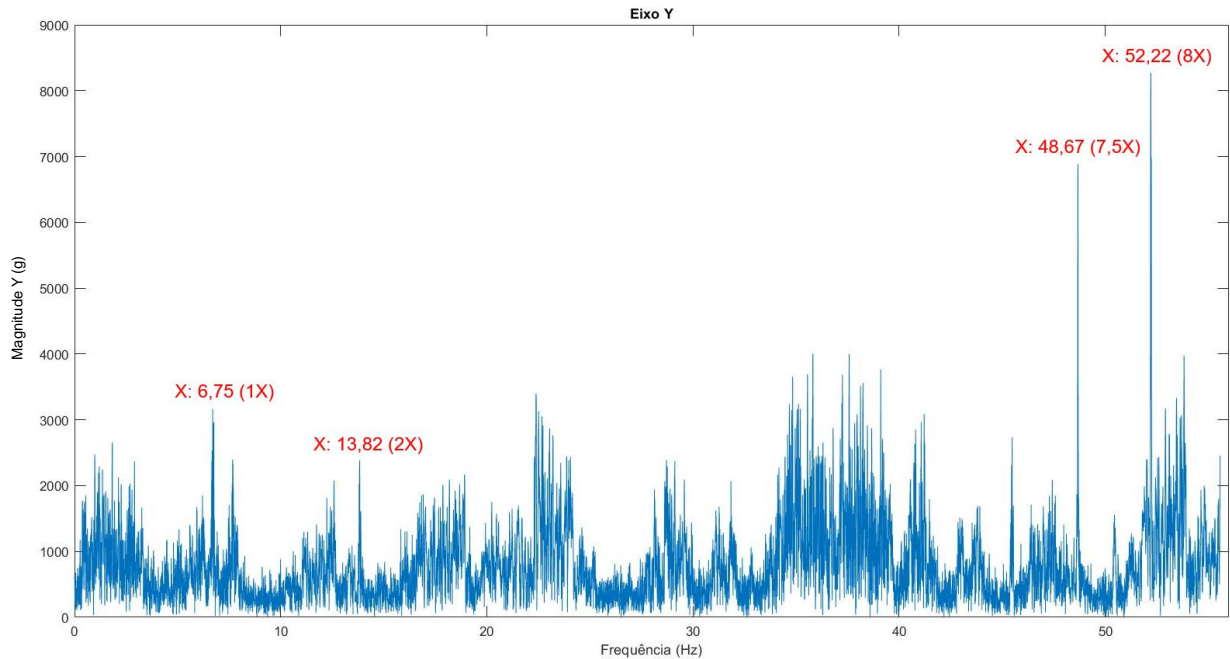


Figura 27 – Espectro de frequência do ventilador de refrigeração mal fixado na direção axial (eixo y).
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Nesse experimento, com os resultados mostrados pelas Figuras 26 e 27, há o aparecimento de diversos problemas, tanto de afrouxamento estrutural com a constatação de picos em múltiplos harmônicos, sendo bem visível no harmônico 8X, quanto de afrouxamento de elementos rotativos, por apresentar picos nos múltiplos harmônicos e semi-harmônicos. Os picos em 7,5X e 8X ocorrem pelo primeiro ser influenciado pela frequência de passagem das pás e o segundo ser um múltiplo da frequência de passagem dos polos.

Outro fator observado é na elevação da amplitude média do espectro de frequência, quando comparado com o equipamento corretamente fixado e balanceado. Pois, com a mal fixação do elemento é gerado maiores ruídos pelo ventilador de refrigeração, por causa de sua vibração excessiva.

Por fim, há ainda a Figura 28 que ilustra o espectro de frequência para o eixo x (tangencial).

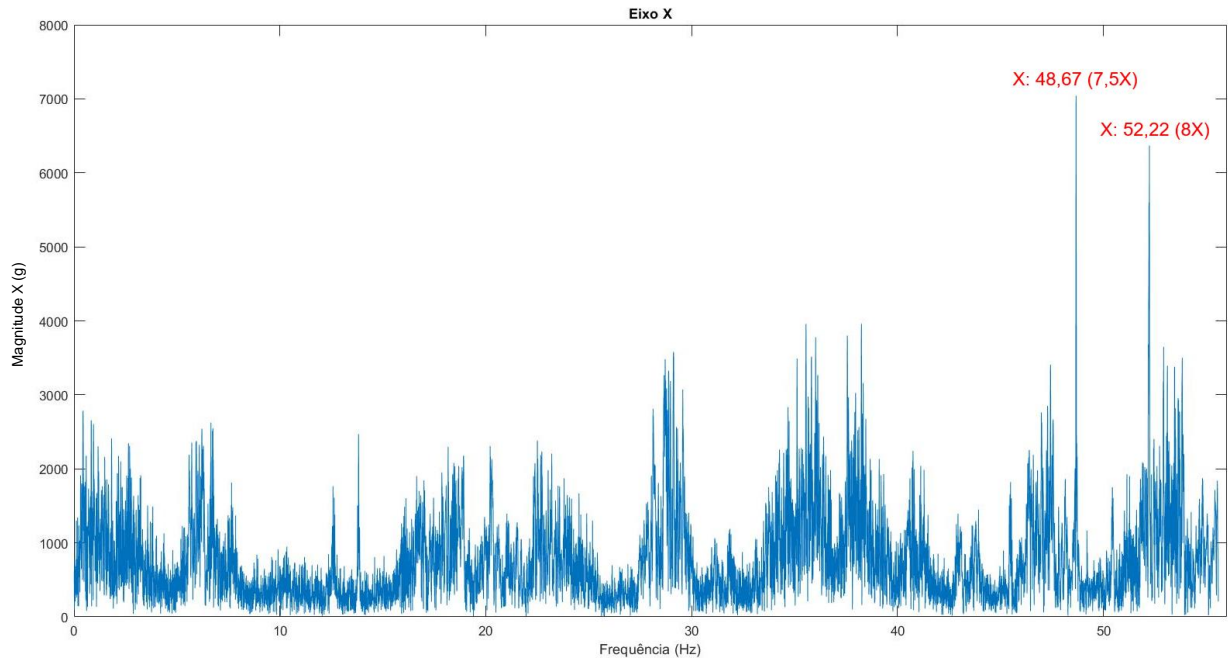


Figura 28 – Espectro de frequência do ventilador de refrigeração mal fixado na direção tangencial (eixo x).
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Consoante com a abordagem teórica, não é possível obter informações significativas desse eixo para os problemas simulados nesse experimento. Observa-se, por meio da Figura 28, que há diversos picos nas mais variadas frequências, assim, não é possível afirmar se é um ruído ou uma anomalia. Somente os dois maiores picos continuam de acordo com os outros dois eixos analisados.

4.2 Considerações finais do capítulo

Durante o estudo desenvolvido, houve a impossibilidade de realizar os cálculos sobre a frequência de passagem do rolamento da pista do anel externo (BPFO), frequência de passagem do rolamento da pista do anel interno (BPFI), frequência de rotação da esfera (BSF) e frequência fundamental do trem (FTF), devido a limitações do acelerômetro em captar altas frequências. Portanto, é válido ressaltar que as frequências características provenientes desses defeitos não foram analisadas nos espectros de frequência.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

A compreensão sólida e crítica da base teórica se fez parte fundamental para o desenvolvimento do trabalho. Pois, foi imprescindível saber analisar os espectros de frequência obtidos, seja para apontar as falhas ou outros conceitos. Assim, pôde ser apresentado e discutido espectros de frequência de anomalias como: desbalanceamento do rotor, má-fixação do componente e afrouxamento de elementos rotativos. E ainda, pôde-se abordar as pequenas diferenças de algumas frequências que ocorrem entre o real e o teórico, seja por causa da presença de ruídos nos testes ou pequena imprecisão do acelerômetro, por exemplo. Contudo, houve ressalvas devido a algumas limitações para aquisição e processamento dos dados dos experimentos. Porém, essas ressalvas não foram fatores determinantes ou que inviabilizavam as análises realizadas.

Por fim, o trabalho pôde, além de tudo, servir como um exemplo de como se realizar a análise de vibração de um ventilador de refrigeração de gabinete e identificar algumas anomalias comumente apresentada por eles, utilizando do conhecimento de aquisição e processamento de sinais. Desse modo, buscou-se deixar de forma clara todos os passos realizados, bem como a necessidade de cada um deles terem sido feitos.

5.2 Recomendações

O trabalho realizou a análise de vibração de um ventilador de refrigeração de gabinete por meio de sinais, dessa forma há as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Análise das anomalias não abordadas nos experimentos desse trabalho;
- Estudo da influência dessas anomalias citadas no trabalho na vida útil do componente;
- Análise de vibração de um outro componente também por meio de sinais.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Fernandez, A. (2022). **Introduction to maintenance**. Disponível em: <https://power-mi.com/content/introduction-maintenance>. Acesso em: 9 de jun. 2022.
- Tian, X. (2006). **Cooling fan reliability: failure criteria, accelerated life testing, modeling and qualification**. In RAMS '06. Annual Reliability and Maintainability Symposium., Newport Beach, CA, USA. IEEE.
- Miao, Q., Azarian, M., and Pecht, M. (2011). **Cooling fan bearing fault identification using vibration measurement**. In 2011 IEEE Conference on Prognostics and Health Management, Denver, CO, USA.
- Badamasi, Y. A. (2014). **The working principle of an Arduino**. 2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), p. 1-4.
- Arduino. **What is arduino**. [S.I] 2018. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 9 de jun. 2022.
- Rao, S. (2011). **Mechanical vibrations**. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
- Rachid, B., Hafaifa, A., and Boumehraz, M. (2016). **Vibrations detection in industrial pumps based on spectral analysis to increase their efficiency**. Management Systems in Production Engineering, 1(21):55-61.
- ROCHA, R e GUIMARÃES, G. P. **A proposal of low-cost experimental project for signal processing and vibration courses: vibration analysis of a computer cooling fan**. Ouro Preto; 2022.
- Oppenheim, A. V. and Willsky, A. S. (2013). **Signals and systems**. Pearson Education Limited.
- Haykin, S. and Van Veen, B. (2002). **Signals and systems**. Wiley, New York.
- Girod, B., Rabenstein, R., and Stenger, A. (2001). **Signals & Systems**. John Wiley & Sons.
- Fahy, K. and Pérez, E. (1993). **Fast Fourier transforms and power spectra in LabView**. Technical report, National Instruments corporation.
- SILVA, Pedro. **MATLAB: O que é e para que serve**. **OPENCADD**, 2022. Disponível em: <https://blog.mettzer.com/referencia-de-sites-e-artigos-online/>. Acesso em 22 de jun. 2023.
- MATHWORKS INC. **Site do MathWorks**, 2023. Accelerating the pace of engineering and science. Disponível em:

https://www.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_ff_p_matlab. Acesso em 22 de jun. 2023.

Oh, H., Azarian, M. H., Pecht, M., White, C. H., Sohaney, R. C., and Rhem, E. (2010). **Physics-of-failure approach for fan PHM in electronics applications**. In 2010 Prognostics and System Health Management Conference, Macao, China. IEEE.

National Instruments Inc. (2022). **Comparing FFT analysis and order analysis (sound and vibration)**. Disponível em: <https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372416L-01/svtconcepts/svcomptorder/>. Acesso em: 9 de jun. 2022.

Blanco, L. S. (2020). **If You're Going to Align a Coupled Shaft Fan, Read This Before**. Disponível em: <https://power-mi.com/content/if-youre-going-align-coupled-shaft-fan-read>. Acesso em: 9 de jun. 2022.

Saruhan, H., Sandemir, S., Çiçek, A., and Uygur, I. (2014). **Vibration analysis of rolling element bearings defects**. Journal of Applied Research and Technology, 12(3):384-395.

He, W., Miao, Q., Azarian, M., and Pecht, M. (2015). **Health monitoring of cooling fan bearings based on wavelet filter**. Mechanical Systems and Signal Processing, 64-65:149-161.

Le Besnerais, J., Souron, Q., and Devillers, E. (2016). **Analysis of the electromagnetic acoustic noise and vibrations of a high-speed brushless dc motor**. In 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), Glasgow, UK.

HEERDT, M. L., LEONEL, V. **Metodologia Científica e da Pesquisa**. Ed. Palhoça. UNISUL/Virtual, 2007.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed.-São Paulo: Atlas, 2003.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

SILVA, C. R. O. **Metodologia do trabalho científico**. Fortaleza: Centro Federal e Educação Tecnológica do Ceará, 2004.

TADACHI, N.T., e FLORES, M.C.X. **Indicadores da Qualidade e do Desempenho**. 1ª.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.