



FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS

Caracterização dos efeitos de vibração em sistemas de transmissão por FSO

**João Pessoa - PB
Abril de 2023**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Caracterização dos efeitos de vibração em sistemas de transmissão por FSO

MESTRANDO:
FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS

ORIENTADORA:
PROF^a. ROSSANA MORENO SANTA CRUZ, DR^a.

COORIENTADOR:
PROF. LUÍS ROMEU NUNES, DR.

João Pessoa – PB
Abril de 2023

FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS

Caracterização dos efeitos de vibração em sistemas de transmissão por FSO

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

ORIENTADORA: PROF^a. ROSSANA MORENO SANTA CRUZ, DR^a.

COORIENTADOR: PROF. LUÍS ROMEU NUNES, DR.

João Pessoa – PB, Abril de 2023
© FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

S237c Santos, Francisco de Assis dos.

Caracterização dos efeitos de vibração em sistemas de transmissão por FSO / Francisco de Assis dos Santos. – 2023. 98 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2023.

Orientação : Prof^a D.ra Rossana Moreno Santa Cruz.

Coorientação : Prof^o D.r Luís Romeu Nunes.

1. Transmissão óptica – espaço livre. 2. Vibração. 3. Efeito atmosférico. 4. Espalhamento da luz. 5. Redes ópticas. I. Título.

CDU 621.391.6:004(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária – CRB 15/132

FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS

Caracterização dos efeitos de vibração em sistemas de transmissão por FSO

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 27 de abril de 2023.

BANCA EXAMINADORA

<hr/> Prof^a. Rossana Moreno Santa Cruz, Dr^a - IFPB Orientadora	 Documento assinado digitalmente ROSSANA MORENO SANTA CRUZ Data: 22/05/2023 15:41:58-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
<hr/> Prof. Luis Romeu Nunes, Dr - IFPB Coorientador	 Documento assinado digitalmente LUIS ROMEU NUNES Data: 22/05/2023 17:55:22-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
<hr/> Prof. Luis Romeu Nunes, Dr - IFPB Coorientador	 Documento assinado digitalmente Suzete Elida Nobrega Correia Data: 24/05/2023 20:33:23-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
<hr/> Prof^a Suzete Élida Nóbrega Correia, Dr^a - IFPB Examinador 1	 Documento assinado digitalmente JOABSON NOGUEIRA DE CARVALHO Data: 22/05/2023 18:17:08-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
<hr/> Prof. Joabson Nogueira de Carvalho Dr - IFPB Examinador 2	 Documento assinado digitalmente LINCOLN MACHADO DE ARAUJO Data: 25/05/2023 11:41:44-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
<hr/> Prof. Lincoln Machado de Araújo, Dr - IFPB Examinador 3	

João Pessoa – PB
Abril de 2023

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, expresso minha gratidão a Deus por sua proteção, sabedoria e discernimento durante os momentos desafiadores;

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e dos Cursos de Telecomunicações e Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, cujas contribuições diretas ou indiretas foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho;

À professora Rossana Moreno Santa Cruz, que ofereceu sua orientação precisa, conhecimento valioso e incentivo constante ao longo deste processo. Além disso, agradeço também pela notável paciência, dedicação e disponibilidade, bem como pelo conhecimento transmitido, que foram essenciais para o meu aprendizado;

Ao professor e coorientador Luis Romeu Nunes, pelo inestimável apoio, incentivo e acompanhamento durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho, pela sua valiosa ajuda na construção dos protótipos utilizados neste projeto;

Aos meus colegas de Mestrado e de Graduação, pelo companheirismo e ajuda mútua;

Aos colegas da SKY Banda Larga por incentivarem minha pesquisa;

Não poderia deixar de agradecer à minha família e amigos pelo amor, suporte e encorajamento constantes que foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

"Se você espera por condições ideais nunca fará nada."

Eclesiastes 11:4

Resumo

A tecnologia FSO (*Free Space Optics*) é uma técnica de comunicação óptica sem fio que utiliza feixes de luz para transmitir dados em alta velocidade no espaço livre. No entanto, essa tecnologia é suscetível a eventos naturais como ventos, chuvas e dilatação térmica que provocam vibração mecânica nas estruturas, resultando em flutuações e perda de qualidade do sinal. É proposta, portanto, a realização de uma investigação sobre os impactos das vibrações na qualidade e na disponibilidade da transmissão FSO. Um dispositivo medidor de vibrações baseado em Arduino foi construído e instalado no topo de uma torre de telecomunicações de 75 metros para coletar dados em resposta às forças do vento em diferentes velocidades e direções. O dispositivo registrou dados dos eixos X, Y e Z dos acelerômetros por 24 horas, em que amostras de uma hora foram selecionadas, processadas e armazenadas em um cartão de memória pelo Arduino. As informações processadas incluem inclinação, aceleração, rotação, vibração, direção e ângulo do movimento. Face a grande quantidade de dados, um programa em MATLAB foi utilizado para seu processamento e melhor seleção dos intervalos de interesse, bem como para gerar gráficos que facilitassem a visualização dos eventos. A transformada de Fourier foi aplicada para identificar a frequência fundamental de vibração nos eixos perpendiculares ao eixo de propagação do laser, X e Y, apresentando uma vibração aproximada de 6 Hz. Os resultados de vibração obtidos na torre de telecomunicações foram replicados em um ambiente de testes por meio de uma mesa de vibração especialmente projetada para esse fim, facilitando a observação do efeito da vibração no feixe laser para um alvo a 10 m e 40 m de distância. O propósito da pesquisa é fornecer uma base teórica sobre o tema, acrescentar dados sobre os efeitos das vibrações nas torres de telecomunicações, contribuir para a melhoria da qualidade e disponibilidade de transmissão FSO e sugerir propostas para trabalhos futuros.

Palavras-Chave: Transmissão óptica em espaço livre, Vibrações, Efeitos atmosféricos, Espalhamento da luz, Redes ópticas.

Abstract

Free Space Optics (FSO) technology is a wireless optical communication technique that uses beams of light to transmit data at high speed in free space. However, this technology is susceptible to natural events such as wind, rain and thermal expansion that cause mechanical vibration in structures, resulting in fluctuations and loss of signal quality. It is therefore proposed to carry out an investigation into the effects of vibrations on the quality and availability of the FSO transmission. An Arduino-based vibration measuring device was built and installed on top of a 75 m telecommunication tower to collect data in response to wind forces at different speeds and directions. The device recorded data from the X, Y and Z axes of the accelerometers for 24 hours, in which one-hour samples were selected, processed and stored on a memory card through Arduino. Information processed includes tilt, acceleration, rotation, vibration, direction and angle of movement. In view of the large amount of data, a MATLAB program was used for the processing and better selection of the intervals of interest, as well as to generate graphs that facilitated the visualization of the events. The Fourier transform was applied to identify the fundamental frequency of vibration in the axes perpendicular to the laser propagation axis (X and Y), presenting an approximate vibration of 6 Hz. The vibration results obtained in the telecommunications tower were replicated in a test environment using a vibration table specially designed for this purpose, facilitating the observation of vibration effects on the laser beam for a 10 m and 40 m away target. The purpose of the research is to provide a theoretical basis on the subject, add data on the effects of vibrations on telecommunications towers, contribute to improving the quality and availability of FSO transmission and suggest proposals for future work.

Keywords: Optical transmission in free space, Vibrations, Optical networks.

Lista de Figuras

Figura 1: Acesso Integrado e Backhaul.....	10
Figura 2: Mapa de ventos na superfície do Brasil.....	11
Figura 3: Diagrama simplificado de um enlace FSO.....	15
Figura 4: Diagrama simplificado de um transmissor FSO.....	15
Figura 5: Divergência do feixe óptico a uma distância de 1 km.....	16
Figura 6: Diagrama simplificado de um receptor FSO.....	17
Figura 7: Diagrama simplificado de um transceptor FSO.....	18
Figura 8: Ilustração de um enlace FSO entre dois edifícios.....	19
Figura 9: Princípio de funcionamento do LED.....	20
Figura 10: Estrutura básica de um laser com cavidade de Fabry-Perot (FP).....	22
Figura 11: Estrutura básica de um laser com realimentação distribuída (DFB).....	23
Figura 12: Estrutura do laser de cavidade vertical e emissão de superfície.....	24
Figura 13: Estrutura básica de um fotodiodo PIN.....	25
Figura 14: Estrutura básica de um fotodiodo APD.....	26
Figura 15: Evento de nevoeiro em Denver no Colorado - EUA.....	28
Figura 16: Transmitância da atmosfera em função do comprimento de onda.....	29
Figura 17: Movimento de Pêndulo Simples.....	34
Figura 18: Vibração quanto à previsibilidade de ocorrência.....	36
Figura 19: Sistemas com um (a), dois (b) e três (c) graus de liberdade.....	37
Figura 20: Variação do vento em relação à altura dos obstáculos.....	43
Figura 21: Mapa de isopletas do vento.....	45
Figura 22: Perfil da torre analisada.....	51
Figura 23: Placa de identificação da torre da SKY.....	52
Figura 24: Faces da torre da SKY.....	53
Figura 25: Vibrômetro baseado no MPU6050.....	54
Figura 26: Pinagem e os sentidos de movimentação dos eixos do MPU6050.....	56
Figura 27: Esquema de um barramento I2C do MPU6050.....	58
Figura 28: Esquema do protocolo de comunicação I2C do MPU6050.....	58
Figura 29: Disposição dos principais componentes da placa Arduino UNO.....	59
Figura 30: Ambiente Integrado de Desenvolvimento Arduino.....	60
Figura 31: Ambiente de programação do MATLAB.....	61
Figura 32: Dispositivo Vibrômetro fixado a 75 m na torre.....	62
Figura 33: Plataforma de vibração.....	64
Figura 34: Foto do ambiente de testes.....	65
Figura 35: Projeção do feixe FSO em direção ao receptor.....	66
Figura 36: Vibração do FSO em direção a Y.....	67
Figura 37: Foco do laser vermelho vibrando a 10 m e 40 m do alvo.....	70
Figura 38: Foco do laser verde a 10 m e 40 m do alvo.....	70
Figura 39: Sinais reais amostrados no tempo.....	72
Figura 40: Sinais reais amostrados no tempo com média subtraída.....	73
Figura 41: Sinais reais amostrados no tempo durante 10 s.....	74
Figura 42: Sinais reais amostrados no tempo durante 10 s com média subtraída.....	75
Figura 43: Gráfico das transformadas de Fourier.....	76
Figura 44: Deslocamento do feixe FSO na origem, em milímetros.....	77
Figura 45: Traçado do feixe FSO ao longo do tempo.....	78

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Materiais usados na fabricação de LEDs e seus comprimentos de onda. ..	21
Tabela 2 - Janelas livres de absorção e seus comprimentos de onda.....	30
Tabela 3 - Fontes de vibração mais comuns.....	41
Tabela 4 - Coeficientes para as diversas características de terreno.	44
Tabela 5 - Fator Topográfico S_1 em função da altura.....	46
Tabela 6 - Cotas médias por categoria e características do terreno.	47
Tabela 7 - Valores mínimos do fator estatístico S_3	48
Tabela 8 - Tabela de carga da torre da SKY - 75 m.....	53
Tabela 9 - Principais especificações técnicas do sensor MPU6050.....	57
Tabela 10 - Tabela de dados armazenados em arquivo.....	63

Lista de Símbolos e Abreviaturas

α	Ângulo;
a	Área;
d	Distância;
E	Energia;
eff	Eficiência;
f	Frequência;
fs	Frequência de Amostragem;
Fr	Fator de Rajada;
Hz	Hertz;
m	Metro;
P	Pressão;
rad	Radiano;
r	Raio;
S₁	Fator Topográfico;
S₂	Fator de Rugosidade;
S₃	Fator Estatístico;
t	Tempo;
T	Período;
V	Velocidade;
Z_g	Altura da Camada Limite da Atmosfera;

Lista de Acrônimos e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
APD	<i>Avalanche Photodiode</i> ;
Backhaul	Enlace entre a rede principal e as sub-redes;
BER	<i>bit Error Rate</i> ;
DFB	<i>Distributed Feedback</i> ;
DMP	<i>Digital Motion Processor</i> ;
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de <i>Fourier</i>);
FO	Fibra Óptica;
FOV	<i>Field of View</i> ;
FP	Fabry-Perot;
FSO	<i>Free Space Optics</i> ;
GPS	<i>Global Positioning System</i> ;
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> ;
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineer</i> ;
IPN	<i>Switch between I-P layers in PIN</i> ;
ISP	<i>Internet Service Provider</i> ;
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> ;
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> ;
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i> .
PIN	<i>Positive-Intrinsic-Negative</i> ;
PIPn	<i>P-layer between the I-layer and N-layer in PIN</i> ;
RF	Radiofrequência;
RIN	<i>Relative Intensity Noise</i> ;
Rx	<i>Receiver</i> ;
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> ;
Tx	<i>Transmitter</i> ;
VCSEL	<i>Vertical Cavity Surface Emitting Laser</i> ;
VLC	<i>Visible Light Communication</i> ;
WDN	<i>Wave Dynamics Network</i> ;
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> .

Sumário

Resumo	I
Abstract	II
Lista de Figuras	III
Lista de Tabelas	IV
Lista de Símbolos e Abreviaturas	V
Lista de Acrônimos e Siglas.....	VI
1. Introdução.....	9
1.1. Objetivo Geral	12
1.2. Objetivos Específicos.....	12
1.3. Organização do Trabalho.....	13
2. Fundamentação Teórica.....	14
2.1. Fundamentos da Tecnologia FSO.....	14
2.1.1. Circuito Transmissor FSO.....	15
2.1.2. Circuito Receptor FSO.....	17
2.1.3. Transceptor FSO	18
2.1.3.1. Principais transmissores ópticos.....	20
2.1.3.2. Principais receptores ópticos.....	25
2.1.3.3. Parâmetros internos adicionais	27
2.1.3.4. Parâmetros externos.....	27
2.2. Vibração.....	34
2.2.1. Vibração mecânica.....	34
2.2.2. Características das Vibrações.....	39
2.3. Vento em estruturas verticais	42
2.3.1. Forças do vento segundo a NBR 6123.....	44
2.3.2. Vibração nas estruturas verticais devido ao vento.....	49
3. Materiais e Métodos.....	51
3.1. Estrutura vertical.....	51
3.2. Coleta de dados.....	54
3.2.1. Módulo Acelerômetro MPU6050	55
3.2.3. Arduíno UNO R3.....	59
3.2.4. Ambiente de programação Arduíno.....	60
3.2.5. MATLAB.....	61
3.2.6. Coleta de dados em campo	62
3.2.7. Ambiente de testes local	64
3.2.8. Método de Análise.....	66

4. Resultados e Discussões	72
5. Considerações Finais	79
Referências Bibliográficas.....	81
Apêndice - Códigos Arduino e Matlab.....	85
a. Código fonte do Arduino UNO R3.....	85
b. Código fonte do MatLab R2017b	89

1. Introdução

As comunicações ópticas, em várias formas, têm sido usadas há centenas de anos, desde os antigos gregos que poliam seus escudos para enviar sinais da luz do sol durante as batalhas, aos modernos sistemas de comunicação utilizados em meios militares, que transmitem sinais ópticos em rede com sofisticada codificação. Dentre as formas de comunicação óptica, sobressai a Comunicação Óptica em Espaço Livre (*Free Space Optics*, FSO). Neste tipo de comunicação, um feixe luminoso é transmitido para um receptor com visada em espaço livre. Este tipo de comunicação conecta dispositivos de telecomunicações por meio de enlaces de curtas e médias distâncias. [1].

As redes FSO estão em constante crescimento devido à sua versatilidade e nível de operação, visto que operam no ambiente sem a necessidade de cabos ou equipamentos complexos. A utilização de enlaces ópticos em espaço livre apresenta algumas vantagens que tornam a sua implementação economicamente viável, apresentando velocidades compatíveis com as necessidades atuais. A tecnologia FSO possibilita uma fácil implementação, infraestrutura escalonável e custos menores quando comparados à tecnologia por radiofrequência (RF) [1].

A tecnologia FSO é definida primordialmente como sistema de visada direta, uma vez que os obstáculos presentes no percurso de propagação degradam consideravelmente os feixes luminosos. Estes feixes são predominantemente transmitidos em comprimentos de onda entre 780 nm a 1600 nm.

Assim sendo, a tecnologia FSO permite às operadoras de telecomunicações e provedores de serviço uma maior disponibilidade de acesso em áreas com pouca infraestrutura de telecomunicações. Do ponto de vista econômico, sua implementação é realizada de forma simplificada e com menor custo em relação aos sistemas cabeados ou por radiofrequência [2].

Alguns fatores limitantes de desempenho dos sistemas FSO são: atenuação por espalhamento e absorção, cintilação, interferência luminosa, ângulo de abertura e a influência na distribuição da energia ao longo do eixo de propagação balanço de potência, turbulência, movimento natural das estruturas

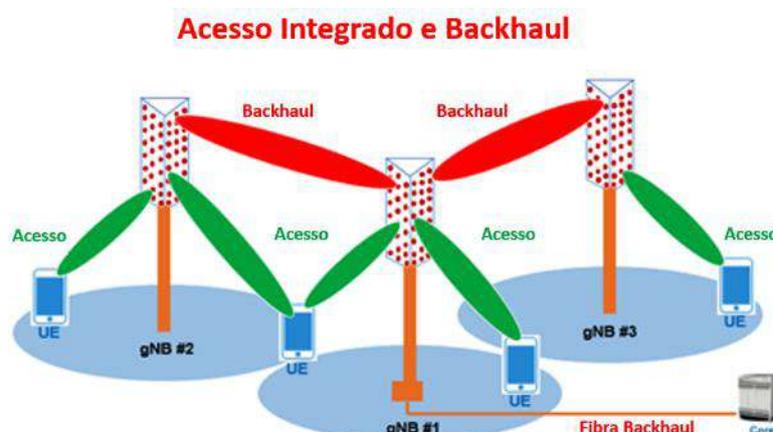
físicas onde estão fixados, atividades sísmicas, vibrações provocadas por fatores internos e externos. Esses fatores devem ser levados em consideração, pois podem reduzir a disponibilidade do enlace óptico, introduzir erros, ou mesmo inviabilizar a comunicação do sistema.

O ângulo de abertura em sistemas FSO é a abertura angular da lente transmissora e receptora que define a área na qual a luz pode ser transmitida e recebida. Ele influencia a distribuição da energia ao longo do eixo de propagação, o que afeta a potência óptica que atinge o receptor. Um ângulo de abertura maior distribui a potência óptica em uma área maior e diminui a intensidade da luz ao longo do eixo de propagação, enquanto um ângulo menor concentra a potência óptica em uma área menor e mantém a intensidade da luz mais forte ao longo do eixo de propagação.

As comunicações ópticas de espaço livre também são utilizadas para permitir comunicações espaciais. Os enlaces ópticos podem ser implementados usando lasers de alta potência cujo alcance atinge vários quilômetros [2].

Pesquisas e avanços tecnológicos da tecnologia FSO estão viabilizando o uso em ambiente de testes das provedoras de serviço de internet (*Internet Service Provider, ISP*) como um meio de interligação da infraestrutura de telecomunicações aos acessos integrados de rede e *Backhaul*, que é a parte de uma rede hierárquica de telecomunicações responsável por fazer a ligação entre o núcleo da rede, Backbone, e as sub-redes periféricas [3]. A Figura 1 ilustra o diagrama de Acesso Integrado e *Backhaul*.

Figura 1: Acesso Integrado e Backhaul.



Fonte: Adaptado de [3].

Interligar a comunicação do cliente com as redes em anel continua sendo um desafio, especialmente em lugares de difícil acesso. Embora a infraestrutura do sistema FSO pareça promissora, há muitos desafios a serem superados antes de sua implementação, sendo a disponibilidade a principal preocupação. É necessário demonstrar estatisticamente a disponibilidade do sistema FSO com dados experimentais realizados em campo antes que haja uma ampla aceitação da tecnologia [3].

O Brasil tem condições climáticas desafiadoras para a tecnologia FSO devido a ventos e chuvas frequentes. A Figura 2 mostra ventos de até 26 km/h na superfície. De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado em 2001, identificando regiões do território brasileiro de grande potencial de utilização de energia eólica, é mostrado que o Brasil possui uma área de aproximadamente 0,8% de todo o território com ocorrência de ventos com velocidades médias igual ou acima de 7 m/s^2 ao nível de 50 m acima do solo [4].

Figura 2: Mapa de ventos na superfície do Brasil.



Fonte: Adaptado de [5].

A tecnologia FSO tem vantagens em relação a outros sistemas de interligação de redes de transporte, como facilidade de implementação, escalabilidade, velocidades compatíveis e custos reduzidos. No entanto, sua confiabilidade e falta de conhecimento por parte das empresas operadoras ainda

são questões em aberto. Estudos detalhados sobre os efeitos que limitam o alcance e a funcionalidade do sistema FSO podem ajudar a mitigar essas dúvidas.

A proposta deste trabalho é fundamentada no estudo e caracterização dos efeitos das vibrações que limitam a funcionalidade do sistema FSO, analisando o movimento natural das estruturas físicas onde estão fixados.

O estudo e a correção da vibração do transmissor e/ou receptor podem aumentar a disponibilidade e qualidade de conexão, proporcionando maior confiabilidade aos sistemas de comunicação via FSO.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é estudar e caracterizar os efeitos de vibração que limitam o alcance, a taxa de transmissão e a funcionalidade prática de sistemas de transmissão utilizando FSO, permitindo, assim, que sistemas FSO possam ser analisados e mais utilizados no Brasil, principalmente por operadoras de sistemas de telecomunicações e provedores de internet.

1.2. Objetivos Específicos

São objetivos específicos propostos nesta dissertação:

- Estudar sobre o estado da arte da Transmissão Óptica em Espaço Livre (FSO) e sobre a teoria do movimento vibratório associado a sistemas de comunicação;
- Caracterizar os efeitos ocasionados pela vibração que limitam o alcance e funcionalidade em sistemas FSO;
- Desenvolver um sistema medidor de vibrações e uma mesa de testes de vibração;
- Coletar dados de vibração, em uma torre de 75 m e analisar os efeitos de vibração no transmissor FSO em laboratório.

1.3. Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em 5 Capítulos, os quais são apresentados de forma resumida a seguir: No Capítulo 1, é apresentado o estado da arte da utilização da tecnologia FSO, bem como suas limitações, propostas e objetivos de estudo. O Capítulo 2 apresenta o princípio de funcionamento, a fundamentação teórica sobre tecnologia FSO e fundamentos de vibração. No Capítulo 3, são apresentados os materiais e métodos propostos para o estudo da vibração nas estruturas que suportam o transmissor e receptor FSO. O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões sobre o tema deste trabalho. No Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais e propostas para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências e anexos utilizados neste trabalho.

2. Fundamentação Teórica

Neste Capítulo, são apresentados os princípios de funcionamento, as bases teóricas e o estado do conhecimento da tecnologia FSO e Fundamentos de Vibração.

2.1. Fundamentos da Tecnologia FSO

A tecnologia de enlace FSO utiliza feixes luminosos para fornecer conexões de alta capacidade por meio do espaço livre. Atualmente, esta tecnologia atinge capacidade de transmissão de dados que ultrapassam os 40 Gb/s por enlace [6] e são aplicados em interligação de redes de dados e de telecomunicações.

Os sistemas FSO operam geralmente em comprimentos de onda de 780 nm a 1600 nm [7]. Outros comprimentos de onda entre 400 nm e 700 nm, são utilizados em sistemas de Comunicação em Luz Visível (*Visible Light Communication, VLC*). As transmissões FSO são guiadas pela norma IEC60825 [8], [9] que estabelecem parâmetros importantes como comprimentos de onda, potência óptica, abertura do feixe, dentre outros. O sistema FSO se divide, basicamente, em três estágios: 1) o circuito transmissor óptico, responsável por modular o sinal de luz, emitindo-o em direção ao receptor por meio do espaço livre; 2) o canal de comunicação, denotado pelo espaço livre, ao qual é sensível às condições atmosféricas e que apresentam turbulências, nuvens, obstruções, chuva, fumaça, cintilação, gases, variações de temperatura, névoa, neblina, aerossóis, granizo, tempestade de areia, variação de pressão e ionização (se for o caso de comunicações por satélite); 3) o receptor óptico, responsável por receber o sinal de luz modulado enviado pelo transmissor e converter o sinal óptico em um sinal elétrico.

O sistema FSO é bem semelhante ao sistema de comunicação por radiovisibilidade em termos de processamento de dados, modulação, transmissão e recepção [10]. Enlaces FSO são ponto a ponto e requerem alinhamento direto sem obstáculos ao longo do trajeto. O receptor captura o feixe

luminoso que atravessa o canal atmosférico e o concentra no fotodetector, tornando o alinhamento um fator primordial para o estabelecimento do enlace. A Figura 3 ilustra um diagrama simplificado de um enlace FSO.

Figura 3: Diagrama simplificado de um enlace FSO.



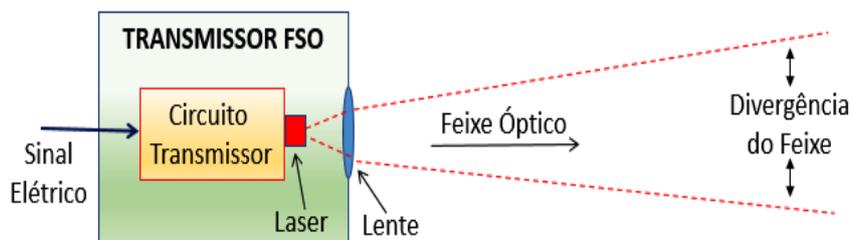
Fonte: Adaptado de [11].

Enlaces FSO de ambiente externo operam entre 300 m e 5 km, embora distâncias maiores possam ser implementadas, dependendo da taxa de transmissão e disponibilidade necessária [10].

2.1.1. Circuito Transmissor FSO

O transmissor óptico ilustrado na Figura 4 é formado por uma fonte de luz, com determinado comprimento de onda, potência e velocidade de modulação, e por um sistema de lentes que auxiliam no direcionamento do feixe gerado, determinando a divergência do feixe [12].

Figura 4: Diagrama simplificado de um transmissor FSO.

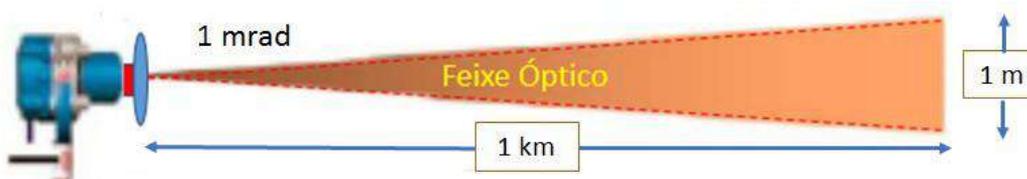


Fonte: Adaptado de [13].

As fontes de luz que podem ser utilizadas em sistemas FSO modernos consistem de lasers de diodo (LASER) e diodos emissores de luz (LED), sendo as principais diferenças entre estas fontes de luz: o comprimento de onda; a potência; e o tipo de excitação (LASER ou LED). Entretanto, a fonte de luz mais utilizada em sistemas FSO é o laser, devido à sua alta direcionalidade, coerência e potência óptica, o que permite a transmissão de sinais de alta velocidade a longas distâncias [14]. O circuito transmissor converte sinais elétricos em sinais ópticos modulados por meio do uso de laser e lentes para ajustar o ângulo de envio do feixe óptico.

Pode-se definir a divergência do feixe como o ângulo máximo formado pelo eixo central do feixe que contém a maior densidade de potência ou como o ângulo entre as linhas de propagação do feixe em que a densidade de potência é reduzida para um valor inferior em 3 dB em relação ao feixe principal. Este valor pode ser expresso como meio ângulo ou ângulo total e sua unidade é expressa em radianos ($1 \text{ mrad} = 0,0573^\circ$). Os transceptores FSO geralmente transmitem um feixe divergente de 2×10^{-3} a 10×10^{-3} radianos, o que significa que, a uma distância de cerca de 1 km, o feixe se dispersará de 2 a 10 metros. Para equipamentos que usam ajuste automático de ângulo, o ângulo de divergência pode ser reduzido entre 0,05 mrad e 1 mrad, o que equivale a uma divergência de feixe de 5 cm a 1 metro ao propagar uma distância de 1 km.

Figura 5: Divergência do feixe óptico a uma distância de 1 km.



Fonte: Adaptado de [13].

Lentes com grande angulação de divergência podem facilitar o alinhamento em sistemas FSO, mas seu uso pode reduzir a potência do sinal e diminuir a qualidade e a confiabilidade da transmissão, além de aumentar o custo do sistema. É necessário considerar esses fatores antes de optar por essa solução.

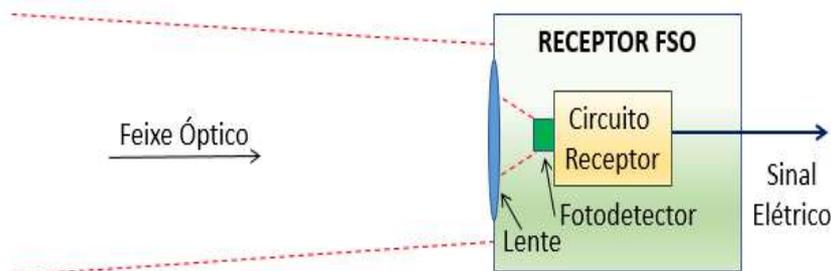
2.1.2. Circuito Receptor FSO

O receptor óptico de um sistema FSO, como o mostrado na Figura 6, é constituído de um conjunto de lentes que direcionam e concentram a energia óptica recebida em um fotodetector (fotodiodos APD, PIN ou fototransistores). Um amplificador e um circuito de processamento, recupera o sinal original para que seja utilizado pelo circuito receptor.

Os fotodetectores operam em uma certa faixa de potência da luz recebida. Se a potência incidente no fotodiodo for menor que o limite de recepção, o número de fótons não será suficiente para convertê-los em elétrons no fotodetector. Por outro lado, se o receptor receber muita luz, o fotodetector satura e não funciona corretamente. Para os comprimentos de onda compreendidos entre o espectro visível e o infravermelho, os fotodetectores normalmente utilizados são aqueles feitos com Silício (Si) [15].

Os fotodetectores PIN-Si3 e os fotodetectores de avalanche de silício (APD-Si) são opções mais econômicas, mas como sua sensibilidade é inversamente proporcional à velocidade de modulação do feixe, eles funcionam com uma largura de banda menor. Para comprimentos de onda mais longos, os fotodetectores feitos de Arseneto de Índio-Gálio (InGaAs) são amplamente usados. Eles têm uma resposta em 1310 nm ou 1550 nm e podem funcionar em uma largura de banda alta. Em comparação com os fotodetectores de Si, os InGaAs são menos sensíveis para uma área de superfície menor [16].

Figura 6: Diagrama simplificado de um receptor FSO.



Fonte: Adaptado de [13].

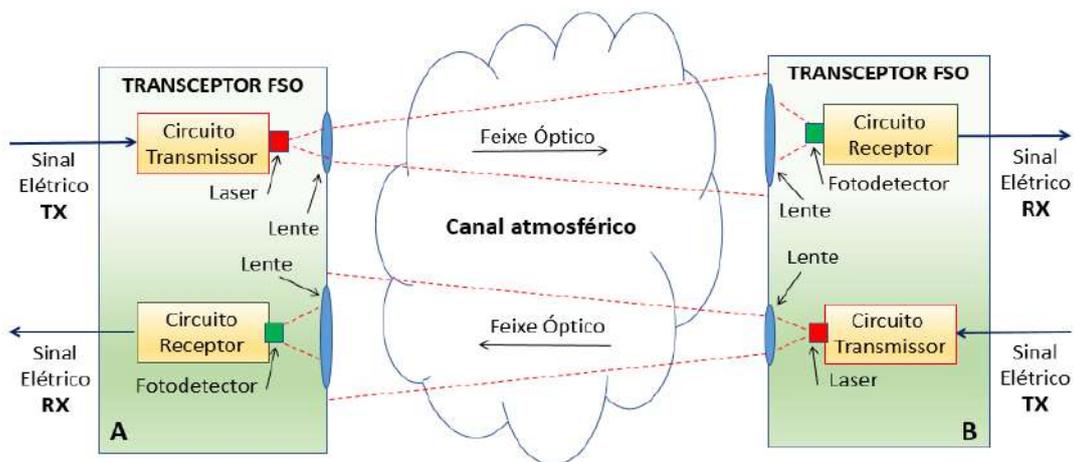
A sensibilidade do receptor medida em dBm representa o menor nível de potência óptica que o fotodetector pode detectar e garantir uma qualidade de recepção satisfatória do sinal transmitido. Este sinal deve apresentar uma BER (*Bit Error Rate*) $\leq 10^{-6}$ e deve ser medido o mais próximo possível da janela do receptor FSO, garantindo assim uma melhor qualidade na transmissão [16].

Os valores mínimos de potência exigidos pelo fotodetector são especificados pelos fabricantes nos seus respectivos *datasheets*. Os valores de sensibilidade típicos para transceptores FSO variam entre -31 dBm e -43 dBm dependendo do fabricante [16].

2.1.3. Transceptor FSO

Na Figura 7, é apresentada de maneira simplificada a configuração do transceptor FSO, que é composto por um transmissor e um receptor óptico. O transmissor converte o sinal elétrico de entrada em um sinal óptico modulado, usando um laser, e envia-o através do canal atmosférico em direção ao receptor. O receptor detecta o sinal usando um fotodetector, realiza o processamento necessário e recupera o sinal elétrico original.

Figura 7: Diagrama simplificado de um transceptor FSO.



Fonte: Adaptado de [13].

Para garantir a eficiência na transferência do feixe de radiação óptica, é fundamental utilizar dispositivos ópticos, tais como lentes, espelhos e combinações desses elementos em sistemas ópticos. Esses dispositivos são capazes de focar, desviar ou ampliar feixes de luz, além de corrigir distorções ópticas, e são utilizados tanto no transmissor quanto no receptor [13].

No transmissor, a função das lentes e demais dispositivos ópticos é proporcionar o confinamento da luz radiada em um cone de pequeno ângulo de abertura, auxiliando no processo de colimação e convergência de feixe. No receptor, as lentes servem para fazer a captura da radiação incidente, proveniente do transmissor, em abertura conveniente, e convergir esta radiação para a área efetiva do fotodetector [13].

A largura estreita do feixe óptico e a movimentação dos edifícios, causada por fatores como dilatação térmica, vento ou vibrações, podem resultar em um desalinhamento entre o feixe transmitido e o receptor, resultando em uma perda de sinal que pode tornar o enlace óptico FSO indisponível. Portanto, é fundamental que os equipamentos FSO sejam instalados em estruturas robustas para minimizar os movimentos dos elementos ópticos e garantir que o feixe óptico permaneça alinhado [16]. A Figura 8 ilustra uma conexão entre dois pontos utilizando um transceptor em cada edifício.



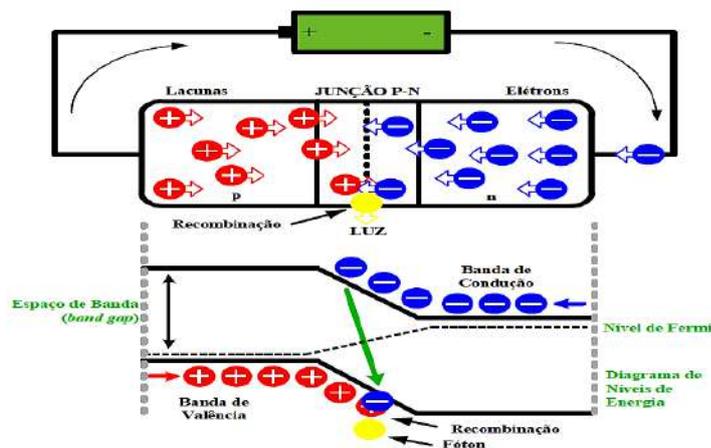
Fonte: Adaptado de [13].

2.1.3.1. Principais transmissores ópticos

A escolha de uma fonte óptica transmissora deve ser adequada às características do meio em um projeto para enlaces ópticos. As fontes ópticas para sistemas FSO são bem semelhantes às utilizadas em sistemas com fibras ópticas. A opção da potência e comprimento de onda depende da taxa de transmissão e distância do enlace. Usualmente os LEDs são utilizados em ambientes internos, por apresentarem baixa potência e transmitirem em luz visível enquanto que lasers são utilizados em ambientes externos, que demandam de uma maior concentração de energia em uma estreita faixa espectral. Ambos os tipos são construídos com formas especiais de junções semicondutoras que permitem a emissão de luz sob condições de polarização específicas [17].

(a) LED - São diodos compostos por uma junção PN, fabricada com materiais semicondutores de Silício, Alumínio, Arseneto de Gálio e Índio, onde o material semicondutor do tipo N contém elétrons livres e o material semicondutor do tipo P tem lacunas deixadas pelos referidos elétrons. A aplicação de um estímulo de polarização direta na junção dos dois materiais faz com que o nível de energia no material tipo N aumente e se inicie o processo de recombinação dos elétrons com as lacunas, liberando energia na forma de luz no processo e o resultado da liberação de energia é o fóton, conforme ilustrado a Figura 9.

Figura 9: Princípio de funcionamento do LED.



Fonte: Adaptado de [18].

O tipo de emissão que ocorre nos LEDs é a chamada emissão espontânea, que surge quando os elétrons excitados retornam ao estado de repouso sem influência externa, portanto, não há direções específicas ou relação entre as fases dos fótons emitidos. Os LEDs apresentam um desempenho superior em enlaces FSO de curta distância, em que o uso de alta potência não é essencial, graças à dispersão de luz.

Os LEDs emitem luz não coerente em uma ampla faixa de comprimentos de onda, dependendo dos tipos de materiais com os quais são fabricados [19]. A Tabela 1 descreve alguns dos materiais usados na fabricação de diferentes tipos de LEDs e os comprimentos de onda que eles produzem.

Tabela 1 - Materiais usados na fabricação de LEDs e seus comprimentos de onda.

Material	Comprimento de onda (nm)
ALGaInP	630 – 680
GaInP	670
GaALAs	620 – 895
GaAs	904
InGaAs	980
InGaAsP	1100 – 1650
InGaAsSb	1700 – 4400

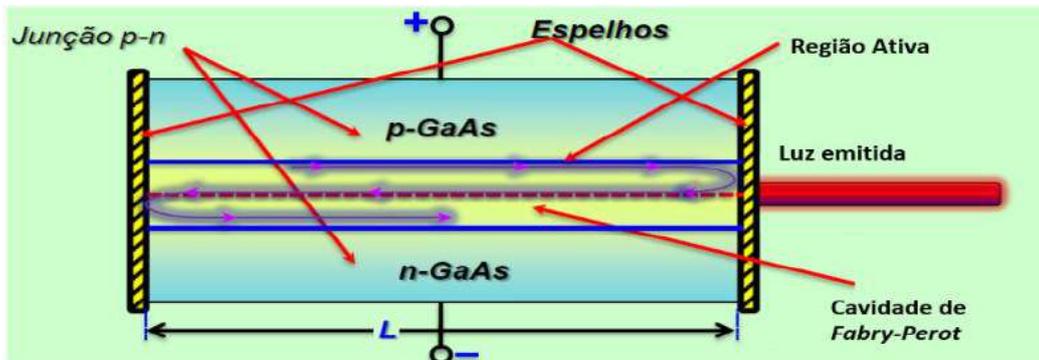
Fonte: Adaptado de [19].

O LED é um dispositivo que fornece baixa potência óptica, são mais baratos do que os diodos lasers. Apresenta outras características de relevância, como pequeno consumo de energia, longa vida útil e disponibilidade de comprimentos de onda em uma grande faixa de valores, entre o infravermelho e o ultravioleta. Além da baixa potência, apresenta outros inconvenientes, como uma largura espectral grande, podendo ultrapassar 10% do comprimento de onda central. Este fato limita a sua taxa máxima de modulação [2]. Como os transceptores baseados na tecnologia LED não representam grande perigo para o olho humano, por utilizarem baixa potência, independentemente do comprimento de onda em que são operados, eles geralmente são preferidos aos equipamentos que usam diodos laser, para enlaces FSO de curta distância [19].

(b) Lasers com cavidade de Fabry-Perot (FP) - Formados por uma cavidade óptica composta por dois espelhos altamente refletivos para criar um feixe de luz coerente e monocromático nas extremidades do guia de ondas. Com

suas superfícies refletoras paralelas entre si, constituem uma cavidade ressonante onde a luz é refletida entre os dois espelhos de ambos os lados do semicondutor, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10: Estrutura básica de um laser com cavidade de Fabry-Perot (FP).



Fonte: Adaptado de [20].

Um dos espelhos é projetado para refletir a luz incidente e outro para refletir uma quantidade menor e assim permitir a transferência de parte da luz que é gerada em sua estrutura para fora da cavidade. A presença de portadores na região ativa muda as propriedades ópticas do material, de modo que, para densidades de portadores suficientemente altas, é possível obter ganho de fótons e amplificação da luz gerada na sua estrutura [21].

O laser de FP emite a maior parte de sua energia em um comprimento de onda central, enquanto distribui o restante em comprimentos de onda ao redor do valor central e em diferentes modos de emissão. No entanto, a potência de saída pode ser instável devido às flutuações nos comprimentos de onda durante a modulação, causadas pela variação do índice de refração do dispositivo devido à diferença de concentração de portadores e temperatura. Como resultado, o comprimento de onda dominante tem uma largura espectral de alguns nanômetros. O laser de *Fabry-Perot* é frequentemente utilizado em sistemas de comunicação óptica com taxas de transmissão mais baixas [20].

(c) Laser de realimentação distribuída (DFB) - O diodo laser de realimentação distribuída (DFB, *Distributed Feedback*) possui um sistema de múltiplas reflexões que utiliza uma grade microscópica em seu ambiente de formação de feixe. A grade determina o comprimento de onda emitido pelo laser, resultando em uma linha muito estreita do espectro. Essa estrutura reforça a

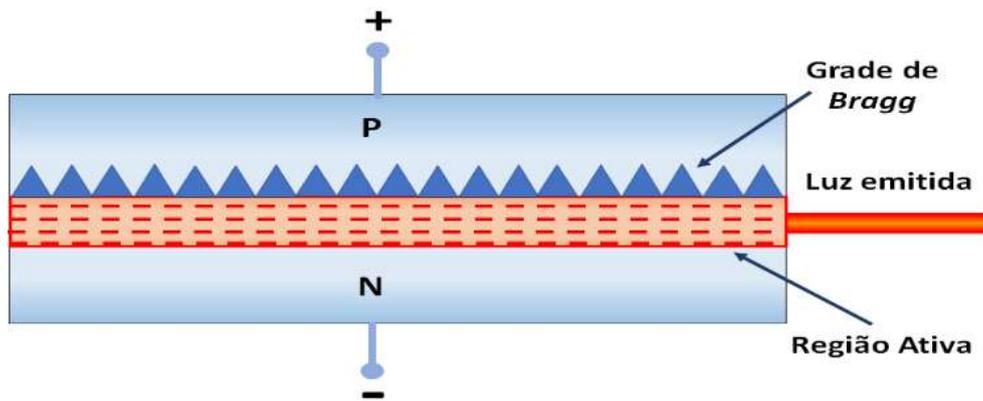
potência na frequência desejada, permitindo que o laser transmita com uma largura espectral reduzida e otimizada [21].

O mecanismo de seleção do laser DFB é um processo que permite que o laser emita luz em um comprimento de onda específico e com uma largura espectral reduzida. Isso é feito por meio de uma estrutura periódica chamada grade de Bragg, que age como um filtro permitindo a passagem da luz em uma frequência específica e refletindo a luz em outras frequências.

A grade de Bragg reforça a potência na frequência desejada, o que permite que o laser transmita com uma largura espectral reduzida e otimizada. Isso é um fator importante para a utilização do laser DFB em sistemas de comunicação óptica de alta velocidade [20].

Para este dispositivo, a irradiação em 1550 nm pode apresentar uma largura espectral típica inferior a 0,01 nm [20]. A Figura 11 ilustra o princípio de funcionamento e a estrutura básica de um laser de realimentação distribuída.

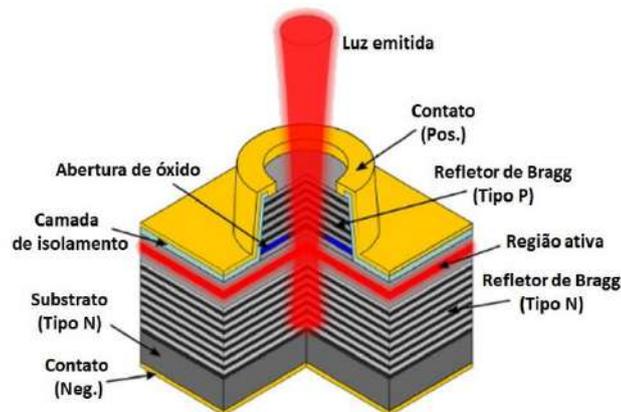
Figura 11: Estrutura básica de um laser com realimentação distribuída (DFB).



Os lasers FP e DFB baseados na tecnologia de semicondutor InGaAs/InP foram desenvolvidos para sistemas de comunicação de fibra óptica devido às características de baixa atenuação da fibra óptica nessa faixa de comprimento de onda. Eles oferecem alta velocidade de modulação, estabilidade do comprimento de onda, confiabilidade e longa vida útil, e os lasers DFB de 1550 nm de baixa potência atuais têm desempenho excelente para atender aos requisitos da indústria de telecomunicações para redes de fibra óptica de alta capacidade de transmissão [16].

(d) Laser de cavidade vertical e emissão de superfície - O VCSEL (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser*), ou laser de emissão de superfície por cavidade vertical, é o laser que emite luz em um feixe cilíndrico verticalmente à superfície do *wafer* onde é fabricado. É semelhante ao laser tradicional, porém sua emissão de luz é similar ao LED [17]. Possuem uma cavidade ressonante vertical perpendicular à sua região ativa. A emissão de luz é na direção normal a essa região e possui formato de feixe com seção transversal aproximadamente circular. A Figura 12 ilustra a representação de um diodo laser de cavidade vertical e emissão de superfície.

Figura 12: Estrutura do laser de cavidade vertical e emissão de superfície.



Fonte: Adaptado de [22].

A cavidade agregada ao dispositivo é constituída por regiões muito finas que atuam como espelhos acima e abaixo da região ativa. O feixe óptico gerado na região ativa incide nesses espelhos e com as reflexões estabelecem as condições de reforço no comprimento de onda desejado com a atenuação dos valores indesejáveis.

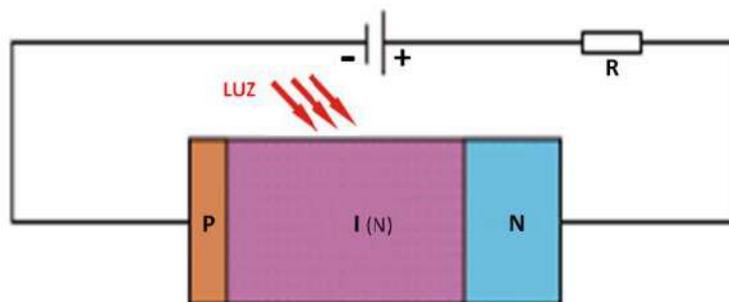
Algumas vantagens que se destacam e são relevantes para os sistemas de comunicações ópticas em espaço livre que utilizam os VCSELs são: baixa corrente de limiar, potência óptica mais elevada em relação aos outros modelos, maior estabilidade de suas características face às alterações na temperatura e largura espectral bem reduzida [20].

2.1.3.2. Principais receptores ópticos

Ao escolher um fotodetector para aplicação em sistemas FSO é necessário levar em consideração as características dos diferentes tipos e optar pelo que tenha o melhor desempenho no enlace FSO. É importante verificar se estes apresentam baixo ruído, alta sensibilidade aos comprimentos de onda utilizados, custo acessível, baixa sensibilidade às variações de temperatura e que sua resposta em frequência seja adequada à máxima taxa de modulação do feixe [19]. Os dispositivos mais utilizados para detectar a energia da luz nos receptores FSO, são os fotodetectores PIN (*Positive-Intrinsic-Negative*) e os fotodetectores APD (*Avalanche Photodiode*). A detecção por câmera, células fotovoltaicas ou fotomultiplicadores pode encarecer o sistema, não responder temporalmente de forma efetiva, ou ser fisicamente inadequada para a aplicação em questão.

(a) Fotodetector PIN - Os fotodetectores baseados em diodos PIN são constituídos por camadas de depleção, que consistem em uma camada levemente dopada (quase pura ou intrínseca) de material semiconductor do tipo N entre as regiões P e N de uma junção semicondutora [19]. A luz que entra no fotodiodo incide sobre o material intrínseco e este se torna espesso o suficiente para que a maioria dos fótons seja absorvida por ele e energia suficiente seja adicionada para fazer os elétrons passarem da banda de valência para a banda de condução. A Figura 13 ilustra a estrutura básica de um fotodiodo PIN e a representação de seu funcionamento [20].

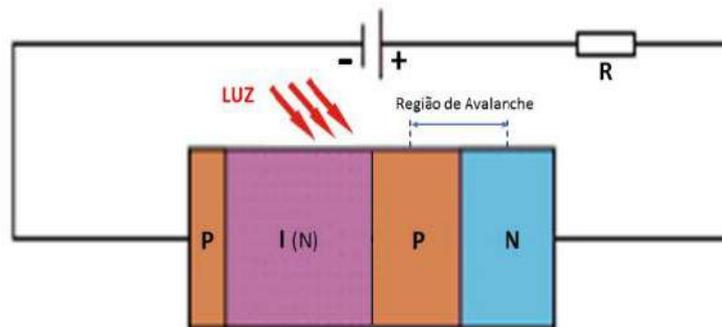
Figura 13: Estrutura básica de um fotodiodo PIN.



Fonte: Adaptado de [20].

(b) Fotodetector APD - Os fotodetectores APD ou fotodiodos de avalanche são formados em sua estrutura interna por materiais PIPN. A luz que entra no diodo é absorvida na camada N, enquanto na junção IPN um grande campo elétrico é desenvolvido por polarização inversa causando ionização por impacto, onde um portador pode adquirir energia suficiente para ionizar os demais elétrons. Esses portadores ionizados, por sua vez, causam mais ionizações, assim, o processo continua como em uma avalanche onde se obtém um ganho ou multiplicação interna. Por isso os APD são mais sensíveis que os PINs e requerem menos amplificação adicional. A Figura 14 ilustra a estrutura básica de um fotodiodo APD. Os fotodetectores baseados em APD podem ter até 4 vezes mais sensibilidade, proporcionando entre 5 e 10 dB de melhoria em relação aos fotodetectores PIN, razão pela qual são os mais usados em receptores ópticos em grande parte devido ao seu custo, uma vez que existem outros fatores que também influenciarão o desempenho e a eficiência dos sistemas FSO [19].

Figura 14: Estrutura básica de um fotodiodo APD.



Fonte: Adaptado de [20].

2.1.3.3. Parâmetros internos adicionais

Os parâmetros internos dos equipamentos utilizados pela tecnologia FSO devem ser considerados na funcionalidade de um enlace FSO, e isso dependerá das características dos diferentes dispositivos. A seguir, estão os principais parâmetros dos transceptores ópticos que devem ser observados:

(a) Ruído térmico - Provocado pelo movimento aleatório de elétrons no resistor de carga do fotodiodo [23].

(b) Ruído quântico: Tem sua origem na fotocorrente gerada pelo fotodiodo, consistindo em um fluxo de elétrons criado em instantes aleatórios de tempo de forma que a corrente não pode ser considerada contínua, mas sim como uma corrente formada por um conjunto de impulsos elétricos de carga [23].

(c) Ruído de Intensidade Relativa: (*Relative Intensity Noise*, RIN) - Ocorre por flutuações de potência causadas pelo comportamento aleatório de emissões espontâneas acopladas ao modo radiante de um diodo laser. O receptor traduz essas flutuações na potência óptica recebida em flutuações na fotocorrente que é gerada [23].

(d) Ruído devido à corrente escura: Mesmo na ausência de um sinal óptico, há a geração de uma corrente reversa, também chamada de corrente escura, que ocorre nos pares elétron-lacuna do fotodetector [23].

2.1.3.4. Parâmetros externos

Os parâmetros externos, ou aqueles que não são específicos do sistema, referem-se ao ambiente em que o sistema deve operar e englobam aspectos como a visibilidade, condições ambientais (como a atmosfera, chuva, vento, nevoeiro, neve, turbulência, nuvens, poeira, poluição, tempestade de areia, entre outros), cintilação, interferência solar, distância do enlace, perda de janela, perda de alinhamento e características da instalação (como o vento, o movimento e a vibração da estrutura vertical) [16].

(a) Atenuação Atmosférica: A atenuação atmosférica dos sistemas FSO é tipicamente dominada por neblina, mas também pode depender de nuvens baixas, chuva, neve, poeira e várias combinações de cada um. Os efeitos do nevoeiro na visibilidade e alcance são ilustrados na Figura 15.

Figura 15: Evento de nevoeiro em Denver no Colorado - EUA.



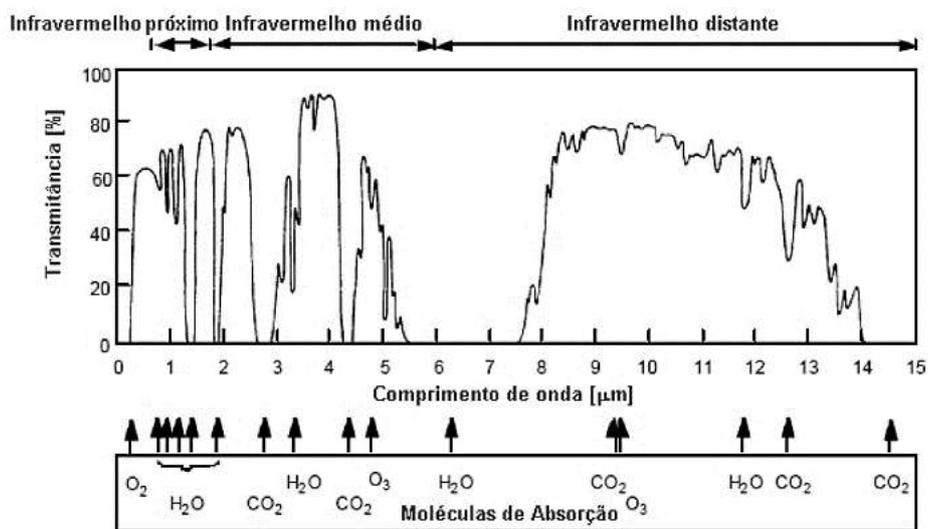
Fonte: Adaptado de [16].

Na Figura 15-a, é possível observar condições atmosféricas favoráveis, com uma faixa de visibilidade superior a 2 km. De acordo com os padrões de contraste estabelecidos pela Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization* - WMO), sediada em Genebra, Suíça, a atenuação é de aproximadamente 6,5 dB/km em comprimentos de onda próximos ao infravermelho. A cordilheira distante é claramente visível, embora esteja a muitos quilômetros de distância. A Figura 15-b mostra o início de uma neblina, com visibilidade limitada a cerca de 113 metros (150 dB/km). Embora ainda seja possível ver um prédio próximo a 300 metros, todos os outros edifícios e pontos de referência estão obscurecidos. Na Figura 15-c, a visibilidade é ainda menor, em torno de 75 metros (225 dB/km), o que faz com que o edifício em primeiro plano fique completamente encoberto [16].

(b) Atenuação devido à absorção: A absorção ocorre quando pequenas partículas sólidas ou líquidas, por exemplo, gelo, poeira, fumaça, etc., presentes na atmosfera causam a conversão de fótons em energia térmica, resultando na absorção da energia da luz emitida, que depende fortemente de seu comprimento de onda [24]. Isso causa uma diminuição na densidade de potência ou atenuação no feixe FSO e afeta diretamente a disponibilidade do sistema. A

absorção ocorre mais facilmente em alguns comprimentos de onda do que em outros. Isso faz com que a atmosfera tenha zonas transparentes (faixa de comprimentos de onda com absorções mínimas) chamadas de janelas de transmissão, portanto, comprimentos de onda adotados em sistemas FSO são basicamente escolhidos para coincidir com as janelas de transmissão atmosférica [24]. Na Figura 16 é ilustrada a transmitância atmosférica para a faixa do infravermelho.

Figura 16: Transmitância da atmosfera em função do comprimento de onda.



Fonte: Adaptado de [2].

Quando se transmite na faixa do infravermelho, a absorção se deve principalmente ao vapor d'água e ao dióxido de carbono. Para comprimentos de onda menores que 200 nm, a absorção devido ao gás oxigênio e ozônio é tão alta que praticamente não há transmissão.

Aerossóis naturais como poeira, partículas de sal marinho e derivados vulcânicos, como aerossóis criados por resíduos industriais, causam absorção em comprimentos de onda infravermelhos, mas não são significativos porque não são abundantes [24]. As regiões onde a absorção não é um problema (menos de 0,5 dB/km) são chamadas de janelas de absorção livre [24]. Na Tabela 2 as janelas consideradas livres de absorção são indicadas.

Tabela 2 - Janelas livres de absorção e seus comprimentos de onda.

Banda de transmissão	Janela livre de absorção (nm)
IR visível e muito próximo ao visível	400 – 1400
Próximo ao IR	1400 – 2700
IR médio	2700 – 4300 e 4500 – 5200
IR distante	8000 – 14000
IR extremo	16000 - 28000

Fonte: Adaptado de [25].

(c) Atenuação devido ao espalhamento: Quando uma onda eletromagnética atinge uma partícula, parte da radiação incidente é espalhada, fazendo com que a luz incidente se desvie de sua orientação inicial. A energia espalhada é chamada de radiação difusa. O espalhamento causa o redirecionamento de parte da energia incidente em partículas em suspensão. Logo, a intensidade da luz sofre redução, uma vez que a energia passa a ser distribuída em uma área de seção transversal que cresce com a distância percorrida. Existem diferentes mecanismos que levam a este processo, conforme as dimensões das partículas envolvidas em relação ao comprimento de onda. Levando em consideração estas particularidades, é definido o parâmetro de tamanho α , um número adimensional que relaciona o raio da partícula espalhadora com o comprimento de onda, representado por: $\alpha=2\pi r/\lambda$, em que r é o raio da partícula, λ é o comprimento de onda. Para $\alpha \ll 1$ tem-se o chamado de espalhamento de Rayleigh e para $\alpha \approx 1$ identifica-se o espalhamento de Mie. Caso contrário, para $\alpha \gg 1$ o espalhamento pode ser analisado usando óptica geométrica e costuma ser identificado como não-seletivo [20].

(d) Espalhamento de Rayleigh: Ocorre quando a luz viaja por sólidos e líquidos transparentes, mas se observa com maior frequência nos gases atmosféricos quando os raios das partículas forem muito menores que o comprimento de onda do feixe ($r \ll \lambda$). A atenuação originada por este fenômeno é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda ($1/\lambda^4$). Portanto, quanto menor o comprimento de onda incidente, maior é a quantidade de energia removida do feixe principal. Assim, a luz azul é mais espalhada que a vermelha, por apresentar menor comprimento de onda. No infravermelho

próximo, de interesse nos sistemas ópticos no espaço aberto, os efeitos do espalhamento de Rayleigh não são significativos [20]. O espalhamento de Rayleigh da luz solar na atmosfera é a principal razão pela qual o céu é azul.

(e) Espalhamento de Mie: Ocorre, principalmente, quando os raios das partículas atmosféricas forem da mesma ordem de grandeza ou maiores do que o comprimento de onda. À medida que os tamanhos das partículas se aproximam do comprimento de onda do feixe óptico, o espalhamento por partículas grandes torna-se mais dominante na direção original da onda incidente do que na direção da onda refletida. O Espalhamento de Mie é resultado da interação do infravermelho, em diferentes direções, com as partículas de neblina, poeira, neve, etc. É um fator de grande importância na avaliação da perda do feixe óptico transmitido [20].

(f) Espalhamento geométrico ou não-seletivo: Ocorre quando as partículas atmosféricas tiverem dimensões muito maiores do que o comprimento de onda da portadora óptica. Pelo fato de não possuir dependência do fator de atenuação com o comprimento de onda é chamado de não-seletivo, essa dependência apresenta-se como uma variação muito lenta para a perda de potência. Aparece nas camadas mais baixas da atmosfera e é causado principalmente por: gotas de chuva, neve, granizo, neblina densa [20].

(g) Cintilação: A mudança das intensidades da luz no tempo e no espaço no plano de um receptor que está detectando um sinal de um transmissor localizado à distância é definida como cintilação atmosférica. O sinal recebido no detector flutua como resultado das mudanças induzidas termicamente no índice de refração do ar ao longo do caminho de transmissão. Essas mudanças de índice fazem com que a atmosfera aja como uma série de pequenas lentes que desviam porções do feixe de luz para dentro e para fora do caminho de transmissão.

A escala de tempo dessas flutuações é da ordem de milissegundos, aproximadamente igual ao tempo que leva um volume de ar do tamanho do feixe para se mover pelo caminho e, portanto, está relacionado à velocidade do vento. Ao longo do dia, a cintilação pode mudar em mais de uma ordem de magnitude sendo a pior, ou mais cintilada, durante o meio-dia, quando a temperatura está mais alta. Alguns experimentos evidenciam que, dependendo das condições atmosféricas ao longo do caminho do feixe, a magnitude dos desvanecimentos

induzidos pela cintilação atinge um máximo que não continua a aumentar com a distância [16].

No geral, a cintilação causa flutuações rápidas na potência recebida e, no pior dos casos, resulta em altas taxas de erro no desempenho de um sistema FSO. No entanto, em alcances inferiores a 1 km, a maioria dos sistemas FSO tem alcance e margem dinâmica suficiente para compensar os efeitos de cintilação. Além disso, as instalações FSO com capacidade de 99,9% ou melhor disponibilidade, normalmente têm margem suficiente para compensar grandes quantidades de atenuação atmosférica e, portanto, têm margem mais do que suficiente para compensar a cintilação. Para enlaces mais longos e de baixa disponibilidade, os recursos do projeto do transceptor, como o uso de vários transmissores a laser, podem reduzir substancialmente os efeitos da cintilação.

(h) Interferência Solar: Um sistema FSO usa um receptor altamente sensível em combinação com lentes ópticas de grande abertura e, como resultado, a luz de fundo natural pode interferir potencialmente na recepção do sinal FSO. Esse é especialmente o caso dos altos níveis de radiação de fundo associados à luz solar intensa. Em algumas circunstâncias, a luz solar direta pode causar interrupções no link por períodos de vários minutos quando o sol está dentro do Campo de Visão (*Field of View* - FOV) do receptor. No entanto, os momentos em que o receptor é mais suscetível aos efeitos da iluminação solar direta podem ser facilmente previstos. Nos casos em que a exposição direta do receptor FSO não pode ser evitada, o estreitamento do FOV e/ou uso de filtros de luz de largura de banda estreita pode melhorar o desempenho do sistema. É importante lembrar que a interferência da luz solar refletida em direção ao receptor FSO também pode interferir na recepção do sinal óptico [16].

(i) Alinhamento: Um dos principais desafios dos sistemas FSO é manter o alinhamento do transceptor. Isso ocorre porque existem diversos fatores que podem levar ao desalinhamento entre o transmissor e o receptor, o que pode resultar na interrupção da transmissão de dados. Os transceptores FSO transmitem feixes de luz estreitos e altamente direcionais que devem incidir sobre a abertura de recepção do transceptor na extremidade oposta do enlace óptico.

Somando-se aos problemas de alinhamento, está o fato de que os receptores FSO têm um campo de visão limitado, que pode ser considerado o "cone de aceitação" do receptor e é muito semelhante ao cone de luz projetado pelo transmissor. Para que um enlace FSO funcione, é muito importante que o feixe de luz transmitido e o cone do campo de visão de recepção englobem o transceptor na extremidade oposta do enlace FSO [16].

Apesar das percepções em contrário, as estruturas que suportam sistemas FSO, como torres e edifícios, estão constantemente em movimento. Esse movimento é o resultado de uma variedade de fatores, incluindo expansão térmica, oscilação do vento e vibração. Devido à pequena largura de feixe transmitido e do FOV do receptor, a vibração pode afetar o alinhamento de um transceptor FSO. Esta oscilação é geralmente referida como "movimento de base". Em muitas situações, o movimento angular (azimute e elevação) representa um problema significativo para o alinhamento do transceptor, em vez do movimento linear [16].

O movimento da estrutura geralmente pode ser atribuído a uma das três classes: baixa, moderada e alta frequência. O movimento de baixa frequência é definido como movimento com períodos de minutos a meses e é dominado por variações de temperatura diurnas e sazonais. O movimento de frequência moderada tem períodos de segundos e inclui o movimento do edifício induzido pelo vento. O movimento de alta frequência tem períodos menores que um segundo e é geralmente referido como vibração, que inclui o movimento induzido por grandes máquinas (por exemplo, grandes ventiladores), bem como a atividade humana (por exemplo, caminhar, fechar portas).

2.2. Vibração

O movimento vibratório ou vibração é definido como a variação ou mudança de configuração de um sistema em relação ao tempo, em torno de uma posição de equilíbrio estável, sua característica fundamental é a periodicidade, com movimento frequente harmônico simples.

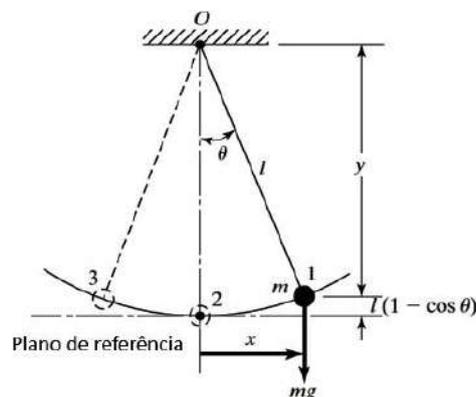
Estruturas mecânicas, quando submetidas à ação de forças que variam ao longo do tempo, principalmente periódicas, respondem variando seus estados de equilíbrio e, como consequência, apresentam alterações de configuração que interferem no seu funcionamento normal [26].

2.2.1. Vibração mecânica

A vibração de um sistema envolve a conversão de energia potencial em energia cinética e vice-versa. Se o sistema for amortecido, alguma energia é dissipada em cada ciclo de vibração, a qual deve ser repostada por uma fonte externa se um estado de vibração permanente deva ser mantido [26].

O intervalo de tempo que o sistema completa um ciclo inteiro de movimento é chamado de período de vibração (**T**), e seu inverso é a frequência de vibração (**f**) [27]. O caso mais simples de movimento periódico é mostrado na Figura 17.

Figura 17: Movimento de Pêndulo Simples.



Fonte: Adaptado de [27].

O movimento do pêndulo da Figura 17 é representado por dois sistemas de coordenadas. São necessárias duas coordenadas, no primeiro sistema, para determinar exatamente a posição do pêndulo (x e y), sua velocidade e sua aceleração. Já no segundo sistema, apenas a coordenada θ representa completamente a posição do pêndulo, sua velocidade e sua aceleração.

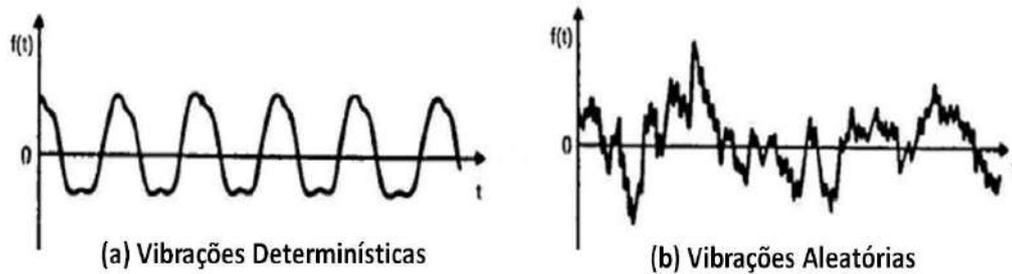
Nada impede que o sistema xy seja utilizado. Apenas ele apresentará um número de equações maior que o sistema mais simples. Nele deve ser incluída a equação de restrição (condição de contorno) $x^2 + y^2 = l^2$. Com a utilização de θ , apenas uma equação descreverá o movimento do sistema.

Este sistema apresenta um número mínimo de coordenadas, igual ao número de graus de liberdade, necessárias para representar completamente o movimento do sistema. Por isso, é chamado de sistema de coordenadas generalizadas. O número de graus de liberdade é sempre igual ao número de coordenadas utilizado menos o número de equações de restrição. Assim sendo, um movimento descrito em um sistema de coordenadas generalizadas não apresenta equações de restrição [28].

Um movimento vibratório pode ser linear ou não linear. Para o movimento vibratório linear, é válido o princípio da superposição e o tratamento matemático é relativamente simples. Em vibrações não lineares, o princípio da superposição não é válido e o tratamento matemático é mais complexo. Para grandes amplitudes de oscilação, mesmo os sistemas considerados lineares apresentam alguma não linearidade, a qual cresce com o aumento das amplitudes, fazendo com que os resultados obtidos com um modelo matemático linear se afastem cada vez mais dos valores reais [28].

As vibrações podem ser categorizadas com base em sua previsibilidade, conforme mostrado na Figura 18. Na Figura 18-a tem-se as Vibrações Determinísticas, onde a magnitude da excitação é conhecida em todos os momentos, possibilitando prever a resposta. Em contrapartida, as Vibrações Aleatórias possuem uma magnitude de excitação que não pode ser prevista em determinado momento, resultando em uma resposta imprevisível e descrita apenas em termos estatísticos, conforme ilustrado na Figura 18-b [28].

Figura 18: Vibração quanto à previsibilidade de ocorrência.



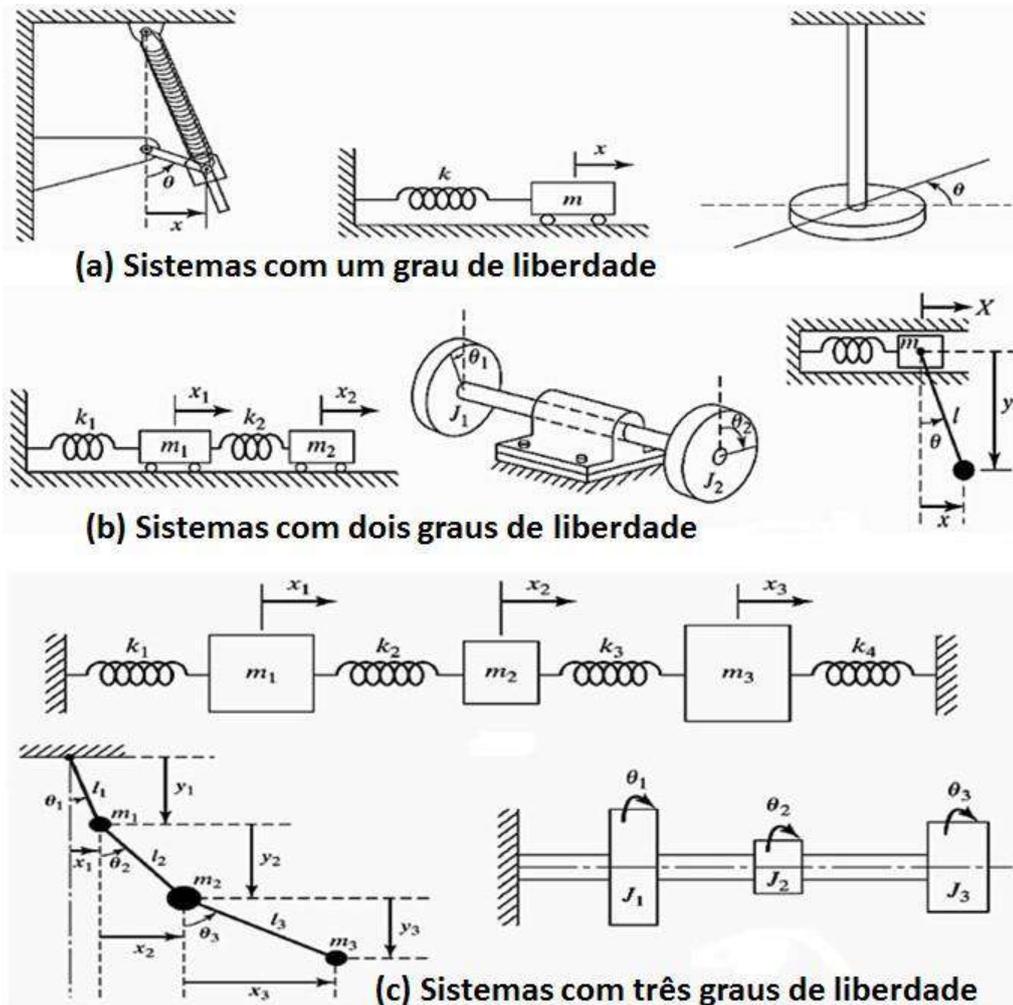
Fonte: Adaptado de [28].

Vibrações que não recebem ação de forças ou torques exteriores ao sistema são classificadas como vibrações naturais ou livres, contudo, se o sistema receber ação de forças exteriores, então as vibrações são classificadas como forçadas. Um sistema em vibração livre irá oscilar em uma ou mais de suas frequências naturais [28].

Os sistemas vibratórios podem ser agrupados em discretos e contínuos. Os sistemas discretos são aqueles que podem ser subdivididos em partes de forma que cada uma delas possua um determinado número de graus de liberdade, levando a um número finito de graus de liberdade do sistema global, sendo também chamados de sistemas com parâmetros concentrados. Os sistemas contínuos não podem ser divididos, possuindo um número infinito de graus de liberdade sendo também conhecidos como sistemas com parâmetros distribuídos [28].

Para que o movimento vibratório de um sistema seja perfeitamente descrito (posição, velocidade, aceleração) torna-se necessário que se escolha um sistema de coordenadas. Então, em relação a este sistema de referência, escolhido de forma arbitrária, o número mínimo de coordenadas independentes necessárias para descrever completamente o movimento de todas as partes que compõem o sistema vibratório é denominado de Graus de Liberdade. A Figura 19 mostra exemplos esquemáticos de sistemas com um (a), dois (b) e três (c) graus de liberdade [28].

Figura 19: Sistemas com um (a), dois (b) e três (c) graus de liberdade.



Fonte: Adaptado de [28].

Um sistema com um grau de liberdade, mostrado na Figura 19-a, é um sistema mecânico que pode ser descrito por apenas uma variável independente. Essa variável pode ser a posição, a velocidade ou a aceleração do sistema. Em outras palavras, um sistema com um grau de liberdade tem apenas um modo de vibração [27].

Exemplos típicos de sistemas com um grau de liberdade incluem um pêndulo simples, um bloco em uma mola, um sistema massa-mola e um sistema de uma partícula em movimento ao longo de uma linha reta. A análise de sistemas com um grau de liberdade é usada em engenharia para compreender o comportamento vibratório de estruturas e máquinas [27].

A Figura 19-b mostra um sistema mecânico com dois graus de liberdade, que pode ser caracterizado por duas variáveis independentes que descrevem sua posição, velocidade ou aceleração em dois eixos distintos. O que significa que, o sistema é capaz de vibrar em dois modos diferentes [27].

Sistemas com dois graus de liberdade têm diversos exemplos, tais como um pêndulo duplo, um sistema composto por duas massas interligadas por uma mola e um sistema massa-mola com duas molas e duas massas, dentre outros. O estudo desses sistemas é frequentemente utilizado para compreender o comportamento vibratório de estruturas complexas, como edifícios e pontes suspensas [27].

A modelagem e análise de sistemas com dois graus de liberdade também são importantes para o desenvolvimento de sistemas de controle eficazes para evitar ressonância e reduzir a vibração excessiva [27].

Um sistema mecânico com três graus de liberdade, exemplificado na Figura 19-c, pode ser caracterizado por três variáveis independentes, como a posição, velocidade ou aceleração do sistema ao longo de três eixos ortogonais distintos. Em resumo, um sistema com três graus de liberdade apresenta três modos de vibração independentes [27].

Exemplos comuns de sistemas com três graus de liberdade incluem um sistema massa-mola com três molas e três massas, um pêndulo triplo e um sistema de três massas acopladas por molas. A análise de sistemas com três graus de liberdade é frequentemente usada em engenharia e física para entender o comportamento vibratório de estruturas mais complexas, como aviões e satélites [27].

A modelagem e a análise de sistemas com três graus de liberdade são importantes para o desenvolvimento de sistemas de controle eficientes para evitar ressonância e reduzir a vibração excessiva, bem como para a compreensão do comportamento dinâmico de sistemas mecânicos em geral [27].

2.2.2. Características das Vibrações

A vibração mecânica de um objeto é causada por uma força de excitação, que pode ser aplicada externamente ao objeto ou pode ser aplicada também dentro do objeto. Porém, será observado que as características da vibração de um dado objeto são completamente determinadas pela força de excitação, sua direção e movimento. Essa é a razão porque uma análise mais detalhada da vibração pode determinar as forças de excitação atuando em um determinado sistema vibratório [26].

Os efeitos produzidos pelas vibrações mecânicas, dependem fundamentalmente das seguintes características: frequência, amplitude, fase e direção.

(a) Frequência: A frequência é o número de vezes por segundo que o ciclo completo de oscilação é realizado e é medido em Hertz (**Hz**). O inverso da frequência é o Período (**T**), que é o tempo necessário para a formação de um comprimento de onda, medido em segundos (**s**). Já o comprimento de onda é a distância entre o início e o fim de um ciclo de onda, medido em metros (**m**). A frequência indica o número de vezes que o objeto ou equipamento vibra por segundo. As vibrações mecânicas, geralmente, não possuem uma determinada frequência, mas sim um conjunto de vibrações e diferentes frequências. Todo objeto tem uma frequência natural que, em um contexto de engenharia, é a frequência em que os sistemas vibratórios com uma massa móvel e somente um grau de liberdade de movimento vibra após uma excitação única [26].

Se uma força impõe vibrações periódicas próximas à frequência natural em um sistema, este reage com amplitudes essencialmente aumentadas. A força inicial transfere energia para o sistema a cada oscilação, o que significa que a amplitude forçadamente aumenta a cada oscilação. No caso de sistemas vibratórios não amortecidos, pode causar um acréscimo descontrolado na amplitude, levando o sistema à ressonância, que consiste em um aumento perigoso das oscilações do sistema. Teoricamente, se o sistema não for amortecido, as amplitudes de oscilação seriam infinitas [26].

(b) Amplitude: A amplitude do ponto de vista das vibrações é quanto movimento uma massa pode ter a partir de uma posição neutra, é a intensidade da vibração e indica sua gravidade. A amplitude de uma vibração pode ser medida com base no deslocamento produzido pela referida vibração. Sendo um movimento, é possível determiná-lo em termos de velocidade ou aceleração. Tendo-se em conta a facilidade de medição, é geralmente determinado em função da aceleração (variação da velocidade de zero ao máximo em cada ciclo), sendo a unidade (m/s^2) utilizada para a medição. Ao detectar a aceleração vibratória, é importante notar que o movimento não é limitado somente por esse parâmetro, já que é possível transformar o sinal de aceleração em velocidade e deslocamento [26].

(c) Fase: A fase é a medida da diferença de tempo entre duas ondas senoidais. Apesar de a fase ser considerada uma diferença de tempo, ela é sempre medida em termos de ângulo, em graus ou radianos. Essa é uma normalização de tempo que toma como referência um ciclo completo da onda sem considerar seu verdadeiro período de tempo. A diferença de fase entre duas formas de onda é chamada de deslocamento de fase. Uma mudança de fase de 360° graus é um atraso de um ciclo completo ou período da forma de onda, o que não é realmente uma mudança. Um deslocamento de 90 graus é um deslocamento de $\frac{1}{4}$ do período da onda e assim por diante. A mudança de fase pode ser considerada positiva ou negativa; isso significa que uma forma de onda pode estar atrás de outra ou pode estar à frente de outra. Esses fenômenos são chamados de atraso de fase e avanço de fase, respectivamente [26].

(d) Direção: As vibrações mecânicas são ondas que necessitam de um meio material para se propagar, ou seja, sua propagação envolve o transporte de energia cinética e potencial e depende da elasticidade do meio. Por isso, não são capazes de se propagar no vácuo. São ondas unidimensionais quando se propagam em uma única direção e bidimensionais quando se propagam em duas direções simultaneamente. Quanto à direção de vibração, são consideradas ondas transversais quando sua direção de vibração é perpendicular à sua direção de propagação e ondas longitudinais, quando sua direção de vibração coincide com sua direção de propagação [26].

O movimento vibratório é comumente denominado como movimento de base, e pode ser categorizado em diferentes faixas de frequência, como baixa, média e alta frequência. O movimento de baixa frequência é caracterizado por períodos que variam de minutos a meses, e é dominado pelas flutuações de temperatura diárias e sazonais. Já o movimento de média frequência tem períodos de alguns segundos e é influenciado pelo movimento das construções induzido pelo vento. Por fim, o movimento de alta frequência possui períodos inferiores a 1 segundo, e é comumente referido como vibração, incluindo tanto o movimento gerado por grandes máquinas quanto atividades humanas [29].

Tabela 3 - Fontes de vibração mais comuns.

Fonte de Vibração	Frequência (Hz)	Amplitude (Pol)
Compressores de ar	4 - 20	10^{-2}
Ferramentas elétricas	5 - 40	10^{-3}
Serviços de construção	7 - 40	10^{-4}
Tráfego de pedestres	0,55 - 6	10^{-5}
Sons / Acústicos	100 - 10K	10^{-2} até 10^{-4}
Transformadores	50 - 400	10^{-4} até 10^{-5}
Perfuratriz	Acima de 20	10^{-2} até 10^{-5}
Elevadores	Acima de 40	10^{-3} até 10^{-5}
Correntes de ar	Depende da classe do vento	Depende da classe do vento

Fonte: Adaptado de [29].

O movimento de base é um termo utilizado para descrever o movimento vibratório presente no solo ou em estruturas, que pode ser causado por diversos fatores, como o vento, as ondas do mar, o tráfego de veículos ou atividades humanas. Ele é importante porque pode afetar a estabilidade e o desempenho de edifícios, pontes, túneis e outras estruturas, bem como influenciar a propagação de ondas sísmicas em caso de terremotos. O movimento de base pode ser medido e analisado por meio de instrumentos de monitoramento, como sensores de aceleração, para que possam ser tomadas medidas de mitigação ou precauções necessárias [29].

2.3. Vento em estruturas verticais

O vento é o movimento das correntes de ar em relação à superfície do planeta Terra. O vento, juntamente com a pressão atmosférica, são as duas variáveis físicas mais importantes que afetam o clima na Terra. O vento é produzido pelo movimento rotacional da Terra, pelo efeito do Sol criado pela entrada e saída dos raios solares pela nossa atmosfera e pelas diferenças de pressão atmosférica causadas pelo ar quente e frio.

O movimento do ar na troposfera (zona inferior da atmosfera) é o mais significativo e tem duas componentes: a vertical, de 10 km ou mais e cujo movimento ascendente ou descendente compensa a horizontal, e a horizontal, que atinge milhares de quilômetros e é a mais importante de ambos. A observação de um tornado é muito apropriada para compreender estes conceitos, pois enquanto o seu turbilhão começa a girar a uma velocidade considerável, com as conhecidas consequências destrutivas, o mesmo diminui à medida que o vento aumenta, uma vez que as dimensões do cone aumentam na largura [30].

As estruturas sujeitas a ação do vento devem ser avaliadas em três aspectos distintos [31]:

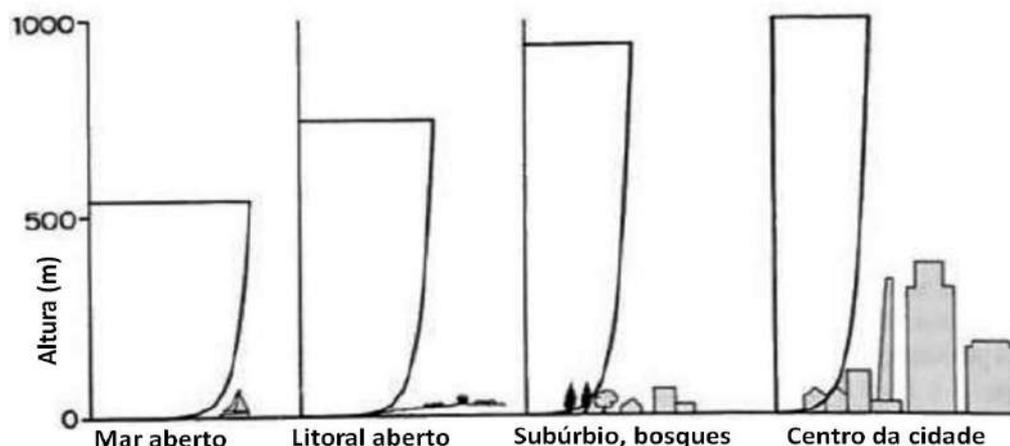
(a) Impacto no entorno: Quando o vento passa por uma estrutura, ocorrem mudanças no seu movimento e surgem componentes em várias direções. Essas componentes podem afetar objetos próximos, causando danos a outras estruturas ou causando desconforto aos pedestres que transitam nas proximidades da estrutura.

(b) Cargas de vento aplicadas às fachadas: Algumas estruturas possuem formas geométricas complexas, tornando-se difícil a definição da distribuição de carga nas fachadas. Nestes casos, é recomendável realizar testes em túnel de vento para determinar com precisão a distribuição das cargas.

(c) Cargas de vento aplicadas à estrutura: As cargas primárias são as que determinam o deslocamento da estrutura, e a análise dessas cargas é fundamental para definir o sistema estrutural que impedirá o deslocamento lateral de edifícios, torres e outras estruturas verticais.

As características do vento dependem de alguns fatores, como topografia do terreno, a dimensões e forma dos obstáculos naturais e artificiais e a variação de temperatura. Por conta disso, o vento apresenta um gradiente de velocidade na direção vertical, tendo velocidade aproximada de zero na superfície e uma velocidade alta em grandes altitudes, como mostrado na Figura 2.

Figura 20: Variação do vento em relação à altura dos obstáculos.



Fonte: Adaptado de [31].

Na atmosfera, há uma camada conhecida como camada limite, na qual a topografia do terreno exerce influência na velocidade do vento; a maioria das atividades humanas ocorre abaixo desta camada.

Foi realizado um estudo que envolveu o cálculo dos coeficientes para uma velocidade do vento de 50 m/s. Os resultados revelaram que os coeficientes utilizados para calcular a velocidade do vento são influenciados pela rugosidade do terreno. Contudo, é fundamental classificar o terreno em uma categoria específica antes de calcular a pressão do vento [31]. O estudo apresenta a equação logarítmica (2.3.1) como uma ferramenta para determinar a variação da velocidade do vento em função da altura.

$$\bar{V}_z = \frac{u^*}{0,4} \left[\log_e \left(\frac{z}{z_0} \right) + 5,75 \left(\frac{z}{z_g} \right) - 1,88 \left(\frac{z}{z_g} \right)^2 - 1,33 \left(\frac{z}{z_g} \right)^3 + 0,25 \left(\frac{z}{z_g} \right)^4 \right] \quad (2.3.1)$$

Sendo \bar{V}_z a velocidade do vento a uma altura Z acima da superfície.

A Tabela 4 mostra os coeficientes para as diversas características do terreno, em que Z_0 é o coeficiente de rugosidade do terreno; u^* é a velocidade de atrito; Z_g é a altura da camada limite da atmosfera.

Tabela 4 - Coeficientes para as diversas características de terreno.

Categoria do Terreno	Z_0 (m)	u^* (m/s)	Z_g (m)
1	0,002	1,204	2006
2	0,02	1,385	2308
3	0,2	1,626	2710
4	2	1,963	3272

Fonte: Adaptado de [31].

Em geral, a divisão das zonas de velocidade do vento de uma determinada área e em determinado país é feita por meio de mapas de zonas de vento. No entanto, devido à baixa resolução dos mapas das zonas de vento, modelos computacionais e softwares de análise estrutural são utilizados para uma maior precisão nos cálculos.

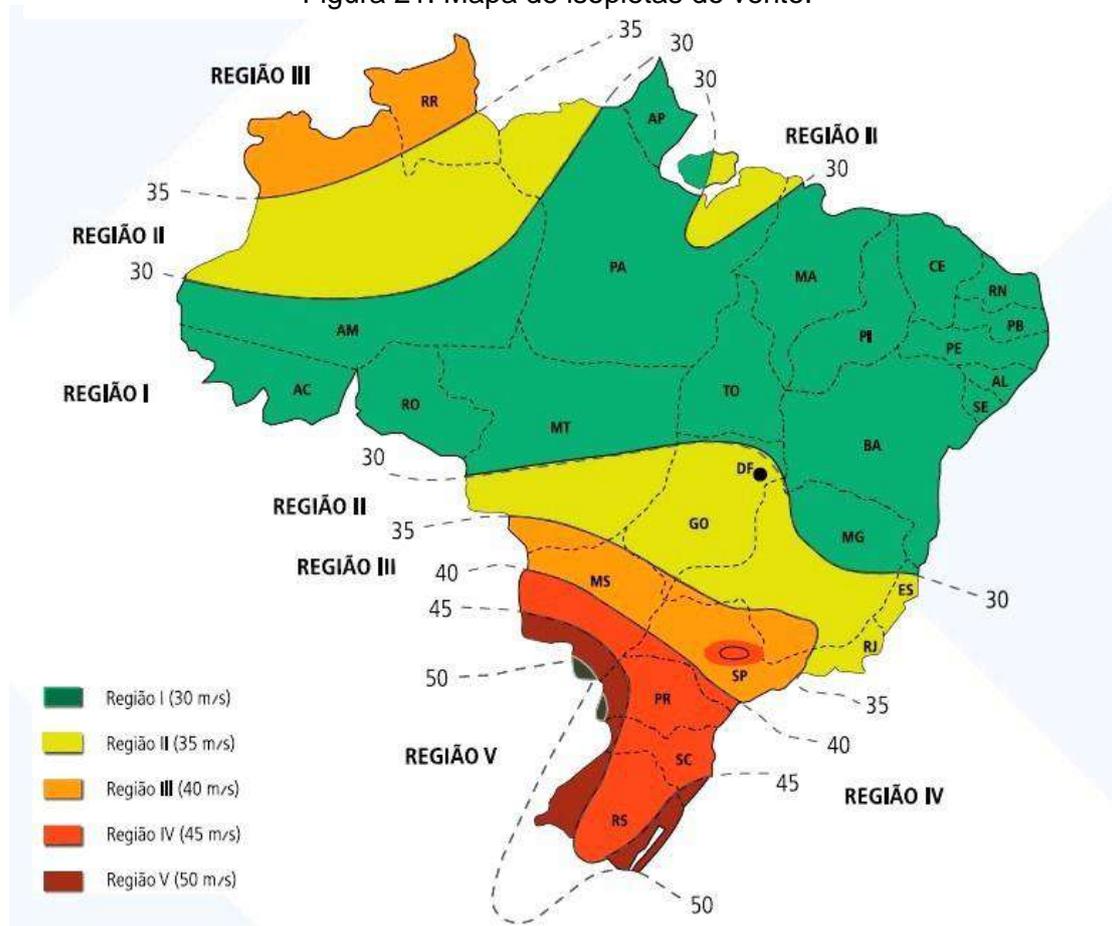
Estruturas verticais de pequena altura, como por exemplo habitações unifamiliares, não são consideradas nos cálculos de efeito de vento. Apesar desta desconsideração, o dimensionamento estrutural não é prejudicado. No entanto, estruturas de grandes alturas, prédios, torres, etc devem considerar o efeito do vento na estrutura, pois nestes, seu efeito é significativo.

2.3.1. Forças do vento segundo a NBR 6123

De acordo com a norma NBR 6123 [32], para calcular as forças do vento no Brasil, é necessário, em primeiro lugar, determinar a velocidade básica do vento, V_0 (m/s). Essa velocidade é definida como a velocidade de uma rajada de 3 segundos, que ocorre pelo menos uma vez a cada 50 anos em média, em campo aberto e plano a 10 metros acima do solo. A velocidade básica do vento varia dependendo da região em estudo e é assumido que o vento sopra de qualquer direção horizontal.

A Figura 21 exibe a variação de V_0 para as diferentes regiões do Brasil, mediante isopletas, ou seja, as linhas no mapa em que o vento possui a mesma velocidade básica.

Figura 21: Mapa de isopletas do vento.



Fonte: Adaptado de [33].

Ao multiplicar-se V_0 pelo fator topográfico S_1 , pelo fator de rugosidade do terreno S_2 e pelo fator estatístico S_3 , obtém-se a velocidade característica do vento V_k para uma determinada região específica, resultando então na Equação (2.3.2). Estes fatores possibilitam a correção da velocidade básica em função da topografia, rugosidade, grau de importância da estrutura e ao terreno onde ela será implantada [32].

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (m/s) \quad (2.3.2)$$

Sendo V_k é a velocidade característica do vento.

Conforme a norma NBR 6123 [32], o fator topográfico S_1 leva em conta as variações do relevo do terreno. Este fator é igual a 1,0 para terrenos planos ou fracamente acidentados, e igual a 0,9 para vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção. Quando a estrutura vertical se localizar no topo de taludes ou de morros, o fator topográfico S_1 será função da altura da edificação (Z) e da diferença de nível entre a base e o topo do talude/morro. Se o ângulo de inclinação do talude/morro for superior a 3° , S_1 será calculado como mostra a Tabela 5. Se o ângulo de inclinação do talude/morro for igual ou inferior a 3° , o fator S_1 será igual a 1,0.

Tabela 5 - Fator Topográfico S_1 em função da altura.

Inclinação do talude/morro (θ)	Fator topográfico (S_1)
$\theta \leq 3^\circ$	$S_1(z) = 1,0$
$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$	$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{Z}{d}\right) \tan(\theta - 3^\circ) \geq 1$
$\theta \geq 45^\circ$	$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{Z}{d}\right) 0,31 \geq 1$

Fonte: [32].

O fator de rugosidade do terreno S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da estrutura em consideração.

Em terrenos com superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medidas na direção e sentido do vento incidente, não é considerada nenhuma cota média do topo dos obstáculos. Em terrenos nivelados com poucos obstáculos isolados, como árvores e edificações baixas, é considerado um valor médio de altitude menor ou igual a 1 m do topo dos obstáculos.

Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, como tapumes vegetais e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas, têm um valor médio de altitude menor ou igual a 3 m do topo dos obstáculos. Para terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada, deve ser considerado um valor médio de

altitude menor ou igual a 10 m do topo dos obstáculos. Para terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados, deve ser considerado um valor médio de altitude de 25 m. A Tabela 6 mostra as cotas médias por categoria e características do terreno [32].

Tabela 6 - Cotas médias por categoria e características do terreno.

Categoria	Características	Cota média do topo dos obstáculos
I	Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medidas na direção e sentido do vento incidente.	-
II	Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.	$\leq 1,0$ m
III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.	3,0 m
IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Esta categoria também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser considerados na Categoria V.	10 m
V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.	25 m

Fonte: [32].

É necessário considerar os fatores de rajada (F_r) em partes das edificações e seus elementos para calcular as ações do vento, levando-se em conta os intervalos de tempo para cálculo da velocidade média de 3 s, 5 s e 10 s, respectivamente, correspondentes às diferentes classes de edificação [32]:

Classe A: Para toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m considerar intervalo de tempo (t) para cálculo da velocidade média de 3 s e $F_r = 1$.

Classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m, $t = 5$ s e $F_r = 0,98$.

Classe C: Para toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m, considerar $I_t = 10$ s e $F_r = 0,95$.

O fator rugosidade do terreno S_2 usado no cálculo da velocidade do vento em uma altura z acima do nível geral do terreno é obtido pela expressão (2.3.3):

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (2.3.3)$$

Em que: b e p são valores que variam em função da categoria do terreno e são definidos e tabelados pela norma NBR 6123 [32].

A norma NBR 6123 [32] também define que o fator estatístico S_3 deve ser baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança exigido e a vida útil da edificação. Na ausência de uma norma específica sobre segurança nas edificações, ou de indicações correspondentes na norma estrutural, os valores mínimos para S_3 são indicados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores mínimos do fator estatístico S_3 .

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc).	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc).	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos Grupos 1 a 3 durante construção.	0,83

Fonte: [32].

2.3.2. Vibração nas estruturas verticais devido ao vento

Quando a força do vento atinge uma determinada edificação, este gera vibrações na estrutura da mesma devido à intensidade da força e aos movimentos. As vibrações mais comuns são: vibrações causadas pela energia cinética das rajadas, martelamento, vibrações por desprendimento dos vórtices e instabilidade aerodinâmica por galope [34].

(a) Vibrações Causadas Pela Energia Cinética das Rajadas: Quando ocorre uma rajada de vento, há um aumento repentino na pressão dinâmica média. Com o tempo, mais rajadas surgem, fazendo com que a pressão dinâmica varie, mas eventualmente retorne ao valor médio. No entanto, essas observações não indicam uma periodicidade das rajadas ou duração constante, portanto, o vento não pode ser considerado como uma fonte de força periódica. Em vez disso, o vento é uma série de cargas e descargas com valores e durações variáveis, separadas por intervalos irregulares de tempo [34].

(b) Martelamento: O fenômeno dinâmico de martelamento ocorre quando uma edificação está situada na esteira do lado oposto ao lado do qual sopra o vento (sotavento) de apenas uma ou de poucas edificações de dimensões semelhantes, as quais estão situadas em regiões convenientes. Este fenômeno consiste em golpes aplicados à estrutura, compassadamente, por turbilhões gerados nas edificações do lado de onde sopra o vento (barlavento), com uma frequência predominante [34].

(c) Vibrações por Desprendimento dos Vórtices: Em corpos não aerodinâmicos, conhecidos como corpos rombudos, ocorre um desprendimento intermitente de vórtices, com uma frequência bem definida, conhecidos como vórtices de *Kármán*. Esses vórtices geram forças periódicas oblíquas em relação à direção do vento médio. Ao analisar as componentes dessas forças periódicas, as forças alternadas na direção do vento ocorrem na frequência de desprendimento individual dos vórtices, enquanto as forças laterais ocorrem na frequência de desprendimento de cada par de vórtices. Ambas as componentes das forças tendem a produzir oscilações nas direções em que atuam [34].

(d) Instabilidade Aerodinâmica por Galope: O fenômeno de instabilidade aerodinâmica por galope pode dar início a oscilações em estruturas ou elementos estruturais leves e flexíveis com breve amortecimento. Na instabilidade por galope, com o aumento da velocidade do vento, aumenta-se a amplitude da oscilação na direção transversal a este. Durante a oscilação, o ângulo de incidência do vento em relação ao corpo oscilante ficará mudando constantemente. Caso haja uma força na direção e sentido do movimento do corpo, em resposta a esta incidência variável, a energia será retirada do vento e a oscilação se manterá [34].

Segundo a norma NBR 6118 [35], a análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais. Para assegurar comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, deve-se afastar o máximo possível a frequência própria da estrutura (f) da frequência crítica (f_{crit}), que depende da destinação da respectiva edificação. A condição: $f > 1,2 f_{crit}$, deve ser satisfeita, onde f é a frequência natural da estrutura [35].

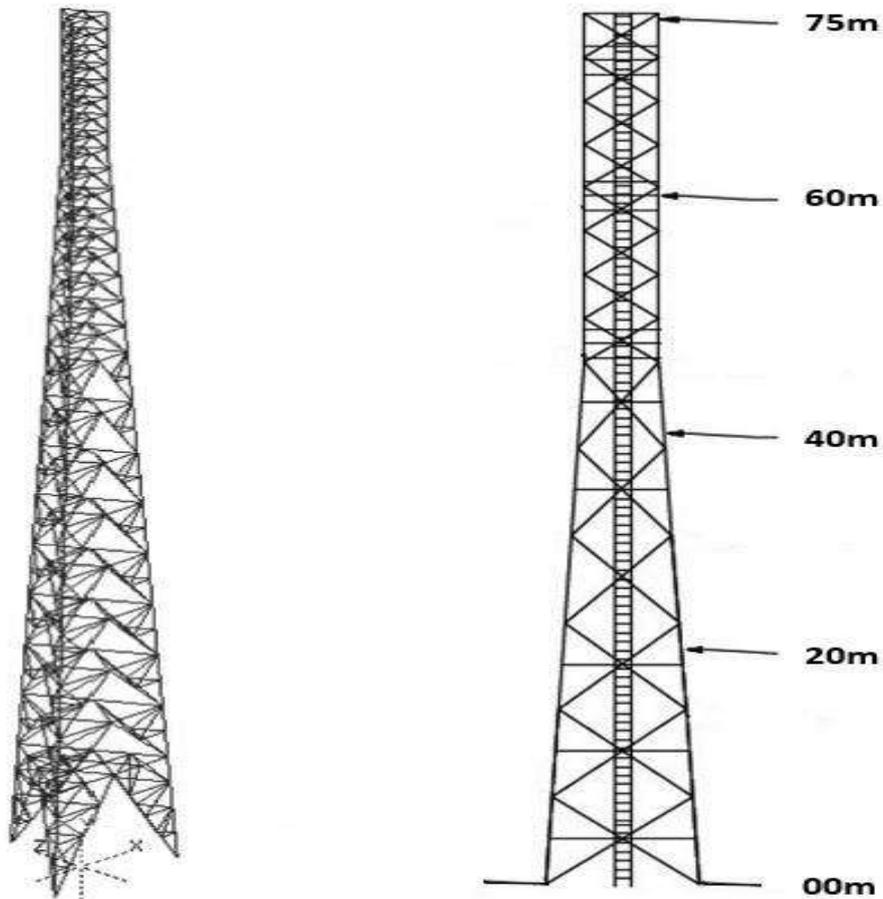
Quando a ação crítica é originada por uma máquina, a frequência crítica passa a ser a da operação da máquina. Nesse caso, pode não ser suficiente afastar as duas frequências, própria e crítica. Principalmente quando a máquina é ligada, durante o seu processo de aceleração, é usualmente necessário aumentar a massa ou o amortecimento da estrutura para absorver parte da energia envolvida [35].

3. Materiais e Métodos

3.1. Estrutura vertical

Para estudar as vibrações em baixa-frequência, nos módulos transmissor e receptor de um sistema FSO, foi utilizado um sistema de coleta de dados de vibração baseado em Arduino. Estas vibrações oriundas de eventos naturais como vento, chuva, dilatação térmica, foram coletadas no topo de uma torre autoportante de 75 metros de altura com seção transversal triangular equilátera, com áreas delimitadas para instalação de antenas, de propriedade da empresa SKY Banda Larga, localizada na cidade de João Pessoa-PB. O perfil da torre é apresentado na Figura 22.

Figura 22: Perfil da torre analisada.



Fonte: Adaptado de SKY Banda Larga.

Esta torre foi projetada e fabricada pela Seccional Brasil S/A para a Acom telecomunicação, adquirida e reforçada pela SKY Banda Larga com os seguintes parâmetros: vento operacional de 100 km/h, velocidade básica do vento V_0 de 30 m/s, fator S_1 igual a 1,0, fator S_2 para rugosidade do terreno de categoria III e edificação de classe C, fator S_3 igual a 1,1 e carga máxima de 18 m², após reforço estrutural realizado em setembro de 2015, incluindo um coeficiente de arrasto da estrutura igual a 1,6. A Figura 23 mostra a placa de identificação da torre SKY.

Figura 23: Placa de identificação da torre da SKY.

PROPRIETÁRIO: SKY BANDA LARGA		 SETEH ENGENHARIA LTDA Av. Cascavel - n. 419 Qd A Lts 15 E 16 Setor Castelo Branco CEP: 74405-030 Goiânia - Goiás - Brasil TEL: (62) 3291-1118 www.seteh.com.br																	
ENDEREÇO DO SITE: Rua Minas Gerais, JOÃO PESSOA-PB																			
LATITUDE:	7° 6' 52"S	LONGITUDE:	34° 51' 21,1"W																
		ALTITUDE:	41 m																
DATA DA INSTALAÇÃO:	09/2000	FABRICANTE:	ACOM Comunicações S.A.																
DATA DO REFORÇO:	09/2015	EXECUTANTE:	SETEH ENGENHARIA LTDA																
ALTURA:	75m	PESO DO REFORÇO:	323,30 kg																
		CÓD. DA TORRE:	TE-7530																
V_k <table border="1"> <tr><td>$V_0 =$</td><td>30 m/s</td></tr> <tr><td>$S_1 =$</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>$S_2 =$</td><td>CAT. III CLASSE "C"</td></tr> <tr><td>$S_3 =$</td><td>1,0</td></tr> </table>		$V_0 =$	30 m/s	$S_1 =$	1,0	$S_2 =$	CAT. III CLASSE "C"	$S_3 =$	1,0	V_k <table border="1"> <tr><td>$V_0 =$</td><td>30 m/s</td></tr> <tr><td>$S_1 =$</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>$S_2 =$</td><td>CAT. III CLASSE "C"</td></tr> <tr><td>$S_3 =$</td><td>1,1</td></tr> </table>		$V_0 =$	30 m/s	$S_1 =$	1,0	$S_2 =$	CAT. III CLASSE "C"	$S_3 =$	1,1
$V_0 =$	30 m/s																		
$S_1 =$	1,0																		
$S_2 =$	CAT. III CLASSE "C"																		
$S_3 =$	1,0																		
$V_0 =$	30 m/s																		
$S_1 =$	1,0																		
$S_2 =$	CAT. III CLASSE "C"																		
$S_3 =$	1,1																		
CONSIDERADO NO REFORÇO																			
CARGA MÁXIMA ORIGINAL INCLUINDO COEFICIENTE DE ARRASTO: 8,54m ²																			
CARGA MÁXIMA APÓS O REFORÇO INCLUINDO COEFICIENTE DE ARRASTO: 18,00m ² (EST)																			

Fonte: SKY Banda Larga.

Na estrutura desta torre são utilizados perfis de montantes e diagonais feitos em cantoneiras em "L", ambos em aço ASTM A36 de alta resistência mecânica, com tratamento de galvanização a quente de alta resistência à corrosão e com pintura antiferrugem de alta temperatura e conectados com parafusos em aço ASTM A325.

Esta torre tem basicamente dois tipos de cargas: cargas causadas pelo vento e causada pelo peso próprio da estrutura. Outros carregamentos, como por exemplo, o causado por pessoal e equipamentos de montagem, podem ocorrer, mas não são considerados. A Tabela 8 mostra o carregamento atual da torre da SKY de 75 m.

Tabela 8 - Tabela de carga da torre da SKY - 75 m.

ALTURA (m)	QTD	TIPO ANTENA	MODELO ANTENA	DIMENSÕES (m)	AZIMUTE (N.V)	AEV	AEV COM ARRASTO
25,7	1	MINI-LINK	N / ESPECIFICADO	0,30	120°	0,07	0,11
33,2	1	MINI-LINK	N / ESPECIFICADO	0,60	210°	0,28	0,45
43,0	1	2G	N / ESPECIFICADO	1,30x0,17	80°	0,22	0,27
46,7	1	2G	N / ESPECIFICADO	1,30x0,17	170°	0,22	0,27
43,0	1	3G/4G	APXVLL13-C-A20	1,39x0,35	80°	0,49	0,58
43,0	1	3G/4G	APXVLL13-C-A20	1,39x0,35	170°	0,49	0,58
43,0	1	3G/4G	APXVLL13-C-A20	1,39x0,35	270	0,49	0,58
36,2	1	4G	ATD451602	1,39x0,32	20°	0,44	0,53
36,2	1	4G	ATD451602	1,39x0,32	140°	0,44	0,53
36,2	1	4G	ATD451602	1,39x0,32	240°	0,44	0,53
58,9	1	MINI-LINK	SCX4-W71 AH	1,20	175,36°	1,13	1,81
62,8	1	MINI-LINK	SBX4-190 AH	1,20	199,21°	1,13	1,81
68,7	1	MINI-LINK	SCX2-190 BH	0,60	235,68°	0,28	0,45
70,9	1	MINI-LINK	SCX2-190 AH	0,60	213,61°	0,28	0,45
75,0	1	MINI-LINK	SC2-190 AXMC	0,60	9,69°	0,28	0,45
Total AEV (m):						6,70	9,43

Fonte: Autoria Própria.

A torre da SKY está localizada na costa nordeste brasileira, na cidade de João Pessoa, estado da Paraíba, em uma região próxima ao mar, com constante incidência de ventos predominantemente de direção leste-sudeste, e que se distribuem na torre com velocidades entre 5 e 20 km/h [5]. Na Figura 24, são mostradas as 03 faces da torre.

Figura 24: Faces da torre da SKY.



Fonte: Autoria Própria.

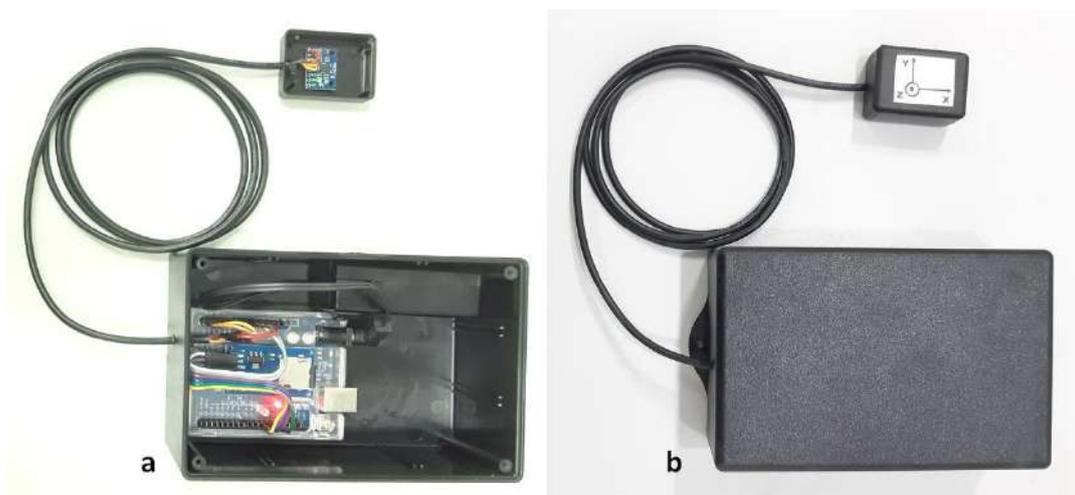
3.2 Coleta de dados

Para a captura dos dados relacionados à vibração, foram feitas pesquisas sobre os sensores comerciais mais adequados que poderiam ser utilizados no sistema, tais como, sensores de pressão e os inúmeros acelerômetros (sensor de aceleração) disponíveis no mercado. Foi desenvolvido um sistema de coleta de vibração (Vibrômetro) baseado em um sensor acelerômetro MPU6050, compatível com a plataforma Arduino UNO, por ter a relação custo-benefício mais favorável, pois o dispositivo é relativamente barato em relação ao custo de vibrômetros comerciais.

Os dados de vibração recebidos pelo sensor acelerômetro são armazenados em cartão de memória (micro SD) e encaminhados para a análise dos valores de vibração em pontos específicos do protótipo sob diferentes condições de trabalho.

Os dados coletados pelo sensoriamento são analisados e processados por meio de filtros no software MATLAB., com o intuito de comprovar os valores medidos de amplitude e frequência de vibração da torre estudada. A Figura 25-a mostra os componentes do Vibrômetro que utiliza o MPU6050, enquanto a Figura 25-b mostra o Vibrômetro fechado e pronto para ser utilizado na coleta de dados de vibração na torre da SKY.

Figura 25: Vibrômetro baseado no MPU6050.



Fonte: Autoria Própria.

3.2.1. Módulo Acelerômetro MPU6050

O sensor MPU6050 contém em seu chip um acelerômetro e giroscópio MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*), que mede cada grandeza nos três eixos e possui um conversor analógico-digital de 16 bits. O MPU6050, além dos dois sensores, tem embutido um recurso chamado DMP (*Digital Motion Processor*), responsável por fazer cálculos complexos com os sensores e cujos dados podem ser usados para sistemas de reconhecimento de gestos, navegação GPS (*Global Positioning System*), jogos e diversas outras aplicações.

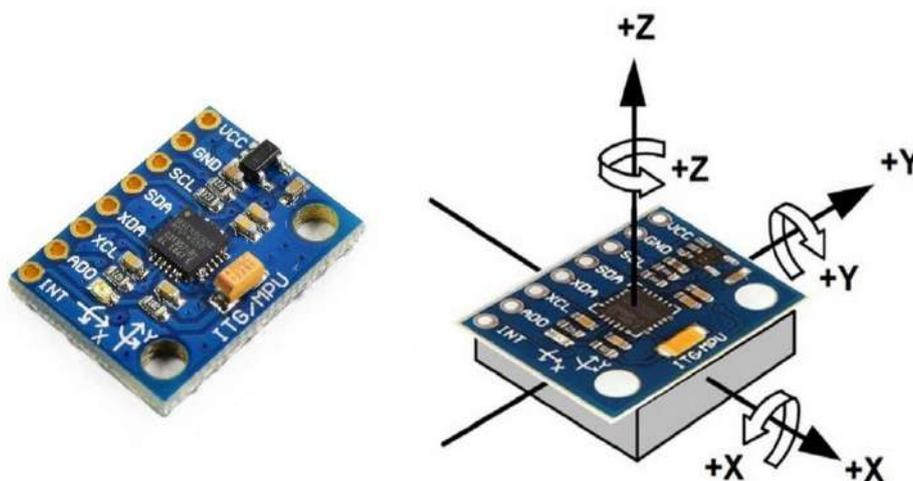
Outro recurso adicional é o sensor de temperatura embutido no chip, que permite medições de temperatura entre -40 e +85 °C. A comunicação com o microcontrolador usa a interface I2C (*Inter-Integrated Circuit*), por meio dos pinos SCL (*Serial Clock*) e SDA (*Serial Data*) do sensor. Nos pinos XDA (*Auxiliary Serial Data*) e XCL (*Auxiliary Serial Clock*) é possível ligar outros dispositivos I2C, como um magnetômetro por exemplo, e criar um sistema de orientação completo. A alimentação do módulo pode variar entre 3 V e 5 V [36].

O MPU6050 elimina problemas de alinhamento de eixo cruzado que podem surgir em partes discretas. As peças integradas com o algoritmo DMTP (*Durable Message Transport Protocol*, Protocolo de Mensagem de Tempo de Vida) e *MotionFusion* de 9 eixos podem até mesmo acessar magnetômetros externos ou outros sensores por meio de um barramento mestre I2C auxiliar, permitindo que um conjunto completo de dispositivos de dados do sensor seja montado, sem a intervenção do processador do sistema.

MotionFusion é um algoritmo proprietário da InvenSense que combina dados de acelerômetro, giroscópio e IMU para produzir dados de movimento mais precisos. O algoritmo *MotionFusion* usa as medições de todos os sensores para compensar e melhorar os dados de movimento, eliminando os erros dos sensores individuais e produzindo resultados mais precisos, melhora a precisão da medição de movimentos e oferece aos projetos de dispositivos embarcados um ótimo desempenho de detecção de movimento [36].

O MPU6050 é um sensor de 6 DOF (*Degrees Of Freedom*, graus de liberdade) ou IMU (*Inertial Measurement Unit*, Unidade de Medição Inercial) de seis eixos, o que significa que ele gera seis valores e é muito preciso, pois contém uma conversão de hardware de 16 bits de A/D para cada canal, para a digitalização das saídas do acelerômetro. Para isso, ele captura os canais x, y e z ao mesmo tempo [36]. A Figura 26 mostra a pinagem e os sentidos de movimentação dos eixos do MPU6050.

Figura 26: Pinagem e os sentidos de movimentação dos eixos do MPU6050.



Fonte: Adaptado de [37].

As faixas de leitura dos sensores (giroscópio e acelerômetro) também podem ser definidas pelo usuário. Por exemplo, definir o valor do parâmetro AFS-SEL igual a 0 (zero), configura a sensibilidade do acelerômetro para a faixa de -2g a +2g.

É possível customizar o MPU6050 para que se tenha o menor consumo possível de energia, pode-se desabilitar os recursos que não são necessários, levando o consumo para valores na ordem de grandeza de μA (microampéres).

O MPU6050 permite que sua amostragem de dados possa ser customizada pelo usuário. O conjunto de dados coletado em cada amostragem engloba os dados dos 3 eixos do giroscópio, dados dos 3 eixos do acelerômetro e leitura do sensor de temperatura [36]. As principais especificações técnicas do sensor MPU6050 são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Principais especificações técnicas do sensor MPU6050.

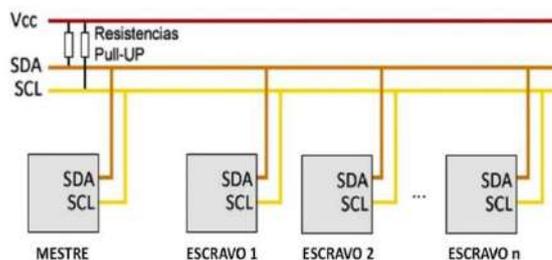
Sensor	Descrição
Giroscópio	<ul style="list-style-type: none"> - Saídas digitais X, Y, Z, com faixas programáveis: 250, 500, 1000 e 2000°/segundos. - Conversores ADC de 16 bits para amostragem das variações angulares. - Filtro “passa-baixa” programável. - Corrente de operação: 3,6 mA. - Corrente em Standby: 5 µA.
Acelerômetro	<ul style="list-style-type: none"> - Saídas digitais X, Y, Z, com faixas programáveis: 2 g, 4 g, 8 g e 16 g. - Conversores ADC de 16 bits para amostragem simultânea dos 3 eixos. - Detecção de orientação e sinal. - Corrente de operação: 500 µA. - Corrente no modo Low Power: 10 µA a 1,25 Hz, 20 µA a 5 Hz, 60 µA a 20 Hz, 110 µA a 40 Hz.
Recursos adicionais	<ul style="list-style-type: none"> - Interface I2C auxiliar para leitura de dados de sensores externos (ex. magnetômetro). - Recurso MotionFusion utilizando o Digital Motion Processing (DMP) e um magnetômetro externo. Com suporte com suporte à tecnologia 3D MotionProcessing e processamento de algoritmos de reconhecimento de gestos. - Consumo nominal de 3,9 µA, quando sensores e processador DMP estão desabilitados. - Buffer de 1024 bytes para armazenamento dos dados de leitura dos sensores, útil principalmente, no modo de baixo consumo de energia. - Filtros digitais programáveis para todos os sensores. - Fast Mode I2C de 400 kHz, para comunicação com todos os registradores. - Faixa de tensão VDD, entre 2,375 V e 3,46 V.

Fonte: Datasheet MPU6050 [36].

Para a comunicação com o Arduino, o MPU6050 usa o barramento de comunicação I2C. Uma das principais características do barramento I2C é que ele requer apenas dois fios para seu funcionamento, um para o sinal de clock (CLK: *Serial CLock*) e outro para envio de dados (SDA: *Serial DATA*) [36].

Em aplicações comuns, é recomendado que o comprimento máximo do barramento I2C seja de aproximadamente 2 metros. No protótipo do Vibrômetro foi utilizado um cabo com 1,5 metros de comprimento entre o MPU6050 e o Arduino. Essa distância está dentro dos limites recomendados e deve permitir uma comunicação adequada entre os dispositivos. A Figura 27 mostra o esquema de um barramento I2C do MPU6050 [38].

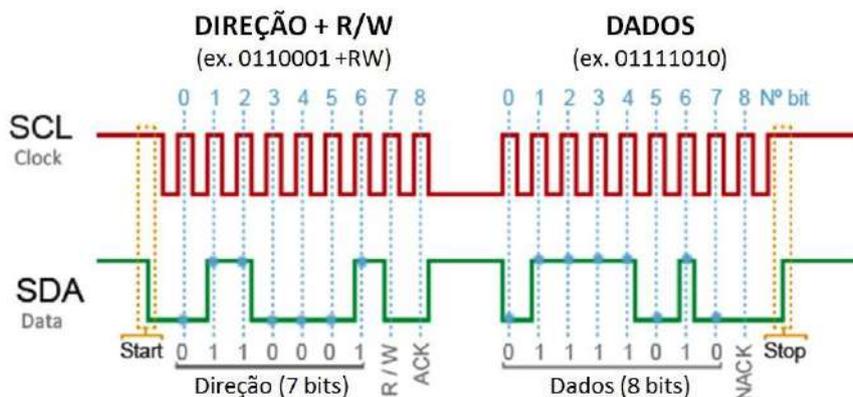
Figura 27: Esquema de um barramento I2C do MPU6050.



Fonte: Adaptado de [38].

A Figura 28 mostra o esquema do protocolo de comunicação I2C. do MPU6050.

Figura 28: Esquema do protocolo de comunicação I2C do MPU6050.



Fonte: Adaptado de [38].

O MPU6050 é capaz de coletar amostras (f_s) em uma taxa de até 1 kHz, o que significa que pode medir frequências (f_m) até 500 Hz, (Teorema de *Nyquist* $f_s \geq 2f_m$). No Vibrômetro construído para este projeto, foi utilizada uma taxa de amostragem (f_s) de 96 Hz, calculada com base na quantidade de amostras coletadas dividida pelo tempo total do experimento. Essa taxa foi suficiente, tendo em vista que a frequência de vibração máxima medida (f_m) ficou abaixo de 30 Hz.

É recomendado calibrar o MPU6050 sempre que for usá-lo para garantir leituras precisas. A calibração é crucial para corrigir possíveis desvios nas leituras dos sensores causados por fatores externos, tais como variações de temperatura, interferências magnéticas e outras condições ambientais.

3.2.3. Arduíno UNO R3

O Arduino® é a plataforma de desenvolvimento de projetos de eletrônica e robótica mais utilizada em todo o mundo, devido à sua facilidade de aprendizado e uso, abundante documentação e múltiplas aplicações.

O Arduino UNO R3 é uma placa de desenvolvimento equipada com o microcontrolador ATmega328P (Atmel/Microchip). Com 14 pinos de entrada/saída digital, 6 entradas analógicas, um oscilador de cristal de 16 MHz, conexão USB, conector de alimentação, conector ICSP (*In-Circuit Serial Programming*) e botão de reset, ela tem tudo que é necessário para suportar o microcontrolador. A placa pode ser alimentada por uma fonte de alimentação externa de 6 a 20 V ou pela conexão USB 5 VDC, mas é recomendado que a alimentação esteja entre 7 e 12 V para evitar problemas. A fonte de energia é selecionada automaticamente e pode vir de um adaptador CA para CC ou bateria conectado na tomada de alimentação da placa. Além disso, o UNO R3 utiliza o Atmega16U2 como conversor USB para serial, diferenciando-se das placas anteriores que usavam o chip de driver FTDI USB [39]. A Figura 29 mostra a disposição dos principais componentes da placa do Arduino UNO.

Figura 29: Disposição dos principais componentes da placa Arduino UNO.



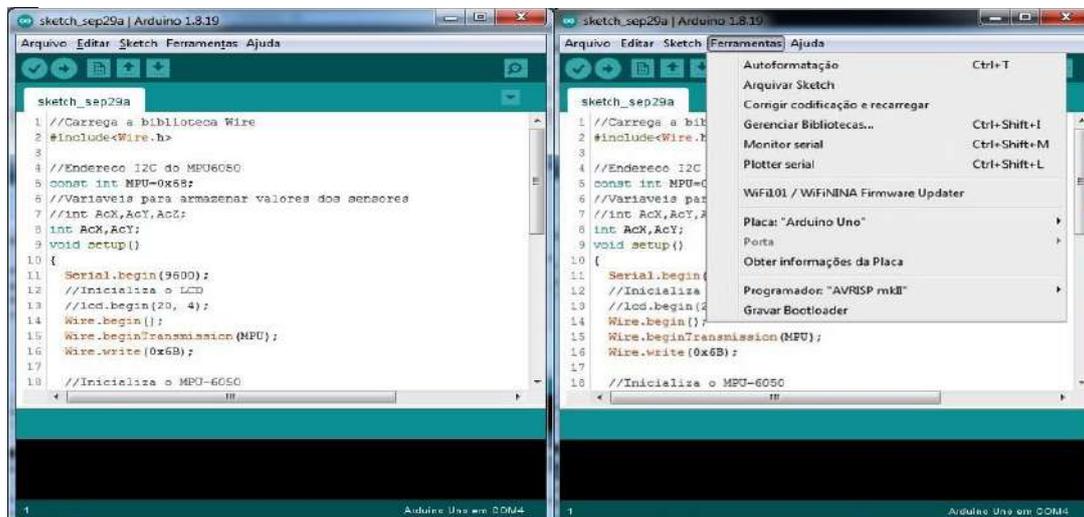
Fonte: Adaptado de [40].

3.2.4. Ambiente de programação Arduíno

O Ambiente Integrado de Desenvolvimento Arduíno - ou software do Arduíno (IDE - *Integrated Development Environment*), é um programa de computador composto por um conjunto de ferramentas de programação. Pode ser dedicado exclusivamente a uma única linguagem de programação ou pode ser utilizado para várias.

Um IDE é um ambiente de programação empacotado como um programa aplicativo, ou seja, consiste em um editor de código, um compilador, um depurador em uma interface gráfica de usuário (GUI - *Graphical User Interface*). Além disso, no caso do Arduíno, incorpora as ferramentas para carregar o programa já compilado na memória flash do hardware via porta serial [39]. A Figura 30 apresenta a interface gráfica (GUI) do Ambiente Integrado de Desenvolvimento (IDE) Arduíno UNO.

Figura 30: Ambiente Integrado de Desenvolvimento Arduíno.

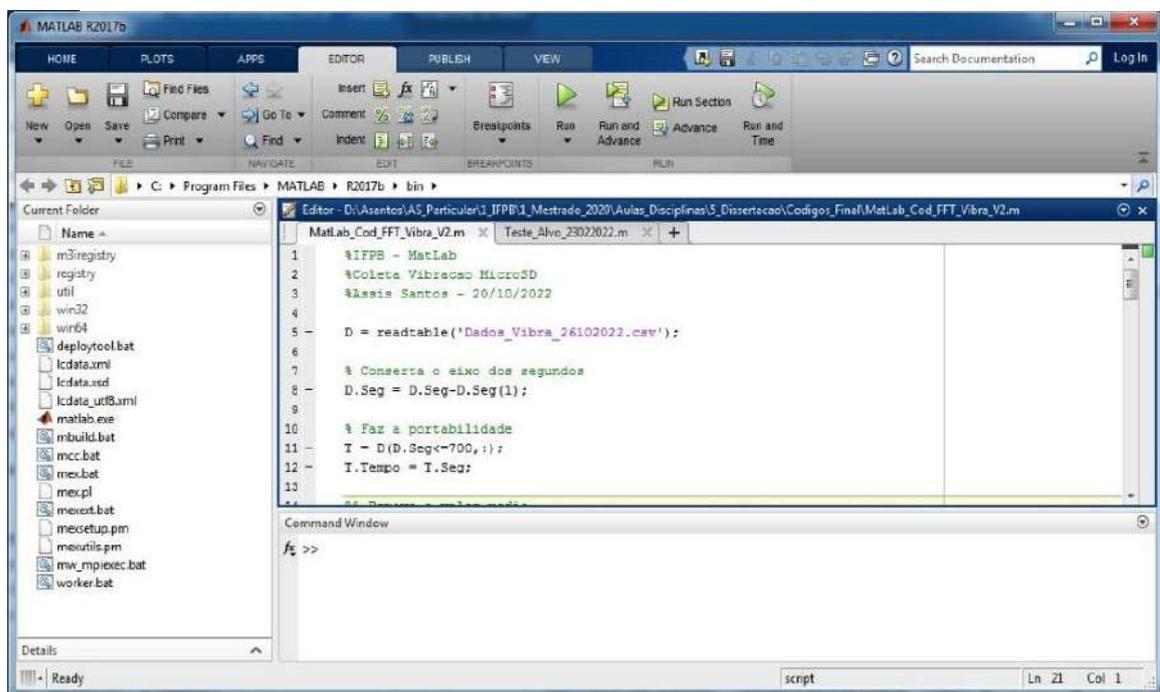


Fonte: Adaptado de [39].

3.2.5. MATLAB

O MATLAB é um ambiente de computação numérica e de prototipagem de alto nível e multi-paradigma, desenvolvido pela MathWorks. Ele suporta programação estruturada, programação orientada a objetos ou programação funcional. A linguagem do MATLAB é baseada em matrizes e permite a expressão mais natural das matemáticas computacionais em um ambiente interativo para computação numérica. Ele também fornece uma ampla biblioteca de funções matemáticas para álgebra linear, estatística, análise de Fourier, filtragem, otimização, integração numérica e resolução de equações diferenciais comuns, bem como uma variedade de tipos de gráficos para visualizar dados e análises estatísticas. O MATLAB também pode ser usado para controlar o Arduino, usando a biblioteca de comunicação serial do MATLAB [41]. Na Figura 31 é apresentado o ambiente de programação do MATLAB.

Figura 31: Ambiente de programação do MATLAB.



Fonte: Adaptado de [41].

3.2.6. Coleta de dados em campo

Foi criado e instalado um Vibrômetro baseado em Arduino para coletar dados de vibração, conforme descrito na seção 3.2. O dispositivo foi posicionado no topo de uma torre de 75 metros, conforme mostrado na Figura 24 da seção 3.1.

Durante um dia normal sem nuvens e com ventos fracos, o Vibrômetro registrou dados dos eixos X, Y e Z dos acelerômetros do sensor MPU6050 por 24 horas. Os dados coletados foram armazenados em um cartão micro SD e foram utilizados para análises no ambiente computacional MATLAB e para simulações em laboratório.

Técnicos treinados em conformidade com a NR35 (trabalho em altura) instalaram o dispositivo coletor de dados de vibração na treliça da torre a 75 m de altura, conforme demonstrado na Figura 32.

Figura 32: Dispositivo Vibrômetro fixado a 75 m na torre.



Fonte: Aatoria Própria.

Os dados coletados pelo módulo de acelerômetro e giroscópio de 6 eixos MPU6050 são enviados em tempo real para o Arduino e processados por um programa escrito para esta finalidade. O programa em Arduino processa os dados coletados, insere o tempo de finalização de cada amostra (em ms),

organiza em arquivo do tipo tabela CSV (Excel) e armazena em cartão de memória microSD.

Os valores tabelados no MPU6050 são relativos, ou seja, os dados de aceleração e velocidade angular são medidos em relação à posição inicial do dispositivo e não em relação ao solo. Além disso, os dados de orientação são medidos em relação à posição inicial do dispositivo.

Os dados de aceleração linear (em três eixos: Ax, Ay e Az) são tabelados em (m/s²) e os de rotação angular (em três eixos: Gx, Gy e Gz) são tabelados em (rad/s). O tempo é tabelado em valores de milissegundos (ms) conforme modelo de registros apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Tabela de dados armazenados em arquivo.

Ax	Ay	Az	Gx	Gy	Gz	M_Seg
0,32	0,54	9,77	-17,41	0,2	0,61	512
0,28	0,67	9,83	-17,29	0,2	0,63	515
0,31	0,65	9,73	-17,41	0,21	0,61	518
0,47	0,73	9,76	-17,66	0,12	0,74	535
0,53	0,69	9,93	-17,41	0,13	0,77	538
0,36	0,70	9,84	-17,53	0,12	0,77	541
-0,01	0,59	9,76	-17,66	0,12	0,82	559
0,08	0,58	9,90	-17,17	0,11	0,83	562
-0,13	0,55	9,74	-17,41	0,11	0,83	565
-0,25	0,66	9,81	-17,66	0,13	0,68	582

Fonte: Autoria Própria.

As informações capturadas incluem a inclinação, aceleração, desaceleração, rotação e vibração do dispositivo, e são usadas para determinar a direção e ângulo do movimento. Para analisar a vibração, um programa em MATLAB foi usado para processar os dados armazenados e gerar gráficos que tornassem os eventos mais facilmente visualizáveis. Embora o arquivo contivesse informações dos acelerômetros e giroscópios, apenas os dados dos acelerômetros em três eixos: Ax, Ay e Az, foram usados para a análise de vibração.

Este estudo não abrange a análise dos coeficientes de arrasto e das forças laterais das antenas presentes na torre, pois esses valores estão sujeitos à norma NBR 6123 [32] e variam de acordo com o ângulo de incidência dos ventos na área frontal das antenas.

3.2.7. Ambiente de testes local

Foi desenvolvida uma plataforma de vibração com quatro molas de alta resistência fixadas nos cantos de uma base fixa e conectadas a uma base móvel suspensa para simular vibrações com a ajuda de dois motores de corrente contínua com êmbolos nos seus eixos, conforme mostrado na Figura 33. Esta plataforma permite a simulação de vibrações mais complexas oferecendo maior flexibilidade para testes e pesquisas em diversas condições de amplitude e frequência.

Figura 33: Plataforma de vibração.



Fonte: Autoria Própria.

Para ajustar a plataforma de vibração, é necessário utilizar um sistema de controle que permite alterar a frequência e amplitude da vibração simulada, de acordo com as necessidades do teste ou pesquisa em questão (Figura 33-a e Figura 33-b). Com essa flexibilidade e precisão, a plataforma de vibração desenvolvida é uma ferramenta fundamental para a realização de testes e pesquisas em vibração de FSO.

Para melhorar a precisão dos testes, uma pequena torre de alumínio foi adicionada à base móvel (Figura 33-d), na qual estão instalados um laser e um acelerômetro MPU6050 no topo (Figura 33-c e Figura 33-f). O laser tem a função de transmissor FSO, enquanto o acelerômetro MPU6050 mede a aceleração e a inclinação da plataforma, enviando estes dados para um cartão SD instalado em um coletor de dados de vibração, Vibrômetro baseado em Arduino (Figura 33-e).

Os dados coletados podem ser utilizados para analisar o comportamento do laser em diferentes condições de vibração, possibilitando o desenvolvimento de soluções mais precisas e eficientes. A Figura 34 mostra o ambiente de testes de simulação na sala de mestrado do IFPB.

Figura 34: Foto do ambiente de testes.



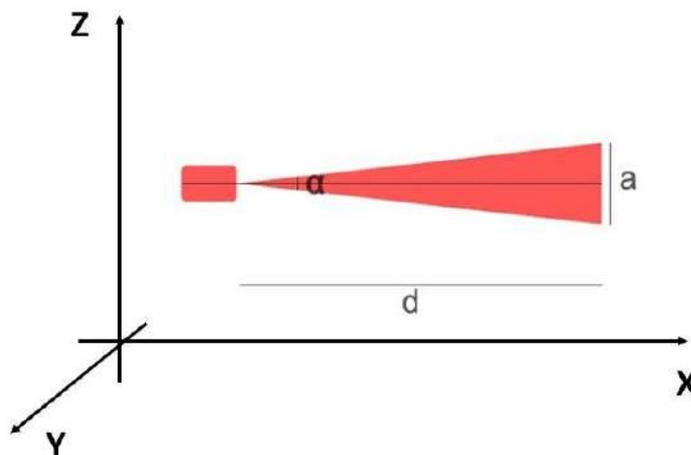
Fonte: Autoria Própria.

3.2.8. Método de Análise

Um transmissor FSO (*Free-Space Optics*) é um dispositivo de transmissão de dados ópticos que transmite luz laser diretamente para outro dispositivo de transmissão de dados ópticos através do espaço livre.

Suponha um transmissor laser FSO conforme representado na Figura 35, que emite um feixe de luz estreito com um ângulo de abertura de 1 mrad (ou $0,0573^\circ$). Esse feixe percorre uma distância de 1 km, onde forma um círculo iluminado com 1 m de diâmetro. No centro desse círculo, um fotodiodo atua como receptor FSO.

Figura 35: Projeção do feixe FSO em direção ao receptor.



Fonte: Autoria Própria.

A área do círculo formada no receptor é dada pela Equação (3.2.1):

$$A_a = \pi r^2 = \pi \left(\frac{a}{2}\right)^2 = \frac{\pi}{4} a^2 \quad (3.2.1)$$

O diâmetro do círculo pode ser obtido por meio do triângulo retângulo, mediante as Equações (3.2.2), (3.2.3) e (3.2.4).

$$\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\left(\frac{a}{2}\right)}{d} \quad (3.2.2)$$

$$\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{a}{2 \cdot d} \quad (3.2.3)$$

$$a = 2 d \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.2.4)$$

Substituindo a Equação (3.2.4) na Equação (3.2.1), obtêm-se as Equações (3.2.5), (3.2.6) e (3.2.7):

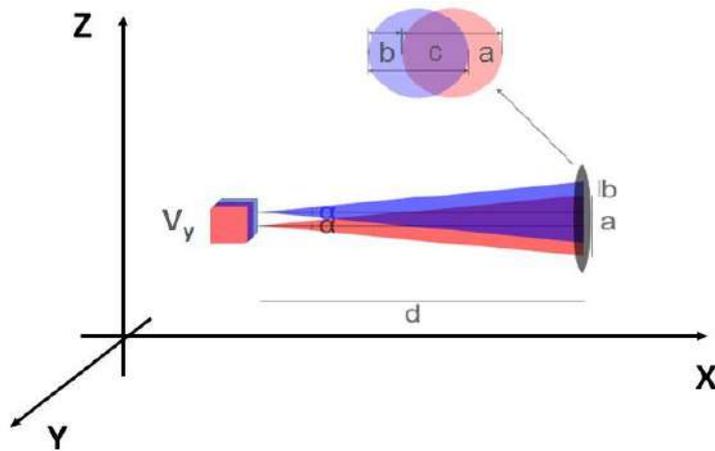
$$A_a = \frac{\pi}{4} \left(2 d \operatorname{sen} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right)^2 \quad (3.2.5)$$

$$A_a = \pi \left(d \operatorname{sen} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right)^2 \quad (3.2.6)$$

$$A_a = \pi d^2 \left(\frac{1}{2} - \cos(\alpha) \right) \quad (3.2.7)$$

Supondo, para fins de análise, que o transmissor vibre no eixo Y, cuja intensidade máxima seja V_y , é obtido como resultado o gráfico da Figura 36.

Figura 36: Vibração do FSO em direção a Y.



Fonte: Autoria Própria.

Um deslocamento de V_y unidades de distância provoca um deslocamento equivalente na projeção do feixe original. Desta forma, uma variação de V_y unidades de distância resulta em uma variação correspondente na projeção do feixe original.

Para saber a área efetiva de transmissão preservada, pode-se considerar a interseção entre as circunferências azul e vermelho [42-43] e utilizar a Equação (3.2.8).

$$A_c = -\frac{1}{2} V_y \sqrt{a^2 - V_y^2} - \frac{1}{2} a^2 \tan^{-1} \left(\frac{V_y}{\sqrt{a^2 - V_y^2}} \right) + \frac{1}{4} \pi a^2 \quad (3.2.8)$$

Substituindo a Equação (3.2.4) em (3.2.8), resulta na Equação: (3.2.9).

$$A_c = -\frac{1}{2} V_y \sqrt{\left(2 d \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 - V_y^2} - \frac{1}{2} \left(2 d \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 \tan^{-1}\left(\frac{V_y}{\sqrt{\left(2 d \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 - V_y^2}}\right) + \frac{1}{4} \pi \left(2 d \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 \quad (3.2.9)$$

Na Equação (3.2.10) é obtida a área efetiva de transmissão preservada, da vibração em direção a Y, em função da vibração e do ângulo de abertura do feixe.

$$eff_y = 100 \frac{A_c}{A_a} \quad (3.2.10)$$

Em que 100% representa nenhuma perda, e 0% representa perda total do sinal. Substituindo (3.2.7) e (3.2.9) em (3.2.10), obtém-se a Equação (3.2.11):

$$eff_y = 100 \frac{-\frac{1}{2} V_y \sqrt{\left(2 d \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 - V_y^2} - \frac{1}{2} \left(2 d \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 \tan^{-1}\left(\frac{V_y}{\sqrt{\left(2 d \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 - V_y^2}}\right) + \frac{1}{4} \pi \left(2 d \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2}{\pi d^2 \left(\frac{1}{2} - \cos(\alpha)\right)} \quad (3.2.11)$$

A Equação (3.2.11) mostra a área efetiva de transmissão preservada, da vibração em direção a Y, em função da vibração e do ângulo de abertura do feixe. Já a área efetiva de transmissão preservada, da vibração em direção a X, em função da vibração e do ângulo de abertura do feixe, é mostrada na Equação (3.2.12).

$$eff_x = 100 \frac{-\frac{1}{2} V_x \sqrt{\left(2 d \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 - V_x^2} - \frac{1}{2} \left(2 d \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 \tan^{-1}\left(\frac{V_x}{\sqrt{\left(2 d \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 - V_x^2}}\right) + \frac{1}{4} \pi \left(2 d \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2}{\pi d^2 \left(\frac{1}{2} - \cos(\alpha)\right)} \quad (3.2.12)$$

Para efeitos deste estudo, não haverá distorção da área efetiva de transmissão preservada da vibração em relação ao eixo Z (direção da gravidade) e a amplitude de vibração será desprezada. Todavia, dependendo da modulação aplicada na transmissão, a vibração em todas as direções não poderá ser desprezada, pois a fase será alterada, ou seja, qualquer modulação em fase será afetada pela vibração na direção de transmissão do FSO.

Para calcular o deslocamento do feixe FSO na origem a partir dos dados de aceleração e frequência de amostragem, em tempo discreto a partir dos valores iniciais de $d[0]$ e $v[0]$, pode-se utilizar a Equação (3.2.13) [47]:

$$d[n] = d[n - 1] + v[n - 1]T + \frac{1}{2}a[n - 1]T^2 \quad (3.2.13)$$

Em que:

$d[n]$ é o deslocamento no tempo discreto atual (n);

$d[n-1]$ é o deslocamento no tempo discreto anterior (n-1);

$v[n-1]$ é a velocidade no tempo discreto anterior (n-1);

T é o período de amostragem ($T=1/f_s$, onde f_s é a frequência de amostragem;)

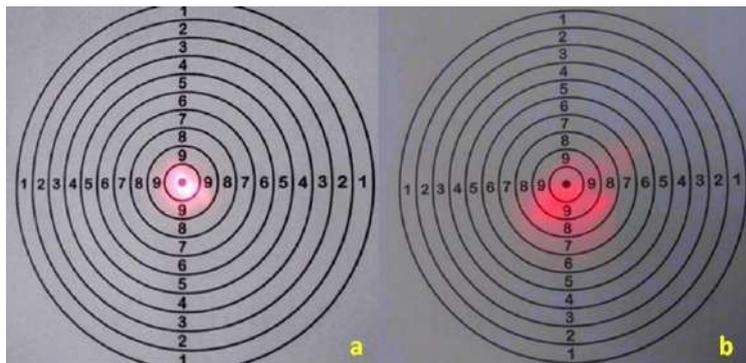
$a[n-1]$ é a aceleração no tempo discreto anterior (n-1).

A Equação (3.2.13) de tempo discreto, é uma aproximação da equação de movimento na cinemática, que relaciona a posição, velocidade e aceleração de um corpo em movimento. Esta equação representa a posição do objeto em um dado instante de tempo n, em termos da sua posição e velocidade no instante anterior, n-1, e da sua aceleração média no intervalo de tempo T entre os dois instantes.

Essa equação é uma simplificação porque não leva em conta fatores como a resistência do ar, a variação da aceleração ao longo do tempo ou outras forças externas que possam afetar o movimento do objeto. No entanto, em certos contextos e condições específicas, pode ser uma aproximação útil para descrever o movimento de um objeto em linha reta.

Os experimentos feitos no ambiente de testes do IFPB comprovaram o deslocamento do feixe de laser durante o processo de vibração na plataforma de testes. Foi utilizado um laser vermelho com λ de 650 nm e 5 mW de potência, transmitindo para um alvo a 10 m e 40 m de distância com vibração aproximada de 6 Hz. A Figura 37 mostra o foco do laser vermelho vibrando, a 10 m (Figura 37-a) e a 40 m (Figura 37-b) de distância do alvo.

Figura 37: Foco do laser vermelho vibrando a 10 m e 40 m do alvo.

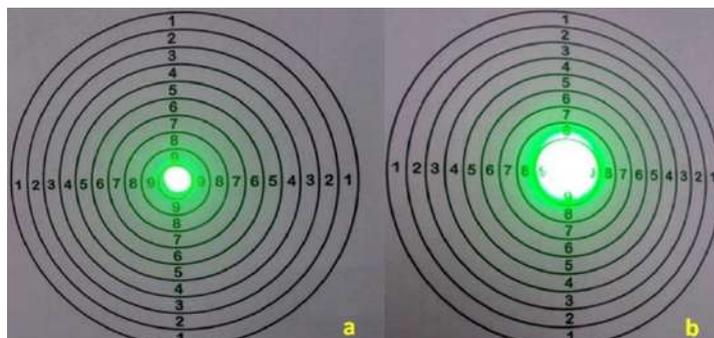


Fonte: Autoria Própria.

Também foi feito um experimento com um laser verde com λ de 532 nm e 5 mW de potência, transmitindo também para outro alvo a 10 m e a 40 m de distância. Entretanto, não foram executados testes de vibração neste laser, o intuito era mostrar somente o espalhamento, fenômeno pelo qual a luz se espalha em diferentes direções quando ela interage com partículas presentes no meio de propagação.

A Figura 38 mostra o laser verde transmitindo a 10 m (Figura 38-a) e a 40 m (Figura 38-b) de distância do alvo.

Figura 38: Foco do laser verde a 10 m e 40 m do alvo.



Fonte: Autoria Própria.

As ondas de comprimento de onda mais curto (verde) se espalham mais do que as ondas de comprimento de onda mais longo (vermelho). Isso é conhecido como espalhamento de Rayleigh [44].

Esse efeito é responsável por várias observações comuns na natureza, como o céu azul durante o dia e a cor avermelhada do sol ao nascer e ao se pôr. Quando a luz solar viaja através da atmosfera, ela interage com as moléculas presentes, principalmente moléculas de nitrogênio e oxigênio. Essas moléculas atuam na luz de maneira seletiva, espalhando mais intensamente as ondas de luz de comprimento de onda mais curto (como o azul e o verde) do que as ondas de comprimento de onda mais longo (como o vermelho).

É possível notar que o grau de espalhamento da cor verde é superior a duas vezes a cor vermelha, para a mesma intensidade de radiação transmitida. Esse fenômeno ocorre porque o olho humano é aproximadamente nove vezes mais sensível ao verde do que ao vermelho [44].

A sensibilidade do olho humano às diferentes cores também influencia a percepção do espalhamento da luz. A retina humana possui diferentes tipos de células fotossensíveis chamadas cones, que são sensíveis a diferentes comprimentos de onda de luz. Os cones responsáveis pela detecção do verde são mais sensíveis do que os cones responsáveis pelo vermelho. Portanto, mesmo que o espalhamento das ondas de luz vermelha e verde seja diferente, a percepção da cor verde é amplificada em relação ao vermelho pelo sistema visual humano, o que pode fazer com que o espalhamento da cor verde pareça mais intenso do que o da cor vermelha [45].

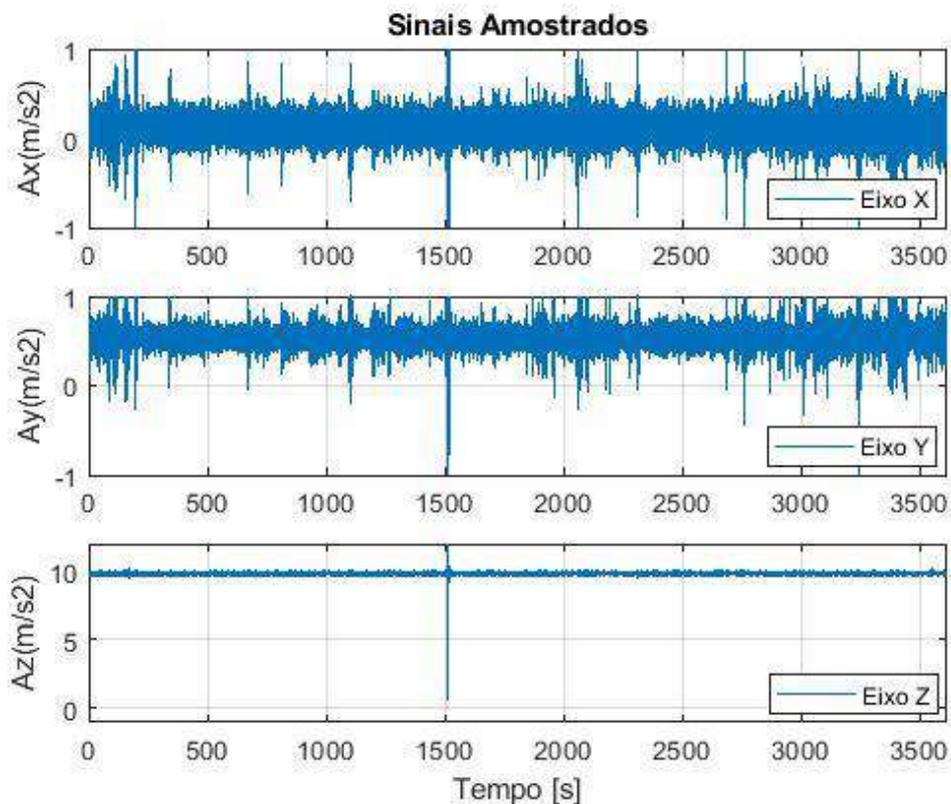
4. Resultados e Discussões

São apresentados, neste Capítulo, os resultados obtidos a partir das medições das acelerações em três eixos (X, Y e Z), utilizando acelerômetros conforme especificados na Figura 36, em resposta às forças do vento em diferentes velocidades e mudanças de direção, aferidas no local. Foram coletados dados de forma contínua durante 24 horas na parte superior da torre, a 75 metros de altura, e amostras de uma hora foram selecionadas para a criação de gráficos com os resultados obtidos pelo dispositivo de medição.

Amostras com duração de uma hora foram escolhidas, uma vez que esse período é longo o suficiente para capturar as variações dos dados ao longo do tempo, mas não tão extenso a ponto de dificultar a visualização e análise dos gráficos resultantes.

Os sinais amostrados no tempo estão separados nos eixos X, Y e Z, e ilustrados na Figura 39.

Figura 39: Sinais reais amostrados no tempo.



Fonte: Autoria Própria.

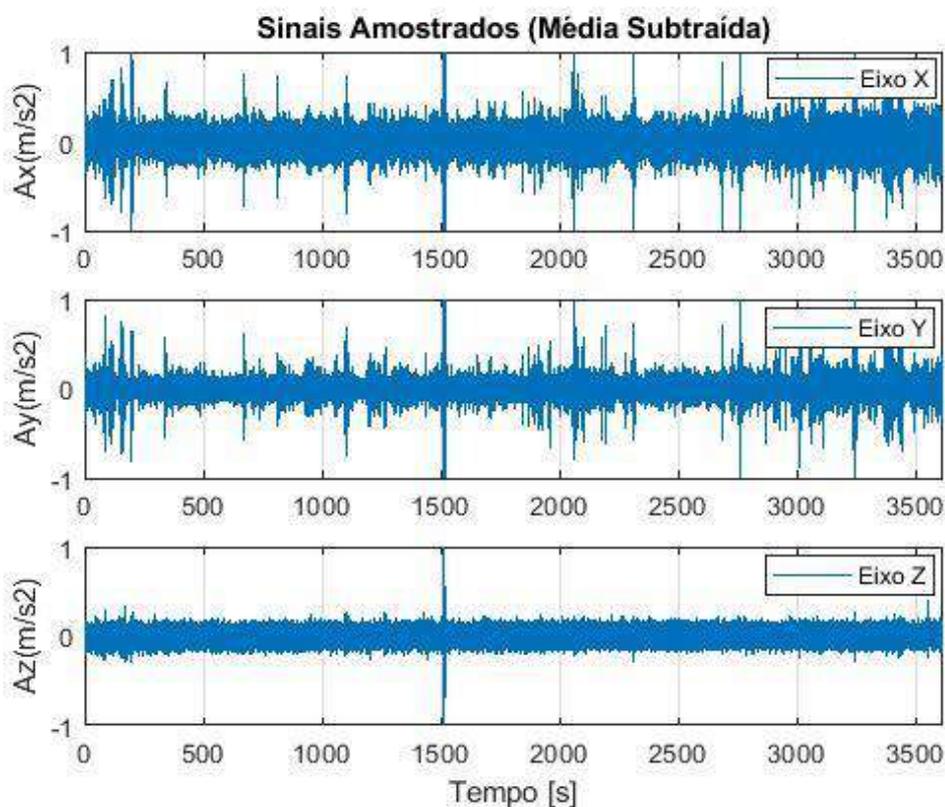
Por meio da análise dos gráficos, é possível perceber que existe um deslocamento (*offset*) positivo nas direções dos eixos X, Y e Z. Essa mudança é explicada como resultado da decomposição do vetor de aceleração da gravidade.

A decomposição do vetor de aceleração da gravidade se refere ao processo de dividir a aceleração total sentida em um ponto, em componentes nas direções dos eixos X, Y e Z. Essa técnica é frequentemente usada em aplicações de navegação, controle de voo e outras áreas que envolvem medições de aceleração [46].

Com o objetivo de centralizar os sinais, Figura 39, em torno da ordenada "zero" do plano cartesiano e remover componentes constantes do sinal (*offset* da constante da gravidade), a média de cada eixo foi subtraída. Isso permitiu que apenas os dados referentes às vibrações fossem mantidos nos gráficos.

Os sinais amostrados no tempo, separados nos eixos X, Y e Z, com o *offset* removido estão apresentados na Figura 40.

Figura 40: Sinais reais amostrados no tempo com média subtraída.



Fonte: Autoria Própria.

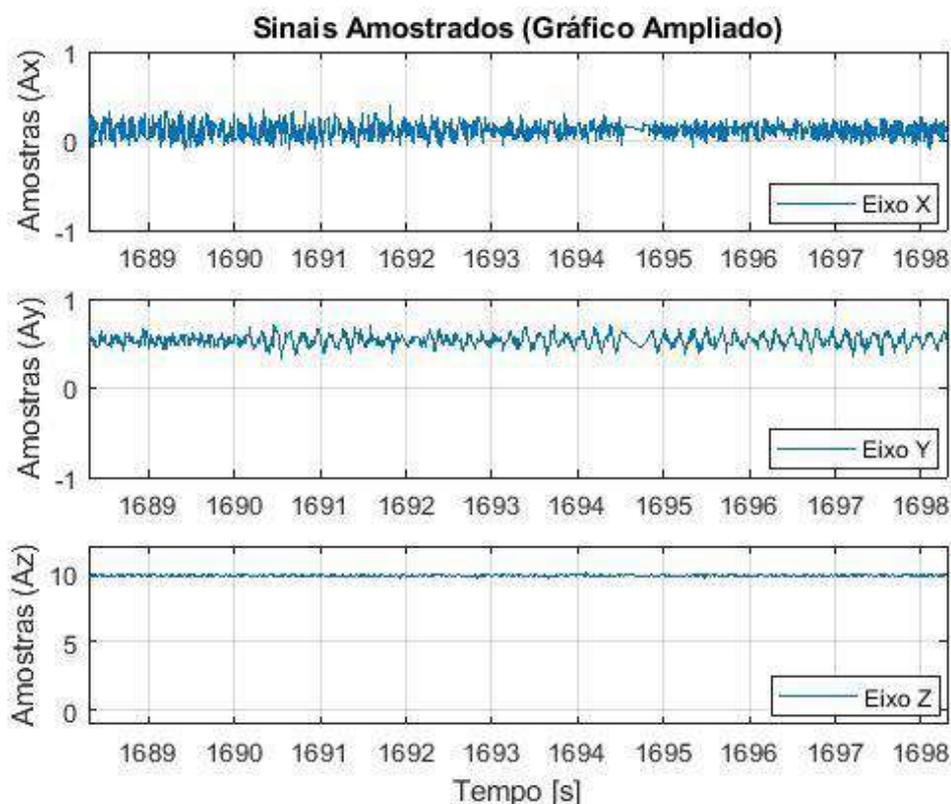
Verifica-se a presença de vibrações no topo da torre nas direções X e Y e uma certa estabilidade na direção da gravidade, eixo Z.

É observado um ruído (nos eixos X, Y e Z) em $T = 1500$ s, isto ocorreu quando os técnicos, ao descer da torre, fizeram o teste de segurança do cabo de aço trava quedas. Este cabo fica conectado na parte superior da torre, próximo às treliças onde estava instalado o dispositivo de coleta dos dados.

Para facilitar ainda mais a visualização dos sinais dos acelerômetros e aprimorar a compreensão dos dados coletados, foi então realizado um novo recorte temporal de apenas 10 segundos, com o objetivo de permitir uma melhor visualização das vibrações presentes na direção X e Y, bem como da estabilidade na direção da gravidade, eixo Z.

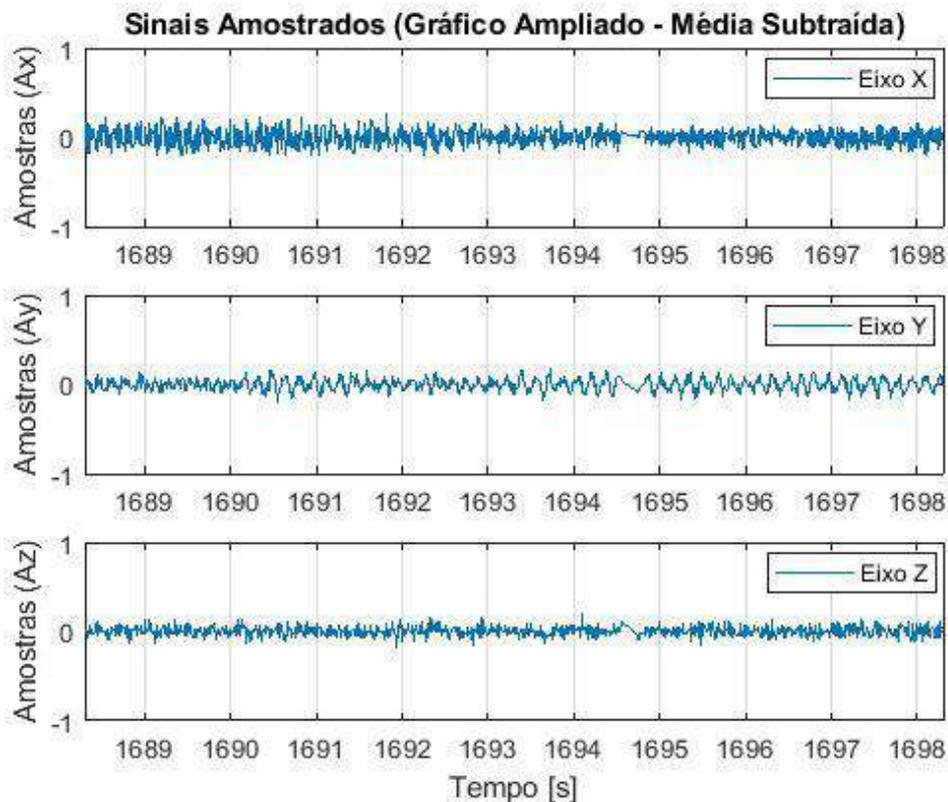
Essa nova seleção temporal é fundamental para que se possa obter um maior nível de detalhamento dos sinais dos acelerômetros, permitindo uma análise mais apurada dos dados. A Figura 41 apresenta os sinais dos acelerômetros nos eixos X, Y e Z, enquanto que a Figura 42 mostra esses mesmos sinais com a média subtraída.

Figura 41: Sinais reais amostrados no tempo durante 10 s.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 42: Sinais reais amostrados no tempo durante 10 s com média subtraída.



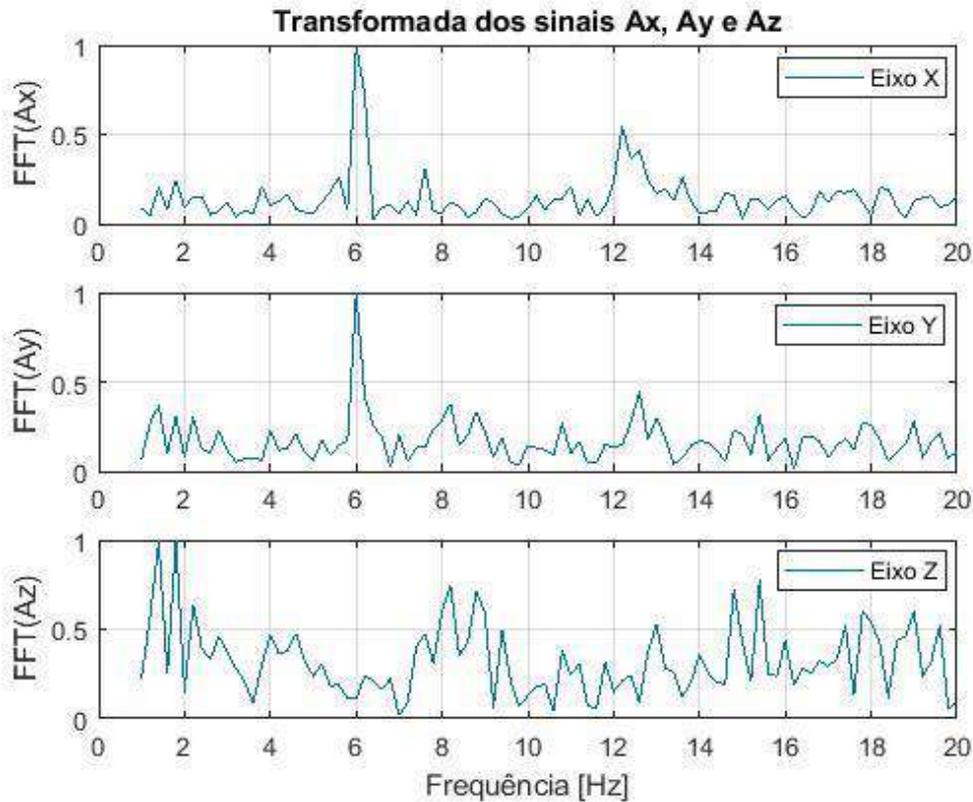
Fonte: Autoria Própria.

Após analisar os dados no domínio do tempo, foi preciso aplicar a transformada de Fourier para identificar a frequência fundamental de vibração nos eixos X e Y. A análise revelou uma frequência de 6 Hz para a vibração.

Essa análise é de extrema importância, uma vez que permite obter informações relevantes sobre o comportamento das vibrações nos eixos X e Y. Nesse contexto, a determinação da frequência fundamental de vibração pode fornecer informações valiosas sobre o sistema em questão, tais como sua ressonância e frequências naturais. No caso específico, a frequência de 6 Hz indica uma vibração de intensidade considerável nos eixos X e Y, o que pode ser relevante para a transmissão FSO.

Foi realizado um processo de normalização nos eixos X, Y e Z para apresentar o gráfico de frequência. Esse processo consistiu em dividir todos os valores dos vetores pelo maior valor absoluto de cada vetor, individualmente. O gráfico das transformadas de Fourier é exibido na Figura 43.

Figura 43: Gráfico das transformadas de Fourier.



Fonte: Autoria Própria.

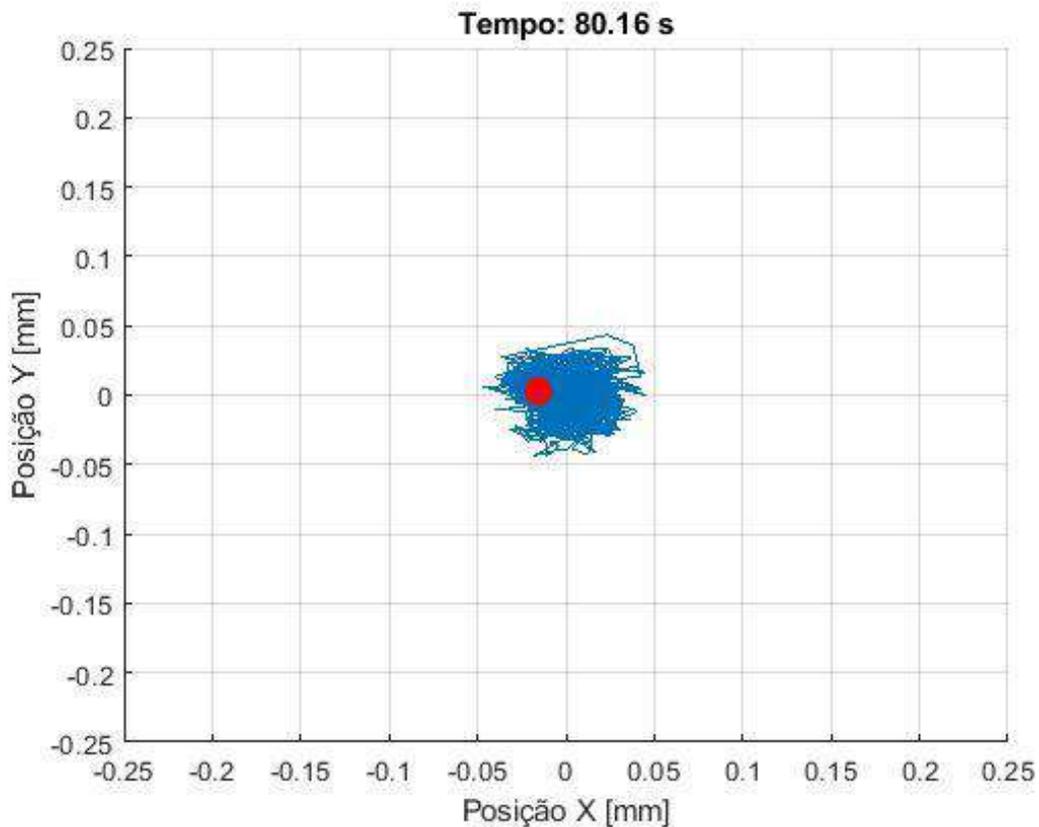
É possível calcular o deslocamento do feixe FSO na origem a partir dos dados de aceleração e frequência de amostragem, conforme descrito no método de análise do feixe FSO (Subseção 3.2.8 deste trabalho).

Determinar o deslocamento do feixe FSO é importante para se obter informações mais precisas sobre a sua posição em relação à origem. É essencial para a avaliação do desempenho de sistemas de comunicação óptica sem fio, que dependem da transmissão de informações por meio de feixes de luz e, por isso, exigem precisão e confiabilidade no deslocamento do feixe.

Ao conhecer o deslocamento do feixe FSO, é possível ter uma noção mais clara da localização do feixe em relação à origem, permitindo a realização de análises precisas e a implementação de estratégias adequadas. Esse conhecimento é especialmente relevante em aplicações que exigem alta precisão e confiabilidade na transmissão de dados.

Na Figura 44, é possível observar a trajetória percorrida pelo feixe FSO a partir da origem, expressa em milímetros, ao longo de 80 segundos de vibração. No gráfico, o ponto destacado em vermelho indica a posição do foco do laser, enquanto as linhas em azul indicam o caminho percorrido pela vibração. É importante ressaltar que o ponto de partida do foco do laser é o ponto (0, 0).

Figura 44: Deslocamento do feixe FSO na origem, em milímetros.

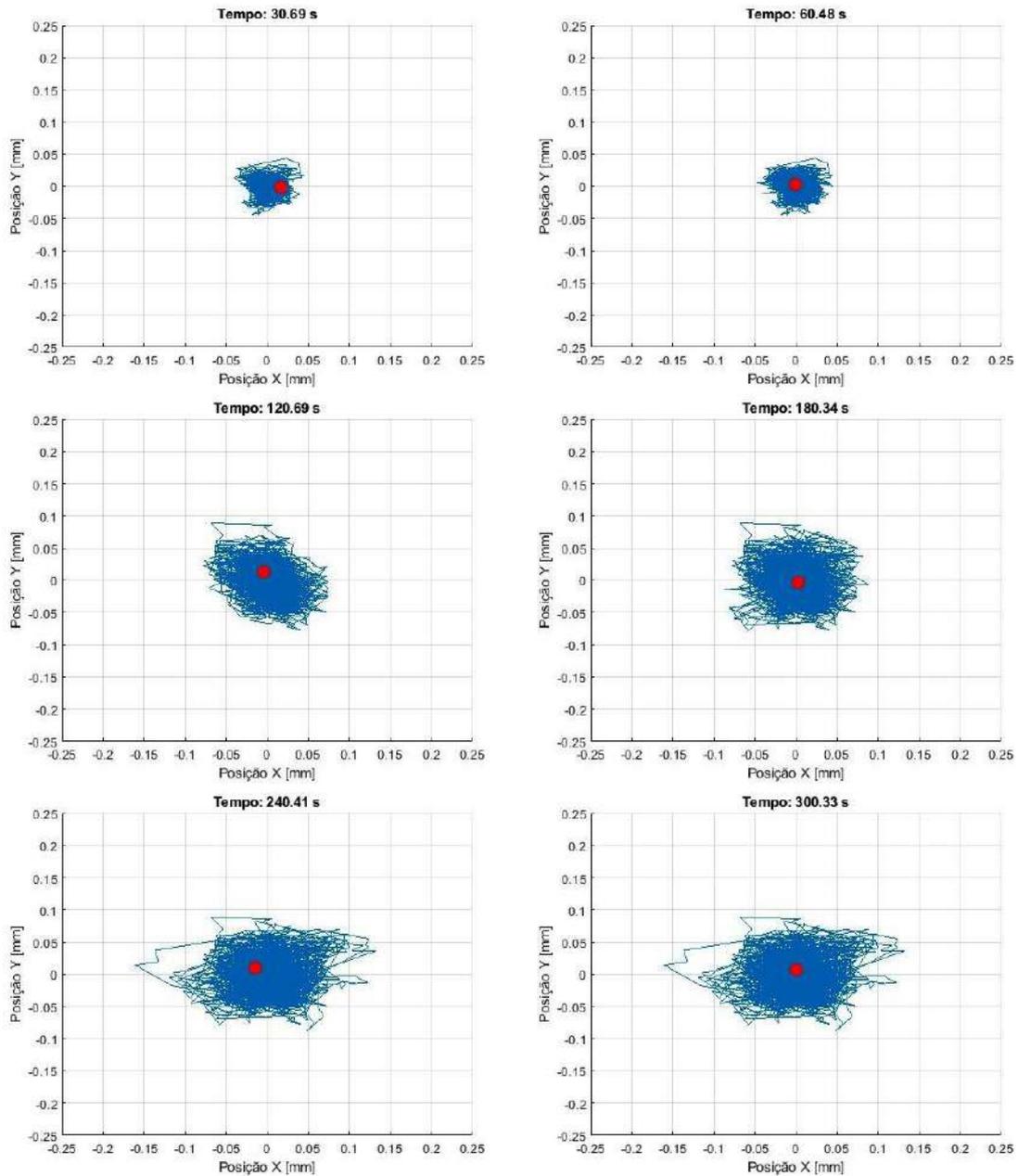


Fonte: Autoria Própria.

Determinar o deslocamento do feixe FSO geralmente envolve o uso de técnicas e sensores apropriados, como dispositivos de rastreamento óptico ou sistemas de alinhamento automático. Essas ferramentas permitem medir a posição do feixe em relação à origem e acompanhar seu deslocamento ao longo do tempo. Além disso, a capacidade de acompanhar o deslocamento do feixe ao longo do tempo possibilita a análise e otimização do desempenho do sistema, identificando potenciais problemas e promovendo melhorias.

A Figura 45 apresenta o rastro do feixe FSO, representação visual do deslocamento do feixe em relação à origem, permitindo avaliar o seu desempenho e precisão em diversos instantes. É interessante notar que o rastro do feixe FSO permanece centralizado no alvo, indicando que sua posição se mantém estável, embora haja algumas variações.

Figura 45: Traçado do feixe FSO ao longo do tempo.



Fonte: Autoria Própria.

5. Considerações Finais

Este trabalho apresentou os resultados da medição das acelerações em três eixos (X, Y e Z) de uma torre, utilizando acelerômetros, em resposta às forças do vento em diferentes velocidades e mudanças de direção. Os sinais amostrados no tempo foram separados nos eixos correspondentes e analisados para avaliar as vibrações no local.

A análise dos sinais amostrados no tempo e a separação nos eixos correspondentes são importantes etapas para a avaliação das vibrações, pois permitem uma compreensão mais precisa das características e comportamento das oscilações da torre em cada eixo.

A direção da gravidade, eixo Z, apresentou estabilidade enquanto as direções X e Y exibiram vibrações consideráveis. A transformada de Fourier foi realizada para determinar a frequência fundamental de vibração nos eixos X e Y, revelando uma frequência de 6 Hz. Isso pode fornecer informações úteis sobre o sistema, como sua ressonância e frequências naturais.

A frequência de 6 Hz indica uma vibração de intensidade considerável nos eixos X e Y, o que pode ser relevante para a transmissão FSO. O trabalho também apresenta uma equação para calcular o deslocamento do feixe FSO na origem a partir dos dados de aceleração e frequência de amostragem, em tempo discreto, e o processo de normalização é realizado para apresentar o gráfico de frequência.

No entanto, a análise dos coeficientes de arrasto e das forças laterais das antenas presentes na torre não foi abordada neste estudo. Em resumo, este estudo forneceu informações sobre as vibrações na torre, que podem ser relevantes para a transmissão FSO, além de apresentar uma equação para calcular o deslocamento do feixe FSO na origem baseada nos dados de vibração.

Para uma avaliação mais completa, é recomendável acrescentar informações mais detalhadas sobre a metodologia utilizada e os equipamentos empregados para coleta e análise dos dados, bem como os resultados obtidos e suas implicações práticas.

Em futuros trabalhos, é possível pesquisar os efeitos de vibração em estruturas verticais, torres autoportantes, edifícios com geometrias diversas. Pesquisar técnicas de controle de vibração, como estabilização de plataforma, amortecimento, isolamento, balanceamento de vibrações e controle ativo de vibrações. Também é possível considerar a utilização de lentes como uma opção promissora para minimizar os efeitos adversos das vibrações, concentrando e aprimorando os feixes FSO dispersos. No entanto, antes de tomar a decisão de usar lentes, é fundamental avaliar criteriosamente as características das vibrações e das superfícies que serão utilizadas para refletir ou refratar as ondas.

Uma outra sugestão de trabalhos futuros é considerar a utilização do processamento digital de sinais para minimizar os efeitos das vibrações indesejadas em diversas aplicações FSO. Com a análise dos sinais gerados pelos sensores de vibração, é possível identificar as frequências de vibração indesejadas e aplicar filtros digitais para reduzir a sua intensidade. Além disso, essa técnica permite o monitoramento constante de equipamentos e estruturas, identificando tendências e comportamentos anômalos e evitando problemas de maior gravidade no futuro.

Referências Bibliográficas

- [1] BOUCHET, Olivier, SIZUN, Hervé, BOISROBERT, Christian, FORNEL, Frédérique de, FAVENNEC, Pierre-Noël. Free-Space Optics, Propagation and Communication. ISTE: London, 2006.
- [2] H. Willebrand and B.S. Ghuman. Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks. Sams Other Series. Sams, 2002.
- [3] Alan Weissberger; AT&T and Verizon to use Integrated Access and Backhaul for 2021 5G networks; IEEE ConSoc 2019. Disponível em: <<https://techblog.comsoc.org/2019/12/16/att-and-verizon-to-use-integrated-access-and-backhaul-for-2021-5g-networks/>> - acesso em 05/04/2023.
- [4] Pinto, Lucia & Martins, Fernando & Pereira, Enio. (2017). O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science. 12. 1082. DOI: 10.4136/ambi-agua.2064.
- [5] Windy; The real-time wind, temperature and wheatear map; Windy Community 2021. Disponível em: <<https://windy.com>> - acesso em 05/04/2023.
- [6] Singh, Jasvir & Gilawat, Pushpa & Shah, Balkrishna. (2014). Performance Evaluation of 32x40 Gbps (1.28 Tbps) FSO Link using RZ and NRZ Line Codes. International Journal of Computer Applications. 85. 10.5120/14831-3084.
- [7] SCOTT BLOOM, PhD – The Physics of Free-Space Optics; Chief Technical Officer. AirFiber, Inc. 2 may 2002.
- [8] IEC 60825-1:2014 / ISH1:2017 - Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/61058>> - acesso em 05/04/2023.
- [9] Karl Schulmeister, Ph.D; Seibersdorf Labor GmbH Laser, LED & Lamp Safety Test House and Consulting 2444 Seibersdorf, Austria; 2017. Disponível em: <https://laser-led-lamp-safety.seibersdorf-laboratories.at/fileadmin/uploads/intranet/dateien/le/laser/whitepaper_iec-60825-1_v1d.pdf> - acesso em 05/04/2023.
- [10] Free Space Optical Communications — Theory and Practices By Abdulsalam Ghalib Alkholidi and Khaleel Saeed Altowij - Submitted: May 29th 2014 - Reviewed: July 18th 2014Published: November 26th 2014.
- [11] Brandt Pearce; Optical Wireless Communications; 2014 - Disponível em: <<https://www.slideserve.com/jolene/prof-brandt-pearce-lecture-1-introduction>> - pag. 14 - acesso em 03/04/2023.
- [12] International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. Fixed service applications using free-space optical link. Report ITU-R F.2106-1, Nov. 2010.

- [13] Gouveia, Fahim - Projeto de um transceptor ótico para comunicação digital em espaço livre / F. Gouveia. - ed.rev. - São Paulo, 2007. 116 p. - Dissertação de Mestrado.
- [14] Ramasamy, K. (2007). Network routing: algorithms, protocols, and architectures. Morgan Kaufmann - ISBN 13: 978-0-12-088588-6 - Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier. 500 Sansome Street, Suite 400, San Francisco, CA 94111.
- [15] Maha Achour. Free-space optics wavelength selection: 10 micrometro versus shorter wavelengths. J. Opt. Netw., 2(6):127 - 143, Jun. 2003.
- [16] Scott Bloom, Eric Korevaar, John Schuster, and H. Willebrand. Understanding the performance of free-space optics. Journal of Optical Networking, 2(6):178-200, 2003.
- [17] AGRAWAL, G. P. Sistema de comunicação por fibra óptica. 4ª. Ed. Elsevier, 2014.
- [18] Bender, V. C. (2012). METODOLOGIA DE PROJETO ELETROTÉRMICO DE LEDs APLICADA AO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica).
- [19] W. Tomasi (2003). Comunicaciones con Fibra óptica, En: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Cuarta Edición, Capítulo 11, Guillermo Trujado Mendoza, PEARSON EDUCACIÓN, Inc, México.
- [20] Almeida, Indira Marília António de - Efeitos da Neblina no Sistema de Comunicações ópticas no Espaço Aberto. / Indira Marília António de Almeida. – Santa Rita do Sapucaí-MG, 2017. - 90p. . - Dissertação de mestrado.
- [21] H. C. Casey, Jr. e M. B. Panish, "Heterostructure Lasers", Academic Press, Orlando, (1978).
- [22] Vertical Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL) - Twenty-One Semiconductors - INNOVATIONLaser Concepts - Disponível em: <<https://www.21semiconductors.com/innovation/laser-concepts/>> - acesso em 02/04/2023.
- [23] Jonathan Hugo León Apolo, R. C. Vaca Ron, (2008). Estudio de factibilidad y simulación de una red inalámbrica óptica basada en la tecnología FSO (Free Space Optical), para mejorar el rendimiento del backbone actual de la ESPE campus Sangolquí, Dpto. Ciencias de la computación, Escuela Politécnica del ejercito. Disponível em:< <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/1085/1/T-ESPE-021878.pdf>> - acesso em 02/04/2023.
- [24] Al Naboulsi, H Sizun, De Fornel F, France Telecom, Bp Belfort Cédex, Université De Bourgogne, Avenue Alain, and Savary Bp Dijon. Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere. Rain, 2005.

- [25] International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links. Recommendation ITU-R P.1817-1, Feb. 2012.
- [26] S.G. Kelly. Schaum's outline of theory and problems of mechanical vibrations. Schaum's Outline Series, 1996.
- [27] RAO, S. S., "Mechanical Vibration - Third Edition", Addison-Wesley Publishing Company, New York, 2012.
- [28] NEWTON SURE SOEIRO., "Fundamentos de Vibrações e Balanceamento de Rotores", Grupo de Vibrações e Acústica – GVA - UFPA, Belém-PA, 2008.
- [29] Muthalif A.G.A., Turahim K.K., Rahim S.A. (2013) Active Vibration Isolation System to Improve Free Space Optics Communication. In: Lu W., Cai G., Liu W., Xing W. (eds) Proceedings of the 2012 International Conference on Information Technology and Software Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 211. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34522-7_40.
- [30] Pérez Porto, J., Gardey, A. (30 de abril de 2010). Definición de viento - Qué es, Significado y Concepto. Definicion.de. Última actualización el 18 de noviembre de 2021. Recuperado el 13 de febrero de 2023. Disponível em: <<https://definicion.de/viento/>> - acesso em 02/04/2023.
- [31] MENDIS, P., NGO T., HARITOS N., HIRA A. Wind Loading on Tall Buildings. 2007. Publicação: EJSE Special Issue: Loading on Structures (2007).
- [32] ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma Brasileira NBR-6123 (NB-599): Forças Devidas ao Vento em Edificações. Rio de Janeiro, Edição 1988.
- [33] GRÁFICO DAS ISOPLETAS DE VELOCIDADES BÀSICA DOS VENTOS - Conforme NBR-6123 - ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. - Catálogo de Técnico AGLO 3.2 - Pg 03- OlgaColor - Alumínio - 2019. Disponível em: <<https://www.olgacolor.com.br/catalogo/catalogo-AGLO3.2-web.pdf>> - acesso em 02/04/2023.
- [34] BLESSMANN, J. Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1998.
- [35] ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma Brasileira NBR-6118 (2014): Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, Edição 2014.
- [36] - INVENSENSE, "MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4", AGO/2013. Disponível em: <<https://www.invensense.com/wpcontent/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>>. Acesso em: 20/02/2023.

- [37] TUTORIAL MPU6050, ACELERÓMETRO Y GIROSCOPIO. Disponível em: <https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html> - acesso em 20/02/2023.
- [38] EL BUS I2C EN ARDUINO - 18 MAYO, 2016. Disponível em: <<https://www.luisllamas.es/arduino-i2c/>> - acesso em 20/02/2023.
- [39] Arduino Uno Rev3 - 2021, Disponível em: <<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3/>> - acesso em 20/02/2023.
- [40] A Tour Of The Arduino UNO Board - Vasudhendra Badami - 2016, Disponível em: <<https://www.hackerearth.com/blog/developers/a-tour-of-the-arduino-uno-board/>> - acesso em 20/02/2023.
- [41] What is MATLAB - The MathWorks, Inc. - 2023, Disponível em: <<https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>> - acesso em 24/02/2023.
- [42] GEOMETRIA PLANA - Área de interseção de duas circunferências - Profº Sandro Curió - UFF - 2020, Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=BqJRp1fP9hs>> - acesso em 02/03/2023.
- [43] GEOMETRIA PLANA - Área de interseção de duas circunferências - WolframAlpha - 2023, Disponível em: <<https://www.wolframalpha.com/input?i=area+interserction+between+two+circle+s/>> - acesso em 02/03/2023.
- [44] FÍSICA GERAL - Por que vemos a luz do laser verde no céu e não vemos a luz do laser vermelho - Profº Fernando Lang da Silveira - UFRGS - 2014, Disponível em: <<https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=por-que-vemos-a-luz-do-laser-verde-no-ceu-e-nao-vemos-a-luz-do-laser-vermelho/>> - acesso em 05/03/2023.
- [45] A PERCEPÇÃO DAS CORES - Vera Lucia Martins de Mello - Aula 9 - Instrumentação para o Ensino de Física IV - Centro de Educação Superior a Distância - CESAD/UFS - 2023, Disponível em: <https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/15094615102012Intrumentacao_para_o_Ensino_de_Fisica_IV_Aula_9.pdf> - acesso em 03/04/2023.
- [46] RESNICK, Robert; HALLIDAY, David; KRANE, Kenneth S. Física, v. 1. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [47] Discrete-time Signal Processing - Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer, John R. Buck. Prentice Hall, 1999 - 870 pág. - Prentice-Hall signal processing series, ISSN 1050-2769.

Apêndice - Códigos Arduino e Matlab

a. Código fonte do Arduino UNO R3

```
1 //IFPB - Arduino
2 //Coleta Vibração MicroSD
3 //Assis Santos - 20/04/2023
4
5 //----- MPU
6 //Carrega a biblioteca Wire
7 #include<Wire.h>
8
9 //----- microSD
10 // Bibliotecas para utilizar o módulo microSD
11 #include <SD.h>
12 #include <SPI.h>
13 #include "MPU6050.h"
14
15 //Inicia variável de tempo
16 //unsigned long mseg;
17
18 //----- MPU6050
19 //Endereço I2C do MPU6050
20 const int MPU = 0x68;
21 //Variáveis para armazenar valores dos sensores
22 int AcX, AcY, AcZ, Tmp, GyX, GyY, GyZ;
23 float f_AcX, f_AcY, f_AcZ, f_Tmp, f_GyX, f_GyY, f_GyZ; //t_seg;
24 String amostra1, amostra2, amostra3;
25 //int arq = 0;
26
27 //----- microSD
28 File myFile;
29 int pinoSS = 10; // Pin 53 para Mega / Pin 10 para UNO
30
31 void lerMPU6050() {
32     //----- MPU
33
34     Wire.beginTransmission(MPU);
35     Wire.write(0x3B); // starting with register 0x3B (ACCEL_XOUT_H)
36     Wire.endTransmission(false);
37
38     //Solicita os dados do sensor
39     Wire.requestFrom(MPU, 14, true);
40     //Armazena o valor dos sensores nas variáveis correspondentes
41     AcX = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //0x3B (ACCEL_XOUT_H) & 0x3C
42     (ACCEL_XOUT_L)
43     AcY = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //0x3D (ACCEL_YOUT_H) & 0x3E
44     (ACCEL_YOUT_L)
45     AcZ = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //0x3F (ACCEL_ZOUT_H) & 0x40
46     (ACCEL_ZOUT_L)
47     Tmp = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //0x41 (TEMP_OUT_H) & 0x42
48     (TEMP_OUT_L)
49     GyX = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //0x43 (GYRO_XOUT_H) & 0x44
50     (GYRO_XOUT_L)
51     GyY = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //0x45 (GYRO_YOUT_H) & 0x46
52     (GYRO_YOUT_L)
53     GyZ = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //0x47 (GYRO_ZOUT_H) & 0x48
54     (GYRO_ZOUT_L)
55
56     f_AcX = (float) AcX/ 16383.5 * 9.80665;
57     f_AcY = (float) AcY/ 16383.5 * 9.80665;
58     f_AcZ = (float) AcZ/ 16383.5 * 9.80665;
59
60 }
```

```

61
62 //f_Tmp= Tmp/340.00+36.53;
63
64 f_GyX = (float) GyX / 131.0;
65 f_GyY = (float) GyY / 131.0;
66 f_GyZ = (float) GyZ / 131.0;
67
68 //mseg = millis();
69 //t_seg = (float) mseg/1000;
70 }
71
72 ////////////////////////////////////////////////// SETUP
73 void setup()
74 {
75 //----- MPU6050
76 Serial.begin(9600);
77 // Inicializa o MPU-6050
78 Wire.begin();
79
80 Wire.beginTransmission(MPU);
81 Wire.write(0x6B);
82 Wire.write(0);
83 Wire.endTransmission(true);
84
85 //mpu.setXAccelOffset(-238);
86 //mpu.setYAccelOffset(135);
87 //mpu.setZAccelOffset(1301);
88
89 // Configura Giroscópio para fundo de escala desejado
90 /*
91 Wire.write(0b00000000); // fundo de escala em +/-250°/s
92 Wire.write(0b00001000); // fundo de escala em +/-500°/s
93 Wire.write(0b00010000); // fundo de escala em +/-1000°/s
94 Wire.write(0b00011000); // fundo de escala em +/-2000°/s
95 */
96
97 Wire.beginTransmission(MPU);
98 Wire.write(0x1B);
99 Wire.write(0b00011000); // Trocar esse comando para fundo de escala
100 desejado conforme acima
101 Wire.endTransmission();
102
103 // Configura Acelerometro para fundo de escala desejado
104 /*
105 Wire.write(0b00000000); // fundo de escala em +/-2g
106 Wire.write(0b00001000); // fundo de escala em +/-4g
107 Wire.write(0b00010000); // fundo de escala em +/-8g
108 Wire.write(0b00011000); // fundo de escala em +/-16g
109 */
110 Wire.beginTransmission(MPU);
111 Wire.write(0x1C);
112 Wire.write(0b00000000); // Trocar esse comando para fundo de escala
113 desejado conforme acima
114 Wire.endTransmission();
115 //delay(100);
116
117 //-----Inicializa microSD -----
118
119 pinMode(pinoSS, OUTPUT); // Declara pinoSS como saída
120 SD.begin();
121 //if (SD.begin()) { // Inicializa o SD Card
122 //Serial.println("SD Card pronto para uso."); // Imprime na tela
123 //}else{
124 //Serial.println("Falha na inicialização do SD Card.");
125 // return;
126 //}
127
128

```

```

129
130     myFile = SD.open("acel_gir.csv", FILE_WRITE); // Cria / Abre arquivo
131     .csv
132     if (myFile) {
133         myFile.println(" Ax ; Ay ; Az ; Gx ; Gy ; Gz ; Seg "); // Escreve
134         titulos das colunas
135     }
136     myFile.close(); // Fecha o Arquivo após escrever
137
138     //Serial.println(" Ax ; Ay ; Az ; Gx ; Gy ; Gz ; Seg "); // Escreve
139     titulos das colunas
140     //-----Inicializa microSD -----
141
142 }
143
144 ////////////////////////////////////// LOOP
145 void loop()
146 {
147
148     lerMPU6050();
149     f_AcX -= 2*238.0/ 16383.5 * 9.80665;
150     f_AcY += 2*135.0/ 16383.5 * 9.80665;
151     f_AcZ += 2*1301.0/ 16383.5 * 9.80665;
152
153     amostra1 = String(f_AcX) + ";" + String(f_AcY) + ";" + String(f_AcZ) +
154     ";" + String(f_GyX) + ";" + String(f_GyY) + ";" + String(f_GyZ) + ";" +
155     String(millis());
156     //delay(10);
157
158     lerMPU6050();
159     f_AcX -= 2*238.0/ 16383.5 * 9.80665;
160     f_AcY += 2*135.0/ 16383.5 * 9.80665;
161     f_AcZ += 2*1301.0/ 16383.5 * 9.80665;
162     amostra2 = String(f_AcX) + ";" + String(f_AcY) + ";" + String(f_AcZ) +
163     ";" + String(f_GyX) + ";" + String(f_GyY) + ";" + String(f_GyZ) + ";" +
164     String(millis());
165     //delay(10);
166
167     lerMPU6050();
168     f_AcX -= 2*238.0/ 16383.5 * 9.80665;
169     f_AcY += 2*135.0/ 16383.5 * 9.80665;
170     f_AcZ += 2*1301.0/ 16383.5 * 9.80665;
171     amostra3 = String(f_AcX) + ";" + String(f_AcY) + ";" + String(f_AcZ) +
172     ";" + String(f_GyX) + ";" + String(f_GyY) + ";" + String(f_GyZ) + ";" +
173     String(millis());
174     //delay(5);
175
176     //-----Escreve no microSD -----
177     -----
178     myFile = SD.open("acel_gir.csv", FILE_WRITE); // Cria / Abre arquivo
179     .csv
180     if (myFile) { // Se o Arquivo abrir imprime:
180         //Serial.println("OK"); // Imprime na tela
181         //Serial.println("Escrevendo no Arquivo .csv"); // Imprime na tela
182         myFile.println(amostra1); // Escreve dados no MicroSD
183         myFile.println(amostra2); // Escreve dados no MicroSD
184         myFile.println(amostra3); // Escreve dados no MicroSD
185         myFile.close(); // Fecha o Arquivo após escrever
186
187         //Serial.println("Terminado."); // Imprime na tela
188         //Serial.println(" ");
189
190     } else { // Se o Arquivo não abrir
191         //Serial.println("Erro ao Abrir Arquivo .csv"); // Imprime na tela
192     }
193
194 }
195

```

```
196
197 /*
198 * Sensor readings with offsets: 3 0 16375 0 0 -1
199 Your offsets: -238 135 1301 -28 42 39
200
201 */
202
203
204
205
```

b. Código fonte do MatLab R2017b

```
1 %IFPB - MatLab 2017b
2 %FFT Vibração MicroSD
3 %Assis Santos - 18/03/2023
4
5 close('all'); clear('vars');
6
7 % Captura os dados
8 D = readtable('ACEL_GIR__26012023.CSV');
9 %D = readtable('ACEL_GIR__09032023N.CSV');
10 D.Seg = D.Seg ./ 1000;
11
12 % Captura a taxa de amostragem (fs)
13 %Qtd de amostras dividido pelo tempo total do experimento
14 fs = length(D.Seg) ./ (D.Seg(end)-D.Seg(1));
15
16 % Aplica a DFT para pontos discretos
17 %Testa frequências de 1 até 20 Hz
18 F = 1:.2:20;
19
20 X = []; % Variável que salva a transformada (FFT)
21 t = D.Seg(:) - D.Seg(1);
22 for i = 1:length(F)
23     X.x(i) = sum( D.Ax .* (cos(2*pi.*F(i)*t) + 1i.*sin(2*pi.*F(i)*t)));
24     X.y(i) = sum( D.Ay .* (cos(2*pi.*F(i)*t) + 1i.*sin(2*pi.*F(i)*t)));
25     X.z(i) = sum( D.Az .* (cos(2*pi.*F(i)*t) + 1i.*sin(2*pi.*F(i)*t)));
26 end
27 %X.x = X.x./max(abs(X.x)); % Normaliza X (FFT)
28 %X.y = X.y./max(abs(X.y)); % Normaliza Y (FFT)
29 %X.z = X.z./max(abs(X.z)); % Normaliza Z (FFT)
30 X.x = X.x./max(abs(X.x)); % Normaliza X (FFT)
31 X.y = X.y./max(abs(X.y)); % Normaliza Y (FFT)
32 X.z = X.z./max(abs(X.z)); % Normaliza Z (FFT)
33
34 % Plota as frequências
35 figure('color','w');
36 subplot(3,1,1);
37 plot(F,abs(X.x),'DisplayName','Eixo X'); ylim([0 1]);
38 ylabel('FFT(Ax)'); legend('show'); grid('on');
39 title('Transformada dos sinais Ax, Ay e Az');
40 subplot(3,1,2);
41 plot(F,abs(X.y),'DisplayName','Eixo Y'); ylim([0 1]);
42 ylabel('FFT(Ay)'); legend('show'); grid('on');
43 subplot(3,1,3);
44 plot(F,abs(X.z),'DisplayName','Eixo Z'); ylim([0 1]);
45 ylabel('FFT(Az)'); legend('show'); grid('on');
46 xlabel('Frequência [Hz]');
47
48 % Plota as vibrações
49 figure('color','w');
50 subplot(3,1,1);
51 %plot(D.Seg,D.Ax-mean(D.Ax),'DisplayName','Eixo X');
52 ylabel('Ax(m/s2)'); legend('show'); grid('on'); ylim([-1 1]); xlim([0
53 D.Seg(end)]);
54 plot(D.Seg,D.Ax,'DisplayName','Eixo X');
55 ylabel('Ax(m/s2)'); legend('show'); grid('on'); ylim([-1 1]); xlim([0
56 D.Seg(end)]);
57 title('Sinais Amostrados (Média Subtraída)');
58 title('Sinais Amostrados');
59 subplot(3,1,2);
60 %plot(D.Seg,D.Ay-mean(D.Ay),'DisplayName','Eixo Y');
61 ylabel('Ay(m/s2)'); legend('show'); grid('on'); ylim([-1 1]); xlim([0
62 D.Seg(end)]);
63 plot(D.Seg,D.Ay,'DisplayName','Eixo Y');
64 ylabel('Ay(m/s2)'); legend('show'); grid('on'); ylim([-1 1]); xlim([0
65 D.Seg(end)]);
```

```

66 subplot(3,1,3);
67 %plot(D.Seg,D.Az-mean(D.Az),'DisplayName','Eixo Z');
68 ylabel('Az (m/s2)');legend('show');grid('on'); ylim([-1 1]); xlim([0
69 D.Seg(end)]);
70 plot(D.Seg,D.Az,'DisplayName','Eixo Z');
71 ylabel('Az (m/s2)');legend('show');grid('on'); ylim([-1 10]); xlim([0
72 D.Seg(end)]);
73 xlabel('Tempo [s]');
74
75 % Plota as frequencias
76 figure('color','w');
77 subplot(3,1,1);
78 %plot(D.Seg,D.Ax-mean(D.Ax),'DisplayName','Eixo X'); ylabel('Amostras
79 (Ax)');legend('show');grid('on'); ylim([-1 1]);
80 xlim([D.Seg(floor(end/2)) (D.Seg(floor(end/2))+10)]);
81 plot(D.Seg,D.Ax,'DisplayName','Eixo X'); ylabel('Amostras
82 (Ax)');legend('show');grid('on'); ylim([-1 1]);
83 xlim([D.Seg(floor(end/2)) (D.Seg(floor(end/2))+10)]);
84 %title('Sinais Amostrados (Gráfico Ampliado - Média Subtraída)');
85 title('Sinais Amostrados (Gráfico Ampliado)');
86 subplot(3,1,2);
87 %plot(D.Seg,D.Ay-mean(D.Ay),'DisplayName','Eixo Y'); ylabel('Amostras
88 (Ay)');legend('show');grid('on'); ylim([-1 1]);
89 xlim([D.Seg(floor(end/2)) (D.Seg(floor(end/2))+10)]);
90 plot(D.Seg,D.Ay,'DisplayName','Eixo Y'); ylabel('Amostras
91 (Ay)');legend('show');grid('on'); ylim([-1 1]);
92 xlim([D.Seg(floor(end/2)) (D.Seg(floor(end/2))+10)]);
93 subplot(3,1,3);
94 %plot(D.Seg,D.Az-mean(D.Az),'DisplayName','Eixo Z'); ylabel('Amostras
95 (Az)');legend('show');grid('on'); ylim([-1 1]);
96 xlim([D.Seg(floor(end/2)) (D.Seg(floor(end/2))+10)]);
97 plot(D.Seg,D.Az,'DisplayName','Eixo Z'); ylabel('Amostras
98 (Az)');legend('show');grid('on'); ylim([-1 10]);
99 xlim([D.Seg(floor(end/2)) (D.Seg(floor(end/2))+10)]);
100 xlabel('Tempo [s]');
101
102 %% Ponto flutuante
103 E = [];
104 E(1).Px = 0; % Posição eixo X
105 E(1).Py = 0; % Posição eixo Y
106 E(1).Pz = 0; % Posição eixo Z
107 E(1).Vx = 0; % Velocidade eixo X
108 E(1).Vy = 0; % Velocidade eixo Y
109 E(1).Vz = 0; % Velocidade eixo Z
110
111 % Retira a média para garantir que volte para a origem corrigindo falha
112 do
113 % acelerometro
114 D.Ax = D.Ax - mean(D.Ax);
115 D.Ay = D.Ay - mean(D.Ay);
116 D.Az = D.Az - mean(D.Az);
117
118 figure('color','w'); hold('on');
119 Rasto = plot(0,0,'-', 'LineWidth',0.5);
120 UltimoPonto = plot(0,0,'ro', 'MarkerSize',10, 'MarkerFaceColor','r'); %
121 Rasto
122 xlim([-0.25 0.25]); ylim([-0.25 0.25]); grid('on');
123 xlabel('Posição X [mm]'); ylabel('Posição Y [mm]');
124 titulo = get(gca, 'Title');
125
126 for i = 1:length(D.Seg)
127 % Atualiza as posições
128 %E(i+1).Px = E(i).Px + E(i).Vx .* (1/fs); % Eixo X
129 %E(i+1).Py = E(i).Py + E(i).Vy .* (1/fs); % Eixo Y
130 %E(i+1).Pz = E(i).Pz + E(i).Vz .* (1/fs); % Eixo Z
131
132 E(i+1).Vx = D.Ax(i) .* (1/fs); % Eixo X
133 E(i+1).Vy = D.Ay(i) .* (1/fs); % Eixo Y

```

```

134     E(i+1).Vz = D.Az(i) .* (1/fs); % Eixo Z
135
136     E(i+2).Px = E(i+1).Vx .* (1/fs);
137     E(i+2).Py = E(i+1).Vy .* (1/fs);
138     E(i+2).Pz = E(i+1).Vz .* (1/fs);
139
140     fator = 1000;
141     E(i+2).Px = fator*E(i+2).Px;
142     E(i+2).Py = fator*E(i+2).Py;
143     E(i+2).Pz = fator*E(i+2).Pz;
144
145     % Atualiza a velocidade
146     %E(i+1).Vx = E(i).Vx + D.Ax(i) .* (1/fs); % Eixo X
147     %E(i+1).Vy = E(i).Vy + D.Ay(i) .* (1/fs); % Eixo Y
148     %E(i+1).Vz = E(i).Vz + D.Az(i) .* (1/fs); % Eixo Z
149
150     % Corrige o vazio do acelerômetro
151     %E(i+1).Px = E(i+1).Px*.77;
152     %E(i+1).Py = E(i+1).Py*.86;
153     %E(i+1).Pz = E(i+1).Pz*.83;
154
155     % Atualiza a figura e titulo
156     %set(Rasto,'XData',[E.Px].*1E3,'YData',[E.Py].*1E3);
157     set(Rasto,'XData',[E.Px],'YData',[E.Py]); % Eixo Y direcao laser
158     %set(UltimoPonto,'XData',[E(end).Px].*1E3,'YData',[E(end).Py].*1E3);
159     set(UltimoPonto,'XData',[E(end).Px],'YData',[E(end).Py]); % Eixo Y
160     direcao laser
161     set(titulo, 'String', strcat('Tempo:',{' '}, num2str(D.Seg(i),
162     '%.2f'), ' s'));
163     %titulo = title(['Tempo: ',num2str(D.Seg(i)), ' segundos']);
164     %pause(.05);
165     pause(1/fs);
166
167     end
168
169
170

```