



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE CAMPUS FORTALEZA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES
(PPGET)**

ALAN ROBSON DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR ÓPTICO PARA FLUXO DE ÁGUA BASEADO NO
PRINCÍPIO DA INTERFERÊNCIA MULTIMODAL**

**FORTALEZA
2025**

ALAN ROBSON DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR ÓPTICO PARA FLUXO DE ÁGUA BASEADO NO
PRINCÍPIO DA INTERFERÊNCIA MULTIMODAL**

Dissertação apresentada à Coordenação de Pós- Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Micro-Ondas e Óptica Integrada.

Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S586d Silva, Alan Robson da Silva.
DESENVOLVIMENTO DE SENSOR ÓPTICO PARA FLUXO DE ÁGUA BASEADO NO PRINCÍPIO DA INTERFERÊNCIA MULTIMODAL / Alan Robson da Silva Silva. - 2025.
121 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.
1. Vazão Hidrométrica. 2. Sensor Óptico. 3. Fibra Óptica. 4. Interferência Multimodal. I. Título.
CDD 621.382
-



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Processo: 23256.004553/2025-00

Interessado: Alan Robson da Silva

ALAN ROBSON DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE SENSOR ÓPTICO PARA FLUXO DE ÁGUA BASEADO NO PRINCÍPIO DA INTERFERÊNCIA MULTIMODAL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia de Telecomunicações (PPGET) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* de Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Aprovada em: **25/04/2025**.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães (orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Profa. Dra. Dayse Gonçalves Correia Bandeira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE Campus Paracurú

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire

Universidade Federal do Ceará - UFC

Dedico este trabalho ao nosso Senhor Jesus Cristo, criador de todas as coisas visíveis e invisíveis, o Alfa e o Ômega, Princípio e o Fim. Dedico também a toda a minha família.

Agradecimentos

Meus Agradecimentos a Deus, Jesus Cristo Nosso Senhor e Salvador, que por meio de sua Cruz redimiste os pecados da humanidade, nos dando a oportunidade de alcançar a vida eterna, que se não fosse por meio de sua vontade, não estaria escrevendo este trabalho.

Agradeço também a minha mãe Maria das Dores de Jesus da Silva, e as minhas irmãs Elisângela Maria da Silva e Rosângela maria da Silva por tudo que tenho em minha vida, principalmente a oportunidade de estar finalizando este curso, sendo que se não fosse por Deus e pela minha família, isso não seria possível.

Também agradeço a todos os meus amigos que conheci durante a os trabalhos no Laboratório Fotônica, ao Laboratório Fotônica em si pelo apoio e ajuda durante todo o desenvolvimento do projeto

Agradeço também ao professor que me orientou, o doutor Glendo de Freitas Guimarães, por toda a sua orientação e paciência.

Também agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa durante esses dois anos de projeto.

”Educação não transforma o mundo. Educação muda as pessoas.
Pessoas transformam o mundo..”

(Paulo Freire)

RESUMO

O consumo de água é um fator de grande importância para a sociedade como um todo, pois esse recurso é essencial para a vida e faz parte do cotidiano de todos. Para medir o consumo de água em uma determinada residência, são utilizados os hidrômetros mecânicos convencionais (medidores de vazão de água). Considerando as dificuldades enfrentadas pelos medidores convencionais, faz-se necessário o desenvolvimento de um protótipo de dispositivo capaz de mensurar sem impactar diretamente no fluxo de água, e assim evitar a perda de carga nas pás da turbina do próprio hidrômetro, e para isso, a utilização da fibra óptica como elemento sensor pode atender essa demanda. O trabalho proposto apresenta o desenvolvimento de um protótipo de um sensor óptico capaz de mensurar quantitativamente o valor de vazão (L/min) em uma determinada tubulação com diâmetro de 3/4" (19,05mm) baseado no princípio da interferência multimodal. Dessa forma, o princípio de funcionamento do sensor proposto neste trabalho baseia-se na configuração de fibras *Single-Mode (SM)* e *Multi-Mode (MM)*, obedecendo a sequência SM-MM-SM, ou seja, SMS. O princípio da interferência multimodal se relaciona com a formação de auto imagens, cujo sinal pode ser modulado por uma determinada perturbação externa, sendo que essa perturbação será ocasionada pela passagem do fluxo de água ao longo da tubulação, interferindo diretamente na passagem da intensidade luminosa pela fibra, e assim, sendo possível relacionar a variação da potência luminosa na saída do sistema SMS com a intensidade do fluxo de água que passa ao longo do trecho da tubulação em análise. Os testes controlados em laboratório foram conduzidos de forma que a tubulação fosse exposta à pequenas quantidades de água, sendo registrado o tempo que o fluido levou para percorrer todo o trajeto, ao final, a vazão deste teste foi calculada. Em paralelo ao teste, foi coletada a tensão fornecida pelo fotodiodo que estava conectado à configuração SMS que fornecia a potência luminosa do laser com comprimento de onda de 1550 nm e 785 nm, para assim, relacionar a tensão na saída do fotodiodo com a vazão do fluido e com a frequência dominante das vazões. Foram utilizadas as vazões de 19, 22, 25, 27 e 29 L/min. Ao final foram obtidos gráficos de frequência para cada vazão, e ao analisá-los, foi possível constatar que o contator do fluxo de água na fibra multimodo influencia diretamente a interação dos modos de propagação no interior da fibra multimodo, influenciando diretamente no sinal construtivo na saída da estrutura SMS utilizada no dispositivo proposto.

Palavras-chave: Vazão Hidrométrica. Sensor Óptico. Fibra Óptica. Interferência Multimodal.

ABSTRACT

Water consumption is a factor of great importance for society as a whole, as this resource is essential for life and is part of everyone's daily life. To measure water consumption in a given residence, conventional mechanical water meters (water flow meters) are used. Considering the difficulties faced by conventional meters, it is necessary to develop a prototype device capable of measuring without directly impacting the water flow, and thus avoiding the loss of load on the turbine blades of the water meter itself, and for this, the use of optical fiber as a sensing element can meet this demand. The proposed work presents the development of a prototype of an optical sensor capable of quantitatively measuring the flow value (L/min) in a given pipe with a diameter of 3/4" (19.05mm) based on the principle of multimodal interference. Thus, the operating principle of the sensor proposed in this work is based on the configuration of *Single-Mode (SM)* and *Multi-Mode (MM)* fibers, obeying the sequence SM-MM-SM, that is, SMS. The principle of multimodal interference is related to the formation of self-images, whose signal can be modulated by a certain external disturbance, and this disturbance will be caused by the passage of water flow along the pipe, directly interfering with the passage of light intensity through the fiber, and thus, it is possible to relate the variation in light power at the output of the SMS system with the intensity of the water flow that passes along the section of pipe under analysis. that the pipe was exposed to small amounts of water, recording the time it took for the fluid to travel the entire path, at the end, the flow rate of this test was calculated. In parallel to the test, the voltage supplied by the photodiode that was connected to the SMS configuration that provided the light power of the laser with wavelengths of 1550 nm and 785 nm was collected, in order to relate the voltage at the photodiode output with the fluid flow rate and the dominant frequency of the flows. Flow rates of 19, 22, 25, 27 and 29 L/min were used. In the end, frequency graphs were obtained for each flow, and when analyzing them, it was possible to see that the water flow contactor in the multimode fiber directly influences the interaction of propagation modes inside the multimode fiber, directly influencing the constructive signal at the output of the SMS structure used in the proposed device.

Keywords:Hydrometric Flow Rate. Optical Sensor. Optical Fiber. Multimodal Interference.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Base de Dados	22
Figura 2 – Representação do Conceito de Vazão.	23
Figura 3 – Hidrômetro Convencional	24
Figura 4 – Estrutura de uma Fibra Óptica.	26
Figura 5 – Ângulo de Lançamento da Luz na Fibra.	26
Figura 6 – Cone de aceitação.	27
Figura 7 – Fibra óptica monomodo.	28
Figura 8 – Fibra óptica multimodo de índice degrau.	29
Figura 9 – Fibra óptica multimodo de índice gradual.	29
Figura 10 – Interferência Multimodal.	30
Figura 11 – Princípio de funcionamento do laser.	32
Figura 12 – Princípio de funcionamento do fotodiodo.	33
Figura 13 – Experimento de Ding et al. (2023).	36
Figura 14 – Experimento de Morshed, Atta e Packirisamy (2021).	37
Figura 15 – Configuração do setup experimental.	41
Figura 16 – Estruturas do <i>Setup</i> experimental.	42
Figura 17 – Configuração do Setup Experimental para o Laser 785 nm.	43
Figura 18 – Etapas Funcionamento Sensor de Vazão Óptico.	44
Figura 19 – Conexão do patch cabel com o adaptador SC-UPC.	45
Figura 20 – Conexão da fibra multimodo na tubulação.	46
Figura 21 – Estrutura Mecânica.	48
Figura 22 – Estrutura Mecânica - localização da bomba hidráulica.	49
Figura 23 – Bomba Hidráulica.	50
Figura 24 – Unidade de acoplamento óptico.	51
Figura 25 – Acoplador da Fibra multimodo.	52
Figura 26 – Osciloscópio Tektronix Tbs1052b EDU 50MHz.	54
Figura 27 – Fonte de Alimentação DC Regulada MPL-3303M.	55
Figura 28 – Esp32 DevKitC V4 WROOM-32D.	56
Figura 29 – Unidade de Processamento de Dados.	57
Figura 30 – <i>Patch Cable</i> Fibra SC/UPC Para SC/UPC Monomodo.	58
Figura 31 – FG105LVA - Fibra multimodo núcleo Ø105 µm.	59
Figura 32 – Ambiente de Desenvolvimento Android Studio.	60
Figura 33 – Dispositivo de acoplamento da fibra Multimodo.	61
Figura 34 – Distancia entre os orifícios centrais.	62
Figura 35 – Ângulo entre os orifícios centrais.	63
Figura 36 – Seguimento da tubulação.	64

Figura 37 – Comprimento da fibra multimodo.	64
Figura 38 – Fibra acoplada ao dispositivo projetado.	65
Figura 39 – Curvatura da fibra no interior da tubulação.	66
Figura 40 – Fotodiodo 1550 nm com fibra acoplada.	67
Figura 41 – Conexão do Fotodiodo.	67
Figura 42 – Teste de potência do laser 1550 nm.	68
Figura 43 – Montagem do arranjo experimental com o laser diodo 1550 nm.	69
Figura 44 – Montagem do arranjo experimental com o laser diodo 785 nm.	70
Figura 45 – Configuração utilizada no laser Butterfly.	71
Figura 46 – Conexão entre o controlador e o laser diodo 785.	71
Figura 47 – Conexões nos canais do osciloscópio.	72
Figura 48 – laser 1550 nm vazão 1.1 - 19L/min	74
Figura 49 – laser 1550 vazão 1.1 - 19L/min Isolado.	74
Figura 50 – laser 1550 Vazão 1.2 - 22L/min Isolado.	75
Figura 51 – laser 1550 Vazão 1.3 - 25L/min Isolado.	76
Figura 52 – laser 1550 Vazão 1.4 - 27L/min Isolado.	76
Figura 53 – laser 1550 Vazão 1.5 - 29L/min Isolado.	77
Figura 54 – laser 1550 Vazão 1.6 - 19 à 29L/min Isolado.	77
Figura 55 – laser 1550 Vazão 1.6 - 19 à 29L/min Métricas Estatísticas.	78
Figura 56 – laser 1550 nm Vazão decrescente 2.1 - 29L/min Isolado.	79
Figura 57 – laser 1550 nm Vazão Decrescente 2.2 - 27L/min Isolado.	80
Figura 58 – laser 1550 nm Vazão Decrescente 2.3 - 25L/min Isolado.	80
Figura 59 – laser 1550 nm Vazão decrescente 2.4 - 22L/min Isolado.	81
Figura 60 – laser 1550 nm Vazão decrescente 2.5 - 19L/min Isolado.	81
Figura 61 – laser 1550 Vazão 2.6 - 29 à 19L/min Isolado.	82
Figura 62 – laser 1550 Vazão 2.6 - 29 à 19L/min Métricas estatísticas.	83
Figura 63 – laser 758 nm vazão 1.1 - 19L/min	84
Figura 64 – laser 758 nm vazão 1.1 - 19L/min - Gráfico Isolado	85
Figura 65 – laser 758 nm vazão 1.2 - 22L/min - Gráfico Isolado	85
Figura 66 – laser 758 nm vazão 1.3 - 25L/min - Gráfico Isolado	86
Figura 67 – laser 758 nm vazão 1.4 - 27L/min - Gráfico Isolado	86
Figura 68 – laser 758 nm vazão 1.5 - 29L/min - Gráfico Isolado	87
Figura 69 – laser 785 vazão 1.6 - 19 à 29L/min Isolado.	87
Figura 70 – laser 758 nm Vazão 1.1 - 19L/min - Gráfico isolado na frequência	88
Figura 71 – laser 758 nm Vazão 1.2 - 22L/min - Gráfico isolado na frequência	89
Figura 72 – laser 758 nm Vazão 1.3 - 25L/min - Gráfico isolado na frequência	89
Figura 73 – laser 758 nm Vazão 1.4 - 27L/min - Gráfico isolado na frequência	90
Figura 74 – laser 758 nm Vazão 1.5 - 29L/min - Gráfico isolado na frequência	90
Figura 75 – laser 785 nm Vazão 1.6 - 19-29L/min - Gráfico das Frequências	91
Figura 76 – Laser 785 nm Vazão 1.6 - 19-29L/min - Vazão, frequência e módulo do sinal.	92

Figura 77 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.1 - 29L/min	93
Figura 78 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.1 - 29L/min - Gráfico isolado	93
Figura 79 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.2 - 27L/min - Gráfico isolado	94
Figura 80 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.3 - 25L/min - Gráfico isolado	94
Figura 81 – laser 758 nm Vazão Decrescente 1.4 - 22L/min - Gráfico isolado	95
Figura 82 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.5 - 19L/min - Gráfico isolado	95
Figura 83 – laser 785 Vazão 1.6 - 29 à 19L/min Isolado.	96
Figura 84 – laser 785 nm Vazão Decrescente 1.6 - 29 à 19L/min Métricas Estatísticas.	97
Figura 85 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.1 - 29L/min - Gráfico isolado na frequência	98
Figura 86 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.2 - 27L/min - Gráfico isolado na frequência	98
Figura 87 – laser 758 nm vazão decrescente 1.3 - 25L/min - Gráfico isolado na frequência	99
Figura 88 – laser 758 nm vazão decrescente 1.4 - 22L/min - Gráfico isolado na frequência	99
Figura 89 – laser 758 nm vazão decrescente 1.5 - 19L/min - Gráfico isolado na frequência.	100
Figura 90 – Laser 785 nm Vazão 1.6 - 29-19L/min - Vazão, frequência e módulo do sinal.	101
Figura 91 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.1 - 19L/min - Gráfico isolado	102
Figura 92 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.2 - 22L/min - Gráfico isolado	102
Figura 93 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.3 - 25L/min - Gráfico isolado	103
Figura 94 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.4 - 27L/min - Gráfico isolado	103
Figura 95 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.5 - 29L/min - Gráfico isolado	104
Figura 96 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.6 - 27L/min - Gráfico isolado	104
Figura 97 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.7 - 25L/min - Gráfico isolado	105
Figura 98 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.8 - 22L/min - Gráfico isolado	105
Figura 99 – Laser 758 nm vazão Crescente e decrescente 1.9 - 19L/min - Gráfico isolado	106
Figura 100–Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.9 - 19 à 29 e 29 à 19L/min - Gráfico isolado.	106
Figura 101–Laser 785 nm Vazão crescente e decrescente - 19 à 29L/min e 29 À 19L/min métricas estatísticas.	107
Figura 102–Laser 785 nm vazão crescente e decrescente - 19 à 29L/min e 29 À 19L/min métricas Estatísticas.	108
Figura 103–Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.1 - 19L/min - Gráfico isolado na frequência	108
Figura 104–Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.2 - 22L/min - Gráfico isolado na frequência	109
Figura 105–Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.3 - 25L/min - Gráfico Isolado na Frequência	109
Figura 106–Laser 758 nm vVazão crescente e decrescente 1.4 - 27L/min - Gráfico Isolado na Frequência	110
Figura 107–Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.5 - 29L/min - Gráfico isolado na frequência	110

Figura 108–Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.6 - 27L/min - Gráfico isolado na frequência	111
Figura 109–Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.7 - 25L/min - Gráfico isolado na frequência	111
Figura 110–Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.8 - 22L/min - Gráfico isolado na frequência	112
Figura 111–Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.9 - 19L/min - Gráfico isolado na frequência	112
Figura 112–Laser 785 nm Vazão 1.10 - 19 á 29 e 29 à 19 L/min - Vazão, frequência e módulo do sinal.	113
Figura 113–Tela de monitoramento do sensor.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes da Estrutura Mecânica.	47
Tabela 2 – Níveis de Vazão da Bomba Hidráulica.	50
Tabela 3 – Componentes da Estrutura Eletrônica.	53
Tabela 4 – Componentes da estrutura óptica.	57
Tabela 5 – laser 1550: Análise Estatística dos Resultados - 1º Ensaio Vazão 19L/min até 29L/min.	78
Tabela 6 – laser 1550: Análise estatística dos resultados - 2º ensaio vazão 29L/min até 19L/min.	82
Tabela 7 – Análise estatística dos resultados - 1º Ensaio Vazão 19L/min até 29L/min.	88
Tabela 8 – Laser 785 nm: Relação Vazão x Frequência x Módulo do Sinal Vazão 19L/min até 29L/min.	92
Tabela 9 – Análise estatística dos resultados - 2º Ensaio vazão 29L/min até 19L/min.	96
Tabela 10 – Laser 785 nm: Relação Vazão x Frequência x Módulo do Sinal Vazão 29L/min até 19L/min.	100
Tabela 11 – Análise estatística dos resultados - 3º Ensaio vazão 19L/min até 29L/min - 29L/min até 19L/min.	107
Tabela 12 – Laser 785 nm: Relação Vazão x Frequência x Módulo do Sinal Vazão 19 à 29 e de 29 à 19 L/min.	113

Lista de abreviaturas e siglas

IMM	Interferência multimodal ou modal
SM	<i>Single mode</i>
MM	<i>Multi-mode</i>
SMS	<i>Single multi single</i>
MMI	<i>Multimode interference</i>
FBG	<i>Fiber grating bragg</i>
CLFBG	<i>Cladding fiber bragg grating</i>
DP	<i>Pressão diferencial</i>
NCF	<i>No-Core fiber</i>
POF	<i>polymer optical fiber</i>
PC	<i>polarization controller</i>
OSA	<i>Optical spectrum analyzer</i>
UV	<i>Ultravioleta</i>
PCF	<i>Fiber cristal photonic</i>
SC-UPC	<i>Conector óptico ultra physical contact</i>
PETG	<i>Polietileno tereftalato glicol</i>
USB	<i>Universal serial bus</i>
DC	<i>Direct corrent</i>
RMS	<i>Root mean square</i>
FC	<i>Fiber Conect</i>
APC	<i>Angled Physical Contact</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>

Lista de símbolos

Q	Vazão
Q_{min}	Vazão mínima
Q_t	Vazão de transição
V	Volume
t	Tempo
n	Índice de refração
λ	Comprimento de onda
λ_0	Comprimento de onda do pulso luminoso.
L_π	Largura do pulso do sinal
θ_i	Ângulo de incidência
θ_r	Ângulo refletido
θ_c	Ângulo crítico
θ_1	Ângulo de entrada
n_1	Índice de refração do núcleo
n_2	Índice de refração da casca
n_{MMF}	Índice de refração do guia de onda utilizado no experimento da interferência multimodal
D_{MMF}	Diâmetro do guia de onda utilizado no experimento da interferência multimodal
$\bar{x}$	Média do sinal
n	Quantidade total de dados
i	Índice do primeiro valor
x_i	Valor do dado correspondente ao seu índice

	Mediana do conjunto de dados X
$\sum_{i=1}^n$	Somatório
$var(X)$	Variância
$X(\omega)$	Transformada de fourier

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Geral	18
1.1.2	Específicos	18
1.2	Produção Científica	18
1.3	Justificativa	19
1.4	Metodologia	19
1.5	Escopo	19
1.6	Delimitação do Tema	19
1.7	Estrutura do Trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Bases de conhecimento	21
2.2	Vazão hidráulica	22
2.3	Hidrômetro Convencional	23
2.4	Fibra Óptica	24
2.4.1	Fibra óptica monomodo de índice-degrau	28
2.4.2	Fibra óptica multimodo de índice-degrau	28
2.4.3	Fibra óptica multimodo de índice-gradual	29
2.5	Interferência multimodal	29
2.6	Transmissor óptico - laser	31
2.7	Receptor óptico - fotodetector	32
2.8	Métricas Estatísticas e Transformada Rápida de Fourier	33
2.8.1	Média	33
2.8.2	Mediana	33
2.8.3	Moda	34
2.8.4	Desvio médio	34
2.8.5	Variância	34
2.8.6	Desvio padrão	35
2.8.7	Transformada rápida de fourier	35
2.9	Métodos e técnicas utilizados para mensurar a vazão por meio da fibra óptica	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Estrutura mecânica	47
3.1.1	Unidade de acoplamento óptico	50

3.1.2	Acoplador da fibra multimodo	51
3.2	Estrutura eletrônica	53
3.2.1	Osciloscópio Tektronix Tbs1052b EDU 50MHz	53
3.2.2	Fonte de Alimentação DC Regulada MPL-3303M	54
3.2.3	Módulo ESP32 DevKitC V4 WROOM-32D 38 Pinos	55
3.2.4	Unidade de processamento de dados	56
3.3	Estrutura óptico	57
3.3.1	<i>Patch cable</i> fibra SC/UPC para sc/upc monomodo	57
3.3.2	FG105LVA - Fibra multimodo núcleo Ø105 µm	58
3.3.3	Aplicativo e Monitoramento da Vazão Óptica	59
3.4	Métodos	60
3.4.1	Dispositivo de acoplamento	60
3.4.2	Preparação da fibra multimodo	64
3.4.3	Conexão do fotodiodo 1550 nm	66
3.4.4	Teste da potência do laser 1550 nm	68
3.4.5	Montagem da setup	68
3.4.6	Ensaio	69
3.4.7	Setup laser diodo 1550 nm	69
3.4.8	Setup Laser Diodo 785 nm	70
3.5	Setup de ensaios	71
	4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1	laser diodo 1550 nm	73
4.1.1	1º Ensaio - Vazão de 19L/min até 29L/min	73
4.1.1.1	Análise no tempo	73
4.1.2	2º Ensaio - Vazão de 29L/min até 19L/min	79
4.1.2.1	Análise no domínio do tempo	79
4.2	laser diodo FPV785S de 785 nm	83
4.2.1	1º Ensaio - Vazão de 19L/min até 29L/min	83
4.2.1.1	Análise no tempo	83
4.2.1.2	Análise no domínio da frequência	88
4.2.2	2º Ensaio - Vazão de 29L/min até 19L/min	92
4.2.2.1	Análise no tempo	93
4.2.2.2	Análise no domínio da frequência	97
4.2.3	3º Ensaio - Vazão de 19L/min até 29L/min e de 29L/min até 19L/min	101
4.2.3.1	Análise no Domínio do Tempo	101
4.2.3.2	Análise no domínio da frequência	107
4.3	Aplicativo Android de monitoramento	115
4.4	Conclusão	116

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
5.1	Trabalhos Futuros	117
	REFERÊNCIAS	119

INTRODUÇÃO

O consumo de água é um fator de grande importância para a sociedade como um todo, pois esse recurso é essencial para a vida. Dessa maneira, faz-se necessário uma maneira de mensurar de forma eficiente o quanto de volume por unidade de tempo esse recurso é consumido em uma determinada residência, indústria etc.

Na indústria, existem inúmeros processos como misturas e separação de reagentes, concentrações adequadas de substâncias específicas, ou seja, proporções necessárias tanto de líquidos, gases ou fluidos de uma maneira geral que necessitam de um controle rigoroso de vazão no processo. Para a medição do consumo de água de uma determinada residência, são utilizados os hidrômetros mecânicos (medidores de vazão), cujo sistema acarreta perda de carga naquele determinado trecho, em razão dos próprios dispositivos utilizados pelo medidor, ou seja, o fluxo de vazão registrado sofre uma redução em relação ao seu valor real. Além disso, medidores de vazão comumente utilizados podem apresentar problemas relacionados ao subdimensionamento ou superdimensionamento, que é quando a tubulação apresenta uma vazão nominal maior do que a que o medidor pode registrar e quando a tubulação apresenta um valor de vazão nominal menor do que o valor mínimo que o dispositivo está capacitado a registrar, respectivamente.

Os hidrômetros convencionais utilizam componentes como conexões, turbinas, reduções entre outros, que acarretam perdas de carga e geram leituras errôneas, fazendo necessário um dispositivo que seja capaz de minimizar essas perdas, para assim registrar um valor de vazão mais exato. Uma maneira de minimizar tais perdas, seria substituir o medidor convencional do fluido em análise, por um composto de dispositivos que apresentem a menor interferência possível no transporte dos fluidos durante a medição, que apresente também um número reduzido de partes móveis e que sejam construídos com materiais que não reajam com os fluidos transportados.

Segundo Olivero et al. (2017), entre as diferentes implementações, os sensores de fibra óptica SMS, que em tradução livre significa monomodo-multimodo-monomodo, têm recebido grande atenção nos últimos anos porque podem exibir alta sensibilidade, simplicidade do sistema, e ainda eficiência de custos, em relação a muitos sensores tradicionais, pois os sensores interferométricos são dispositivos capazes de gerar um sinal construtivo ou destrutivo na saída de um sistema, quando submetidos à sinais de entrada.

Dessa forma, Wu et al. (2020) afirma que se for utilizado um material de baixa perda, como a sílica, é possível uma perda de transmissão ultrabaixa, de modo que a atenuação da fibra é muito pequena, cerca de 0,21 dB/km a 1550 nm. Assim, de acordo com Barnoski et al. (1977), Hartog, Leach e Gold (1985), Kurashima, Horiguchi e Tateda (1990), Bernini, Minardo e Zeni (2009), Milne et al. (2020), a vantagem da perda de transmissão ultrabaixa é que possibilita que a fibra óptica seja usada para sensoriamento remoto e distribuído, por exemplo, para detectar perturbações ambientais, como temperatura, deformação e sinais acústicos em uma vasta região geográfica.

Com isso, esse projeto tem como proposta desenvolver um sensor óptico que seja capaz de registrar a variação de fluido por unidade de tempo quando submetido a um fluxo, utilizando tecnologias como a fibra óptica, que é inerte a interferências eletromagnéticas, sendo ainda sensível à perturbações mecânicas externas, fazendo variar a intensidade luminosa percorrida pelo seu interior devido à alterações no caminho óptico percorrido e a vazão enviada pelo sensor terá um sistema de monitoramento para facilitar a visualização em tempo real.

1.1 Objetivos

A seguir serão apresentados os objetivos que contemplam o desenvolvimento desta pesquisa.

1.1.1 Geral

O objetivo desta dissertação de mestrado é desenvolver um sensor óptico de vazão de água capaz de mensurar e monitorar os valores de vazão em uma tubulação.

1.1.2 Específicos

1. Projetar, construir e montar um protótipo de acoplador óptico capaz de armazenar uma fibra óptica multimodo no seu interior;
2. Desenvolver uma Unidade do Transdutor Óptico capaz de acoplar os conectores e fibras ópticas em um sistema de tubulação;
3. Desenvolver uma Unidade de Aquisição e Tratamento de Dados capaz de receber e processar as informações enviados pela Unidade do Transdutor Óptico;
4. Desenvolver um aplicativo Android capaz de receber os dados enviados pela Unidade de Aquisição e Tratamento de dados;
5. Definir uma tecnologia utilizada para que ocorra a comunicação entre a Unidade do Transdutor Óptico e a Unidade de Aquisição de Dados, permitindo o monitoramento dos dados;
6. Projetar um *setup* experimental para o funcionamento do sistema;
7. Utilizar um sensor convencional de Arduino para validar os dados obtidos com os valores de vazão do sistema.

1.2 Produção Científica

Durante o desenvolvimento deste trabalho de mestrado, o seguinte trabalho científico foi publicado, a saber:

1. Evento: SILVA A.R., MAIA, L. S. P., GUIMARÃES, G.F. **DEVELOPMENT OF OPTICAL FLOW SENSOR BASED ON THE PRINCIPLE OF MULTIMODAL INTERFERENCE**, XV Simpósio de Lasers e suas Aplicações, 2023.

1.3 Justificativa

Os hidrômetros convencionais que utilizam o princípio de deslocamento positivo, ainda podem apresentar algumas deficiências em relação à sua estrutura mecânica, como o valor de medida abaixo do esperado, ou seja, uma submedição. Essas deficiências podem ter origem em fatores, como: condições de instalação do equipamento; condições de operação abaixo ou elevada em relação às características de operação do equipamento; dimensionamento realizado de maneira incorreta; ausência de manutenção no equipamento; falha ou leitura incorreta do equipamento e também na vida útil do equipamento, pois, caso o equipamento esteja fora, ou próximo do tempo de vida útil, a sua estrutura interna e os seus componentes poderão estar comprometidos, impactando diretamente na leitura do equipamento.

Com isso, o dispositivo proposto por este trabalho apresenta um valor de medição mais próximo do real na tubulação, pois somente um pequeno seguimento de fibra óptica irá atuar como o elemento sensor ficando em contato direto com o fluxo de água gerando o mínimo de perda de carga, ou seja, perda de pressão no processo de medição. Além disso, esta dissertação ainda propõe o desenvolvimento de um aplicativo de monitoramento da vazão que atravessa a tubulação.

1.4 Metodologia

Para esta dissertação, foi projetado um arranjo experimental onde os ensaios foram realizados, bem como a estrutura do sensor óptico proposto. No arranjo experimental foram realizados ensaios variando a vazão (L/min) do sistema. Esses valores foram analisados e processados por uma unidade de tratamento de dados e validados por um sensor de vazão convencional. A unidade de tratamento de dados é composta por um microcontrolador ESP32(modelo DevKitC V4), bem como o circuito eletrônico capaz de armazenar e exibir os valores por meio do *display*. O monitoramento do sistema é através de um aplicativo Android desenvolvido para esta aplicação.

1.5 Escopo

O sensor proposto é um dispositivo de bancada, tendo assim as suas limitações e aspectos ainda a serem melhorados e otimizados. Os dados registrados pelo sensor óptico são enviados para um aplicativo que tem a função de monitoramento do sistema em tempo real, bastando apenas que o sensor tenha uma rede wi-fi disponível para a conexão.

A vazão analisada pelo sistema possui um valor máximo de 29 L/min, sendo esta a capacidade máxima disponível da bomba hidráulica utilizada no arranjo experimental.

1.6 Delimitação do Tema

O sensor proposto realiza a medição da vazão por meio da tensão detectada pelo fotodiodo. Dessa forma, o dispositivo possui um sistema em que a fibra óptica será acoplada e exposta ao fluxo que atravessa a tubulação.

1.7 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho de dissertação está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo é abordado a introdução, explorando todos os critérios iniciais do trabalho em si. Logo após,

no segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica, onde são abordados os trabalhos encontrados em bases de dados que exploram trabalhos correlatos ao tema desta dissertação. Já o terceiro capítulo é sobre a materiais e métodos onde é explorado todo o desenvolvimento do projeto bem como as suas etapas mais detalhadas. No quarto capítulo, resultados e discussões, são apresentados os resultados obtidos com os ensaios do sensor desenvolvido. No quinto capítulo está a conclusão onde é abordado uma visão geral do trabalho, apresentando os objetivos alcançados e também algumas ideias para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

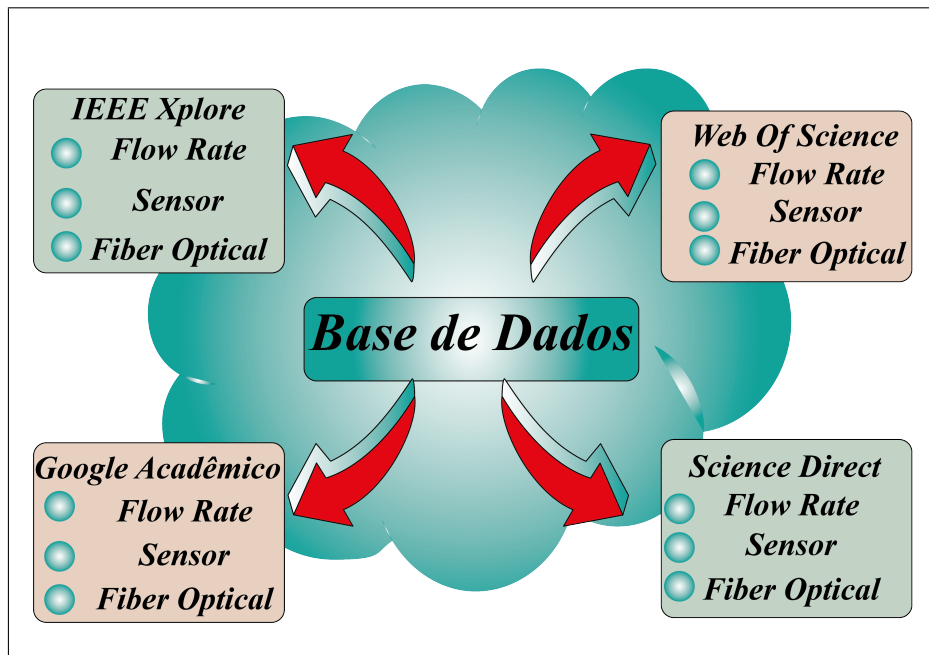
Neste capítulo serão apresentados os conceitos relacionados ao tema deste trabalho, bem como os conceitos de fibra de vazão hidráulica ótica monomodo, multimodo e sobre a interferência multimodal (IMM).

Este capítulo está dividido em nove seções: bases de conhecimento, vazão hidráulica, hidrômetro convencional, fibra ótica, interferência multimodal, transmissor ótico, receptor ótico, métricas estatísticas e métodos e técnicas utilizadas para mensurar a vazão por meio da fibra ótica. No Estado da Arte, são apresentados alguns trabalhos relacionados às aplicações de ferramentas digitais didáticas como melhoria para o melhor desenvolvimento das disciplinas tradicionais em sala de aula. Na seção de Teoria dos Projetos Abordados, são apresentados os conceitos básicos necessários para a compreensão dos projeto de parafuso e de eixo.

2.1 Bases de conhecimento

Para a busca de trabalhos relacionados, foram utilizados quatro bases de dados: *IEEE Xplore*, Google Acadêmico, *Web of Science* e *Science Direct*. Na base *IEEE Xplore* foi utilizado a busca avançada com as palavras chaves *Flow Rate*, *Sensor*, *Fiber Optical*. A estrutura resumida das Bases de Conhecimento é ilustrada na Figura 1, bem como as palavras chaves utilizadas em cada base.

Figura 1 – Base de Dados

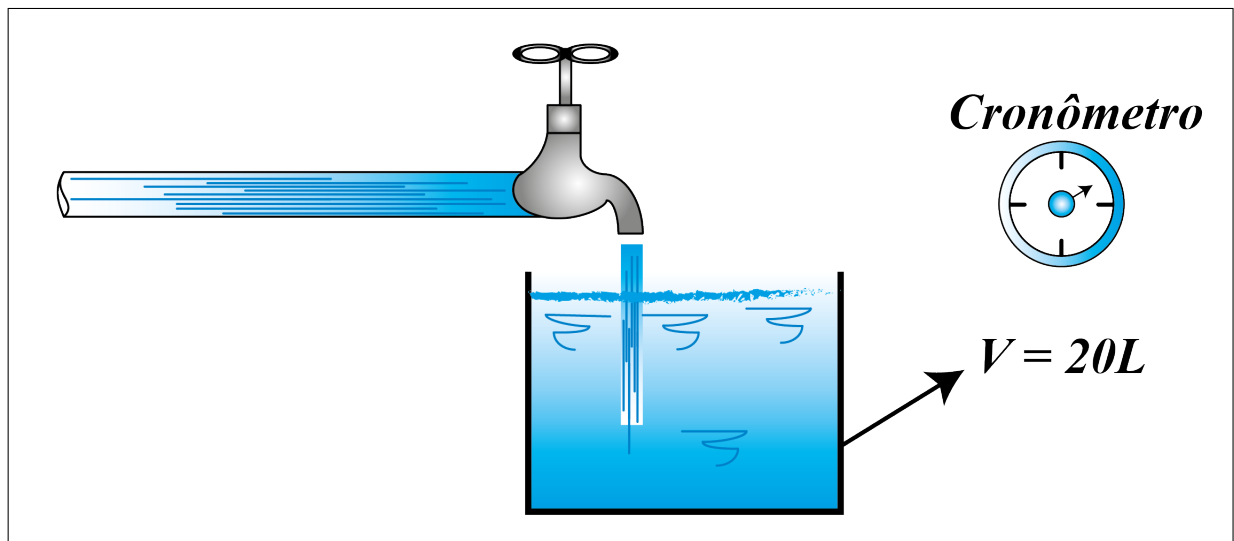


Fonte: Autor (2023).

2.2 Vazão hidráulica

A vazão é definida como a taxa de variação de um determinado volume em relação a uma unidade de tempo, ou seja, a medida com que uma determinada quantidade de massa atravessa uma determinada seção durante um período de tempo, teremos um fluxo. Segundo Brunetti (2008), no capítulo 3 de Vazão - Velocidade Média na Seção, o conceito de vazão (Q) pode ser definido como o volume (V) de fluido que atravessa uma certa seção de escoamento por unidade de tempo (t) em escoamento. Esse conceito pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Representação do Conceito de Vazão.



Fonte: Autor (2023)

Dessa forma, de acordo com a abordagem de Brunetti (2008), a Equação 2.1 descreve a definição de vazão:

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (2.1)$$

onde representa o valor da taxa de variação, V é o volume do fluido que atravessa a seção e o t é a quantidade numérica de tempo utilizada. Em seu livro, Brunetti (2008), explica que as unidades de vazão correspondem à definição: m^3/s , L/s , m^3/h , L/min , ou qualquer outra unidade de volume ou capacidade por unidade de tempo.

De acordo com a Norma NBR NM 212 ABNT (1999), a vazão é expressa em m^3/h , com isso, os medidores dividem-se em três classes metrológicas de acordo com os valores de vazão mínima (Q_{min}) e vazão de transição (Q_t), sendo a vazão mínima a menor vazão que o medidor deve registrar sem que os erros sejam maiores do que o máximo admissível, e a vazão de transição é o valor da vazão situada entre as vazões de sobrecarga e a mínima, no qual o campo de medição divide-se em duas zonas, superior e inferior, cada uma caracterizada pelo valor do erro máximo admissível.

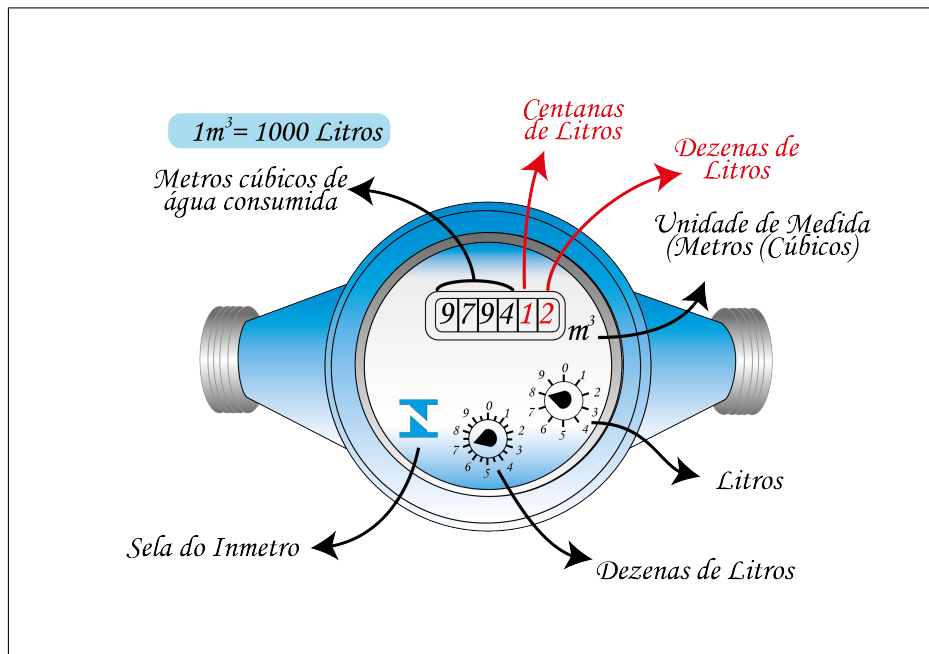
2.3 Hidrômetro Convencional

Na indústria existem inúmeros processos como misturas e separação de reagentes, concentrações adequadas de substâncias específicas, ou seja, proporções necessárias tanto de líquidos, gases ou fluidos de uma maneira geral que necessitam de um controle rigoroso do valor quantitativo da vazão no processo.

Para a medição do consumo de água de uma determinada residência, são utilizados os hidrômetros mecânicos (medidores de vazão), cujos componentes mecânicos podem gerar uma perda de carga naquele determinado trecho, em razão dos próprios dispositivos utilizados pelo medidor, ou seja, o fluxo de vazão registrado pode sofrer uma redução em relação ao seu valor real. Além disso, medidores de vazão comumente utilizados podem apresentar problemas relacionados ao subdimensionamento ou superdimensionamento, que é quando a tubulação apresenta uma

vazão nominal maior do que a que o medidor pode registrar e quando a tubulação apresenta um valor de vazão nominal menor do que o valor mínimo que o dispositivo está capacitado a registrar, respectivamente. A Figura 3 ilustra o modelo de um hidrômetro convencional.

Figura 3 – Hidrômetro Convencional



Fonte: Adaptada pelo Autor (2023).

Os hidrômetros convencionais utilizam componentes como conexões, turbinas, reduções entre outros, que acarretam perdas de carga e geram leituras errôneas, fazendo necessário um dispositivo que seja capaz de minimizar essas perdas, para assim registrar um valor de vazão mais exato. Uma maneira de minimizar essas perdas, seria substituir o medidor convencional do fluido em análise, por um composto por dispositivos que apresentem a menor interferência possível no transporte dos fluidos durante a medição, que apresente reduzido número de partes móveis e que sejam construídos com materiais que não reajam com os fluidos sendo transportados.

Dessa maneira, a utilização da fibra óptica como elemento sensor teria uma grande impacto positivo, pois esta possui propriedades que a qualifica como um meio de transmissão em relação ao cobre (o cobre é uma matéria prima utilizada para a fabricação de fios condutores de eletricidade), como transmissão a longas distâncias, melhor capacidade de informação, pequeno tamanho e peso, imunidade à interferência eletromagnética, aumento de segurança e aumento da privacidade do sinal, ou seja, no seu interior pode-se propagar uma determinada potência luminosa sujeita a sofrer perdas dependendo da intensidade das perturbações externas.

2.4 Fibra Óptica

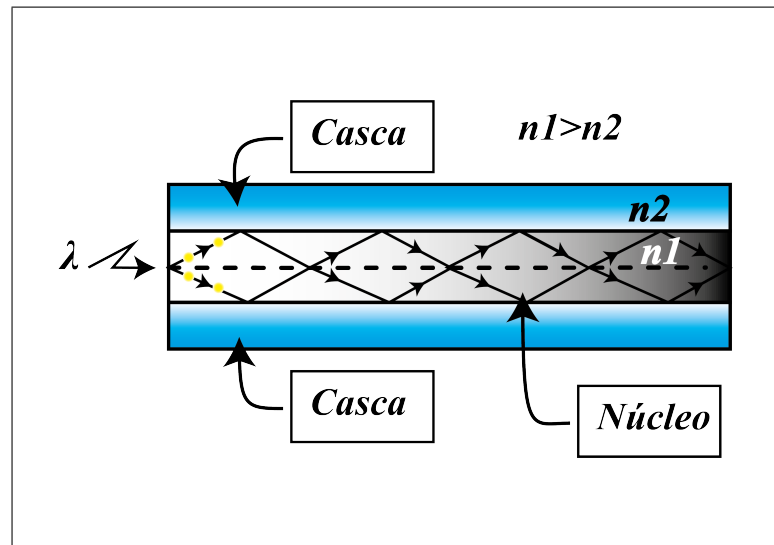
As fibras ópticas são estruturas fabricadas a partir da sílica por meio de um processo específico onde o material é aquecido e em seguida são trefiladas (esticadas para assumirem a forma de fios). Essas estruturas são bastante utilizadas em sistemas de telecomunicações, além disso, segundo Wu et al. (2020), a fibra óptica possui uma série de vantagens exclusivas sobre outros meios de transmissão que incluem tamanho pequeno, peso leve, baixa perda de transmissão e imunidade à interferência de campos eletromagnéticos.

Segundo Keiser (2014), a fibra óptica é um guia de ondas dielétrico que opera nas chamadas frequências ópticas, sendo que esse guia de onda possui geralmente um formato cilíndrico, e dessa maneira, a fibra confina a energia eletromagnética na forma de luz dentro da sua superfície e direciona em uma direção paralela em relação ao eixo da fibra. Dessa forma, a fibra óptica é um dispositivo capaz de fazer com que a luz percorra o seu interior de maneira otimizada, sendo refletida de um extremo a outro no seu interior. Essa reflexão que ocorre, obedece a um parâmetro conhecido por índice de refração.

De acordo com Ribeiro e Antônio (2005), a fibra óptica é um guia de onda composto de um núcleo cilíndrico de sílica envolvido por uma casca, também de sílica, esta por sua vez com índice de refração menor do que o do núcleo, de forma a propiciar a reflexão interna total da luz, fenômeno este que é responsável pela manutenção do feixe óptico no interior do núcleo da fibra óptica.

Dessa forma, conforme Tronco e Avila (2007), a estrutura cilíndrica é composta de uma região central, denominada núcleo, por onde a luz atravessa a fibra óptica; e uma região periférica denominada casca que envolve o núcleo, sendo que índice de refração do material que compõe o núcleo (n_1) é maior do que o índice de refração do material que compõe a casca (n_2), conforme ilustra a Figura 4, sendo assim, é possível permitir que a luz possa ser confinada e transportada no interior da fibra.

Figura 4 – Estrutura de uma Fibra Óptica.

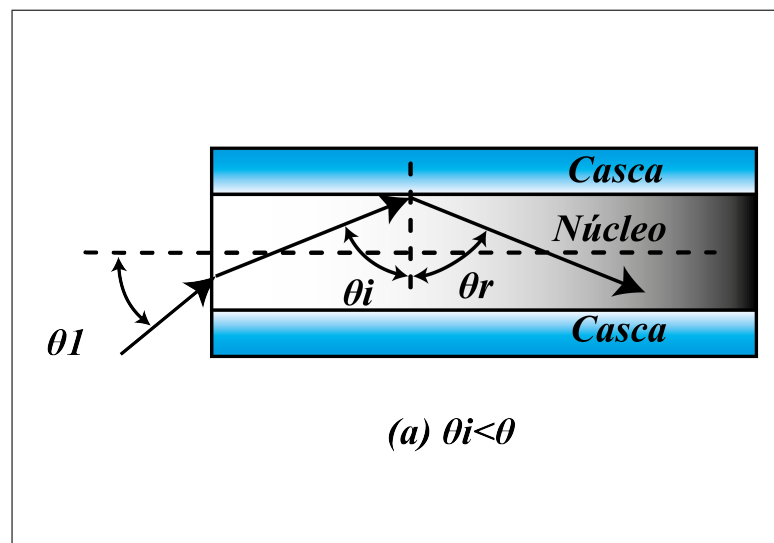


Fonte: Adaptado Tronco e Avila (2007).

De acordo com Tronco e Avila (2007), a transmissão da luz ao longo da região interna da fibra óptica consiste em um processo conhecido como reflexão interna total, fenômeno esse que ocorre quando um feixe de luz emerge de um meio mais denso para um meio menos denso.

Dessa maneira, para que a luz possa ser transmitida na fibra óptica, é necessário que ela alcance a interface entre o núcleo e a casca num ângulo θ_i (que irá gerar um ângulo θ_r de reflexão). Para que isto ocorra, a luz deve ser lançada nas terminações da fibra num ângulo θ_1 que é menor que o ângulo crítico, conforme é ilustrado na Figura 5.

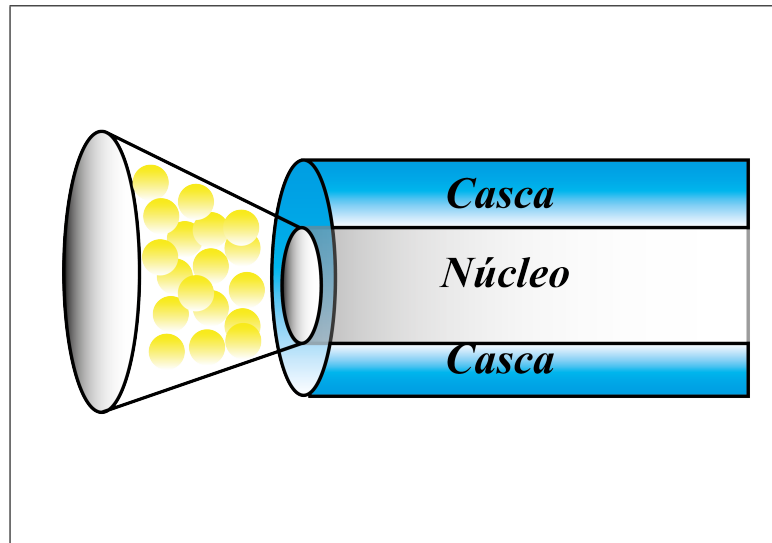
Figura 5 – Ângulo de Lançamento da Luz na Fibra.



Fonte: Adaptado Tronco e Avila (2007).

Esse fenômeno resulta em um cone de aceitação dentro do qual a luz deve ser lançada, conforme é ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Cone de aceitação.



Fonte: Adaptado Tronco e Avila (2007).

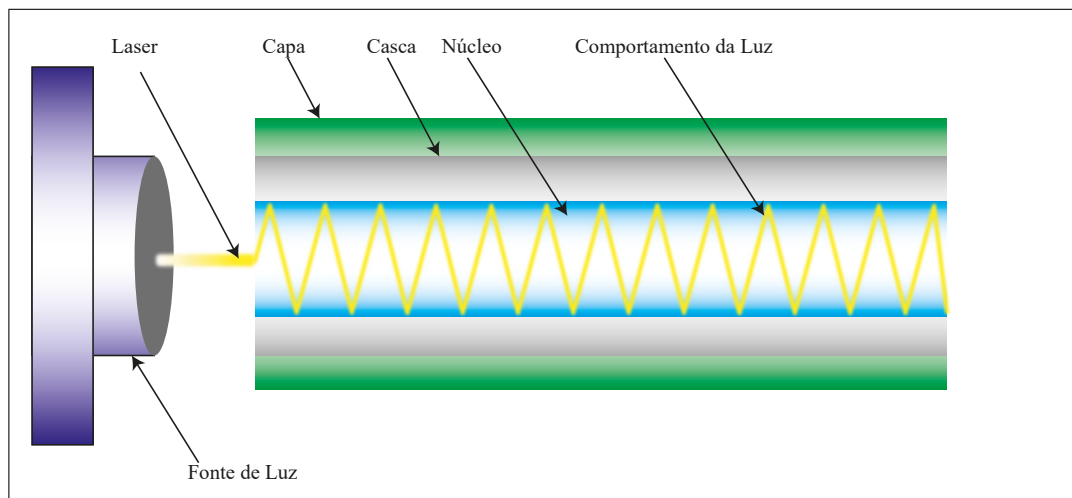
Ainda de acordo com Tronco e Avila (2007) a transmissão da luz nas fibras ópticas está sujeita às perdas devido a efeitos ópticos. Estes efeitos podem ser classificados como lineares e não lineares. Os principais tipos de perdas relativas a efeitos lineares são: atenuação e dispersão. Atenuação refere-se à redução da potência óptica ao longo do comprimento da fibra. Dispersão é a distorção da forma do sinal óptico. Essas perdas são ditas lineares, pois são proporcionais e estão relacionadas ao comprimento da fibra. As perdas em função dos efeitos não-lineares estão relacionados à dependência do índice de refração com a intensidade do campo elétrico empregado. Estes efeitos têm origem na interação das ondas de luz (campo elétrico) com os elétrons do material da fibra, mudando seu índice de refração. As fibras ópticas possuem uma resposta não linear a campos elétricos intensos.

2.4.1 Fibra óptica monomodo de índice-degrau

As fibra ópticas são divididas em dois grupos: A fibra monomodo (SMF - *Singlemode Fiber*) e a fibra multimodo (MMF - *Multimode Fiber*). Dessa forma, o que difere um grupo do outro é o modo de propagação do feixe de luz no interior da fibra óptica.

A fibra multimodo (SMF - *Singlemode Fiber*) é uma estrutura que pode possuir apenas um modo de propagação do feixe de luz no seu interior, ou seja, o sinal luminoso que transpassa o núcleo da fibra, vai se propagar por meio de apenas um modo de propagação. A estrutura da fibra SMF pode ser observada na Figura 7

Figura 7 – Fibra óptica monomodo.



Fonte: Autor (2025)

De acordo com a Figura 7, o feixe de luz entra em uma extremidade da fibra e sai pela outra, durante todo o seu percurso no interior do núcleo, o sinal luminoso se propaga de uma única maneira. Dessa forma, considerando que ocorra o fenômeno da reflexão interna total, sendo o índice de refração do núcleo maior do que o índice de refração da casca, o feixe de luz ficará contido no interior do núcleo, respeitando o perfil de índice de refração degrau ilustrado.

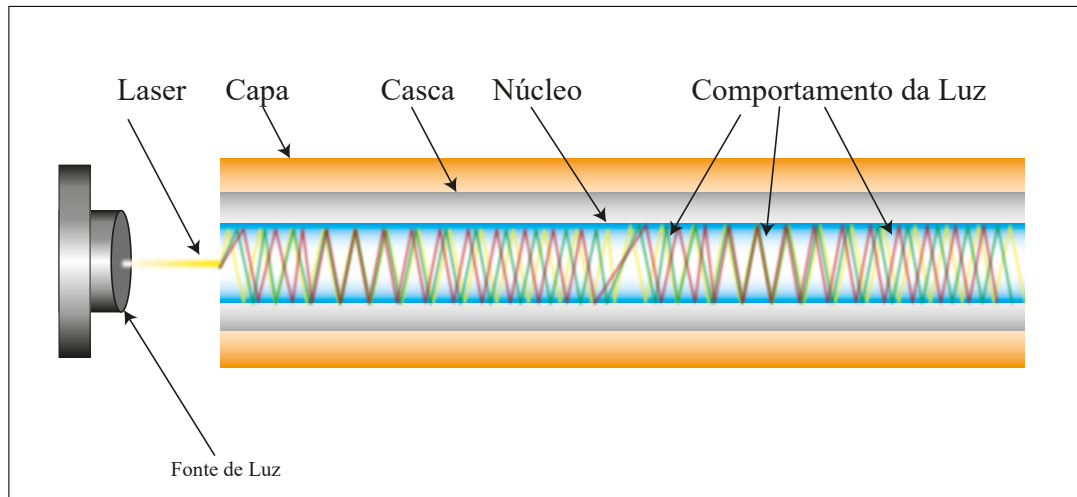
Segundo Keiser (2014), o índice de refração do núcleo é uniforme ao longo do seu comprimento e sofre uma mudança brusca (ou degrau) na interface com a casca, por isso esse tipo de fibra é denominado de fibra de índice degrau. Nesse tipo de fibra, ocorre uma variação abrupta entre os índices de refração, fazendo com que a luz se propague pelo guia de onda de uma maneira única, por isso a denominação de fibra monomodo, por causa do único modo de propagação da luz. Na Figura 7 é ilustrado a maneira como ocorrer a variação do índice de refração degrau.

2.4.2 Fibra óptica multimodo de índice-degrau

Na fibra óptica multimodo de índice degrau ocorre uma variação do modo de propagação da luz que percorre o guia de onda. Essa variação significa que a luz se desloca de várias maneiras no interior da fibra, diferente do que ocorrer na fibra monomodo, onde o deslocamento da luz é único. Entretanto, como o índice de refração ainda é degrau, os vários modos de propagação, sofrem uma variação abrupta de direção quando a luz se aproxima da casca, fazendo com que a luz fique contida no interior do núcleo, além disso, a fibra multimodo possui um diâmetro

de núcleo maior do que a fibra monomodo. Nessa fibra óptica, o feixe de luz se propaga de inúmeras maneiras, como é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Fibra óptica multimodo de índice degrau.

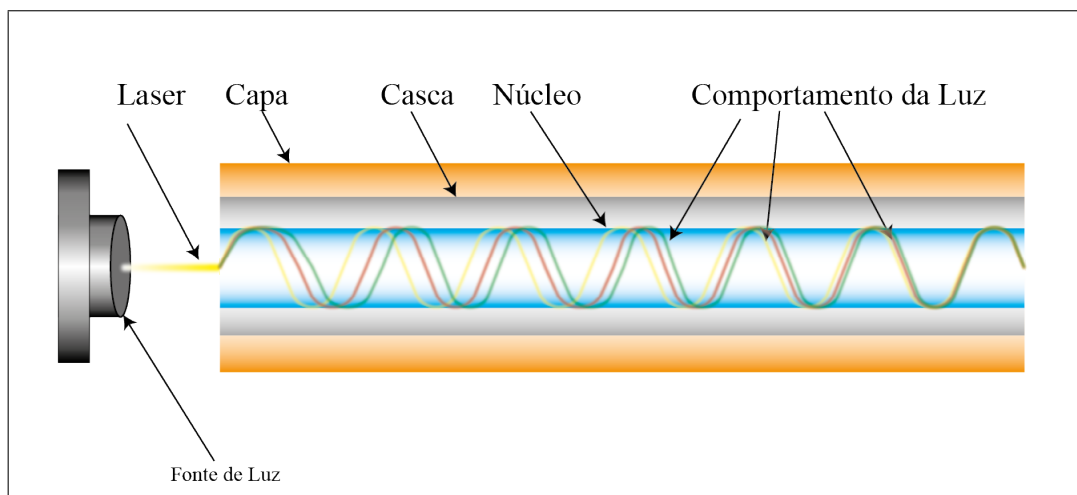


Fonte: Autor (2025)

2.4.3 Fibra óptica multimodo de índice-gradual

Na fibra óptica multimodo de índice gradual, ocorre algo semelhante ao de índice degrau, entretanto, a mudança no sentido de propagação do feixe de luz, ocorre de maneira mais suavizada, ou gradual, diferente do que ocorre no índice degrau. Na Figura 9 é ilustrado a estrutura da Fibra multimodo de índice gradual.

Figura 9 – Fibra óptica multimodo de índice gradual.



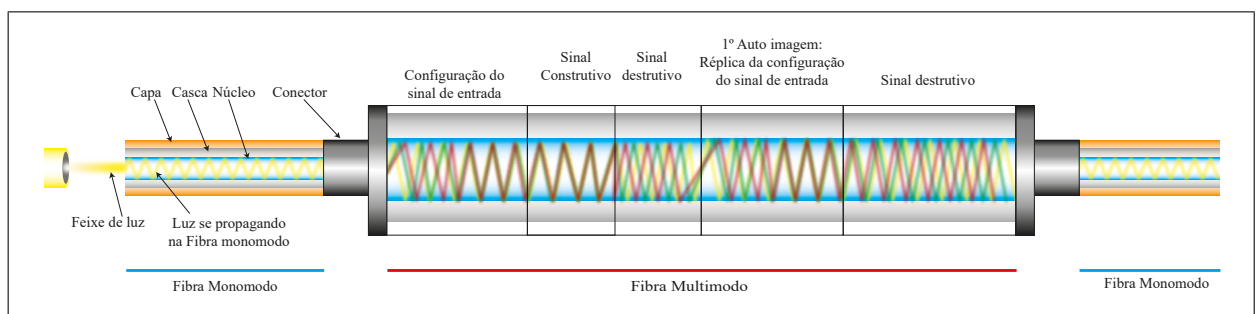
Fonte: Autor (2025)

2.5 Interferência multimodal

Segundo Mejia-Aranda et al. (2013), a interferência é definida como a superposição de duas ou mais ondas e sua combinação para formar uma única onda. O princípio fundamental no

qual se baseia a técnica MMI (*Multimode interference*) é denominado fenômeno de autoimagem. Que pode ser definido como: “a propriedade dos guias de ondas multimodais em que o perfil do campo de entrada é reproduzido em uma ou múltiplas imagens em intervalos periódicos ao longo da direção de propagação do guia de ondas” (SOLDANO; PENNING, 1995). Dessa forma, e baseando-se nos estudos realizados por Mejia-Aranda et al. (2013), a reprodução da imagem se deve tanto à interferência construtiva quanto à interferência destrutiva que está presente ao longo de todo o guia de onda. Entretanto, a interferência construtiva está associada à geração de autoimagens, que são réplicas dos sinais de entrada, e a interferência destrutiva está associada à geração de regiões de baixa ou nula intensidade de potência óptica, que são sinais resultantes da interseção entre os modos de propagação ao longo do guia de onda. O fenômeno da Interferência Multimodal pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10 – Interferência Multimodal.



Fonte: Autor (2024).

A Interferência multimodal ou modal (IMM) é um fenômeno interferométrico em que ocorre a construção de sinais construtivos na saída da fibra multimodo, considerando uma estrutura de fibras SMS (*Singlemode-Multimode-Singlemode*), podendo ocorrer em seu interior, sinais destrutivos também, mas na saída será construtivo, ou seja, quando a luz se propagada através de um guia de onda MMF, são gerados diferentes modos de propagação da luz ao longo da fibra óptica e devido a fatores como a trajetória, atraso de fase e outros, os feixes de luz podem gerar interferências entre si e essas interferências podem resultar em sinais construtivos ou destrutivos em um ponto específico da fibra. Dessa maneira, ao adentrar no guia de onda, o sinal de luz possui uma configuração inicial, e ao longo do guia de onda, a interação com os diferentes modos de propagação irá gerar diversas configurações e no momento em que essa configuração for semelhante à configuração inicial na entrada do guia de onda, ela será definida como autoimagem do sinal. Essa autoimagem é formada em diversos momentos ao longo da fibra multimodo, e dessa maneira, a quarta autoimagem é a que apresenta uma maior sensibilidade para a aplicação em sensores que utilizam a (IMM).

Em seus trabalhos, MAIA (2020) e Fuentes-Fuentes et al. (2015), afirmam que é possível notar que as perdas de inserção diminuem consideravelmente na quarta imagem, e ainda, segundo MAIA (2020) e Fuentes-Fuentes et al. (2015), essa é a autoimagem geralmente usada em dispositivos IMM.

Já no trabalho de Olivero et al. (2017), o autor afirma que a estrutura SMS pode ser analisada como um interferômetro, uma vez que os modos na seção MM se propagam com diferentes velocidades de fase e produzem um padrão de interferência na junção MM-SM que depende do deslocamento de fase adquirido na seção MM.

Em seu trabalho, MAIA (2020), afirma que o fenômeno IMM é inerente aos guias de

onda multimodo, em que os modos excitados se interferem à medida que se propagam ao longo de uma MMF. Em função disso, um padrão de interferência é produzido ao longo da MMF e autoimagens se formam em locais específicos.

Dessa maneira, Olivero et al. (2017) ainda afirma que entre as diferentes implementações, os sensores de fibra óptica monomodo-multimodo-monomodo (SMS) têm recebido grande atenção nos últimos anos porque podem exibir sensibilidade muito alta sendo sensores interferométricos e ainda apresentam a simplicidade na montagem, sendo potencialmente de baixo custo.

No trabalho apresentado por Mejia-Aranda et al. (2013) é desenvolvido um sensor de pressão que possui uma faixa de trabalho de 0 à 0,36 psi utilizando a metodologia da interferência multimodal ou modal. Em seu arranjo experimental, Mejia-Aranda et al. (2013) utilizou um diodo laser (com um comprimento de onda 1555 nm), um elemento sensor, um circuito amplificador eletrônico, uma placa de aquisição de dados e um computador. Ainda de acordo com Mejia-Aranda et al. (2013), o elemento sensor utilizado é uma estrutura composta por uma fibra óptica SMS (monomodo-multimodo-monomodo, onde uma fibra multimodo é incorporada entre duas fibras monomodo) colocadas dentro da superfície de contato (diafragma) feita de material polimérico e o corpo do sensor era feito de *nylamid*. Dessa forma, segundo Mejia-Aranda et al. (2013) a flexão produzida no diafragma pela pressão dentro do corpo do sensor resultou em alterações na resposta de potência transmitida e transportada no interior da fibra.

Nos trabalhos desenvolvidos por Mejia-Aranda et al. (2013) e MAIA (2020) é explorada a distância onde as autoimagens do sinal irá se formar no interior do guia de onda. A distância L de onde é formada as autoimagens a partir do do início da fibra multimodo é descrita na Equação 2.2, onde p refere-se ao número das respectivas autoimagens formadas e L_π é a largura do pulso do sinal.

$$L = p * \left(\frac{3}{4}\right) * L_\pi, p = 0, 1, 2, \dots \quad (2.2)$$

Dessa forma, se considerarmos $p=0$, teremos a localização da primeira autoimagem do sinal, que é basicamente o sinal na iminência de adentrar no guia de onda. Já o valor de L_π é definido pela Equação 2.3

$$L_\pi = \frac{4 * n_{MMF} * D_{MMF}^2}{3 * \lambda_0} \quad (2.3)$$

onde n_{MMF} e D_{MMF} referem-se respectivamente ao índice de refração e ao diâmetro do núcleo do guia de onda utilizado, e o valor de λ_0 é o comprimento de onda do pulso luminoso. Quando a MMF é submetida a uma ação física, a autoimagem é deslocada e dessa forma a ação gera diferentes resultados que irão refletir na intensidade transmitida.

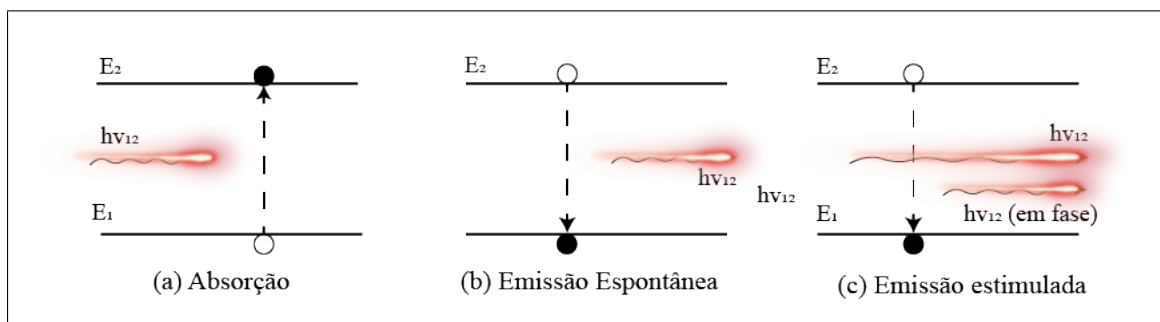
2.6 Transmissor óptico - laser

De acordo com Keiser (2014), os lasers possuem diversas formas com dimensões que vão desde o tamanho de um grão de sal até um que ocupa uma sala inteira, ou seja, esses dispositivos ópticos possuem diversas características em relação a sua forma, podendo ir desde de dispositivos que podem ser acionados por uma placa de desenvolvimento, até dispositivos que necessitem de uma estrutura mais robusta de acionamento como uma fonte de alta potência. Uma outra característica do laser é que ele é uma fonte de luz coerente, onde o seu feixe de luz é

concentrado, diferente do LED (*Light Emitting Diodes* que em tradução livre é diodo emissor de luz), onde a sua fonte de luz é difusa. Para se propagar, o laser necessita de um meio, e segundo Keiser (2014), o meio do laser pode ser um gás, um líquido, um cristal isolante (estado sólido) ou um semiconductor. Dessa forma, considerando sistemas ópticos que possuem a fibra óptica, as fonte de lasers utilizadas são quase exclusivamente diodos laser semicondutores.

O laser apresenta como princípio básico de funcionamento a absorção, a emissão espontânea e a emissão estimulada. Na absorção o átomo em seu estado fundamental absorve o fóton fazendo com que o átomo fique em um estado de maior energia, ou seja em um estado excitado. Na emissão espontânea, esse átomo acabada liberando o fóton que foi absorvido e assim o próprio átomo retorna para o seu estado fundamental. E na emissão estimulada, é quando um fóton acaba excitando um átomo que já se encontra no estado excitado, fazendo com que ocorra o a liberação de mais um fóton. a Figura 11 ilustra os três princípios básicos de funcionamento do laser.

Figura 11 – Princípio de funcionamento do laser.



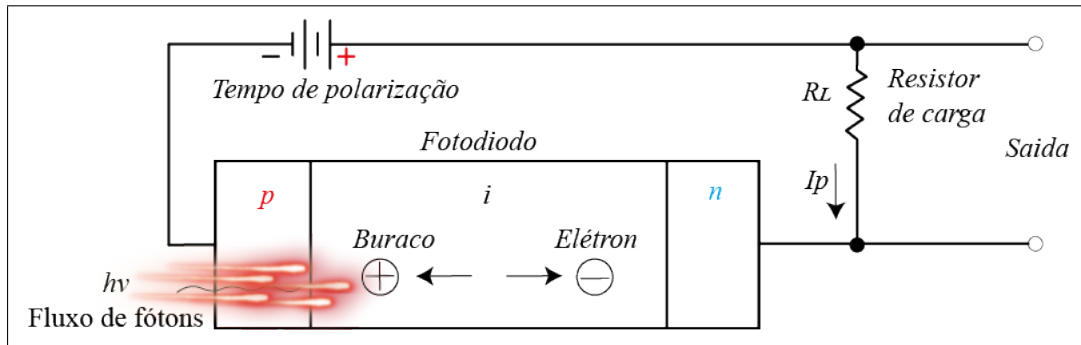
Fonte: Adaptado de Keiser (2014).

2.7 Receptor óptico - fotodetector

Segundo Keiser (2014), um fotodetector é um dispositivo de recepção que interpreta a informação contida no sinal óptico, ou seja, na extremidade de saída de uma linha de transmissão óptica e ainda de acordo com Keiser (2014) o primeiro elemento da estrutura de recepção do sinal, deve ser um fotodetector que detecta a energia luminescente que o atinge, e converte a variação da potência óptica em uma corrente elétrica variável correspondente.

O fotodiodo é um fotodetector onde a medida com que a intensidade dos fótons aumenta sobre ele, uma corrente elétrica irá circular com mais intensidade, ou seja, quanto maior a quantidade de luz sobre o fotodiodo, maior será a corrente elétrica que ele irá permitir com que circule no circuito eletrônico. Para isso, o circuito terá uma fonte, bem como um resistor de carga, e esse resistor será utilizado para fazer com que a corrente circule no circuito, e a ligação do fotodiodo irá funcionar como uma chave, que a medida com que a incidência luminosa aumente, maior será a corrente do circuito. A Figura 12 ilustra o princípio de funcionamento do fotodiodo.

Figura 12 – Princípio de funcionamento do fotodiodo.



Fonte: Adaptado de Keiser (2014).

2.8 Métricas Estatísticas e Transformada Rápida de Fourier

As métricas estatísticas são de grande importância na análise de vários tipos de sinais e dados. Nesta etapa será discutido o conceito simples e resumido de algumas métricas necessárias e da transformada de Fourier, que foram conceitos utilizados na análise deste trabalho.

2.8.1 Média

A média de uma sinal é considerada como a soma de todos os valores do conjunto de dados, dividido pela sua quantidade, ou seja, é a soma de todos os valores disponíveis, dividido pelo número de valores em si. De acordo com Bussab e Morettin (2010), a Equação 2.4 descreve a média de um sinal.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.4)$$

Onde:

- $\bar{x}$: é a média do sinal;
- n : é a quantidade total de dados;
- i : é o índice do primeiro valor;
- x_i : é o valor do dado correspondente ao seu índice.

2.8.2 Mediana

Segundo Bussab e Morettin (2010), a mediana é a realização que ocupa a posição central da série de observações, quando estão ordenadas em ordem crescente. Dessa maneira, a mediana de um sinal pode ser entendida como sendo o valor centrado, ou central, de um conjunto de dados de um determinado conjunto de valores. Segundo a literatura, caso o valor total desse conjunto de dados for um número par, a mediana será a média dos dois valores do centro, e quando o conjunto de valores for um número ímpar, a mediana será o valor que está no centro do conjunto de dados. Então, a mediana possui dois casos, um onde o conjunto de valores é par e ou onde o conjunto de dados é um número ímpar.

Considerando o conjunto de dados como sendo ímpar, a mediana pode ser entendida como sendo o valor central. A Equação 2.5 descreve o caso onde o conjunto de valores é ímpar.

$$md(X) = x_{(\frac{n+1}{2})} \quad (2.5)$$

Onde:

- $md(X)$: é a mediana do conjunto de dados X ;
- x : é o valor do dado correspondente ao índice da sua posição;
- n : é o valor total do conjunto de dados, e deve ser um valor ímpar para este caso;
- $\frac{n+1}{2}$: é o valor correspondente ao seu índice.

Para o caso da quantidade dados ser um valor par, a Equação 2.6 descreve o cálculo da mediana como sendo:

$$md(X) = \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2} \quad (2.6)$$

2.8.3 Moda

Segundo Bussab e Morettin (2010), a moda é definida como a realização mais frequente do conjunto de valores observados, ou seja, a moda pode ser entendida como sendo o valor que aparece com mais frequência em um conjunto de dados. Dessa maneira, considerando um conjunto de dados X como sendo 2, 4, 4, 6 e 8, a moda desse conjunto de dados X é 4, pois sua frequência é maior do que a dos outros números.

2.8.4 Desvio médio

Segundo a literatura, o desvio médio é entendido como sendo a média das distâncias absolutas entre cada valor e a média do conjunto de dados disponíveis, ou seja, é a medida de cada dado em relação a média dos valores. De acordo com Bussab e Morettin (2010), a Equação 2.7 descreve o desvio médio de um conjunto de dados.

$$dm(X) = \frac{\sum_{i=1}^n * |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (2.7)$$

2.8.5 Variância

Segundo a literatura, a variância pode ser definida como sendo a média dos quadrados das diferenças entre cada valor e a média do próprio conjunto de dados analisados.

Segundo Bussab e Morettin (2010), tanto a variância como o desvio médio são medidas de dispersão calculadas em relação à média das observações. Dessa aforma, a Equação 2.8 descreve a variância de um conjunto de dados X .

$$var(X) = \frac{\sum_{i=1}^n * (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (2.8)$$

2.8.6 Desvio padrão

Segundo a literatura, o desvio padrão é definido como sendo a raiz quadrada da variância de um conjunto de dados, e o seu valor está relacionado a dispersão dos valores em torno da média. Segundo Bussab e Morettin (2010), a Equação 2.9 descreve o desvio padrão de um conjunto de dados.

$$var(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.9)$$

Como exemplo de aplicação do desvio padrão, podemos considerar o conjunto de dados X como sendo 2, 4, 6 e 8, com média igual a 5, e utilizando a Equação 2.9, temos:

$$var(X) = \sqrt{\frac{|2-5|^2 + |4-5|^2 + |6-5|^2 + |8-5|^2}{4}} = 2,24 \quad (2.10)$$

Dessa forma, para o conjunto de dados X, podemos concluir que a variância é igual a 2,24.

2.8.7 Transformada rápida de fourier

Segundo a literatura, a Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) é um algoritmo eficiente para calcular a Transformada Discreta de Fourier (DFT) de uma sequência de dados fornecida e a sua equação específica pode ser encontrada em softwares de planilhas. A DFT converte um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, decompondo-o em suas componentes de frequência, e assim, é possível analisar o sinal de uma maneira mais específica, onde será verificado o deslocamento do sinal em relação à sua frequência dominante ou amplitude. Segundo Lathi (2006), a Transformada de Fourier de uma função pode ser dado por:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.11)$$

onde $X(\omega)$ é a função encontrada no domínio da frequência e $X(t)$ é a função utilizada no domínio do tempo

2.9 Métodos e técnicas utilizados para mensurar a vazão por meio da fibra óptica

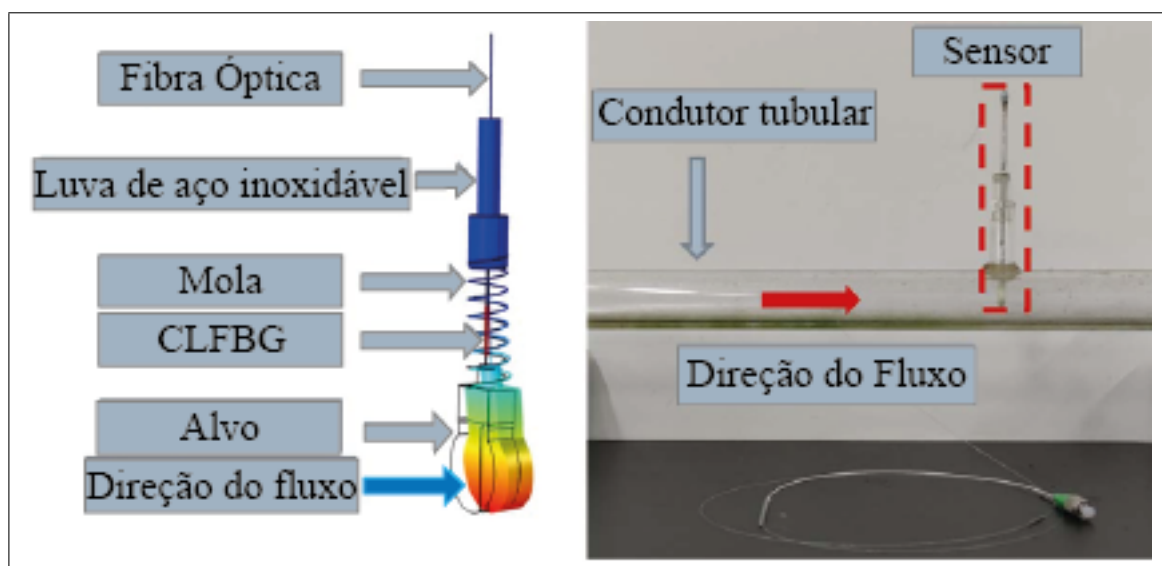
Dentre os trabalhos que utilizam a fibra como elemento sensor, o de Ding et al. (2023) utiliza a fibra como Grade de Bragg (FBG - *Fiber Grating Bragg*), pois as suas propriedades ópticas de reflexão se adequaram de maneira conveniente na medição de vazão. Já Morshed, Atta e Packirisamy (2021) se utiliza de um pequeno artifício em relação à superfície em que a fibra fica disposta, pois à medida que o fluido passa, a vazão faz com que a fibra se desloque da cavidade onde ela está instalada, fazendo que ocorra uma variação da potência luminosa transmitida, e assim pode-se relacionar essa variação com a vazão do fluido.

Além de Morshed, Atta e Packirisamy (2021), Allil et al. (2020) também utiliza a tecnologia FBG, onde o seu dispositivo para medir o fluxo é composto por duas FBG, uma fonte de calor e o fluido analisado é um gás. Em seu trabalho, Allil et al. (2020) realiza a medição da vazão do gás por meio do cálculo que é obtido pela razão entre a distância em que as duas

FBG estão uma da outra, pela diferença de tempo em que a primeira FBG detecta a temperatura fornecida pela fonte de calor, sendo que todo esse arranjo está montado no interior de uma pequena tubulação.

Trabalhos como o apresentado por Ding et al. (2023), propõe o desenvolvimento de um sensor de vazão baseado no princípio de deformação mecânica de uma estrutura que contém uma fibra óptica em forma de Bragg com revestimento, ou seja CLFBG (*Cladding Fiber Bragg Grating*), onde o sinal ocorre quando o fluido entra em colisão com o alvo estabelecido, fazendo com que a fibra seja deformada e essa deformação é relacionada com a taxa de fluxo que passa pelo alvo, entretanto esse medidor registra valores baixos de vazão. A Figura 13 ilustra o experimento de Ding et al. (2023).

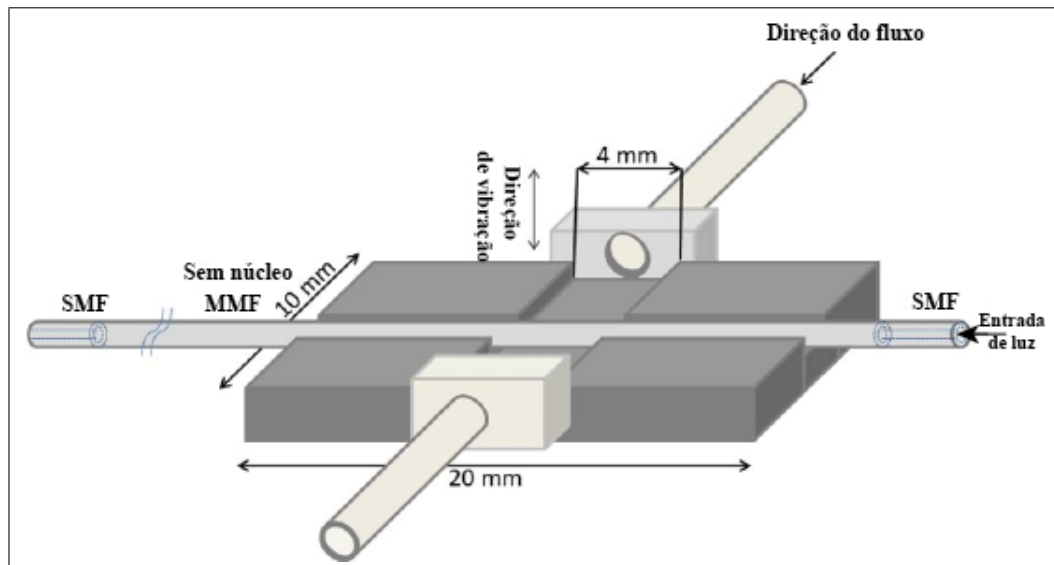
Figura 13 – Experimento de Ding et al. (2023).



Fonte: Adaptado de Ding et al. (2023).

Além dessa tecnologia da Fibra de Grade de Bragg (FBG), ainda é possível utilizar outras tecnologias envolvendo a medição de fluxo de fluido utilizando a fibra óptica, que é o trabalho proposto por Morshed, Atta e Packirisamy (2021). Em seu trabalho, Morshed, Atta e Packirisamy (2021) propôs o desenvolvimento de um sensor utilizando a fibra, baseado-se no princípio das fibras monomodo (*Single - Mode*) e multimodo (*Multi - Mode*), ou seja, na variação entre os índices de refração das fibras utilizadas. Com esse princípio, Morshed, Atta e Packirisamy (2021) apresenta um *setup* com a estrutura SMS (*Single - Mode*, *Multi - Mode* e *Single - Mode*), onde a estrutura SMS é condicionada em uma cavidade perpendicular por onde o fluxo irá passar, e devido a passagem do fluxo, este irá fazer com que a fibra tenha um leve desprendimento da cavidade, e assim, será possível relacionar a variação da intensidade de luz transmitida da vibração da fibra com a intensidade de fluxo. A Figura 14 ilustra o experimento de Morshed, Atta e Packirisamy (2021).

Figura 14 – Experimento de Morshed, Atta e Packirisamy (2021).



Fonte: Adaptado de Ding et al. (2023).

No trabalho proposto por Yuan, Yang e Liu (2008), foi desenvolvido o conceito de interferometria para a detecção da velocidade do fluxo, baseando-se em uma fibra de núcleo duplo, especialmente projetado para esse trabalho. Em seu trabalho, Yuan, Yang e Liu (2008), desenvolveu um sensor de velocidade que é composto por um segmento de fibra de núcleo duplo com um tubo de aço que garante a fixação da estrutura, formando uma viga, com a capacidade de sofrer uma curvatura.

Já no trabalho proposto por Lv et al. (2018), foi desenvolvido um sensor utilizando a tecnologia das FBGs (*Fiber Bragg Gratings*), capaz de mensurar vazão e temperatura em uma tubulação. O seu sistema é composto por um tubo capilar de aço, um alvo ajustável e duas redes de Bragg (FBGs). Em seu experimento, Lv et al. (2018) fez com que as duas estruturas das grades de Bragg de fibra fossem fixadas no tubo. Uma extremidade do tubo foi montada na carcaça protetora, a outra extremidade estava conectada a um alvo, que seria o objeto que entrará em contato com a água (fluido utilizado), e dessa maneira a vazão e a temperatura, quando entrassem em contato com o alvo, irão causar as mudanças de comprimento de onda das FBGs, sendo possível realizar a correlação com os valores de temperatura e vazão registrados por sensores convencionais, fazendo assim a validação dos dados obtidos por Lv et al. (2018).

No trabalho proposto por Costa et al. (2019), foi utilizado o princípio da interferência para o desenvolvimento de um anemômetro. Basicamente a estrutura possui uma configuração SMS, onde o laser emite o feixe de luz, passa por um circular, em seguida é direcionado para a fibra multimodo, sendo que é nessa região onde irá ocorrer a variação da potência luminosa devido a interferência multimodal devido a reflexão que o fluxo de ar irá causar na fibra exposta, ou seja, o fluxo de ar irá dobrar a fibra.

O controle da vazão de fluido também tem uma grande importância em muitas áreas da ciência, como é o caso da área médica, onde o trabalho de Ruiz-Vargas et al. (2019) pode ser empregado para o controle da vazão de sangue que sai das bolsas de sangue. Em seu trabalho, Ruiz-Vargas et al. (2019) demonstra um método de medição da variação instantânea durante o pulso da vazão de sangue com um sensor de fluxo óptico compreendendo uma fibra sensora de grade de Bragg (fibras em rede de grade de Bragg) e iluminação de um diodo emissor de luz de 565 nm, ou seja, no espectro visível na faixa próxima à cor verde.

Ainda utilizando a tecnologia das FBGs (Fiber Bragg Gratings), Lim et al. (2001) desenvolveu um trabalho utilizando o conceito de pressão diferencial (DP) para um sistema de monitoramento de válvula hidráulica com alimentação óptica e controle de *feedback* onde conseguiu mensurar uma vazão entre 0 e $800 \text{ cm}^3/\text{s}$. O seu *setup* é constituído por dois elementos de rede Bragg de modo único de fibra óptica, que são montados em ambos os lados do diafragma de detecção DP. Para a obtenção dos valores de vazão, o sinal de vazão do fluido foi obtido na forma de deslocamento óptico diferencial do comprimento de onda em uma determinada temperatura. Em seu trabalho, Lim et al. (2001) variou a vazão em uma tubulação, e cada uma das FBGs estava conectada a uma região, separadas por uma placa de orifício, e em cada valor de vazão, o comprimento de onda obtido nas FBGs era detectado, e assim, foi feita a diferença entre os comprimentos de onda dessas FBGs, e para cada valor diferencial foi feita uma correlação com a vazão.

Ainda baseando-se no fenômeno da interferência multimodal, Wang et al. (2021) apresenta revisão sobre o princípio de funcionamento de sensores de fibra que funcionam mediante a MMI, destacando de maneira específica às estruturas das sondas, métodos de medição e propriedades de detecção de diferentes estruturas. Ainda em relação ao seu trabalho, Wang et al. (2021) destaca cinco categorias principais de sensores de fibra óptica baseado em uma estrutura SMS, que são: sensores de fibra SMS convencionais, sensores baseados em MMI com fibra sem núcleo (NCF - *No-Core Fiber*), sensores baseados em MMI com fibra gravada/polida, sensores baseados em MMI com fibra cônica e cascatas de sensores de fibra baseados em MMI. Após análises dos resultados dos trabalhos abordados, Wang et al. (2021) concluiu que os sensores apresentaram alta sensibilidade em relação a parâmetros como temperatura, deformação mecânica, controle de qualidade de uma variedade de misturas de gasolina e etanol (gasohol) dentre outros.

Ainda sobre a implementação da interferência multimodal na aplicação de sensor, Kawa et al. (2017) desenvolveu um trabalho referente a um sensor de temperatura cujo princípio de funcionamento é baseado na interferência multimodal em fibras de plástico (POF - *polymer optical fiber*), que apresenta uma sensibilidade alta. Em seu trabalho, Kawa et al. (2017) avaliou de maneira experimental como o recozimento (que é um tratamento térmico) do POF afeta a sensibilidade na temperatura ambiente. Em sua análise, Kawa et al. (2017) demonstrou que a sensibilidade à temperatura é aumentada com o aumento da temperatura de recozimento, e que, ao recozer o POF a 90°C , foi obtido uma sensibilidade à temperatura de $+2,17 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, que é aproximadamente 3 vezes maior do que sem recozimento. O seu ensaio experimental é composto por um laser de fonte varrida, um controlador de polarização (PC), fibra óptica plástica perfluorada de índice graduado (a fibra fica exposta à temperatura que se deseja medir) e um analisador de espectro óptico (OSA - *Optical Spectrum Analyzer*).

Baseando-se na tecnologia da interferência multimodal, Wang et al. (2023) desenvolveu um sensor capaz de detectar a pressão e a temperatura por meio de um laser ultravioleta (UV) de nanosegundos, que são lasers cujo tempo de duração de seus pulsos está na faixa de nanosegundos, ou seja, cada pulso de luz emitido pelo laser dura, aproximadamente, alguns nanosegundos (ns), onde 1 nanosegundo equivale a 10^{-9} segundos (ou um bilionésimo de segundo), ou seja, são lasers pulsados de nanosegundos. Para obter a detecção de temperatura, Wang et al. (2023) padronizou o laser no gerador termoeletrônico flexível com o filme de grafeno. Logo após, Wang et al. (2023) preparou polímeros condutores de Carbon Powder-Carbon Nanotubo / Polidimetilsiloxano (CP-CNT / PDMS) com base no princípio do efeito piezoresistivo e, em seguida, fabricou estruturas de microcones usando laser UV como camadas sensíveis à pressão. Dessa forma, os resultados experimentais mostraram que o sensor conseguiu distinguir sinais de pressão e temperatura com apenas uma aquisição de sinal de canal único.

Em seu trabalho, Silva e Frazão (2017) apresenta o desenvolvimento de um sensor utilizando a tecnologia da interferência multimodal para a detecção da mudança do índice de refração da água mediante a mudança de temperatura. Segundo Silva e Frazão (2017), o sistema é composto por uma fonte de laser modulada, dois acopladores de fibra óptica padrão, um *loop* de fibra, um EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*), um fotodetector e um osciloscópio. Dentro do *loop* de fibra foi colocado o dispositivo de fibra baseado em MMI para fins de detecção, ou seja, a região onde está instalado o dispositivo com a configuração SMS ficará exposta à água. Em seu experimento, Silva e Frazão (2017) fez com que a cabeça sensora (onde está localizado a configuração SMS) fosse colocada debaixo d'água e submetida ao aumento da temperatura na faixa de 25–80°C, com 5°Etapas °C. Dessa forma, fonte de laser modulada usada neste experimento enviou pulsos no comprimento de onda de operação de 1550 nm. Ao final, Silva e Frazão (2017) constatou que a cabeça sensora é intrinsecamente sensível à temperatura, o que afeta o índice de refração da água e, conseqüentemente, o comportamento do sistema. O estudo demonstrou que o sensor possui uma sensibilidade térmica, ou seja, mudanças muito pequenas de temperatura resultam em alterações no sinal detectado.

A tecnologia da interferência multimodal também pode ser aplicada em interferômetros, como é o caso do trabalho desenvolvido por Rota-Rodrigo et al. (2015). Em seu trabalho, Rota-Rodrigo et al. (2015) propôs um interferômetro multimodal baseado em uma fibra de cristal fotônico (PCF - *Fiber Cristal Photonic*) de núcleo suspenso para medições simultâneas de deformação e temperatura. O sensor é composto por uma PCF com núcleo suspenso de 3 mm conectada entre fibras monomodo (SMFs) e é baseado na combinação de duas interferências multimodais com diferentes padrões de frequência. Os padrões interferométricos apresentam respostas de sensibilidade diferentes para deformação e temperatura. Após análises, Rota-Rodrigo et al. (2015) constatou por meio de um filtro de frequência passa-baixa aplicado ao espectro detectado, o deslocamento de comprimento de onda dos dois padrões pode ser medido, permitindo a discriminação dos efeitos de deformação e temperatura com resoluções de 0,45°C e 4,02 $\mu\epsilon$, respectivamente.

O fenômeno da interferência multimodal também pode ser aplicado em sistemas mais compactos de sensores de campo magnético, como é o caso do trabalho desenvolvido por Wu et al. (2019), onde foi elaborado o desenvolvimento de um sensor compacto de campo magnético baseado em um fluido magnético integrado a um interferômetro. Em seu trabalho, Wu et al. (2019) desenvolveu sensor de campo magnético compacto, de baixo custo e compatível com fibras ópticas, baseado em interferência multimodal em um interferômetro modal de fibra com afunilamento em forma de "S" e fusão ajustada, foi projetado e demonstrado experimentalmente. Em seus experimentos, Wu et al. (2019) constatou que os resultados experimentais obtidos indicavam que a sensibilidade magnética do sensor atingiu -0,03464 nm/Oe para um campo magnético na faixa de 40 a 160 Oe, ou seja, para cada Oersted (Oe) de campo magnético, o comprimento de onda observado no espectro desloca-se em aproximadamente 0,03464 nm. Dessa forma, o sensor proposto por Wu et al. (2019) manifestou uma sensibilidade máxima à temperatura de 0,04889 nm/°C quando a temperatura aumenta de 27° a 45 °C. Com isso, o efeito da temperatura no deslocamento de comprimento de onda pode ser resolvido usando uma matriz que contém as sensibilidades ao campo magnético e às temperaturas para dois mergulhos interferométricos selecionados.

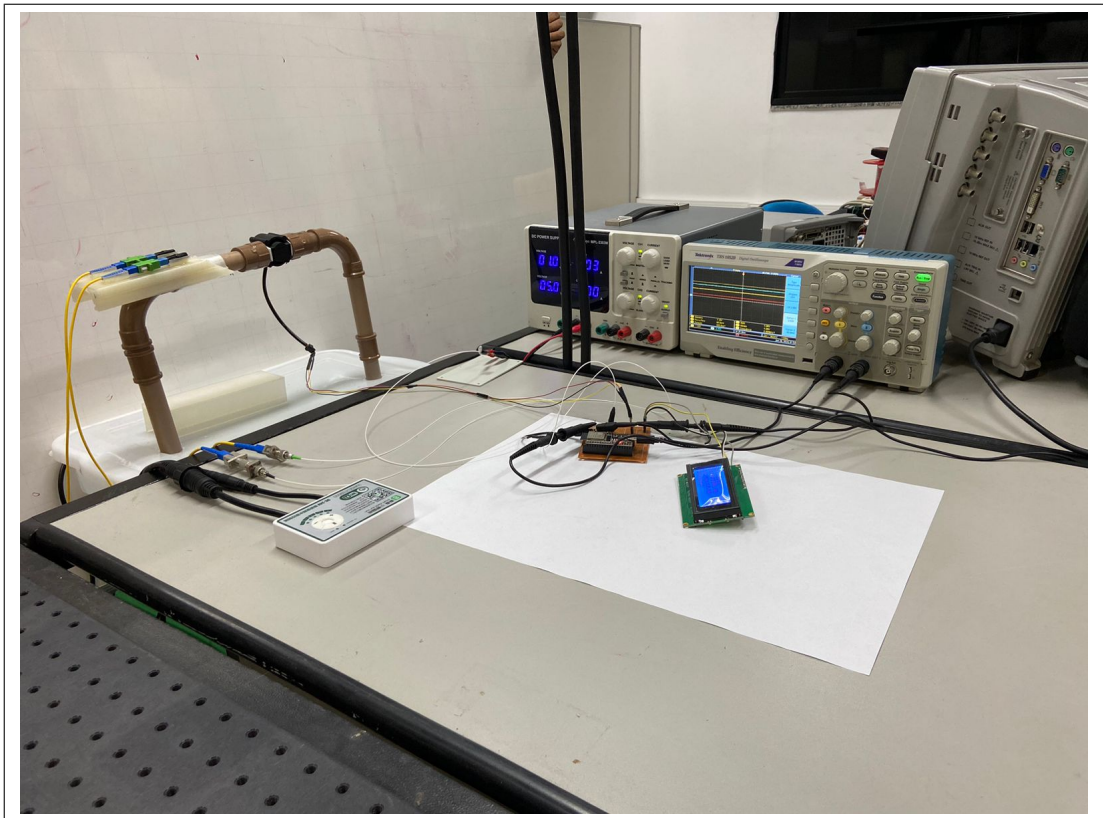
Com isso, os dispositivos mecânicos utilizados em medidores de vazão atualmente são responsáveis por perdas de carga em uma tubulação, interferindo, de maneira significativa, nos valores de vazão registrados. Entretanto, ao utilizar um elemento capaz de ter uma influência mínima em relação aos dispositivos mecânicos, além de possuir uma alta sensibilidade de resposta a estímulos externos, é possível desenvolver um dispositivo óptico capaz de registrar

um valor de vazão mais próximo do verdadeiro e com perdas de carga quase mínimas em relação aos dispositivos tradicionais.

MATERIAIS E MÉTODOS

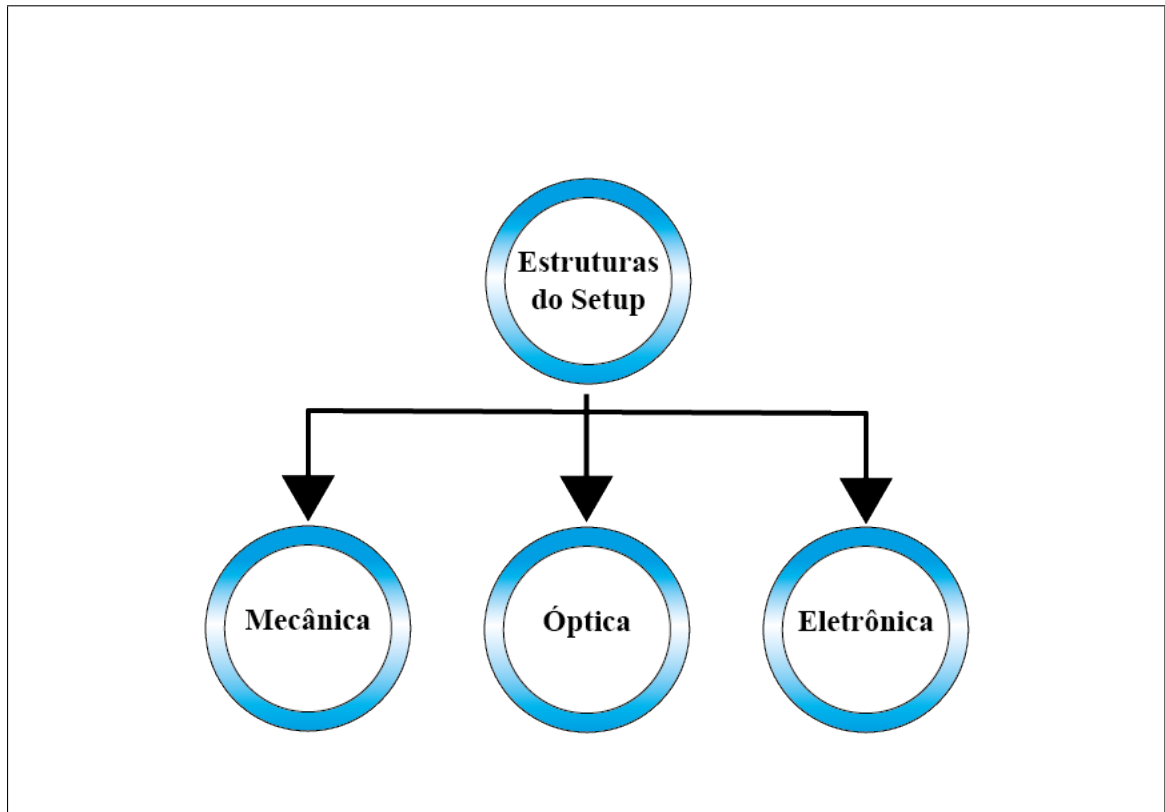
Nesse capítulo foram apresentadas as ferramentas empregadas e o detalhamento das etapas seguidas para o desenvolvimento do sensor de vazão óptico. Todo o sistema montado está representado na Figura 15.

Figura 15 – Configuração do setup experimental.



Fonte: Autor (2024).

O *setup* para o experimento foi dividido em 3 estruturas: Mecânico, Óptica e Eletrônica. Nas próximas subseções serão descritos cada um dos materiais que compõem as 3 estruturas do trabalho desenvolvido. O diagrama simples do sistema com as estruturas Mecânicas, Ópticas e Eletrônicas estão representado na Figura 16.

Figura 16 – Estruturas do *Setup* experimental.

Fonte: Autor (2024).

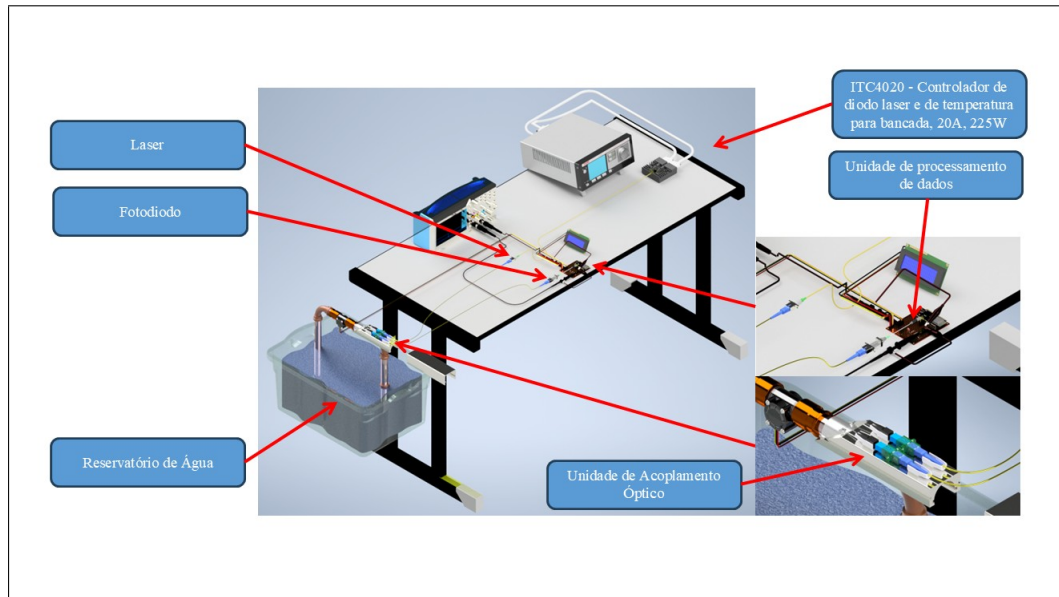
A estrutura mecânica presente na Figura 16 se refere aos componentes responsáveis pelo sistema de circulação do fluxo de água, já estrutura óptica é referente à fonte luminosa do laser que é fornecida para o sistema e a estrutura eletrônica é a unidade responsável pelo tratamento do sinal.

Todas as estruturas presentes na Figura 16 estão presentes em toda a configuração do *setup* presente na Figura 15, que é como todo o sistema está dividido.

Na Figura 15 é possível visualizar toda a estrutura de ensaios do sensor óptico de vazão, como o controle de vazão da bomba, o osciloscópio para verificação e coleta de dados, a fonte de bancada responsável por energizar o laser diodo de 1550 nm.

Para este trabalho também foi montado um arranjo experimental utilizando o laser FPV785S de 785 nm com o controlador Butterfly ITC4020, que é um controlador de diodo laser e de temperatura para bancada, que fornece uma corrente de até 20 Amperes com uma potência de 225 Watts. Essa configuração com o diodo laser FPV785S está representado na Figura 17.

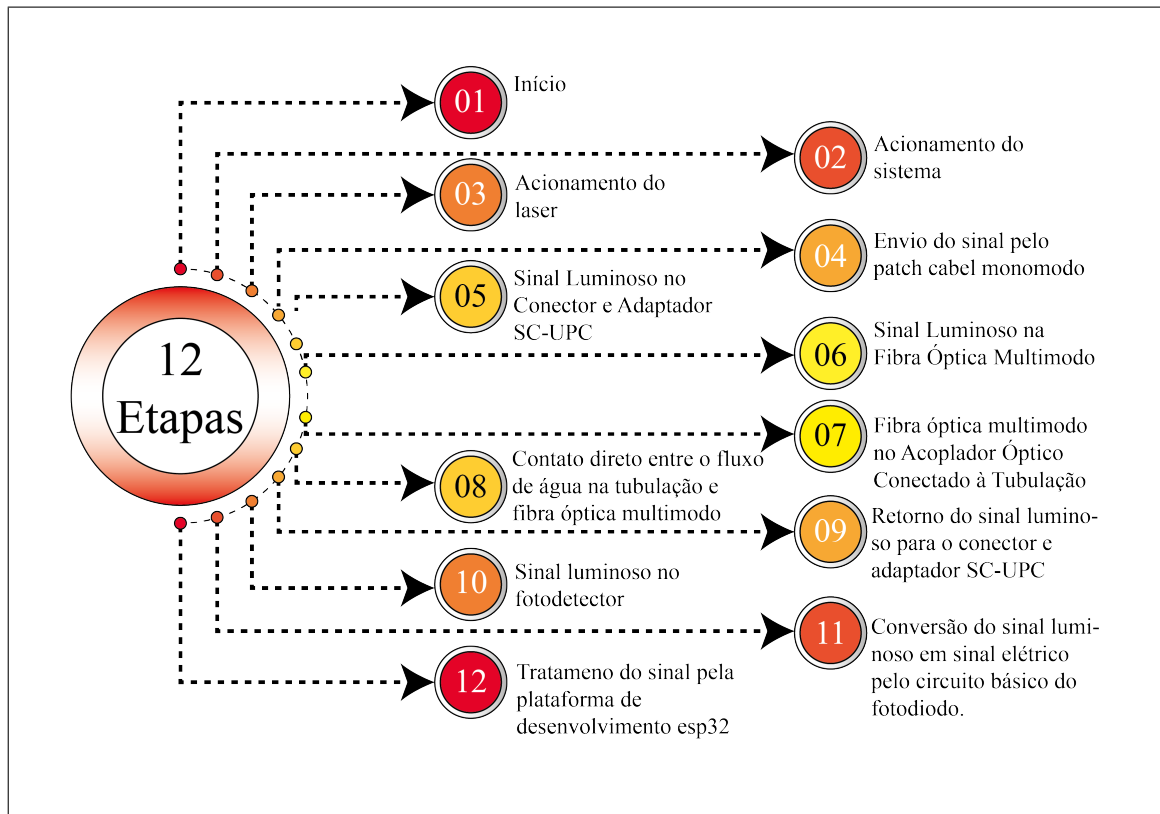
Figura 17 – Configuração do Setup Experimental para o Laser 785 nm.



Fonte: Autor (2024).

Para o melhor entendimento do funcionamento deste trabalho, o sistema do sensor de vazão óptico foi dividido em 12 etapas, e esse passo a passo pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18 – Etapas Funcionamento Sensor de Vazão Óptico.



Fonte: Autor (2024).

Como pode ser visualizado na Figura 18, todo o sistema possui um total de 12 etapas, que podem ser alocadas nas estruturas mecânicas, ópticas e eletrotônica.

A etapa 01 é o início do sistema, onde é verificado se todos os componentes estão conectados e nos seus devidos lugares.

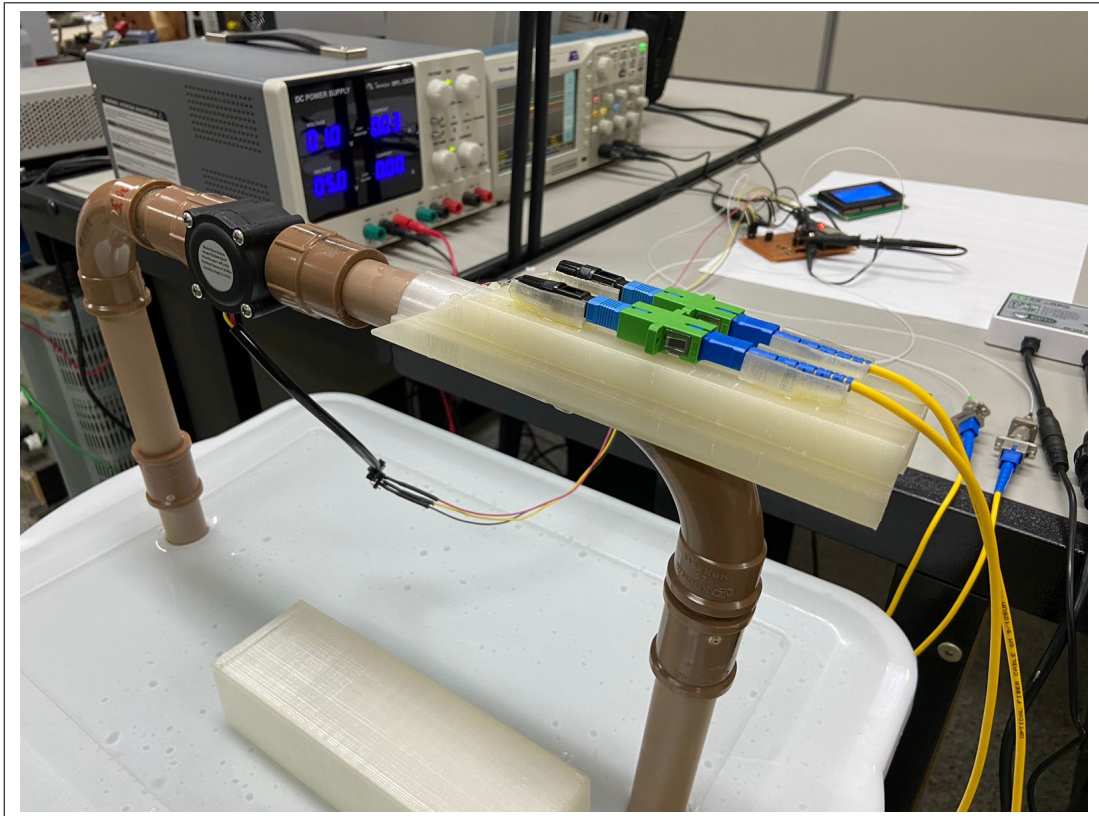
A etapa 02 se refere ao acionamento do sistema, ligando a fonte, o osciloscópio e a bomba hidráulica.

Em seguida, na etapa 03 é realizado a energização do laser, mediante a alimentação de 1 V pela fonte para a configuração do laser diodo 1550 nm, ou ligando o controlador butterfly ITC4020 para o laser FPV785S, considerando a configuração do *setup* para o laser FPV785S.

Com o sistema devidamente energizado, na etapa 04 o laser enviará o sinal luminoso através da fibra do patch cabel monomodo.

Ao final da fibra, será a etapa 05, onde a fibra monomodo irá se conectar ao conector e adaptador SC-UPC, onde SC significa Conector Óptico Monomodo e UPC significa *Ultra Physical Contact*, onde esse conector estará encaixado no suporte para os conectores que estão instalados na região superior da tubulação. O conector SC-UPC do patch cable encaixará no adaptador SC-UPC, iniciando a etapa 06, como pode ser visualizado na Figura 19.

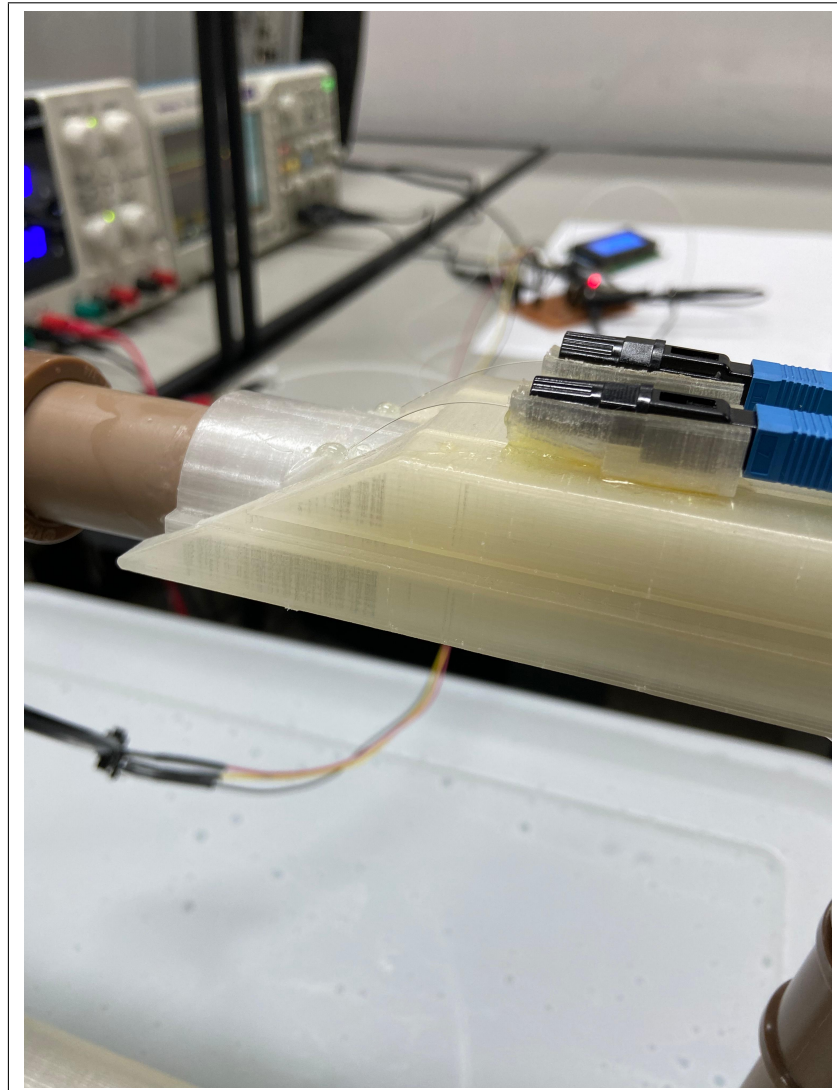
Figura 19 – Conexão do patch cabel com o adaptador SC-UPC.



Fonte: Autor (2024).

Na etapa 06, a fibra multimodo estará acoplada à tubulação por meio do suporte projetado para este objetivo. O suporte foi projetado em software cad e impresso em 3D utilizando o filamento PETG para minimizar o vazamento. Nesta etapa a fibra multimodo, ao sair do conector SC-UPC foi conectada ao suporte modelado por meio de um uma cola pra garantir a vedação. O encaixe da fibra multimodo no suporte pode ser visualizado na Figura 20.

Figura 20 – Conexão da fibra multimodo na tubulação.



Fonte: Autor (2024).

Na etapa 07 ocorre a conexão propriamente dita da fibra multimodo no acoplador projetado. O acoplador possui dois orifícios, onde um é a entrada da fibra e o outro é a sua saída. O acoplador funciona como uma conexão entre dois seguimentos da tubulação para facilitar a conexão da fibra com o fluxo de água que atravessa à tubulação.

A etapa 08 da Figura 18 corresponde ao contato direto do fluxo de água com a fibra multimodo. Nesta etapa o fluxo de água percorrerá a tubulação projetada e vai colidir com a fibra de maneira perpendicular, fazendo com que ocorra uma interferência mecânica do fluxo de água com a fibra, onde dará início ao sinal de vazão que será analisado, pois é nessa região onde ocorre a interferência multimodal do sinal, já que é a região que fica exposta a perturbação mecânica do fluxo de água.

Na etapa 09 ocorre a conexão da fibra multimodo no conector SC-UPC e em seguida a conexão com o adaptador SC-UPC, fazendo com que a luz retorne para a fibra monomodo.

Com o sinal luminoso retornando para o sistema, é iniciada a etapa 10, onde a luz do laser chegará ao fotodiodo e dessa forma, o sinal luminoso será convertido em sinal elétrico, com picos variando entre o valor mínimo de 0V e o valor máximo de 3,3V, devido a plataforma de

desenvolvimento ESP32 utilizado.

Na etapa 11 ocorre a conversão do sinal luminoso em sinal elétrico por meio do fotodiodo que está conectado ao seu circuito básico de funcionamento, onde é possível receber devidamente o sinal variando entre 0V e 3,3V.

Por ultimo, na etapa 12, ocorre o tratamento do sinal pela plataforma de desenvolvimento ESP32 por meio de uma programação específica onde será lido sinal.

3.1 Estrutura mecânica

Para o desenvolvimento do sistema do sensor de vazão óptico, foi projetado um *setup* próprio, e também foi desenvolvido um modelo 3D do dispositivo de acoplamento da fibra óptica multimodo no sistema da tubulação. Para a construção da estrutura mecânica, foram utilizados os seguintes itens presentes na Tabela 1:

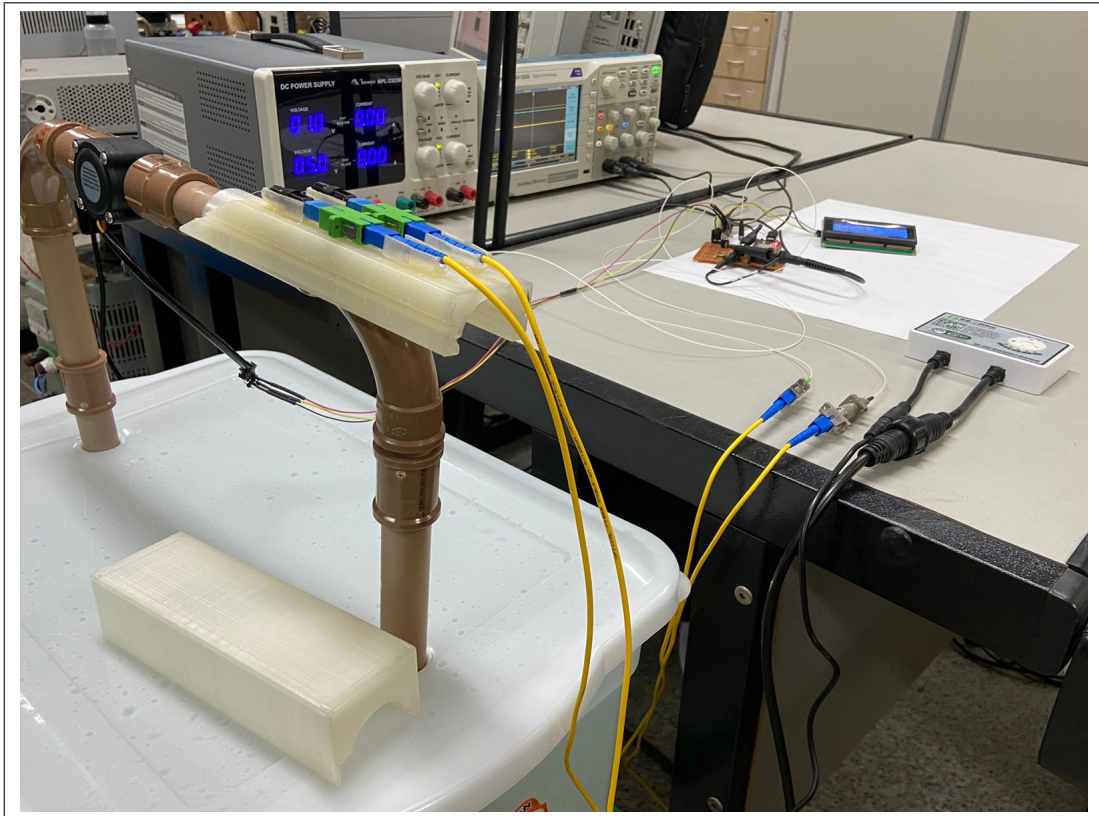
Tabela 1 – Componentes da Estrutura Mecânica.

Componentes da Estrutura Mecânica		
Nº Item	Identificação	Quantidade
1	Reservatório de água.	1
2	Cano PVC de 3/4 de polegada.	2 metros
3	Curva 90° PVC Marrom Soldável 3/4 de polegada.	2
4	Luva PVC Marrom Soldável 3/4 de polegada.	4
5	Filamento Impressão 3D Voolt Petg Natural Translucido.	1 kg
6	Filamento PLA Premium Natural.	1 kg
7	Sensor de Fluxo de Água FS300A 3/4 de polegada.	1
8	Bomba de Água de Frequência Variável Submersa JDP 3500Q wifi.	1

Fonte: Autor (2025).

A Estrutura Mecânica está representada na Figura 21, onde é possível visualizar o sistema de circulação de água, bem como a estrutura projetada para suportar os conectores na região superior da tubulação.

Figura 21 – Estrutura Mecânica.

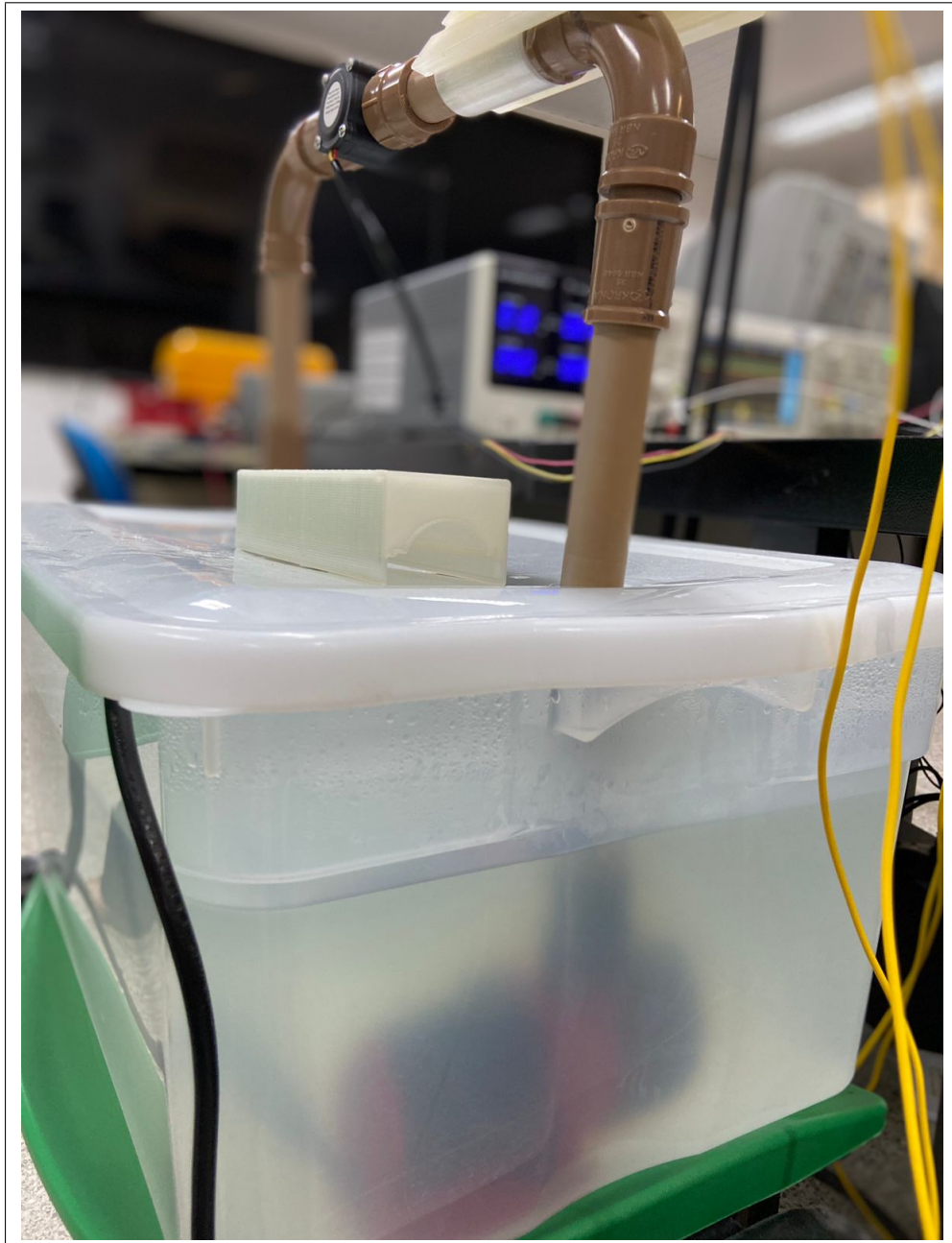


Fonte: Autor (2024).

Na Figura 21 é possível visualizar o vasilhame que contém a água que ficará em um ciclo contínuo de circulação no sistema, bem como a estrutura modelada e impressa em 3D para este trabalho.

Para fazer com que a água do sistema fique em um ciclo contínuo de circulação, foi utilizado uma bomba hidráulica que está presente na região interna inferior do vasilhame que contém a água e pode ser visualizada na Figura 22.

Figura 22 – Estrutura Mecânica - localização da bomba hidráulica.

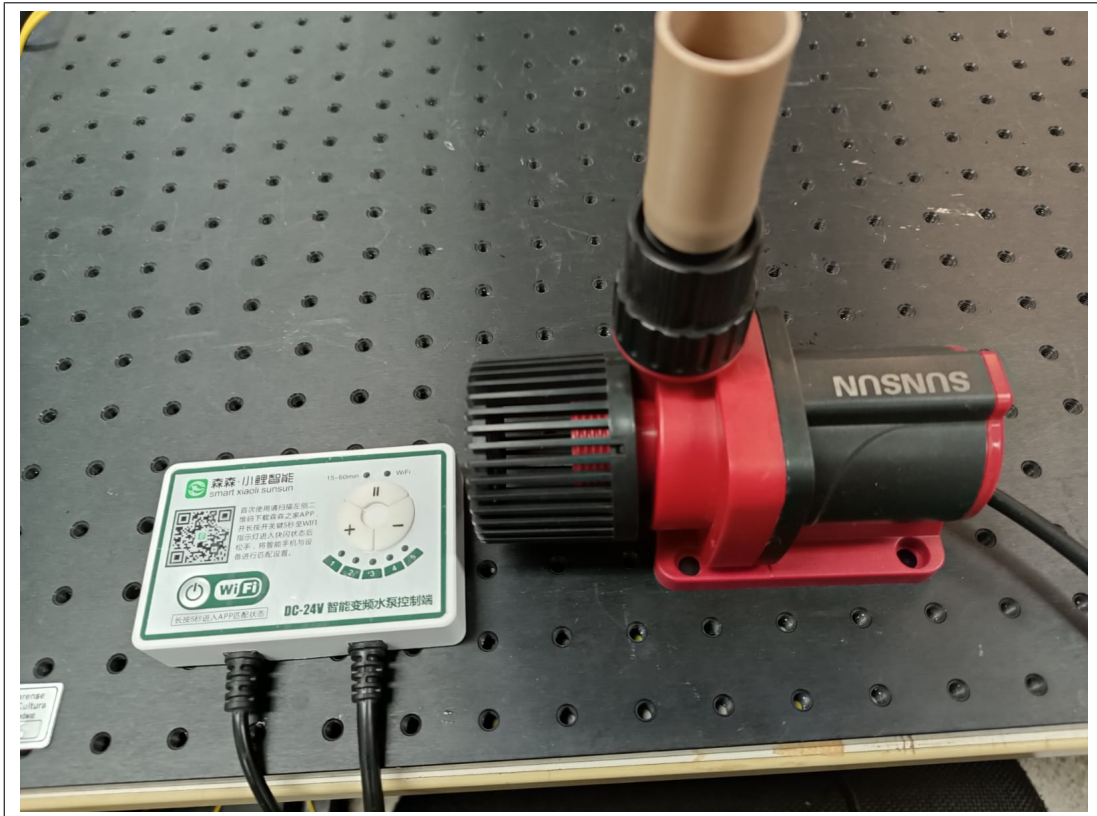


Fonte: Autor (2024).

A bomba utilizada possui um controle de vazão que corresponde a 5 níveis, indo de 19L/min até 29 L/min. A bomba ainda possui conexões para uma tubulação de 19,05 mm e 25,4 mm, além de outros acessórios não utilizados. Para este experimento foi utilizada a conexão de 19,05 mm devido ser o padrão comercial presente nas casas residenciais. A bomba hidráulica utilizada no experimento pode ser visualizada na Figura 23.

Resumindo, a Bomba da Figura 23, possui 5 níveis que obedecem a Tabela 2.

Figura 23 – Bomba Hidráulica.



Fonte: Autor (2025).

Tabela 2 – Níveis de Vazão da Bomba Hidráulica.

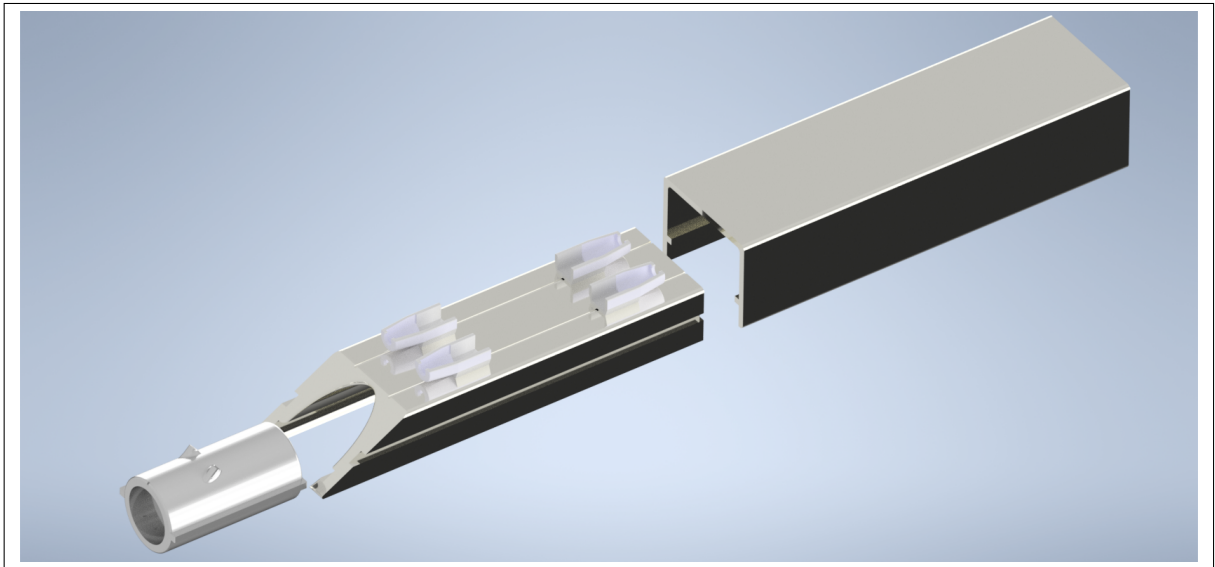
Valores de vazão da Bomba Hidráulica	
Níveis de Vazão da Bomba	Vazão (L/min)
1	19
2	22
3	25
4	27
5	29

Fonte: Autor (2025).

3.1.1 Unidade de acoplamento óptico

Esta unidade é responsável por fixar os conectores do laser e do fotodiodo na tubulação para que o sistema tenha estabilidade mecânica. Esta estrutura contém 4 partes principais: o acoplador óptico da fibra multimodo, a base para os conectores SC-UPC e também para os seus adaptadores bem como os pequenos suportes para encaixar os conectores, e por ultimo a tampa para proteger os conectores. A unidade de acoplamento óptico modelada e projetada para este trabalho pode ser visualizada na Figura 24

Figura 24 – Unidade de acoplamento óptico.

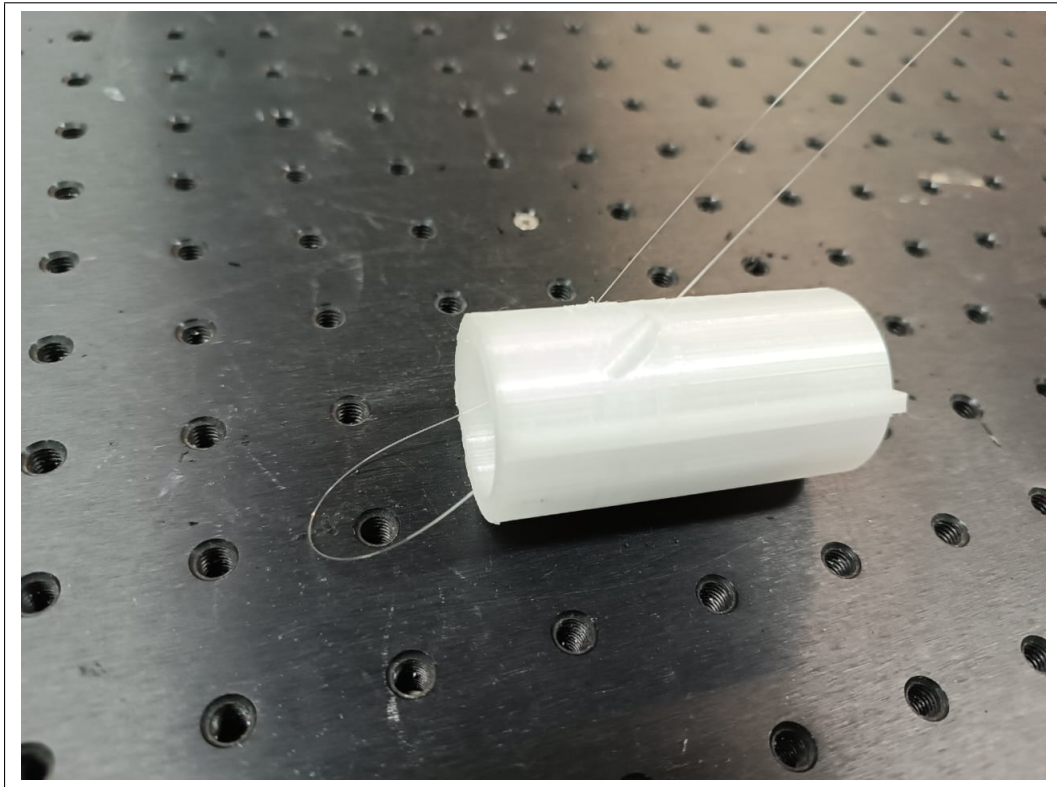


Fonte: Autor (2024).

3.1.2 Acoplador da fibra multimodo

Este dispositivo foi projetado com a finalidade de conectar a fibra multimodo, que é a região que sofrerá a interferência mecânica do fluxo de água. A peça projetada é basicamente um seguimento de cano, com dois orifícios para a entrada e a saída fibra multimodo e a estrutura também possui esbarros internos para facilitar o encaixe da tubulação que conduzirá o fluxo de água. O acoplador da fibra multimodo modelado e projetado para este trabalho pode ser visualizado na Figura 25.

Figura 25 – Acoplador da Fibra multimodo.



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 25 é possível visualizar a fibra multimodo conectada ao acoplador, entrando no primeiro orifício, dando uma pequena curva e retornando pelo segundo orifício. Essa curva é necessária para que a fibra funcione como uma espécie de chave, que vai levantar ou abaixar mediante a passagem do fluxo de água, causando assim uma perturbação mecânica, sendo essa perturbação o sinal que ser lido pelo circuito eletrônico do projeto.

3.2 Estrutura eletrônica

A estrutura eletrônica foi projetada para poder realizar o tratamento dos dados enviados pelo Fotodiodo. Além da placa eletrônica, foram utilizados alguns componentes e dispositivos eletrônicos como o osciloscópio e a fonte de bancada para a realização do experimento. Os componentes e dispositivos gerais da estrutura eletrônica estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Componentes da Estrutura Eletrônica.

Nº Item	Identificação
1	Osciloscópio Tektronix Tbs1052b EDU 50mhz
2	Fonte de Alimentação DC Regulada MPL-3303M
3	Módulo ESP32 DevKitC V4 WROOM-32D 38 Pinos
4	Unidade de Processamento de Dados

Fonte: Autor (2024).

3.2.1 Osciloscópio Tektronix Tbs1052b EDU 50MHz

Os osciloscópio é um dispositivo eletrônico capaz de analisar o sinal eletrônico de um determinado circuito, e assim é possível analisar com mais detalhes os sinais de sensores, componentes eletrônicos e também podendo ser utilizado em salas de aula e ambientes profissionais. Nesse trabalho foi utilizado o osciloscópio Tektronix Tbs1052b EDU 50MHz, ou seja, ele analisa sinais com uma frequência de até 50MHz.

Esse osciloscópio ainda possui algumas características que facilitam o desenvolvimento do projeto como a conectividade USB ((*Universal Serial Bus*)), dois canais para análise de sinais, sistema interno para realizar operações com os sinais, registro de dados via conexão USB, análise do sinal no domínio da frequência e outras características. O osciloscópio Tektronix Tbs1052b EDU 50MHz está representado na Figura 26.

Figura 26 – Osciloscópio Tektronix Tbs1052b EDU 50MHz.



Fonte: Autor (2024).

3.2.2 Fonte de Alimentação DC Regulada MPL-3303M

Essas fontes de alimentação de bancada foram projetadas para serem utilizadas de maneira simples, próprias para laboratórios, salas de ambientes didático ou profissionais. De acordo com o fabricante, esse modelo de fonte MPL-3303M possui duas saídas variáveis, além disso, segundo o fabricante, a fonte MPL-3303M ainda apresenta uma alta estabilidade de baixo *ripple*, *display* de fácil leitura para apresentação simultânea da tensão e corrente de saída, ainda ajuste da tensão e da corrente através de potenciômetros de precisão, botão para habilitar energização, possibilidade de operação contínua mesmo nas condições de máxima carga. A Fonte de Alimentação DC Regulada MPL-3303M está representada na Figura 27.

Figura 27 – Fonte de Alimentação DC Regulada MPL-3303M.

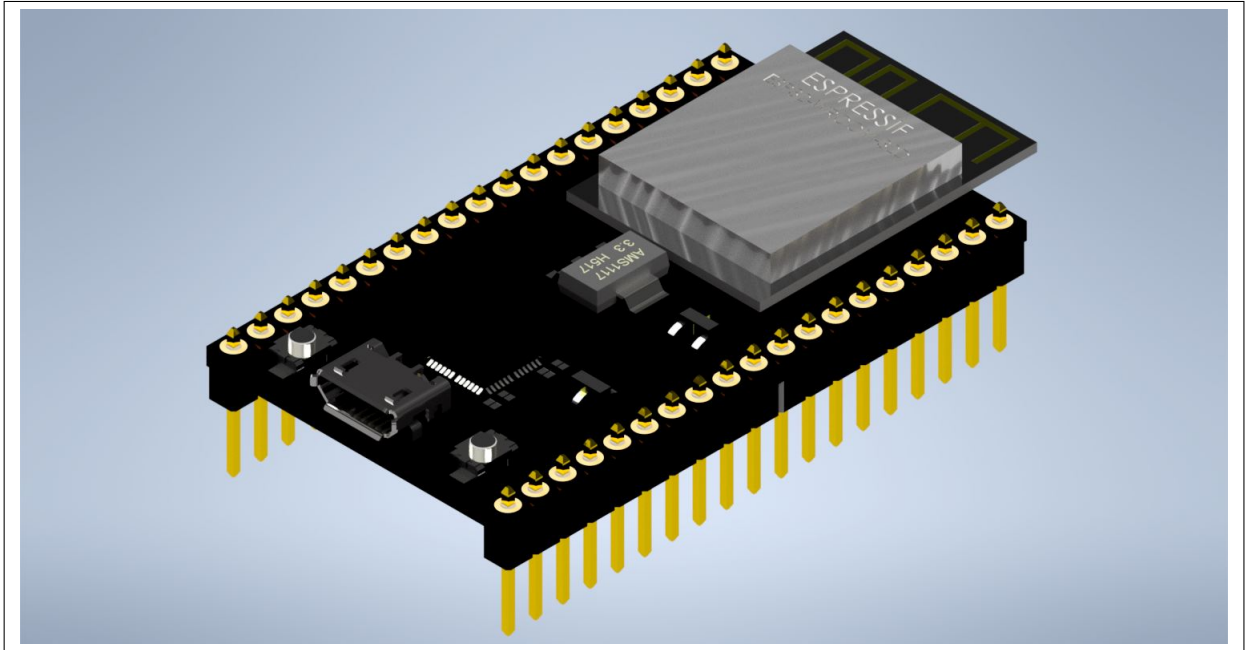


Fonte: Autor (2024).

3.2.3 Módulo ESP32 DevKitC V4 WROOM-32D 38 Pinos

O Módulo ESP32 DevKitC V4 WROOM-32D é um microcontrolador que já possui em sua estrutura, dispositivos periféricos que possibilitam a conexão WiFi e conectividade Bluetooth. Além disso, esta placa de desenvolvimento oferece um baixo consumo de energia para o seu funcionamento, o que garante uma vantagem em relação à outras placas como a do Arduino, oferece uma grande versatilidade em diversos projetos que utilizem o conceito de Internet das Coisas, ou IOT (*Internet of Things*). Além disso, o dispositivo possui memória *flash* de 4 MB de 32 bits, além de um processador Xtensa 32-bits 1x6 *Dual-Core*, favorecendo um melhor desempenho para o dispositivo como um todo. A placa de desenvolvimento ESP32 DevKitC V4 WROOM-32D está representada na Figura 28.

Figura 28 – Esp32 DevKitC V4 WROOM-32D.

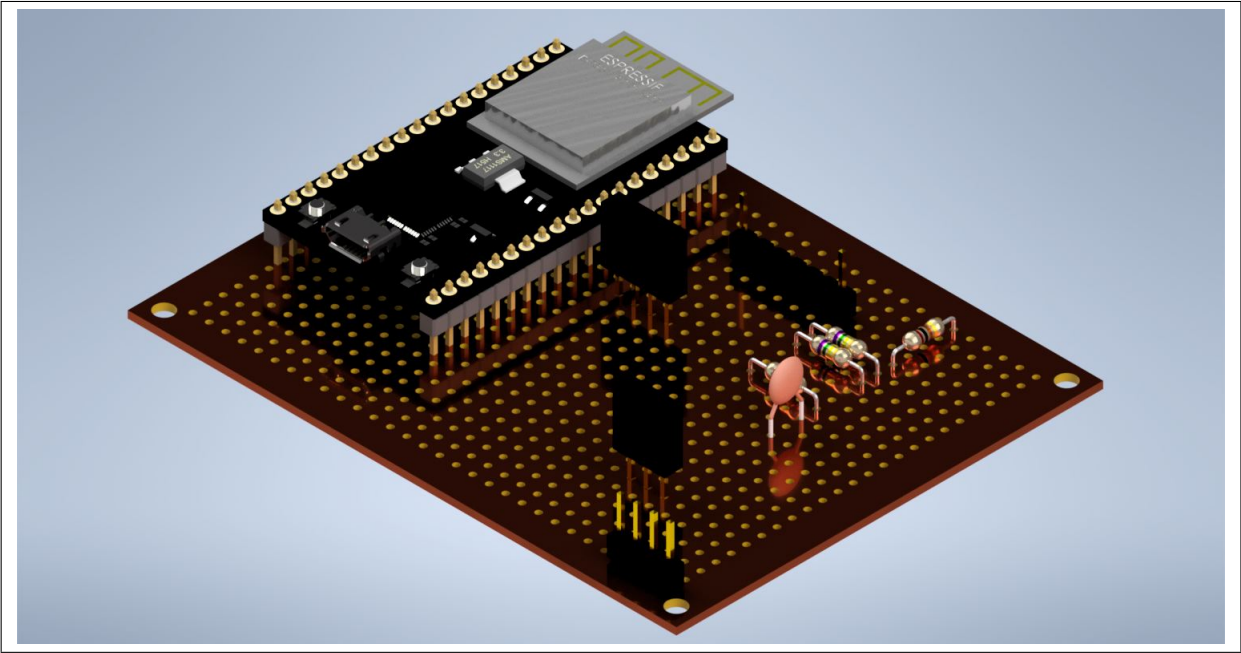


Fonte: Autor (2024).

3.2.4 Unidade de processamento de dados

A Unidade de Processamento de dados é um circuito eletrônico composto por uma plataforma de desenvolvimento ESP32, e alguns componentes eletrônicos. A plataforma de desenvolvimento está programada para realizar a função de conectar as informações necessárias para o funcionamento da unidade. Essa unidade tem como função receber as informações enviadas pelo fotodiodo, e assim realizar o devido tratamento. Para que a leitura dos dados fosse possível, foi necessário realizar a confecção do circuito do fotodiodo, circuito esse soldado e projetado na própria placa furada. Então nessa unidade processamento de dados esta inserido a plataforma de desenvolvimento ESP32, o circuito básico de funcionamento do fotodiodo, e as conexões necessárias para que as leituras do sinal e as ligações com o *display* LCD (*Liquid Crystal Display*). A Unidade de Processamento de Dados está representada na Figura 29.

Figura 29 – Unidade de Processamento de Dados.



Fonte: Autor (2024).

3.3 Estrutura óptico

A estrutura óptica do trabalho é responsável por conter todos os componentes responsáveis por gerar, conter e transmitir o sinal luminoso. Para a realização dessa transmissão da luz, foram utilizados alguns dispositivos e equipamentos que estão discriminados na Tabela 4.

Tabela 4 – Componentes da estrutura óptica.

Nº Item	Identificação	Quantidade
1	Patch Cord Fibra Sc/upc Para Sc/upc Monomodo	2 pares
2	FG105LVA - Fibra multimodo, NA 0.10, núcleo $\phi 105\mu$	1 metro
3	Conectores Rápido Sc-Upc Reutilizável	2
4	Adaptadores Óptico Simplex SC/UPC	2
5	Optical Power Meter 1550 nm	1
6	Clivador Cortador Óptico Fibra Optica De Alta Precisão Ftth	1
7	Laser Diodo 1550 nm potencia de 3mW	1
8	Laser Diodo 785 nm potencia de 50mW	1
9	ITC4020 - Controlador de diodo laser e de temperatura para bancada, 20A, 225W	1

Fonte: Autor (2025).

3.3.1 Patch cable fibra SC/UPC para sc/upc monomodo

Neste trabalho foi utilizado um par de *patch cord* fibra SC/UPC para SC/UPC monomodo para transmitir a luz do laser para o acoplador óptico SC (*Conector Suscriptor* ou Conector Quadrado)/UPC (*Ultra Physical Contact*). Esse dispositivo possui um encaixe que possibilita

a conexão rápida e ágil. Devido ao seu tamanho, é possível utilizar vários conectores em uma estrutura compacta, permitindo uma grande densidade de conectores por instrumento. É utilizado em fibras ópticas monomodo e multimodo, possuindo uma perda de aproximadamente 0,25 dB de acordo com o fabricante. A Figura 30 está representando o *patch cable* utilizado no projeto.

Figura 30 – Patch Cable Fibra SC/UPC Para SC/UPC Monomodo.



Fonte: Autor (2024).

3.3.2 FG105LVA - Fibra multimodo núcleo $\varnothing 105 \mu\text{m}$

Essas fibras ópticas multimodo possuem índice escalonado 0,10 NA (*Numerical Aperture*), que de acordo com Keiser (2014), a abertura numérica (NA) de uma fibra óptica é uma característica referente à medida da capacidade da fibra de recolher a luz. De acordo com a empresa fabricante Thorlabs (2024), essa fibra óptica apresenta uma construção de fibra dupla (revestimento de acrilato de baixo índice de refração sobre revestimento de sílica dopada com flúor), permitindo alta potência, capacidades de manuseio e estabilidade ultra-alta na transmissão do laser. A Fibra FG105LVA pode ser visualizada na Figura 31.

Figura 31 – FG105LVA - Fibra multimodo núcleo Ø105 µm.

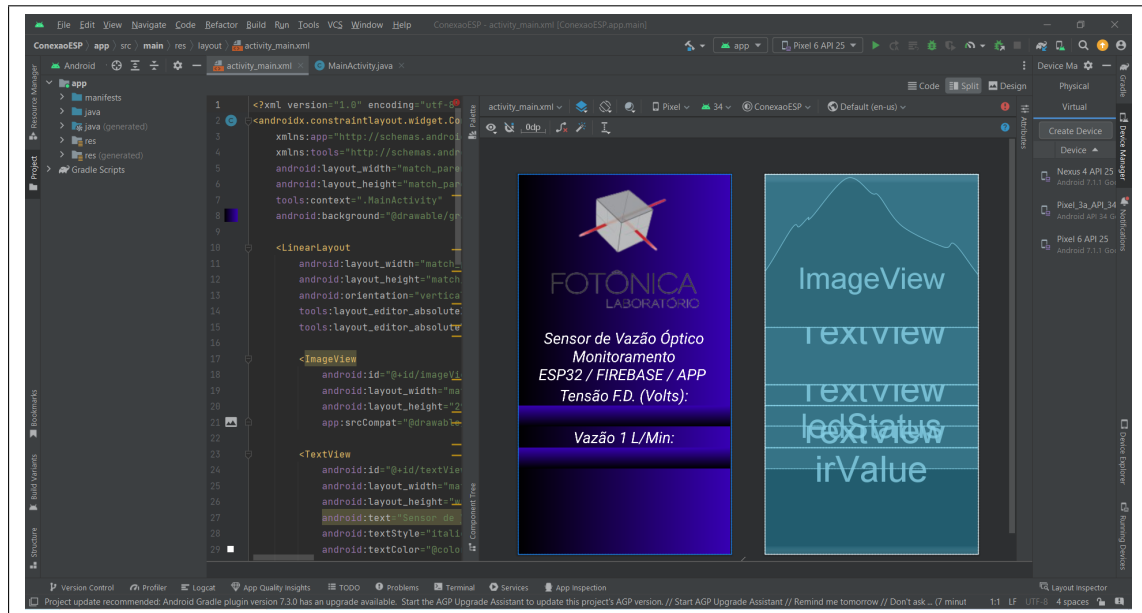


Fonte: Autor (2024).

3.3.3 Aplicativo e Monitoramento da Vazão Óptica

Para este projeto foi desenvolvido um aplicativo para o sistema operacional Android para monitorar os valores de tensão e vazão do sensor proposto. O aplicativo foi desenvolvido no ambiente de desenvolvimento Android Studio, que é um programa disponibilizado gratuitamente pela Google. O ambiente de desenvolvimento Android Studio pode ser visualizado na Figura 32.

Figura 32 – Ambiente de Desenvolvimento Android Studio.



Fonte: Autor (2024).

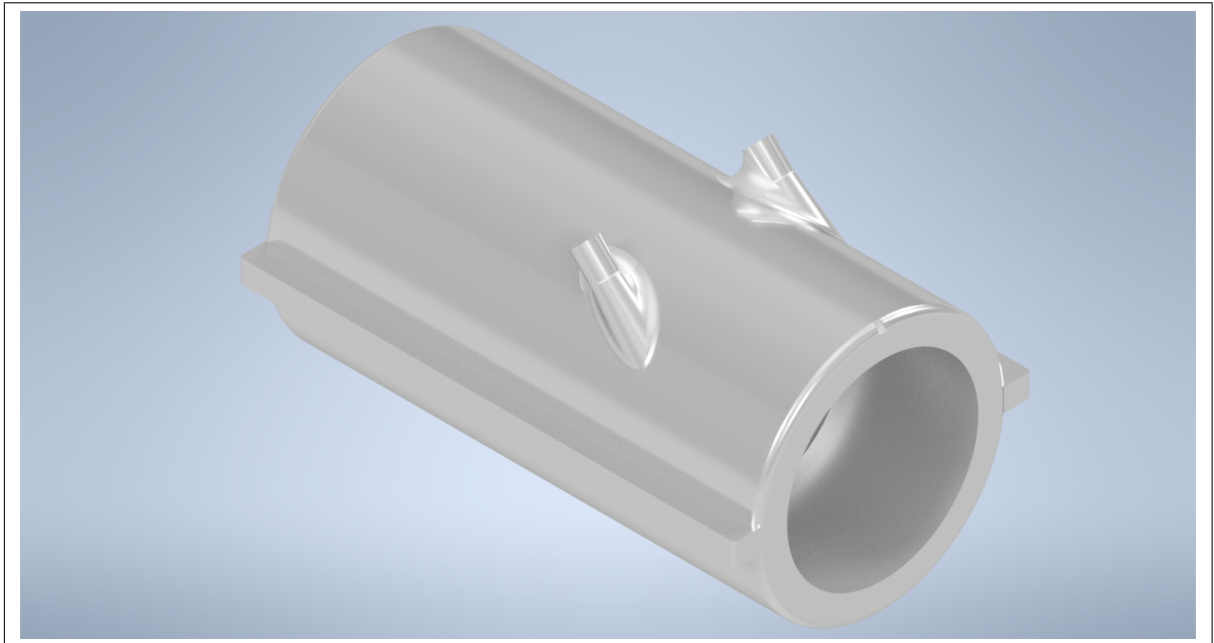
3.4 Métodos

Nesta seção será abordada cada etapa do desenvolvimento do trabalho de maneira individual, a fim de ratificar a sua importância.

3.4.1 Dispositivo de acoplamento

O dispositivo de acoplamento foi projetado para que a fibra multimodo pudesse ser acoplada à tubulação e ainda manter o contato com os conectores SC-UPC. O dispositivo projetado é basicamente um seguimento de tubulação de 19,05 mm de diâmetro, considerando o seu diâmetro interno. O dispositivo de acoplamento está ilustrado na Figura 33.

Figura 33 – Dispositivo de acoplamento da fibra Multimodo.

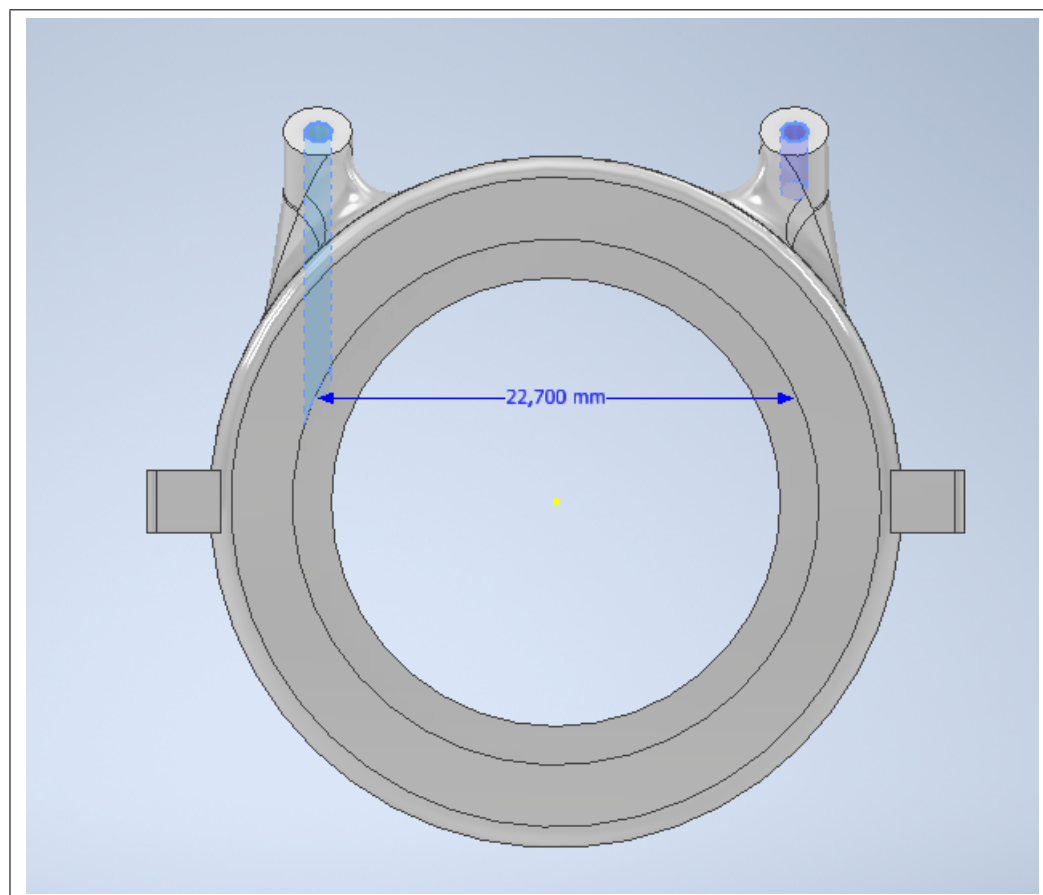


Fonte: Autor (2024).

A tubulação utilizada é de 3/4", que é equivalente a 19,05 mm, entretanto, comercialmente essa tubulação possui o diâmetro externo de 25 mm, e como diâmetro interno 20 mm, por isso, o projeto do acoplador considerou essas dimensões e assim, foi projetado um dispositivo que atendesse a esses requisitos, e também que respeitasse a curvatura ideal da fibra para garantir a menor perda de potência óptica por curvatura. Por isso, foi projetado uma estrutura com o maior raio possível de curvatura para a fibra, respeitando as dimensões da tubulação residencial.

Baseando-se na Figura 33, é possível visualizar que o dispositivo possui dois orifícios na sua região superior, que é por onde a fibra multimodo irá entra e sair. A distância horizontal entre os orifícios é de aproximadamente 22,7 mm, e considerando ainda o plano perpendicular a seção do dispositivo, os dois orifícios possuem um ângulo de 65,41°. A distância horizontal entre os orifícios está ilustrada na Figura 34.

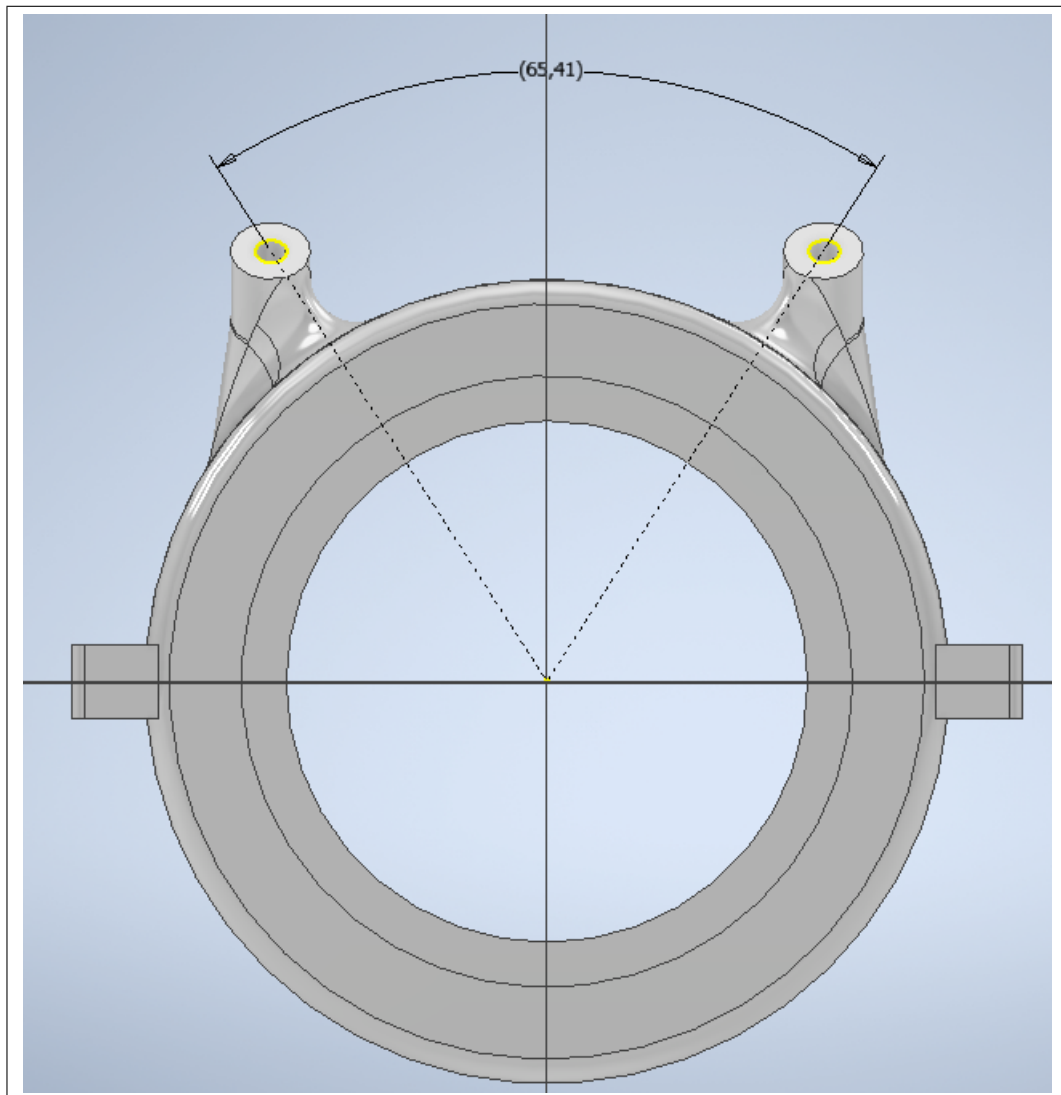
Figura 34 – Distancia entre os orifícios centrais.



Fonte: Autor (2024).

O angulo projetado entre os orifícios, por consequência das distâncias é de aproximadamente $65,4^\circ$, conforme está ilustrado na Figura 35.

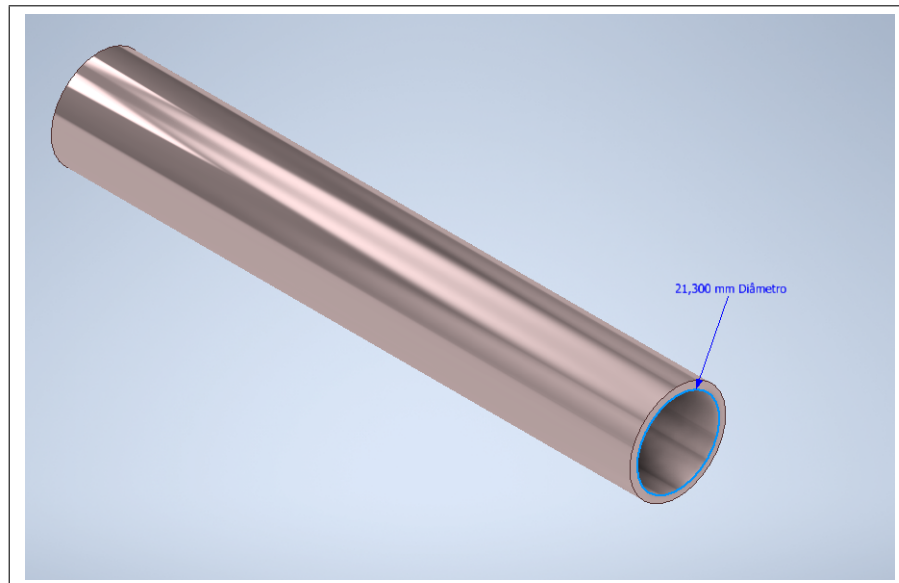
Figura 35 – Ângulo entre os orifícios centrais.



Fonte: Autor (2024).

Basicamente o dispositivo foi projetado para acomodar a fibra, considerando o menor raio de curvatura possível para as condições para uma tubulação residencial, pois devido ao diâmetro interno da tubulação de 3/4", que é aproximadamente 21,5 mm, o raio de curvatura da fibra ficou aproximadamente 10,75 mm. O diâmetro interno da tubulação de 3/4" está ilustrado na Figura 36.

Figura 36 – Seguimento da tubulação.



Fonte: Autor (2025).

3.4.2 Preparação da fibra multimodo

A preparação da fibra multimodo foi feita considerando as dimensões da tubulação, além de considerar também a ocorrência do fenômeno da interferência multimodal. Foi utilizada uma fibra de aproximadamente 30 cm, conforme ilustrada na Figura 37.

Figura 37 – Comprimento da fibra multimodo.

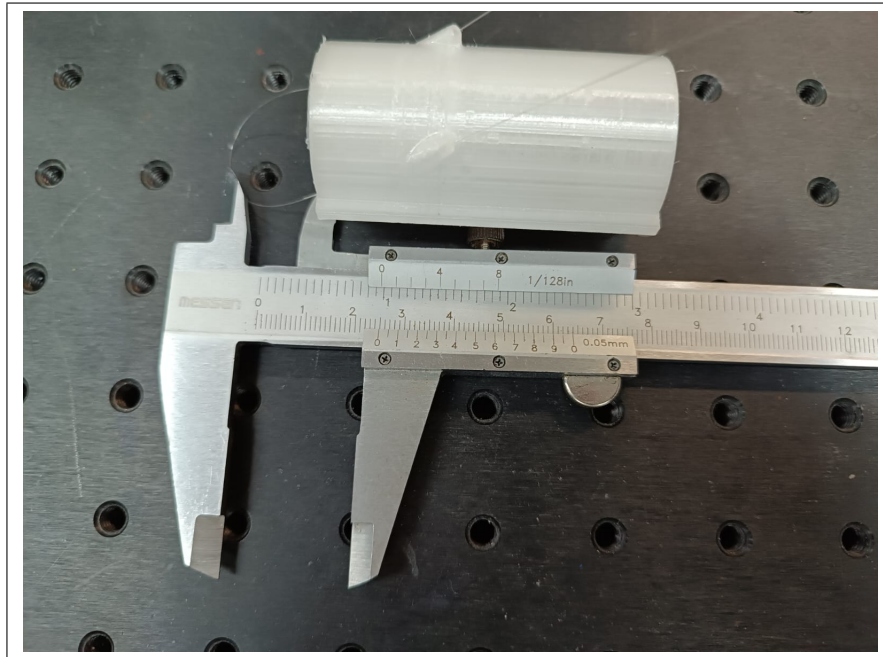


Fonte: Autor (2025).

Após a preparação da fibra, foram realizados os procedimentos necessários para o acoplamento. Basicamente, uma extremidade da fibra foi inserida em um dos orifícios do

dispositivo, passando por dentro, e em seguida, foi feita uma curva na região interna e em seguida a fibra passou pelo orifício de saída. Após essa montagem, foi respeitada a distância de aproximadamente 25 mm para fora do dispositivo, para que fosse possível fazer com que a curvatura da fibra funcionasse com uma espécie de "chave", para quando o fluxo de água atravessasse a tubulação, a fibra pudesse sofrer uma perturbação mecânica, sinal este que será analisado pelo circuito eletrônico do sensor. A montagem da fibra no dispositivo de acoplamento está ilustrada na Figura 38

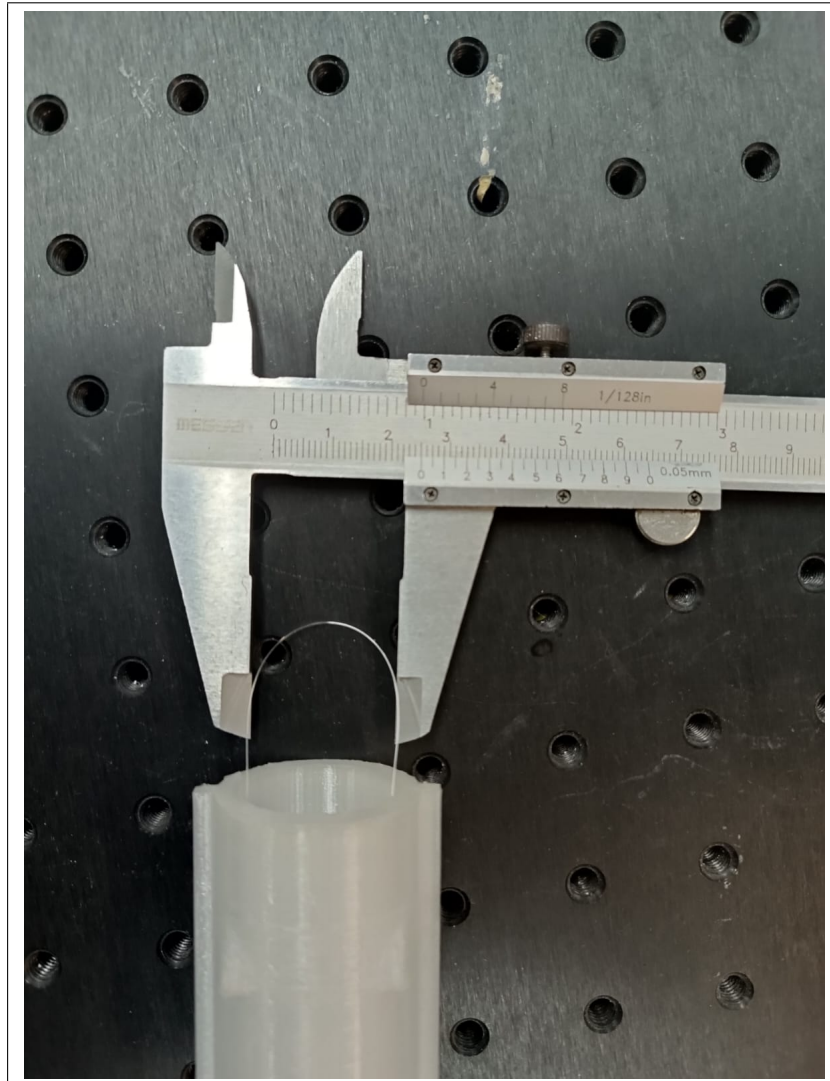
Figura 38 – Fibra acoplada ao dispositivo projetado.



Fonte: Autor (2025).

Dessa forma, a fibra ficou com uma região limitada no interior da tubulação, e bem específica, devido às restrições das dimensões do projeto, que é devido as dimensões de uma tubulação residencial. Devido às condições do projeto, a fibra ficou com um diâmetro de curvatura de aproximadamente 25 mm, como está ilustrado na Figura 39.

Figura 39 – Curvatura da fibra no interior da tubulação.

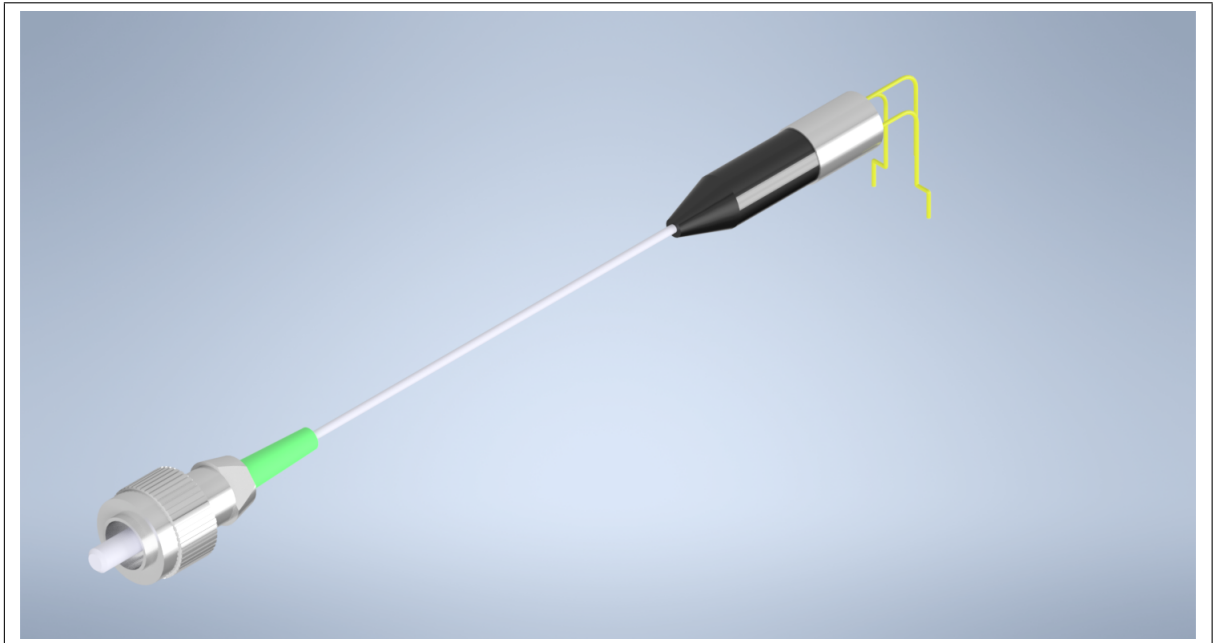


Fonte: Autor (2025).

3.4.3 Conexão do fotodiodo 1550 nm

O fotodetector utilizado foi o de comprimento de onda de 1550 nm acoplado a uma fibra monomodo, minimizando perdas por conexão. Basicamente o fotodiodo possui três pinos, que são dois pinos para a sua ligação no circuito e um pino para a sua blindagem, que é para realizar o seu aterramento. Como o dispositivo é basicamente um diodo, a sua ligação é baseada nos pinos de ânodo e cátodo, o cátodo é o pino responsável por enviar o sinal que será tratado pelo circuito eletrônico. O fotodiodo utilizado está ilustrado na Figura 40.

Figura 40 – Fotodiodo 1550 nm com fibra acoplada.

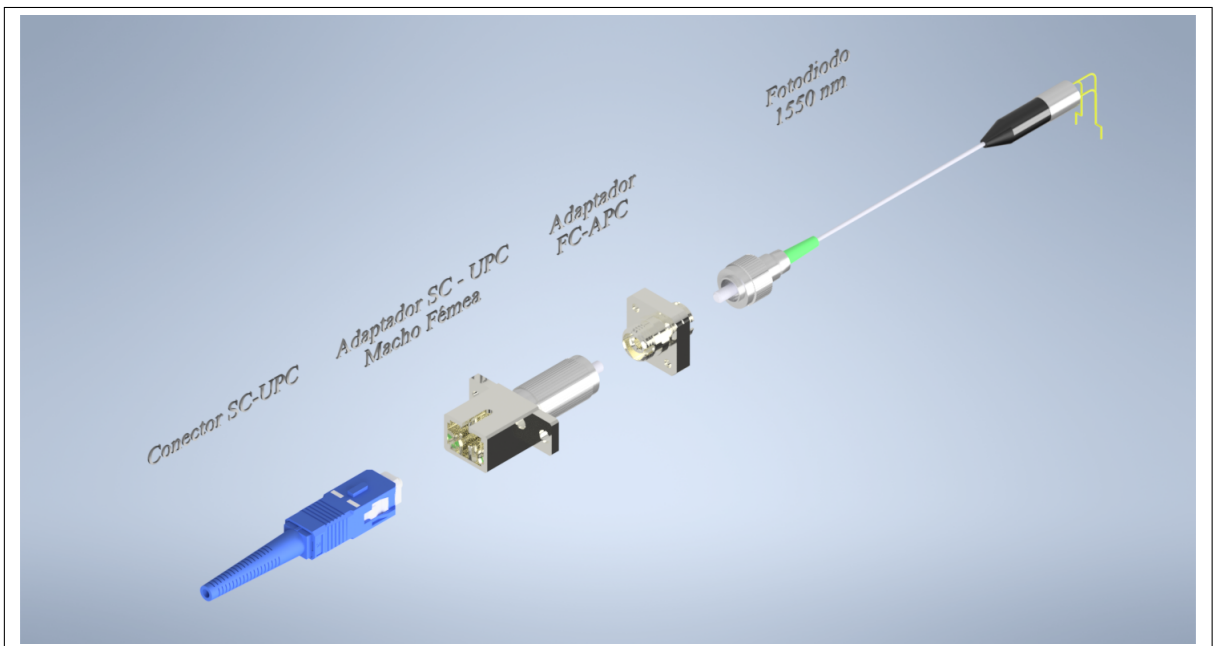


Fonte: Autor (2025).

Para realizar a devida conexão do fotodiodo no circuito, foi necessário acrescentar em sua extremidade, um adaptador FC-APC e um adaptador SC-UPC macho-fêmea, para que pudesse ser realizado a conexão no conector SC-UPC, conforme está ilustrado na Figura 41

APC (Angled Physical Contact)

Figura 41 – Conexão do Fotodiodo.

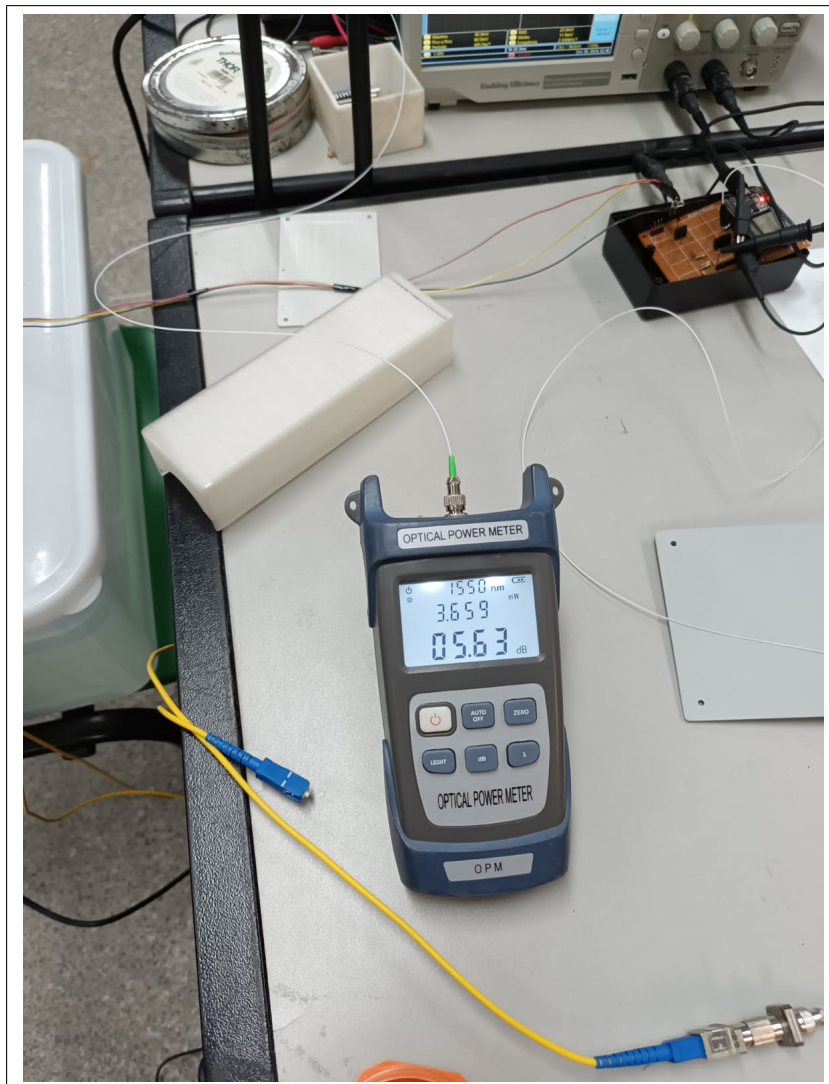


Fonte: Autor (2025).

3.4.4 Teste da potência do laser 1550 nm

Antes de iniciarmos os testes deste trabalho, foi verificado a potência do laser 1550 nm utilizado. Neste teste foi utilizado o medidor de potência óptica *Optical Power Meter* 1550 nm para verificar a potência do laser, afim de constatar a sua integridade antes de iniciarmos os ensaios. Após a devida conexão do laser no *optical power meter*, bem como a sua ligação na fonte de bancada, foi constatada a sua integridade tendo uma potência de aproximadamente 3,66 mW, como está sendo ilustrado na Figura 42.

Figura 42 – Teste de potência do laser 1550 nm.



Fonte: Autor (2025).

3.4.5 Montagem da setup

Nesta seção será discutido a montagem e os procedimentos para os ensaios com os dois *setups*: um com o laser de 1550 nm e o outro com o laser de 785 nm.

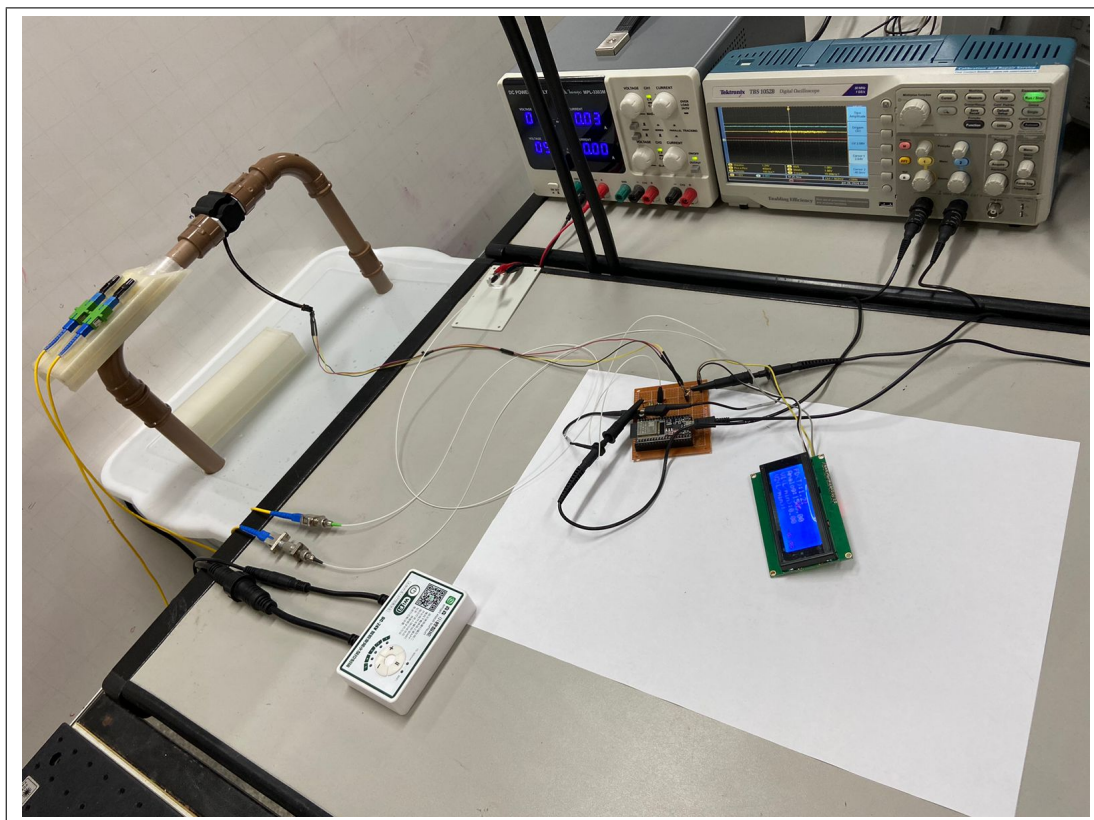
3.4.6 Ensaios

Nesta etapa será descrito como ocorreram os ensaios com o sistema de tubulação, com o sensor FS300A, o sensor do projeto e sistema eletrônico. Para todos os ensaios, foi aguardado o tempo de 20 segundos até que o sistema se estabilizasse devido à alteração da vazão da bomba, e somente após esse tempo, o dados foram coletados por um *pendrive* conectado ao osciloscópio Tektronix Tbs1052b EDU 50MHz. Ao todo foram realizados dois setups de ensaios, um com o laser diodo de 1550 nm e o outro com o laser diodo de 785 nm, este com o controlador ITC4020.

3.4.7 Setup laser diodo 1550 nm

Neste experimento foi utilizado o laser diodo com comprimento de onda 1550 nm, energizado pela fonte de bancada MPL-3303M. O laser foi energizado com 1,0V, tensão especificada pela fabricante. A Figura 43 ilustra o arranjo experimental com o laser diodo 1550 nm.

Figura 43 – Montagem do arranjo experimental com o laser diodo 1550 nm.



Fonte: Autor (2025).

Para este experimento, foram realizados dois tipos de ensaios: um variando a vazão de 19L/min até 29L/min, considerando o tempo de 20 segundos para o sistema; e a vazão diminuindo de 29L/min até 19L/min. Ambos os ensaios foram realizados para validar a reação do sistema, e assim, confirmar a veracidade dos dados obtidos.

À medida com que o nível do fluxo variava, os dados visualizados pelo osciloscópio eram gravados em um *pendrive* e logo em seguida, o dados foram tratados para a devida análise. Ao todo foram gerados 2500 pontos, em um período de 25 ms, ou seja, no osciloscópio os valores do período foram de -12,5 ms até 12,5 ms, perfazendo um total de 25 ms de período, como será analisado nos resultados.

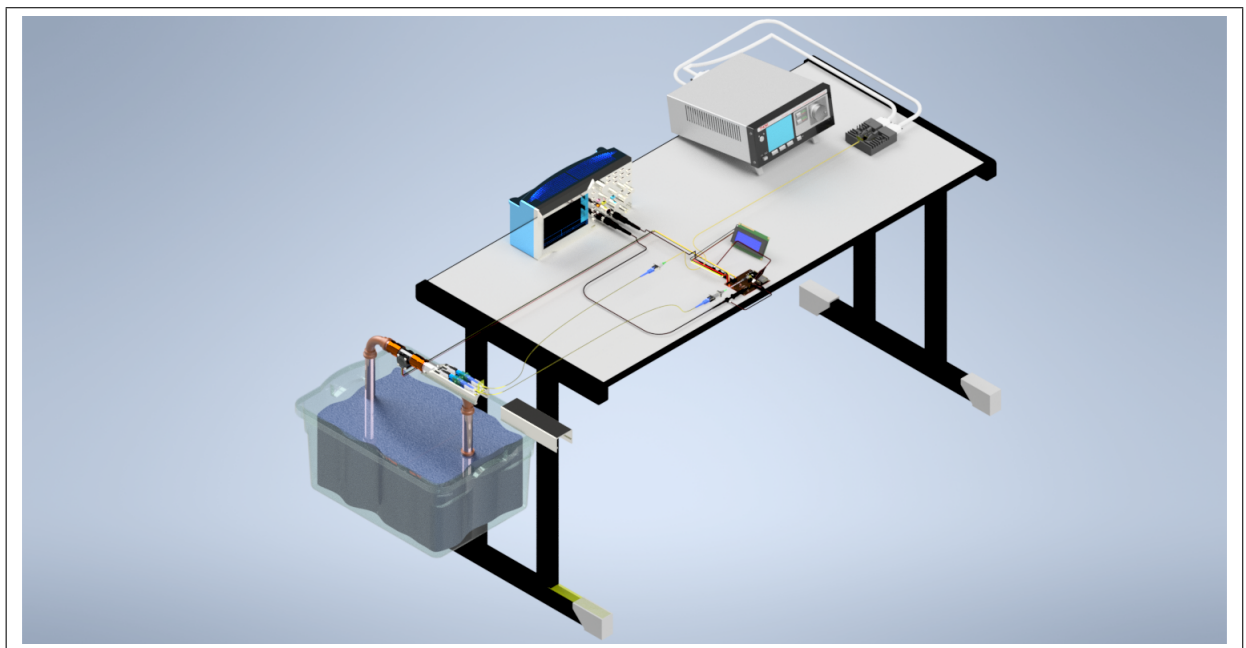
Cada nível de vazão gerava uma perturbação no sinal, e esses dados foram coletados e analisados logo após os ensaios.

3.4.8 Setup Laser Diodo 785 nm

O diodo laser FPV785S, foi monitorado e controlado pelo controlador de diodo laser e de temperatura para bancada, 20 Amperes de corrente elétrica e 225 Watts de potência elétrica. Esse controlador é capaz de controlar a potência, corrente de temperatura do laser de saída. Esse dispositivo faz parte da série ITC4000, que possui uma série de diodos lasers de precisão de alta potência e controladores de temperatura com uma interface USB 2.0 para acionar diodos lasers de até 20A de corrente de laser.

Neste *setup*, o arranjo experimental foi semelhante ao do laser de 1550 nm, tendo como única diferença o próprio laser do sinal luminoso. Para este arranjo, foi utilizado o laser diodo 785 nm, com o controlador TC4020, que é o laser Butterfly. A Figura 44 ilustra o arranjo experimental com o laser diodo 785 nm e com o controlador TC4020.

Figura 44 – Montagem do arranjo experimental com o laser diodo 785 nm.



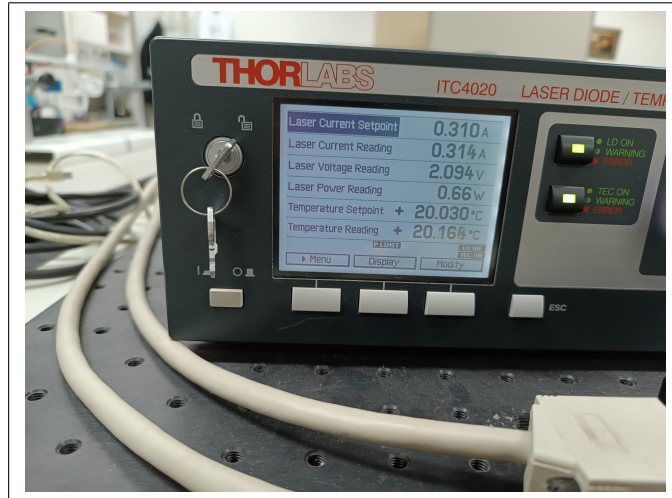
Fonte: Autor (2025).

O valor de 0,310A para a corrente de acionamento do laser foi utilizada como valor inicial para verificar se o comportamento do sinal seria válido, e como o sensor apresentou uma sensibilidade, esses valores foram mantidos.

Este diodo laser possui, dentre outros elementos, um termistor que permite que a temperatura do laser seja controlada pelo controlador ITC4020. Este diodo laser produz um espectro de comprimento de onda estabilizado com uma largura de linha estreita de frequência única na faixa de potência operacional de aproximadamente 30 a 50 mW. A saída é acoplada a 1,0 m de fibra monomodo 780HP, terminada em FC/APC. A configuração e os valores utilizados no ensaio com o laser diodo 785 nm podem ser visualizados na Figura 45

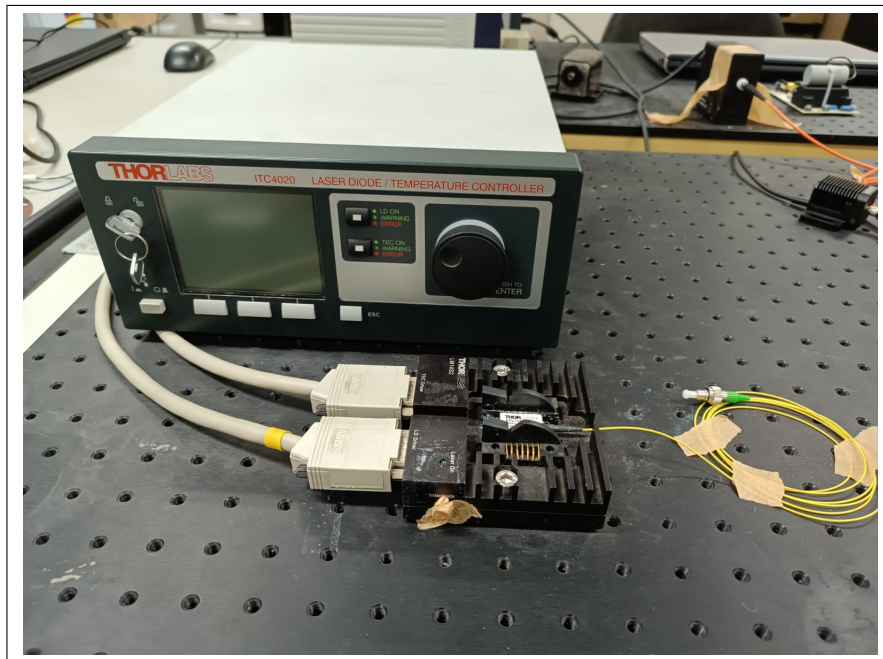
Como o laser diodo 785 nm precisa estar conectado com o laser Butterfly, Na Figura 46 é possível visualizar a conexão entre o laser e o controlador.

Figura 45 – Configuração utilizada no laser Butterfly.



Fonte: Autor (2025).

Figura 46 – Conexão entre o controlador e o laser diodo 785.



Fonte: Autor (2025).

3.5 Setup de ensaios

Os ensaios foram realizados utilizando duas fontes de lasers: o laser diodo 1550 nm e o laser diodo 785 nm. Para cada ensaio foi considerado os valores de vazão disponíveis pelo controle da bomba hidráulica, ou seja, o controle de vazão da bomba permite uma variação de vazão de cinco níveis: 19 L/min, 22 L/min, 25 L/min, 27 L/min e 29 L/min. Estes valores de vazão foram obtidos utilizando o sensor de vazão FS300A, bem como a sua programação específica utilizando a plataforma de desenvolvimento ESP32.

Para todos os ensaios, foi aguardado o tempo de 20 segundos até que sistema tenha se

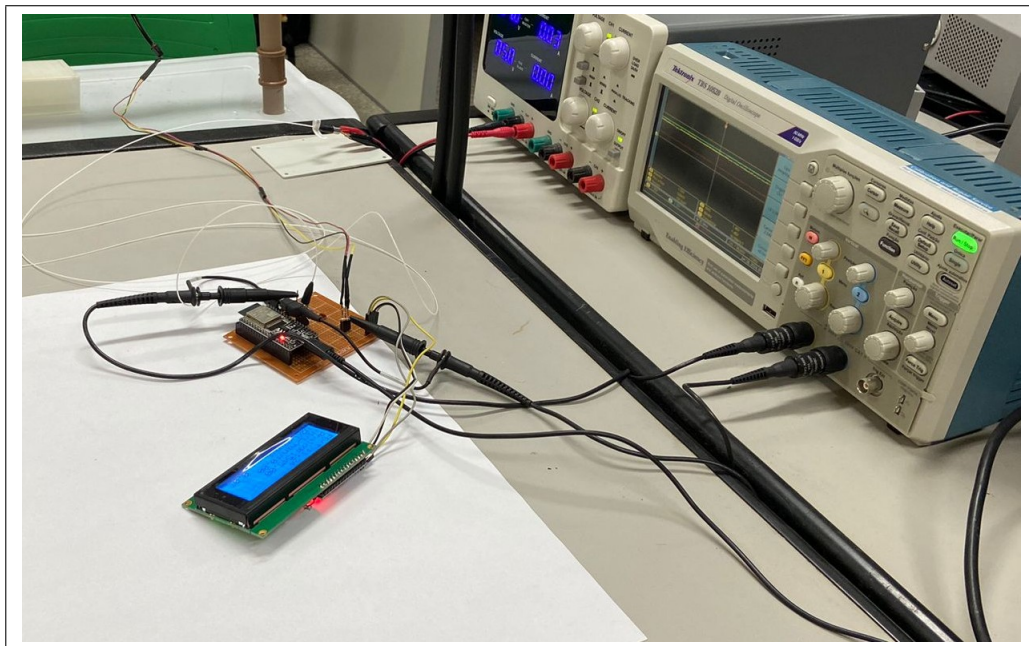
estabilizado devido à alteração da vazão da bomba, e somente após esse tempo, os dados foram coletados por um *pendrive* conectado ao osciloscópio Tektronix Tbs1052b EDU 50MHz.

Para cada ensaio do laser diodo 1550 nm e do laser diodo 785 nm, foi feita a análise tanto no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência.

O laser diodo de 1550 nm foi energizado por uma fonte de alimentação DC (*Direct Current*) regulada MPL-3303M. Como o laser diodo 1550 nm precisa de uma tensão de 2,0 Volts para que possa funcionar corretamente, a fonte de bancada MPL-3303M foi ajustada para fornecer esse valor para os terminais de alimentação do diodo laser.

Em seguida, para poder analisar o sinal do fotodiodo conectado na placa do circuito eletrônico, foi utilizado o osciloscópio Tektronix Tbs1052b EDU 50MHz. O sinal do fotodiodo, que é o sinal eletrônico do sensor de vazão, foi analisado no canal 1 do osciloscópio, enquanto o sinal PWM (*Pulse Wave Modulation*, que em tradução livre significa Modulação por Largura de Pulso) do sensor de vazão de água FS300A 3/4". Para realizar uma melhor análise do sinal, também foi utilizada a função de soma dos sinais, gerando assim um terceiro sinal no *display* do osciloscópio. A conexão dos canais do osciloscópio está representada na Figura 47.

Figura 47 – Conexões nos canais do osciloscópio.



Fonte: Autor (2024).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentadas e discutidos os resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho.

4.1 laser diodo 1550 nm

Nesta seção serão abordados os resultados e análises referentes ao laser diodo 1550 nm tanto no domínio do tempo.

4.1.1 1º Ensaio - Vazão de 19L/min até 29L/min

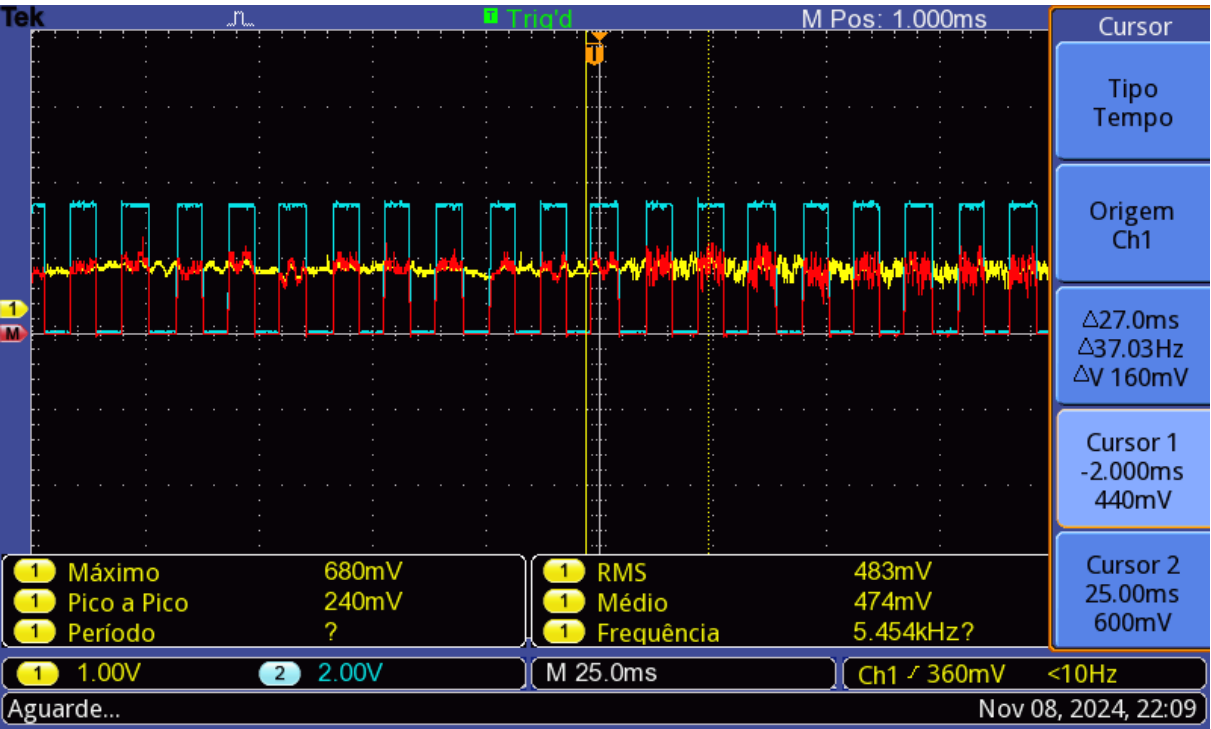
Nesta etapa será abordado os resultados obtidos diretamente pelo osciloscópio.

4.1.1.1 Análise no tempo

Para este primeiro ensaio, foram realizadas triplicatas para uma melhor validação dos dados obtidos, ou seja, este ensaio foi realizado três vezes. Em cada ensaio da triplicada foram obedecidos os mesmo parâmetros, como a tensão de alimentação do laser, o controle de vazão da bomba e o tempo de estabilização do sistema para medir as vazões, juntamente com a tensão fornecida pelo fotodiodo. O *setup* para a realização do primeiro ensaio está representada na Figura 43.

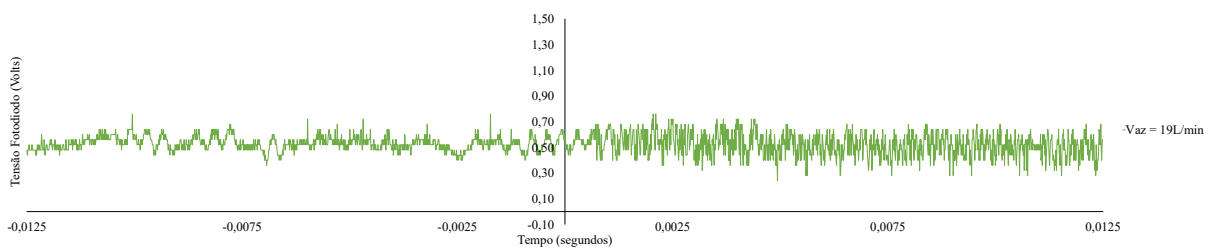
Com a coleta dos dados, foi obtido o gráfico referente ao sinal do fotodiodo, do sinal PWM do sensor FS300A e a soma desses dois sinais. Para todas as vazões, o valor PWM do sensor FS300A também irá sofrer uma alteração, pois quanto maior a vazão, maior a frequência dos pulsos, e quanto menor a vazão, menor será a frequência dos pulsos, sendo que isso pode ser observado pelo gráfico na curva de cor ciano que está presente nas imagens obtidas pelo osciloscópio. O gráfico para a vazão de 19L/min está representado nas Figuras 48 e 49, onde a Figura 49 refere-se ao gráfico isolado e para cada vazão ao longo desta seção será incluído o gráfico isolado afim de facilitar o entendimento e visualização do sinal fornecido pelo fotodiodo.

Figura 48 – laser 1550 nm vazão 1.1 - 19L/min



Fonte: Autor (2025)

Figura 49 – laser 1550 vazão 1.1 - 19L/min Isolado.



Fonte: Autor (2025)

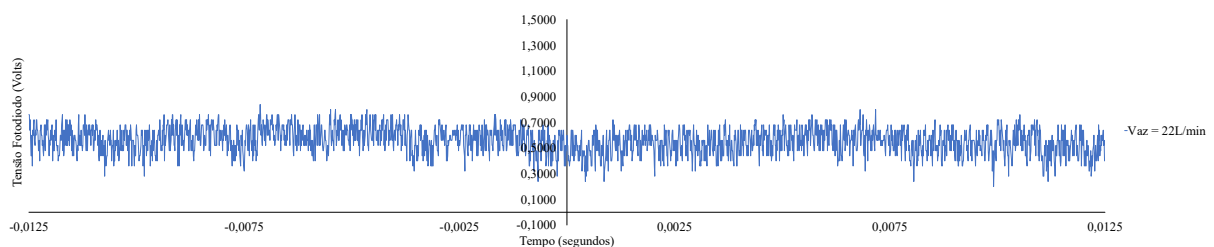
A Figura 48 foi coletada diretamente do osciloscópio e nela é possível observar três gráficos sobrepostos, além das indicações dos valores de pico a pico, valor máximo, valor RMS (*Root Mean Square*, que significa raiz média quadrática), valor médio, além de outros valores como a escala do valor da tensão do fotodiodo e a escala do do valor PWM do sensor de vazão FS300A. A curva amarela representa a variação do valor de tensão do fotodiodo ao longo do período de 25 ms(milissegundos). Durante o período de 25 ms é possível analisar a curva tendo uma oscilação e isso é resultado do contato direto do fluxo de água com a fibra multimodo que

está no interior da tubulação. Cada variação ao longo do período é um valor de tensão fornecido pelo fotodiodo.

A curva na cor ciano presente na Figura 48 é referente ao sinal do sensor de vazão FS300A que também é captado pelo circuito eletrônico. Dessa maneira, no mesmo instante em que o fotodiodo enviará o sinal de tensão, o sensor FS300A também envia um sinal PWM que será traduzido em um valor de vazão por meio de programação, ou seja, tanto o sinal da curva em vermelho quanto o sinal do gráfico em ciano representam a vazão de 19 L/min, considerando que o fotodiodo está com uma resolução de 1 Volt e o sensor FS300A está com 2 Volts.

Logo em seguida, foi realizado o ensaio com a vazão de 22 L/min alterando o sistema para o nível 2 do controle da bomba, alterando assim o comportamento da curva do comportamento da tensão do fotodiodo. O gráfico para a vazão de 22L/min está representado nas Figuras 50.

Figura 50 – laser 1550 Vazão 1.2 - 22L/min Isolado.

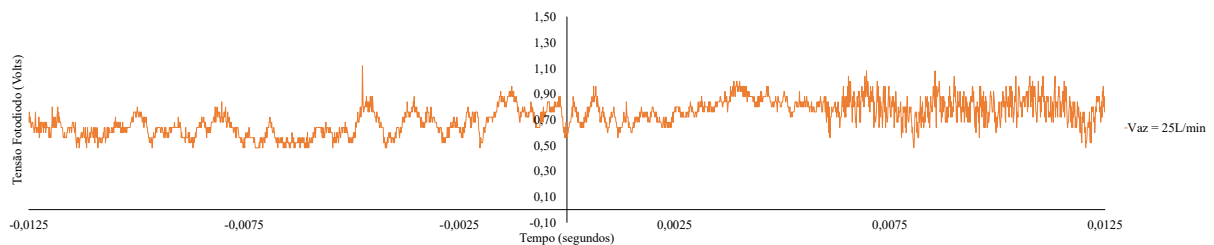


Fonte: Autor (2025)

Após a análise do gráfico fornecido pelo osciloscópio é possível observar uma pequena alteração na variância com que ocorre a variação de tensão da curva amarela, que é justamente a variação dos valores de tensão elétrica fornecida pelo fotodiodo, o que comprova a relação existente entre a variação da vazão com a variação dos valores de tensão.

Em seguida, a vazão do sistema foi alterada para 25 L/min, fazendo com que a tensão enviada pelo fotodiodo sofresse uma maior variância. Os gráficos para a vazão de 25 L/min estão representados na Figura 51.

Figura 51 – laser 1550 Vazão 1.3 - 25L/min Isolado.

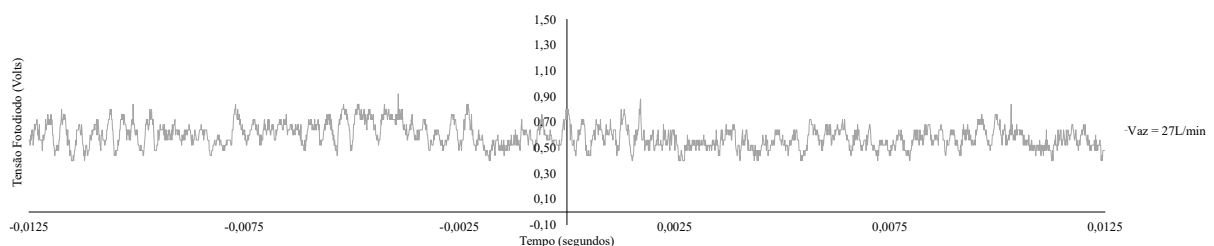


Fonte: Autor (2025)

Quando o sistema está em funcionamento, o limiar da tensão fornecida pelo fotodiodo, que é o valor central por onde a tensão da curva amarela fica em torno, sofre alterações de maneira aleatória, por esse motivo, tem momento onde o valor central do gráfico pode mudar. Em relação a Figura 51, é possível observar que os valores já apresentam uma maior variância em relação ao gráfico de 22 L/min, entretanto, é uma alteração sutil.

Aumentando o nível da bomba para 27 L/min, foi possível visualizar uma alteração no gráfico, ainda de maneira sutil, mas perceptível, tanto para a tensão do fotodiodo quanto para o sinal PWM do sensor FS300A. O gráfico para a vazão de 27 /min está representado nas Figura 52.

Figura 52 – laser 1550 Vazão 1.4 - 27L/min Isolado.

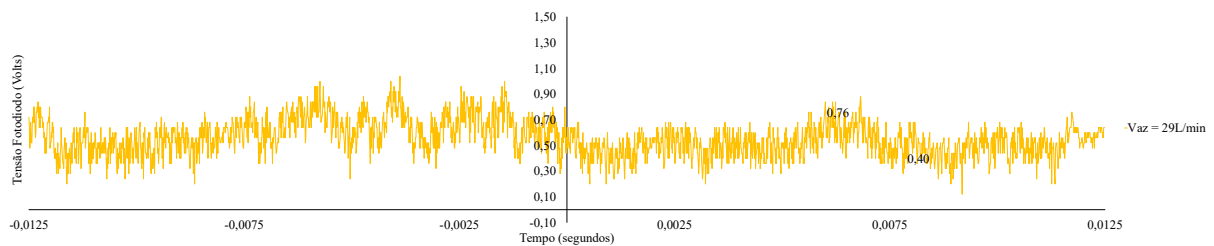


Fonte: Autor (2025)

Um dos valores que garantem a alteração da variância do sinal, é o valor de tensão pico a pico que pode ser observado na Figura 52. Esse valor foi alterado em relação ao gráfico da Figura 51 de 320 mV para 520 mV, garantindo assim uma maior amplitude de valores, validando assim a alteração da tensão em função da vazão da tubulação.

No último valor de vazão que é possível analisar o sistema para 29 L/min, onde é possível visualizar a maior turbulência da variância do sinal em razão do fluxo de água que atravessa a tubulação. O gráfico para a vazão de 29 /min está representado na Figura 53.

Figura 53 – laser 1550 Vazão 1.5 - 29L/min Isolado.

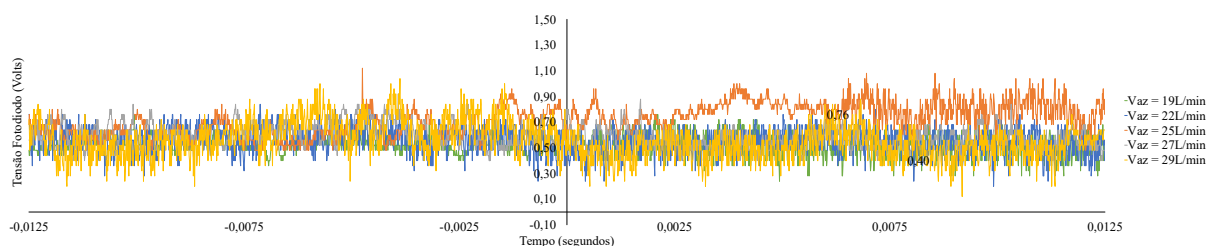


Fonte: Autor (2025)

Ao analisarmos a Figura 53 é possível observar que quando a vazão atinge o valor o de 29 L/min ocorre uma oscilação maior dos valores de tensão do fotodiodo em relação à Figura 52, tendo o valor de pico a pico mudando de 520 mV para 720 mV.

Após analisar cada gráfico isoladamente, também é possível analisar o comportamento dos sinais sobrepostos, como está ilustrado na Figura 54.

Figura 54 – laser 1550 Vazão 1.6 - 19 à 29L/min Isolado.



Fonte: Autor (2025)

Na Figura 54 é possível analisar o comportamento de cada sinal, onde pode-se concluir que o aumento da vazão influencia diretamente na intensidade do sinal.

Para analisar esses sinais foram utilizadas as ferramentas estatísticas apresentadas no Capítulo 2. O resumo dos resultados pode ser visualizado na Tabela 5.

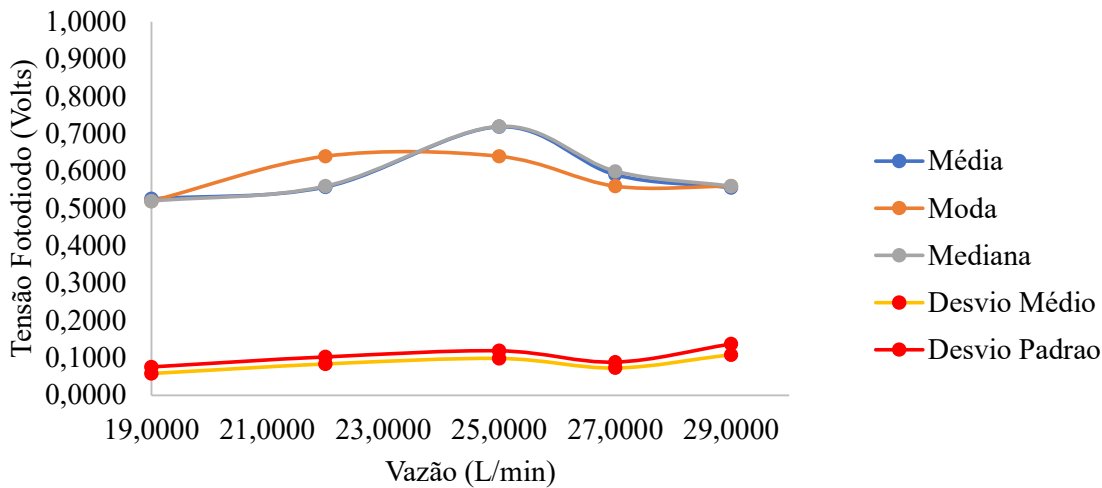
Tabela 5 – laser 1550: Analise Estatística dos Resultados - 1º Ensaio Vazão 19L/min até 29L/min.

Vazão L/min)	Média	Moda	Mediana	Desvio Médio	Desvio Padrão	Variância
19	0,5257	0,5200	0,5200	0,0582	0,0760	0,0058
22	0,5577	0,6400	0,5600	0,0838	0,1029	0,0106
25	0,7188	0,6400	0,7200	0,0986	0,1193	0,0142
27	0,5908	0,5600	0,6000	0,0732	0,0889	0,0079
29	0,5562	0,5600	0,5600	0,1087	0,1375	0,0189

Fonte: Autor (2025)

Com todos os valores disponíveis na Tabela 5, foi possível gerar todas as curvas referentes a média, à moda, à mediana, ao desvio médio, ao desvio padrão e à variância, e essas curvas podem ser visualizadas na Figura 55.

Figura 55 – laser 1550 Vazão 1.6 - 19 à 29L/min Métricas Estatísticas.



Fonte: Autor (2025)

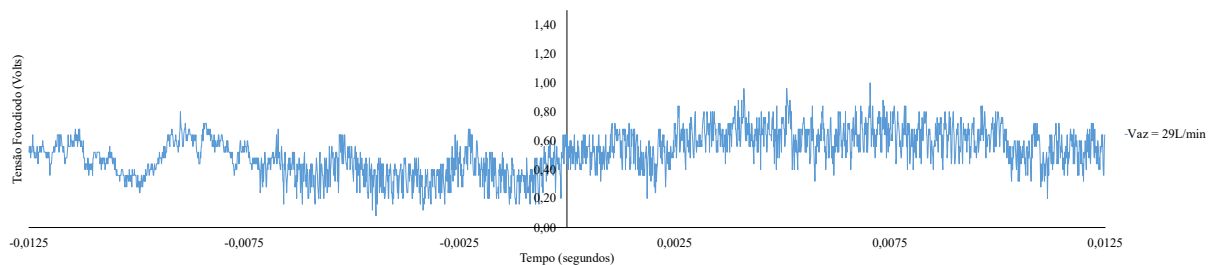
Analisando a Figura 55 é possível visualizar que o comportamento das curvas da média e da mediana tem semelhanças em sua tendência, tendo uma predisposição ascendente, e posteriormente decrescente. Já o comportamento da moda, possui uma tendência mais linear, com pouca variação, considerando a escala vertical do gráfico. Já o desvio médio e o desvio padrão possuem um comportamento semelhante.

4.1.2 2º Ensaio - Vazão de 29L/min até 19L/min

4.1.2.1 Análise no domínio do tempo

Ao realizar o ensaio com o aumento progressivo do fluxo de água na tubulação, resultados semelhantes foram obtidos com a diminuição progressiva do fluxo de água. Inicialmente foi possível observar que o sinal visualizado no osciloscópio está informando que o sinal recebido pelo fotodiodo tem uma variação bem mais elevada do que o do sinal com vazão menor. O sinal para o fluxo de água com a vazão de 29 L/min pode ser visualizado na Figura 56.

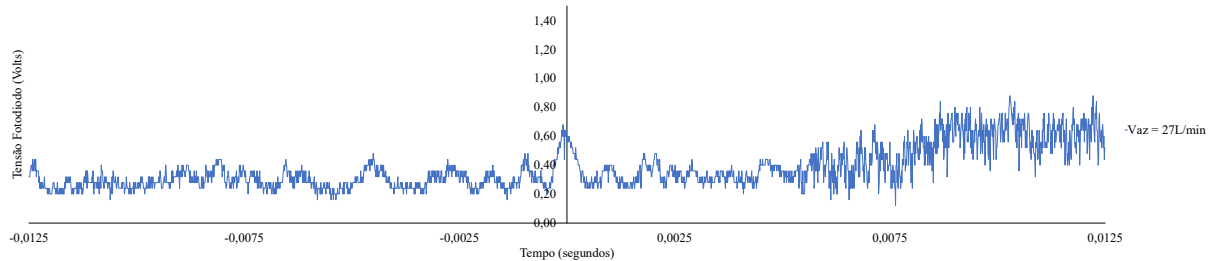
Figura 56 – laser 1550 nm Vazão decrescente 2.1 - 29L/min Isolado.



Fonte: Autor (2025)

Após aumentarmos o nível do fluxo da bomba, o fotodiodo enviou o sinal com uma variação menor, entretanto ainda um pouco turbulento e não tão simples de se observar por parâmetros convencionais, entretanto, ainda é possível visualizar a variação na turbulência do sinal, pois em relação à vazão de 29L/min, o fluxo de 27L/min já apresenta um valor reduzido nos parâmetros já mencionados. O Sinal para a vazão de 27L/min pode ser visualizado na Figura 57.

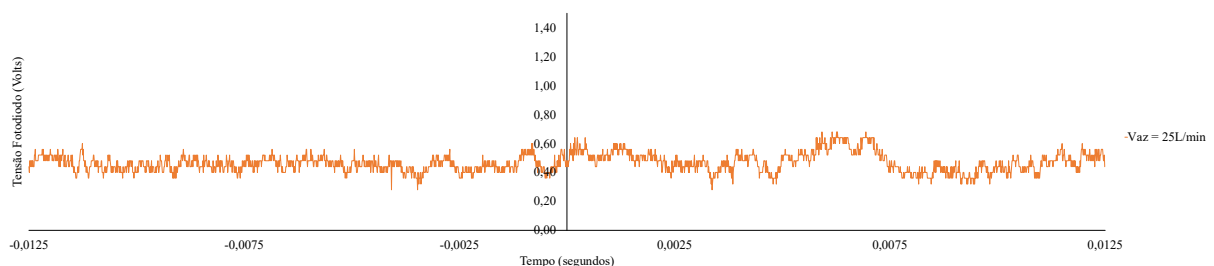
Figura 57 – laser 1550 nm Vazão Decrescente 2.2 - 27L/min Isolado.



Fonte: Autor (2025)

Aumentando o nível de vazão para 25L/min ainda é possível visualizar por meio do *display* do osciloscópio uma alteração no comportamento de todos os gráficos, mesmo que ainda seja algo sutil. Diminuindo o nível de vazão de 27 para 25L/min, é possível constatar que o valor médio do sinal sofreu uma diminuição do seu valor inicial, desde o início dos ensaios, sendo possível visualizar essa informação na Figura 58, pois a curva já esta bem mais suavizada em relação à curva da Figura 56.

Figura 58 – laser 1550 nm Vazão Decrescente 2.3 - 25L/min Isolado.



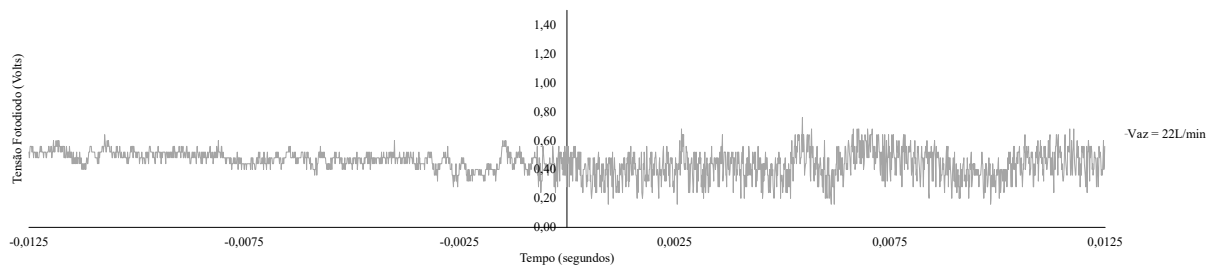
Fonte: Autor (2025)

Após diminuir o nível do fluxo de água para 22L/min, foi possível constatar que os valores RMS, médio e a frequência indicados pelo osciloscópio ainda diminuem. Devido à oscilação do sistema, esses valores tendem a variar para mais ou para menos, pois o osciloscópio registra valores do instante.

Entretanto, é possível constatar que a influência do fluxo de água está atuando no sinal do fotodiodo, apesar de que em alguns instantes os valores possam não corresponder exatamente

devido às oscilações. Os resultados obtidos para a vazão de 22/min podem ser visualizados na Figura 59.

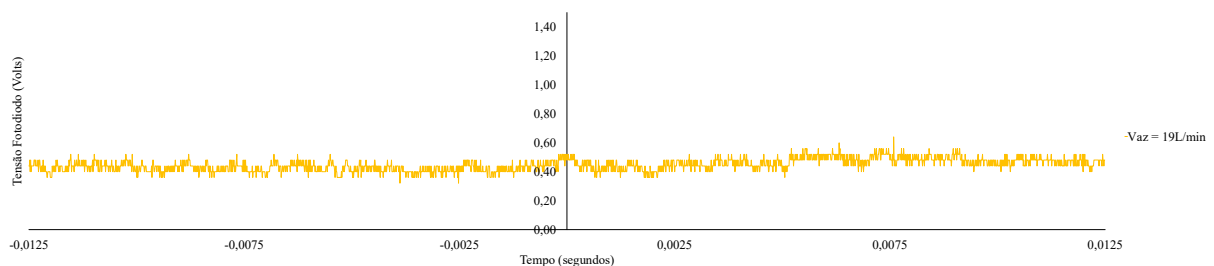
Figura 59 – laser 1550 nm Vazão decrescente 2.4 - 22L/min Isolado.



Fonte: Autor (2025)

Agora já no último de nível de vazão da bomba hidráulica, é possível visualizar a menor frequência registrada no osciloscópio e são valores maiores do que a vazão anterior, e com isso a frequência com que o sinal chega no fotodiodo é reduzido. Essas informações podem ser visualizadas na Figura 60.

Figura 60 – laser 1550 nm Vazão decrescente 2.5 - 19L/min Isolado.

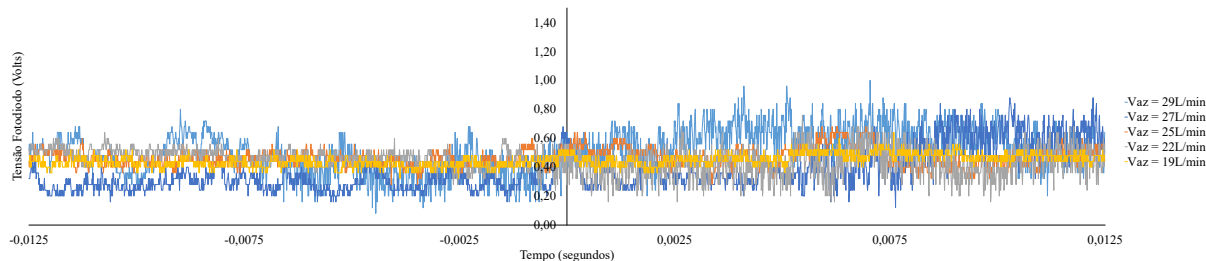


Fonte: Autor (2025)

Ainda em relação à Figura 60 é possível destacar que o sinal está bem menos turbulento do que o sinal inicial da Figura 56, onde o sinal está oscilando bastante. Por este ensaio foi possível constatar que ocorre uma variação decrescente do sinal de tensão enviado pelo fotodiodo em função do fluxo de água que passa no interior de uma tubulação.

Com todas as curvas do ensaio de vazão decrescente do laser de 1550 nm, foi possível reunir todos as curvas em uma única Figura 61, partindo de 19 L/min até 29 L/min.

Figura 61 – laser 1550 Vazão 2.6 - 29 à 19L/min Isolado.



Fonte: Autor (2025)

Com todas as curvas sobrepostas, de acordo com a Figura 61, é possível observar que ocorre uma grande turbulência entre as curvas, ficando difícil a sua devida análise, entretanto, é possível constatar que existe uma alteração significativa no comportamento em função da variação do fluxo na tubulação.

Após cada ensaio, os dados do osciloscópio foram armazenados em um pendrive, e em seguida cada dado foi organizado e resumido nos dados disponíveis na Tabela 6.

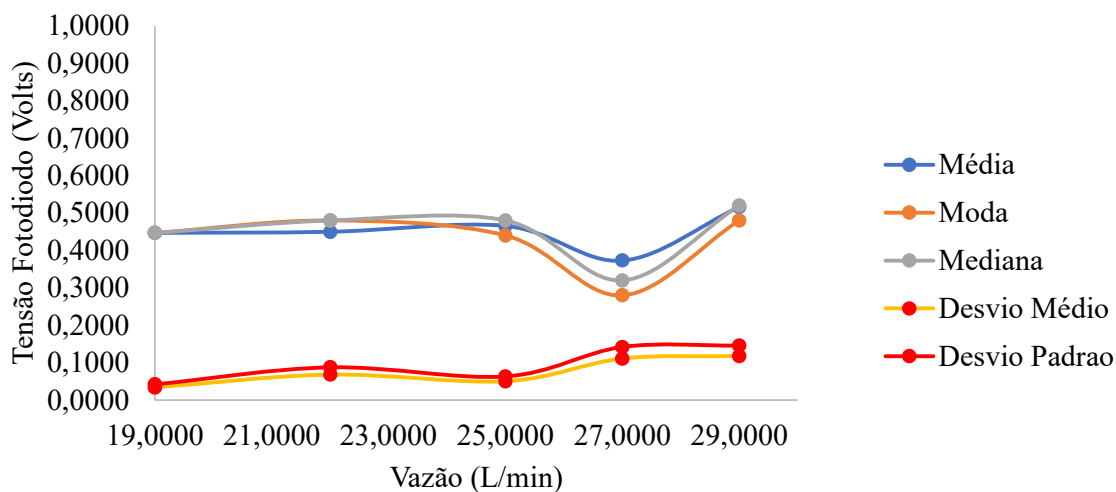
Tabela 6 – laser 1550: Análise estatística dos resultados - 2º ensaio vazão 29L/min até 19L/min.

Vazão L/min)	Média	Moda	Mediana	Desvio médio	Desvio padrao	Variância
29	0,5160	0,4800	0,5200	0,1176	0,1455	0,0212
27	0,3730	0,2800	0,3200	0,1109	0,1419	0,0201
25	0,4654	0,4400	0,4800	0,0505	0,0634	0,0040
22	0,4496	0,4800	0,4800	0,0682	0,0877	0,0077
19	0,4467	0,4467	0,4467	0,0339	0,0422	0,0018

Fonte: Autor (2025)

Ao analisar os dados devidamente organizados na Tabela 6 é possível observar que a média, a mediana e a moda, possuem um comportamento bem semelhante, tendo poucas alterações com a variação do fluxo de água. Já o desvio médio e o desvio padrão também possuem comportamentos semelhantes, e a variância tem uma tendencia descende, respeitando a lógica utilizada no ensaio. Com todos esses dados disponíveis, foram geradas as curvas que podem ser visualizadas na Figura 62.

Figura 62 – laser 1550 Vazão 2.6 - 29 à 19L/min Métricas estatísticas.



Fonte: Autor (2025)

4.2 laser diodo FPV785S de 785 nm

Neste etapa do trabalho iremos analisar os resultados obtidos com o laser diodo FPV785S de 785 nm utilizando o controlador ITC4020, que é o controlador do diodo laser e de temperatura para bancada, 20 Amperes e 225 Watts de potência elétrica. Como esse laser possui um controlador mais robusto para realizar o seu acionamento, os resultados obtidos foram mais satisfatórios em relação aos do laser 1550 nm.

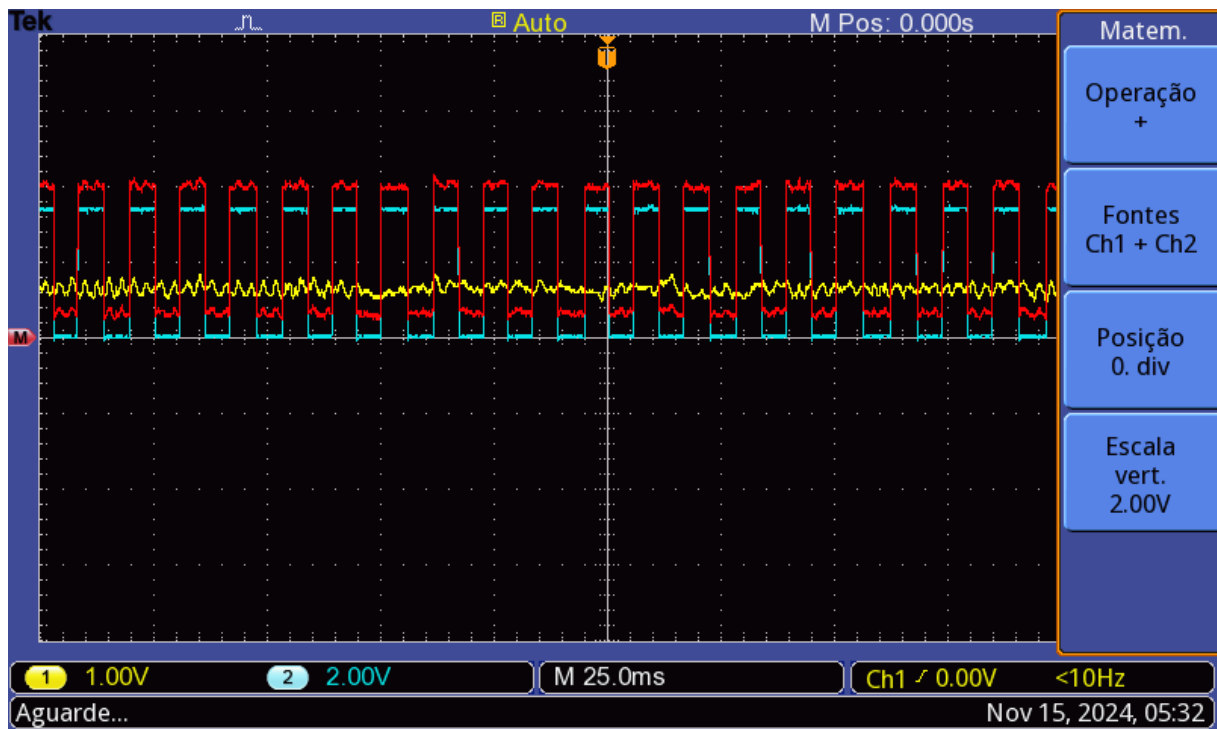
4.2.1 1º Ensaio - Vazão de 19L/min até 29L/min

Neste ensaio o fluxo de água foi aumentado gradativamente obedecendo os níveis de vazão da bomba foram variados de acordo com a Tabela 2.

4.2.1.1 Análise no tempo

A análise para os resultados obtidos no domínio do tempo, foi semelhante aos realizados nos ensaios anteriores. Coletando os dados no osciloscópio e realizando o devido tratamento em planilhas eletrônicas, foram obtidos os gráficos isolados de cada ensaio de vazão no sentido crescente de 19L/min até 29L/min. Nesses próximos resultados da tela do osciloscópio, não foi habilitado no *display* a visualização de alguns resultados como nos ensaio anteriores, mas foram plotados os gráficos individuais como será visto ao decorrer do trabalho. O resultado obtido para a vazão de 19L/min pode ser visualizado na Figura 63.

Figura 63 – laser 758 nm vazão 1.1 - 19L/min

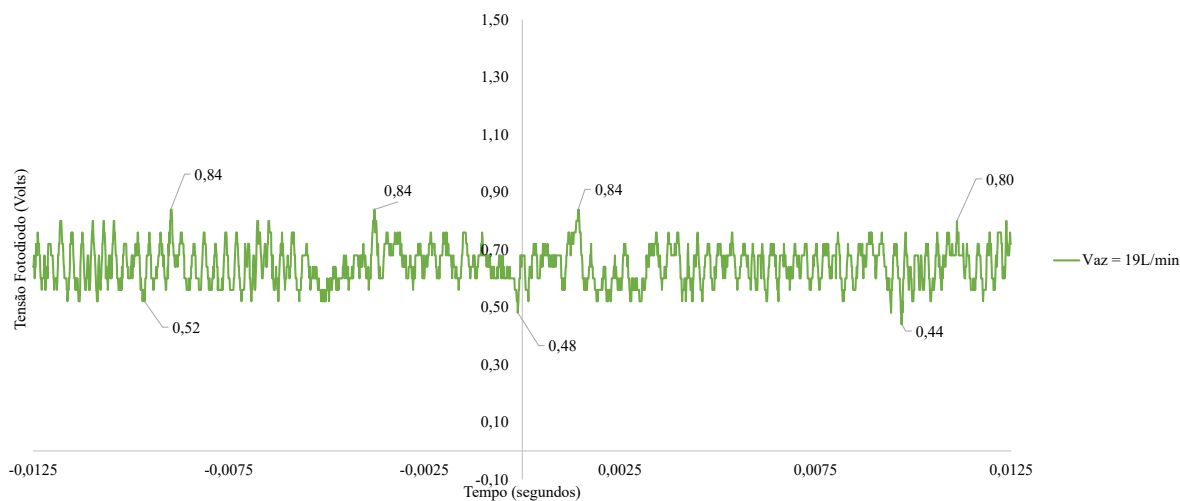


Fonte: Autor (2025)

Semelhante as análises anteriores o gráfico em amarelo presente na Figura 63 está representando a tensão do fotodiodo ao longo de um período de 25 ms(milissegundos). Como o nível de vazão é inicial, é possível observar que o gráfico em amarelo é bem menos conturbado em relação às vazões já analisadas.

Ao coletar os dados, foram obtidos 2500 pontos de tensão ao longo de 25 ms, e ao fazer o devido tratamento desses dados no software de planilha, foi possível plotar os gráficos individuais de cada vazão, e o gráfico isolado (é o mesmo gráfico em amarelo presente na Figura 63 para a vazão de 19L/min pode ser visualizado na Figura 64.

Figura 64 – laser 758 nm vazão 1.1 - 19L/min - Gráfico Isolado

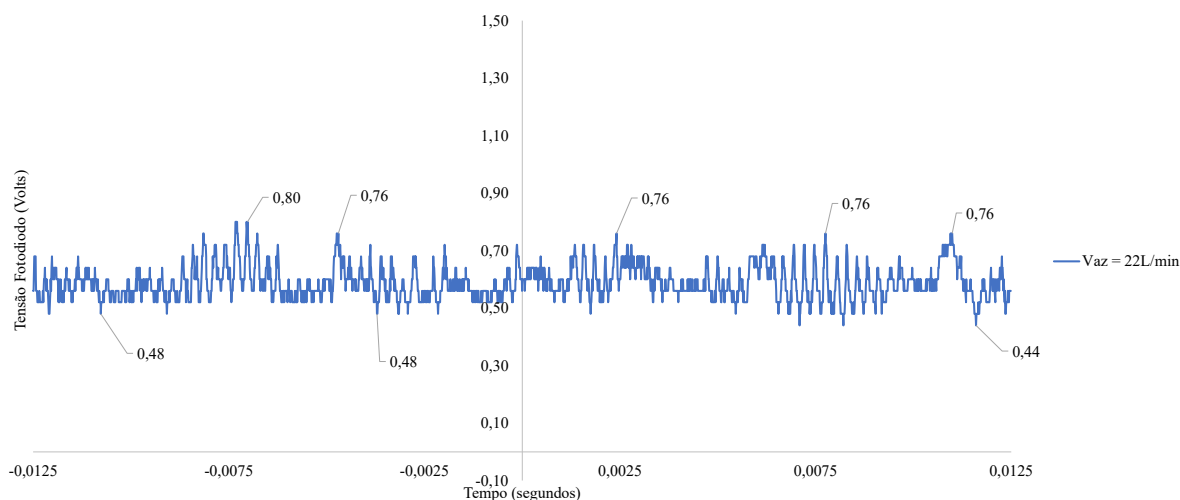


Fonte: Autor (2025)

Analisando a Figura 64 é possível visualizar que o valor central de tensão fornecido pela fotodiodo foi em torno de 0,70 V.

Ao aumentar o nível de vazão para 22L/min, a variação no comportamento da curva de tensão elétrica fornecida pelo fotodiodo ainda é bem sutil, como nas análises anteriores, por isso a necessidade de plotar cada curva de maneira individual e realizar a devida análise. Ao plotar a curva de maneira individual, é possível observar que ocorre uma perturbação mais sutil em relação a da Figura 64. O resultado da curva obtida para a vazão de 22L/min pode ser visualizado na Figura 65.

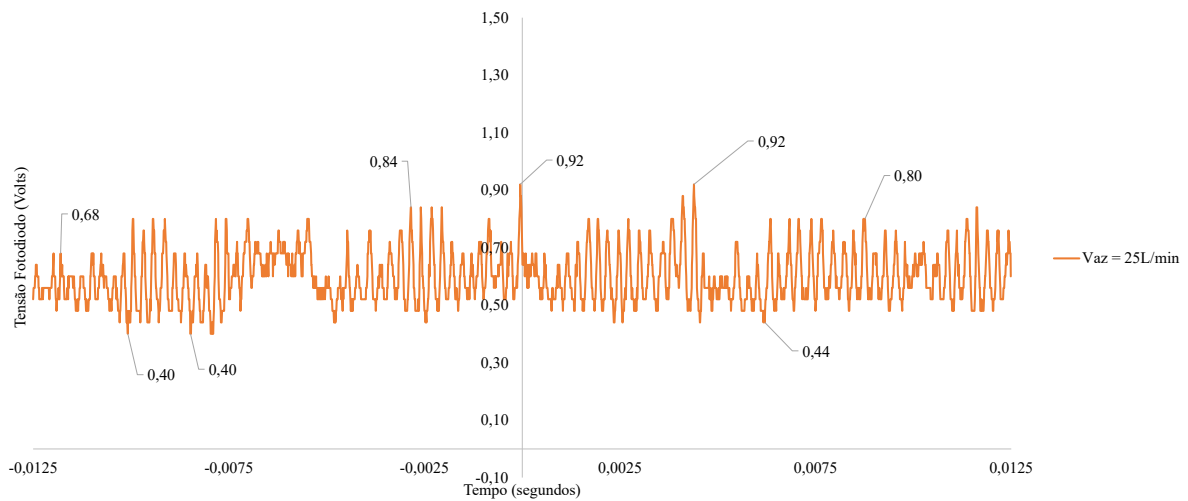
Figura 65 – laser 758 nm vazão 1.2 - 22L/min - Gráfico Isolado



Fonte: Autor (2025)

Aumentando o nível da vazão da tubulação para 25L/min já é possível visualizar uma perturbação mais notável no sistema por meio do aumento da amplitude do sinal, sendo possível visualizar na Figura 66.

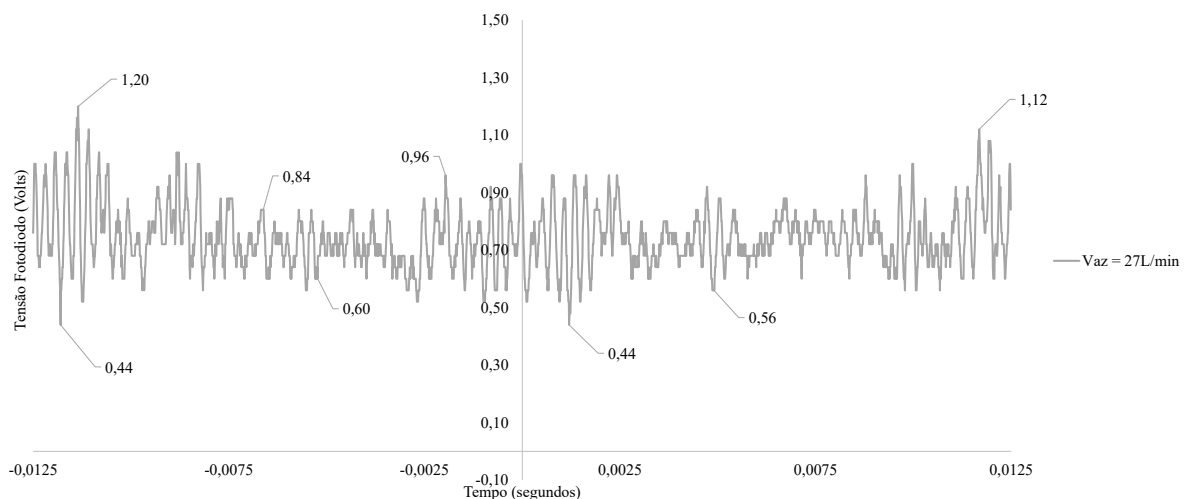
Figura 66 – laser 758 nm vazão 1.3 - 25L/min - Gráfico Isolado



Fonte: Autor (2025)

Aumentando o nível do fluxo de água para 27L/min já é possível notar uma mudança característica, pois o gráfico da tensão do fotodiodo já apresenta uma maior turbulência ao longo do período de 25 ms. Com esse comportamento é possível constatar que na vazão de 27L/min o comportamento do gráfico já é notável em amplitude valores de tensão. O resultado obtido para a vazão de 27L/min pode ser visualizado na Figura 67.

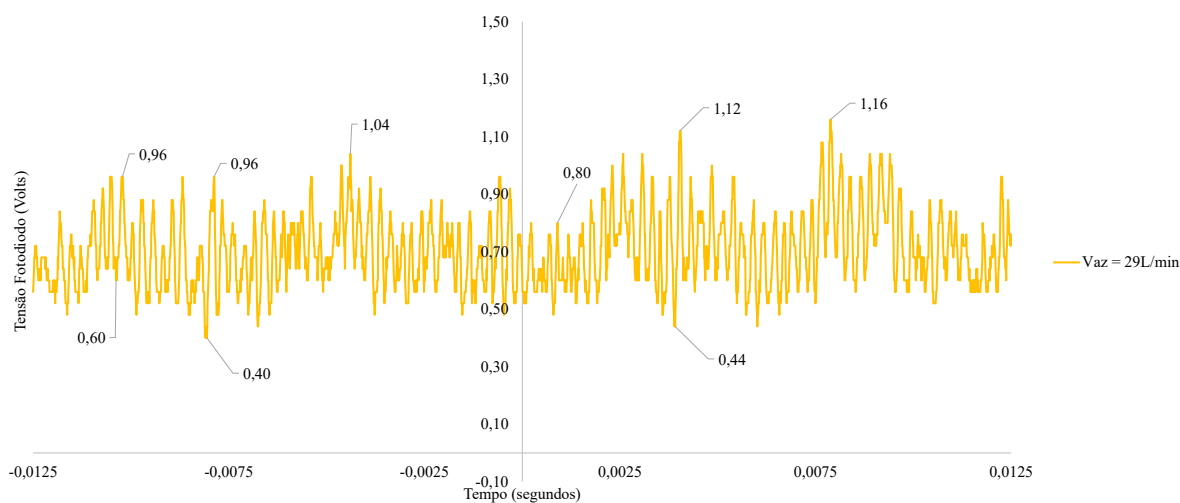
Figura 67 – laser 758 nm vazão 1.4 - 27L/min - Gráfico Isolado



Fonte: Autor (2025)

Configurando o controle de vazão da bomba para 29L/min é possível observar a alteração no comportamento do gráfico da tensão do fotodiodo. Comparando esse gráfico com os anteriores, é possível notar que a vazão influenciou diretamente no comportamento ao longo do aumento do fluxo de água. O resultado para a vazão de 29L/min pode ser visualizado na Figura 68.

Figura 68 – laser 758 nm vazão 1.5 - 29L/min - Gráfico Isolado

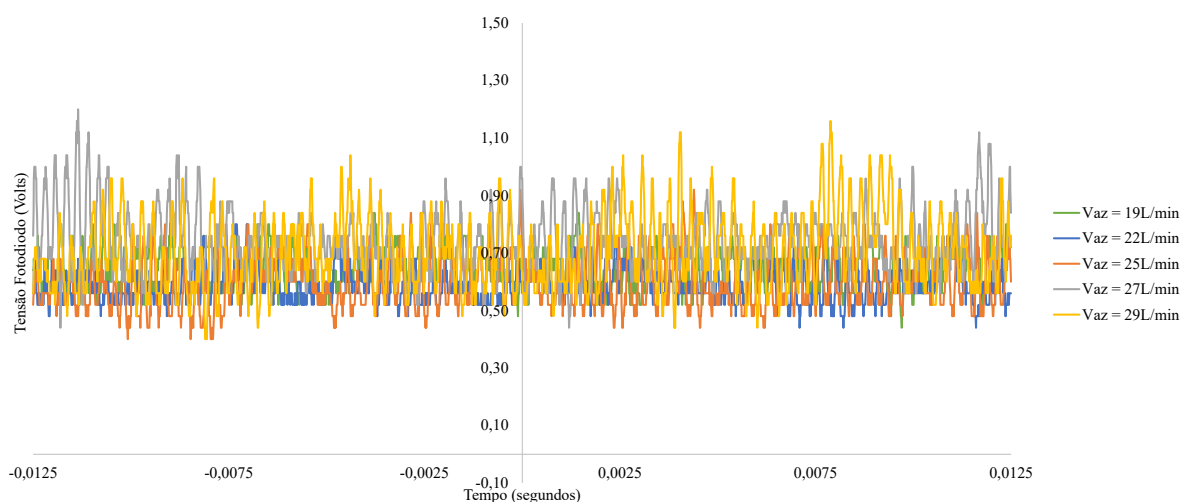


Fonte: Autor (2025)

Por meio da Figura 68 é possível observar que a tensão do limiar (tensão central no eixo Tensão Fotodiodo (Volts)) e a amplitude do gráfico para a vazão de 29L/min teve um aumento em relação as vazões anteriores, e esses valores estão apresentados na Tabela 7.

Com todas as curvas do ensaio de vazão crescente do laser de 785 nm, foi possível reunir todos as curvas na Figura 69, partindo de 19 L/min até 29 L/min.

Figura 69 – laser 785 vazão 1.6 - 19 à 29L/min Isolado.



Fonte: Autor (2025)

Com todas as curvas sobrepostas, de acordo com a Figura 69, é possível observar que ocorre uma grande turbulência entre as curvas, ficando difícil a sua devida análise, entretanto, é possível constatar que existe uma alteração significativa no comportamento em função da variação do fluxo na tubulação.

O osciloscópio nos forneceu dados com 2500 pontos referentes ao período de 25 ms, e com esses dados foi possível plotar os gráficos individuais de cada ensaio, bem como analisar estaticamente cada ensaio.

Na Tabela 7 é possível visualizar os dados compilados para o ensaio 1 sendo possível visualizar que a variância dos dados aumenta com a vazão.

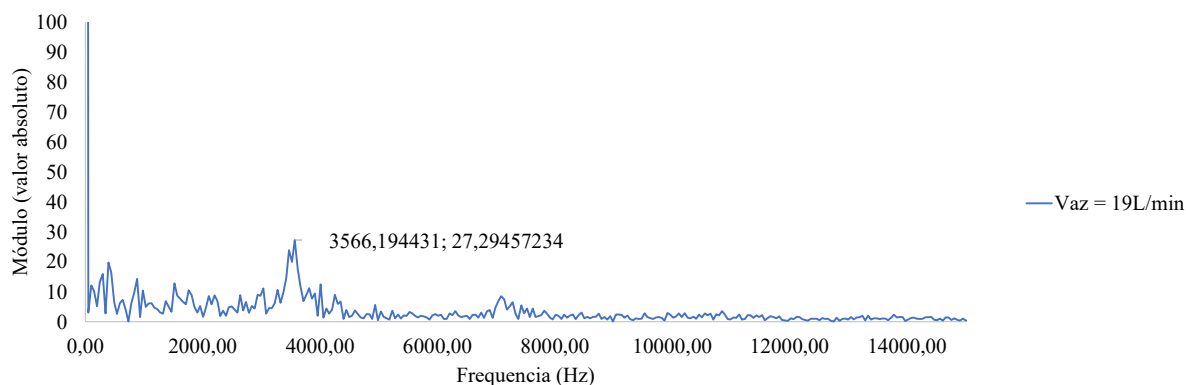
Tabela 7 – Análise estatística dos resultados - 1º Ensaio Vazão 19L/min até 29L/min.

Vazão L/min)	Média	Moda	Mediana	Desvio Médio	Desvio Padrão	Variância
19	0,6466	0,6800	0,6400	0,0550	0,0651	0,0042
22	0,5890	0,5600	0,5600	0,0466	0,0586	0,0034
25	0,5983	0,5200	0,6000	0,0725	0,0894	0,0080
27	0,7440	0,7200	0,7200	0,0819	0,1059	0,0112
29	0,7041	0,6000	0,6800	0,1047	0,1281	0,0164

4.2.1.2 Análise no domínio da frequência

Utilizando os dados obtidos nos ensaios, foi possível gerar a Transformada Rápida de Fourier para cada ensaio de vazão. Com o auxílio de uma função específica da planilha que é própria para gerar a transformada rápida de Fourier de um conjunto de dados, foi possível gerar as magnitudes, bem como as frequências para cada ensaio e o resultado obtido para a vazão de 19L/min pode ser visualizado na Figura 70.

Figura 70 – laser 758 nm Vazão 1.1 - 19L/min - Gráfico isolado na frequência

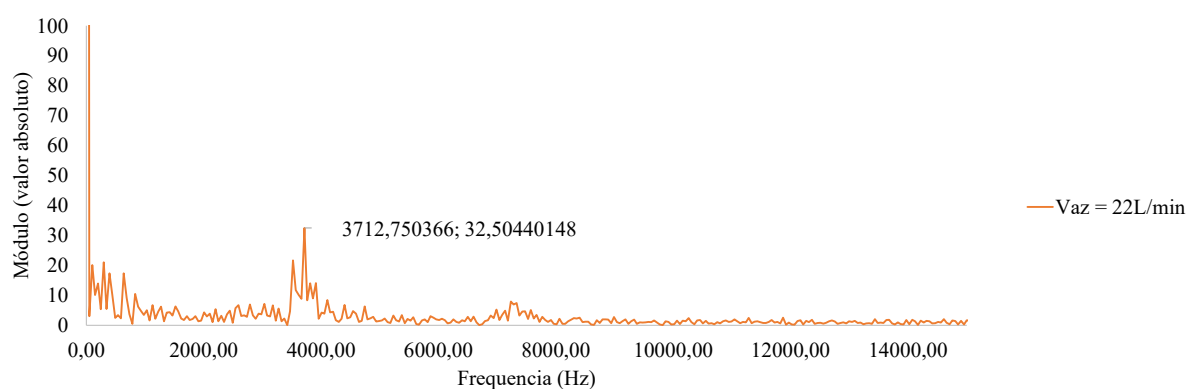


Fonte: Autor (2025)

Analisando a Figura 70, é possível constatar que a frequência dominante está próxima de 3KHz, para este caso. Seguindo o mesmo raciocínio, foram gerados os gráficos referentes às vazões de 22, 25, 27 e 29L/min.

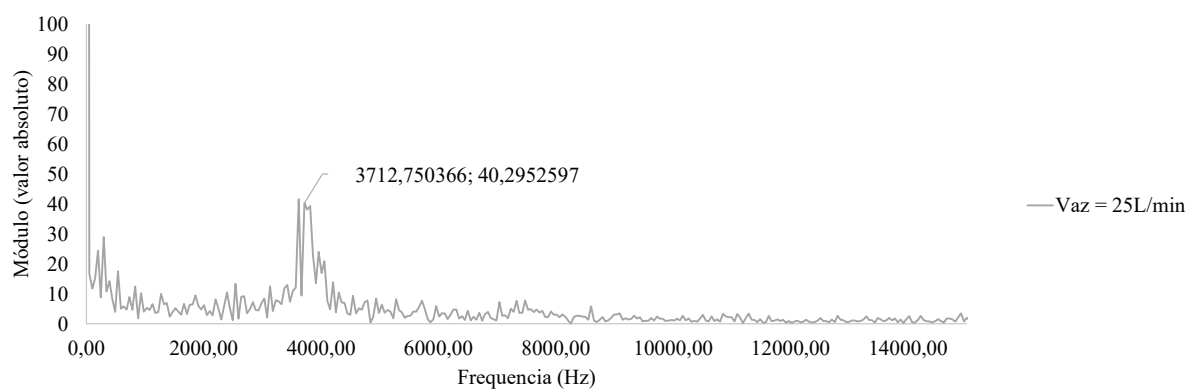
Aumentado o nível da bomba para 22L/min, é possível visualizar o deslocamento da frequência à esquerda, rumo à frequência de 4KHz. A alteração da frequência pode ser visualizada nas Figuras 71 e 72, que representam respectivamente as vazões de 22L/min e 25L/min.

Figura 71 – laser 758 nm Vazão 1.2 - 22L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

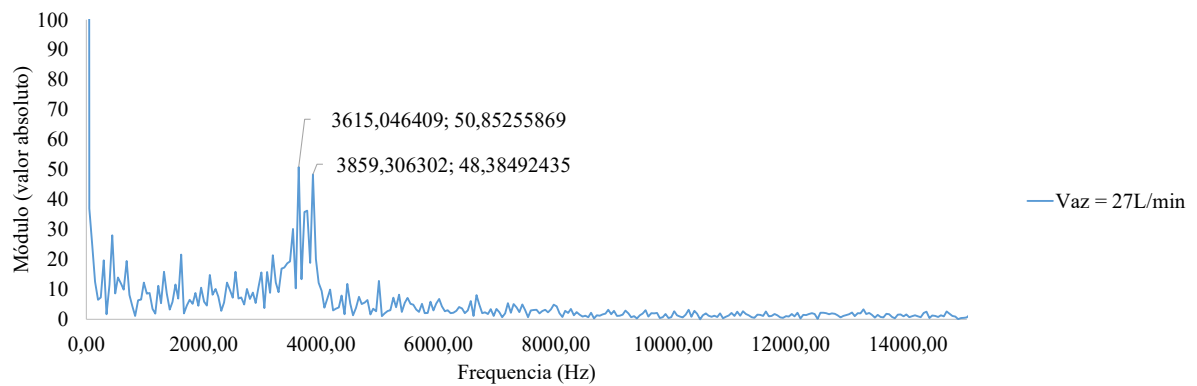
Figura 72 – laser 758 nm Vazão 1.3 - 25L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

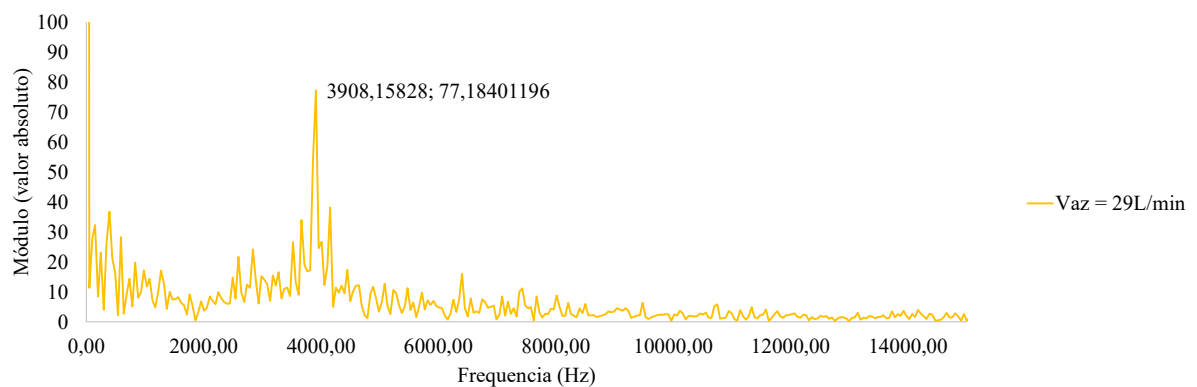
Aumentando o nível do fluxo da bomba para 27 e 29L/min, ainda é possível visualizar o deslocamento da frequência do sinal, como pode ser visualizado nas Figuras 73 e 74 respectivamente

Figura 73 – laser 758 nm Vazão 1.4 - 27L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

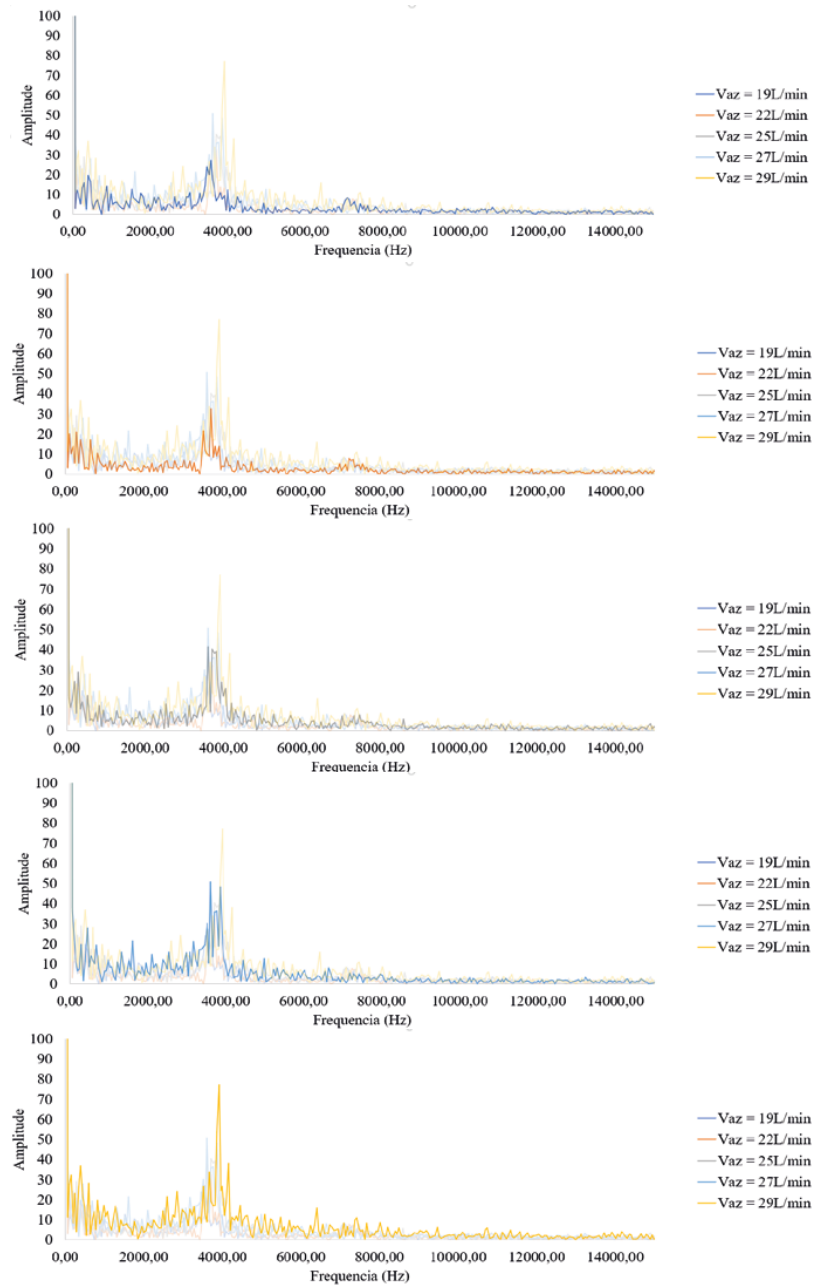
Figura 74 – laser 758 nm Vazão 1.5 - 29L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

Ao compilar todos os resultados obtidos no domínio da frequência, é possível ter uma melhor noção do deslocamento da frequência em função da variação do fluxo de água da tubulação. Os resultados compilados das transformadas rápida de Fourier compilados podem ser visualizados na Figuras 75.

Figura 75 – laser 785 nm Vazão 1.6 - 19-29L/min - Gráfico das Frequências



Fonte: Autor (2025)

Na Figura 75 é possível observar que na vazão inicial, a frequência do sinal está próxima de 3KHz, com uma amplitude de aproximadamente 30. Aumentando o nível do fluxo gradativamente até o nível de 29L/min, é possível notar um deslocamento na frequência, como o aumento gradativo da amplitude do sinal, ou seja, na vazão de 19L/min, a frequência do sinal estava em torno de 3KHz, com uma amplitude de aproximadamente 30. Já no fluxo de 29L/min, a frequência do sinal estava em torno de 4KHz, com uma amplitude de aproximadamente 80, comprovando assim a influência direta do fluxo de água com a frequência do sinal enviado pelo fotodiodo.

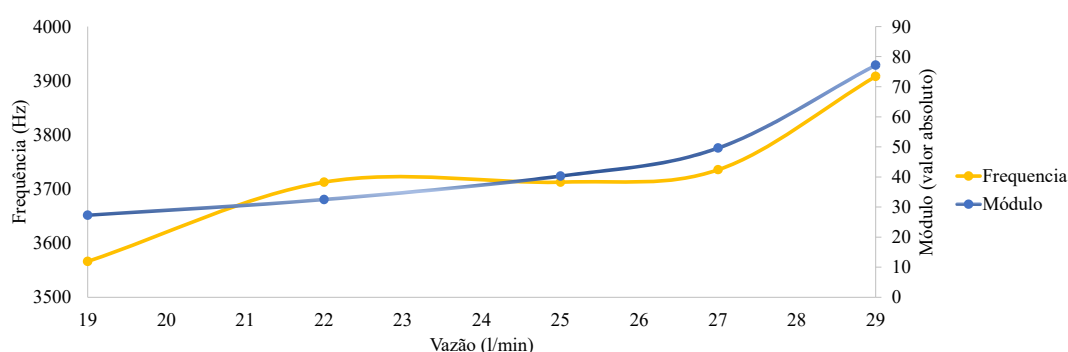
Ao analisar o deslocamento da frequência dominante para cada ensaio, juntamente com o módulo da amplitude do sinal, foi possível plotar as curvas referentes a frequência de cada vazão, juntamente com o módulo e cada uma e assim realizar uma análise mais detalhada do resultado. Os valores de cada frequência bem como o seu respectivo módulo foram organizados na Tabela 8.

Tabela 8 – Laser 785 nm: Relação Vazão x Frequência x Módulo do Sinal Vazão 19L/min até 29L/min.

Vazão L/min)	Frequência (Hz)	Módulo (valor absoluto)
19	3566,1944	27,2945
22	3712,7503	32,5044
25	3712,7503	40,2952
27	3735,6764	49,6187
29	3908,15828	77,184

Por meio da Tabela 8 é possível visualizar que tanto a frequência dominante, quanto o módulo de cada vazão possuem uma tendência crescente, respeitando o sentido do ensaio proposto neste seção. A curva com as frequência dominantes de cada ensaio, bem como o módulo de cada frequência pode ser visualizada na Figura 76

Figura 76 – Laser 785 nm Vazão 1.6 - 19-29L/min - Vazão, frequência e módulo do sinal.



Fonte: Autor (2025)

Na Figura 76 é possível visualizar duas curvas, sendo que cada uma possui o mesmo eixo horizontal, mas com eixos verticais diferentes. A curva em amarelo significa as frequências dominantes do sinal de vazão e nela é possível destacar que a tendência das frequências é crescente de acordo com o sentido do ensaio, ou seja, a curva está respeitando o aumento da vazão da tubulação, que essa curva em amarelo possui, pertence ao eixo vertical da esquerda. Já a curva de cor azul, representa o módulo (valor absoluto) do sinal de cada frequência. Pelos valores obtidos, os módulos também apresentam uma tendência linear crescente, convergindo com o sentido das frequências dominantes, sendo que essa curva em azul pertence ao eixo vertical da direita.

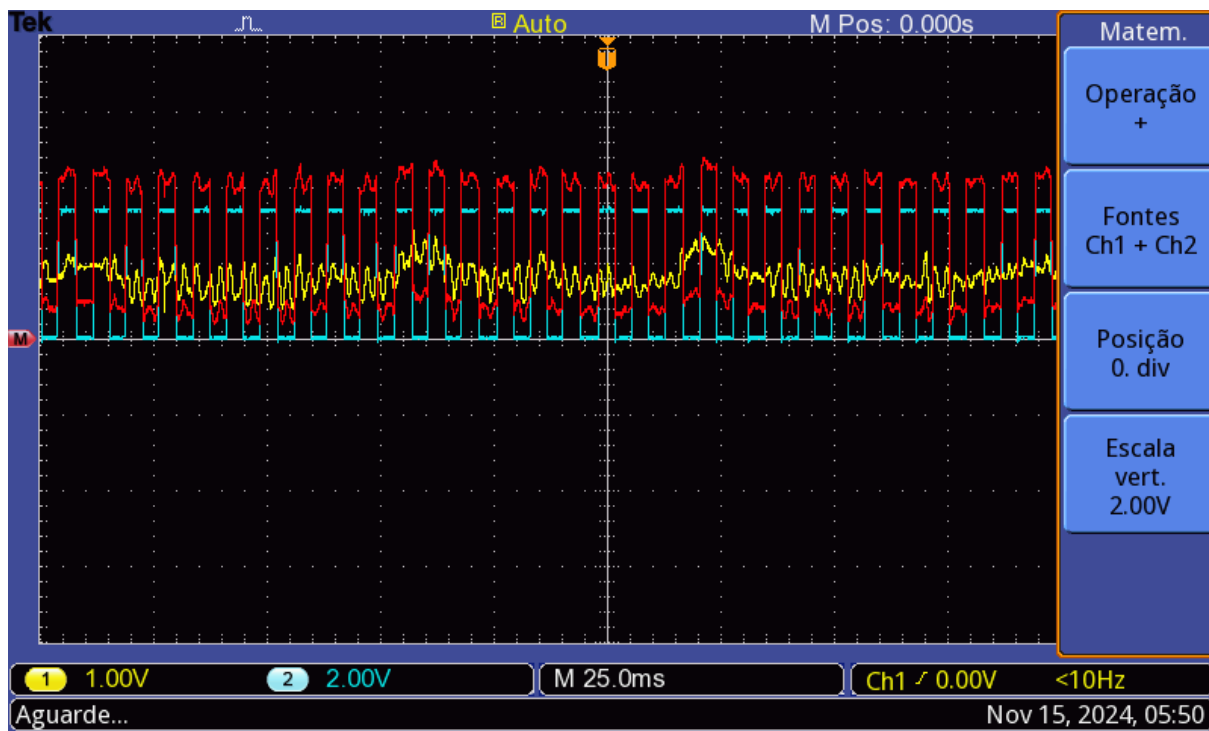
4.2.2 2º Ensaio - Vazão de 29L/min até 19L/min

Nesta etapa do trabalho iremos analisar os resultados obtidos para o ensaio onde o fluxo de água foi reduzindo de 29 até 19 L/min, ou seja, no sentido decrescente.

4.2.2.1 Análise no tempo

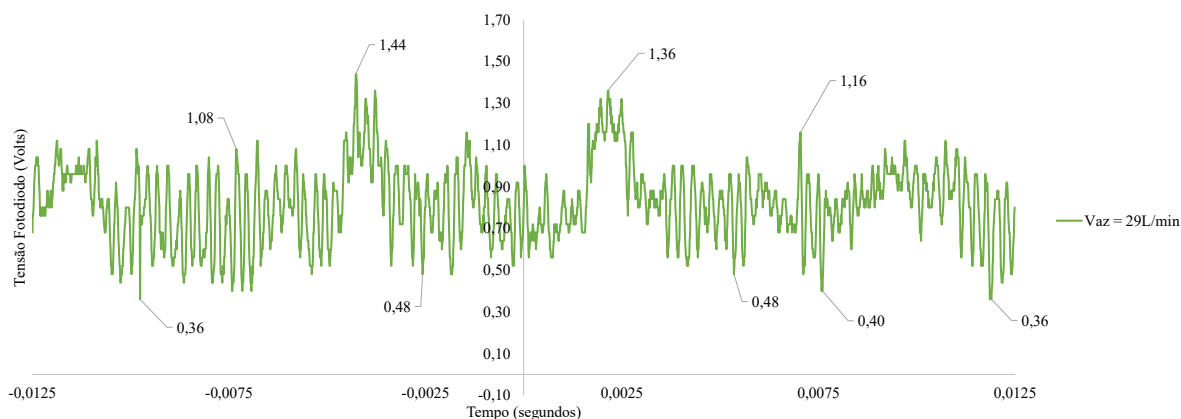
Para a análise no domínio do tempo, foi realizado o mesmo procedimento para os demais resultados, onde foram utilizados os 2500 pontos disponibilizados pelo osciloscópio, e assim foram gerados os gráficos isoladamente, e comparados com os fornecidos pelo osciloscópio por meio da imagem na tela. O comportamento do sinal para a vazão de 29L/min pode ser visualizado nas Figuras 77e 78.

Figura 77 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.1 - 29L/min



Fonte: Autor (2025)

Figura 78 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.1 - 29L/min - Gráfico isolado

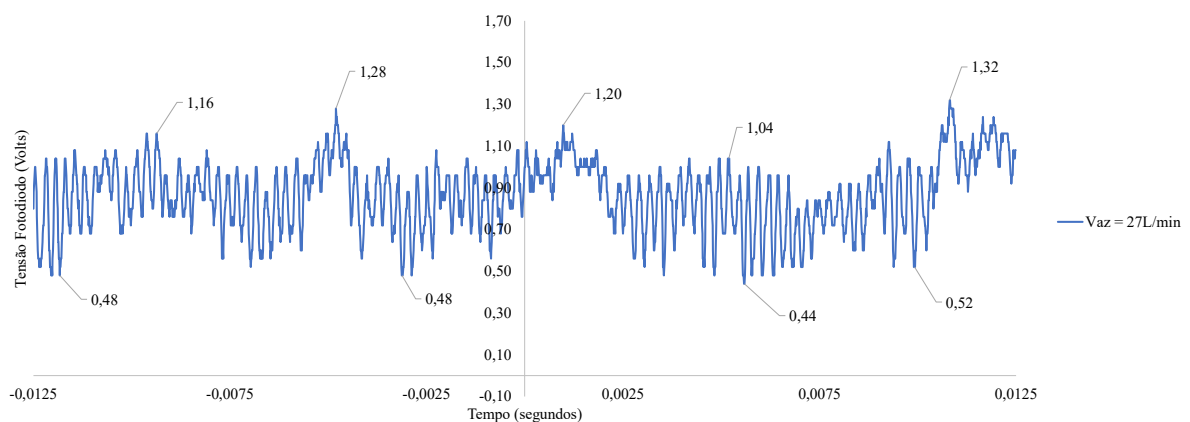


Fonte: Autor (2025)

A Figura 77 mostra o resultado da tela do osciloscópio no instante da medição, onde é possível visualizar a curva em amarelo tendo um comportamento bem oscilatório com várias amplitudes ao longo do tempo, como já era o esperado devido aos ensaios anteriores e também porque é a vazão mais elevada. Já na Figura 78 é possível visualizar o comportamento do sinal de forma mais "limpa", confirmando a grande perturbação causada pelo fluxo de água em contato com a fibra.

Diminuindo o nível da bomba para 27 L/min ainda é possível visualizar o comportamento característico de um fluxo elevado, pois a variação do sinal ainda continua ao longo do tempo, como pode ser visualizado na Figura 79.

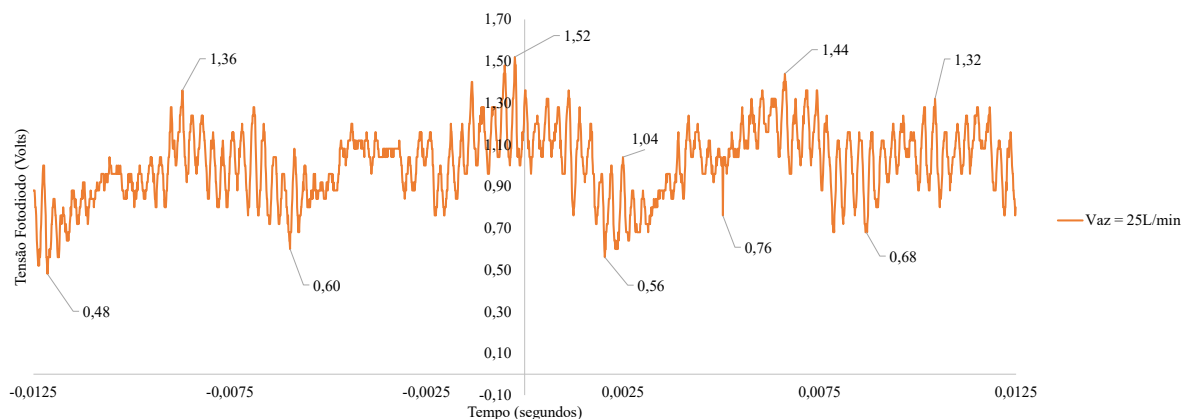
Figura 79 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.2 - 27L/min - Gráfico isolado



Fonte: Autor (2025)

Diminuindo os níveis para 25L/min e 22L/min é possível observar que a turbulência do sinal diminui, como pode ser observado na Figura 80.

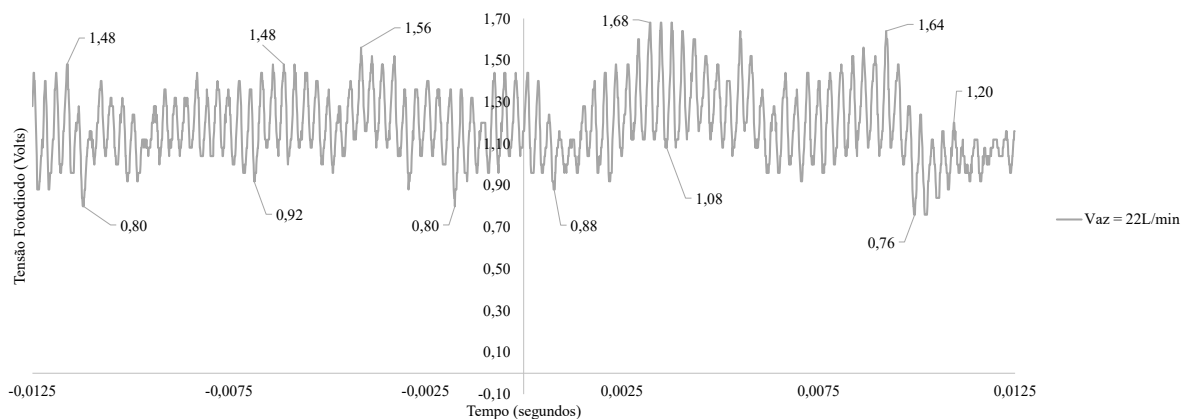
Figura 80 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.3 - 25L/min - Gráfico isolado



Fonte: Autor (2025)

Considerando o limiar do sinal como o valor central da curva, e assim, quando o nível do fluxo é reduzido, é possível observar que o limiar é deslocado um pouco para cima, alterando assim a turbulência do sinal. Essa modificação pode ser observada na Figura 81.

Figura 81 – laser 758 nm Vazão Decrescente 1.4 - 22L/min - Gráfico isolado

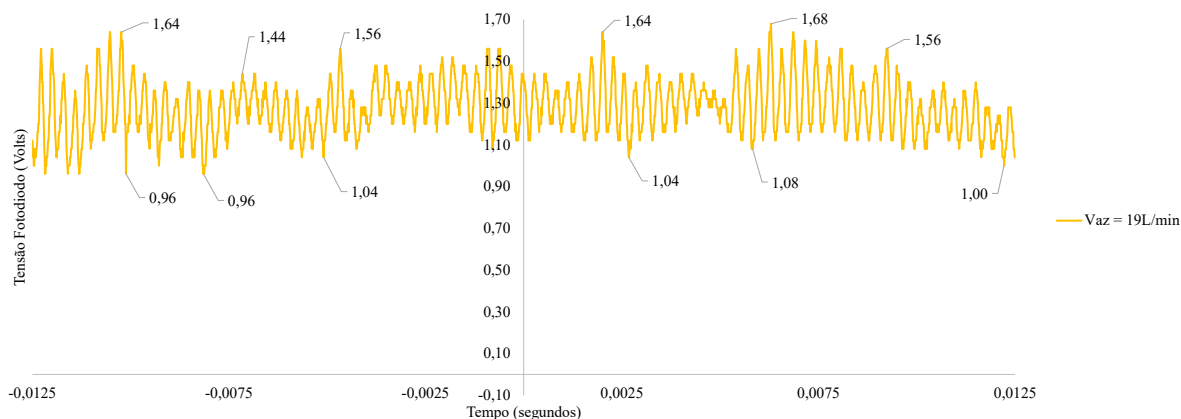


Fonte: Autor (2025)

O sinal da Figura 81 nos possibilita visualizar uma menor turbulência de valores, ou seja, uma menor variância do sinal em relação ao fluxo anterior, devido a sua menor turbulência.

Reduzindo ainda mais o fluxo de vazão, é alcançado o nível de 19L/min, onde devido a turbulência inferior em relação aos resultados já demonstrados, é possível constatar que ocorre uma influência do impacto do fluxo de água na fibra multimodo, onde ocorre o fenômeno da interferência multimodal, confirmando assim, a influência desse fenômeno na variação do fluxo de água na tubulação. A turbulência do final em relação ao fluxo de 19L/min pode ser visualizada na Figura 82.

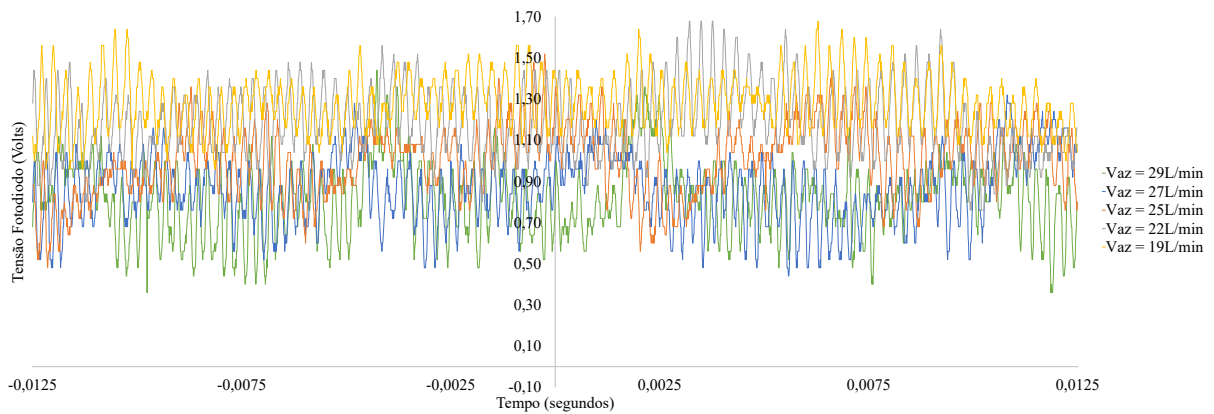
Figura 82 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.5 - 19L/min - Gráfico isolado



Fonte: Autor (2025)

Com todas as curvas do ensaio de vazão decrescente do laser de 785 nm, foi possível reunir todos as curvas na Figura 83, indo de 29 l/min até 19 l/min.

Figura 83 – laser 785 Vazão 1.6 - 29 à 19L/min Isolado.



Fonte: Autor (2025)

Com todas as curvas sobrepostas, de acordo com a Figura 69, é possível observar que ocorre uma grande turbulência entre as curvas, ficando difícil a sua devida análise, entretanto, é possível constatar que existe uma alteração significativa no comportamento em função da variação do fluxo na tubulação.

Todos os resultados no domínio do tempo foram compilados e preenchidos na Tabela 9, onde é possível visualizar algumas métricas estatísticas que foram utilizadas para ter como base na análise dos resultados obtidos.

Tabela 9 – Análise estatística dos resultados - 2º Ensaio vazão 29L/min até 19L/min.

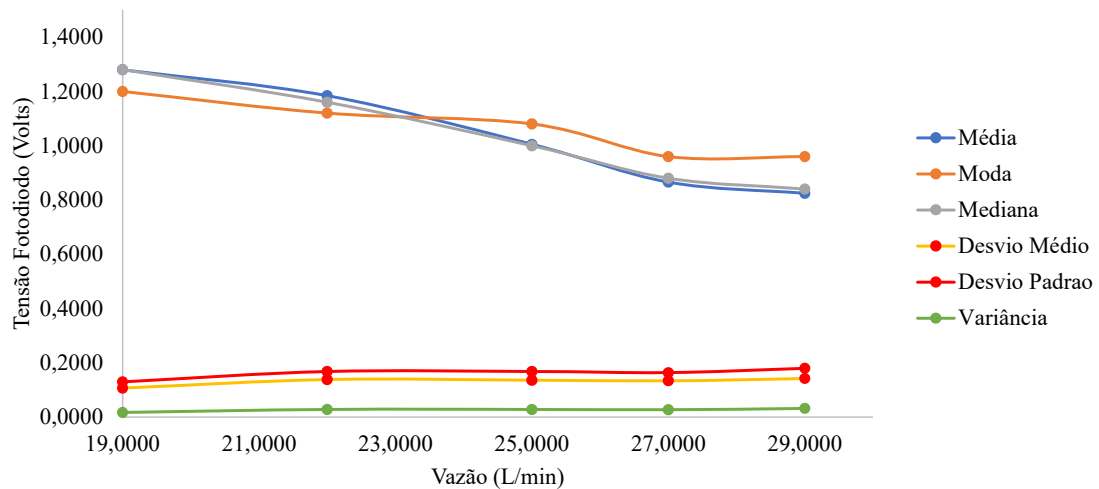
Vazão L/min)	Média	Moda	Mediana	Desvio médio	Desvio padrão	Variância
29	0,8244	0,9600	0,8400	0,1422	0,1793	0,0321
27	0,8658	0,9600	0,8800	0,1335	0,1638	0,0269
25	1,0050	1,0800	1,0000	0,1359	0,1682	0,0283
22	1,1841	1,1200	1,1600	0,1385	0,1680	0,0282
19	1,2799	1,2000	1,2800	0,1065	0,1299	0,0169

Fonte: Autor (2025).

Por meio da Tabela 9 é possível analisar os valores de média, moda, mediana, desvio médio, desvio padrão e variância. Dentre todas essas métricas, é possível observar que na coluna da variância, ocorre uma diminuição do valor à medida que a vazão diminui, constatando assim a influência da turbulência em relação ao fluxo de água, ou seja, quanto maior o fluxo, o sinal varia com mais intensidade.

Por meio da Tabela 9, foi possível plotar os gráficos da média, moda, mediana, desvio padrão e desvio médio do sinal. Os gráficos para essas métricas citadas da Tabela 9 podem ser visualizadas na Figura 84

Figura 84 – laser 785 nm Vazão Decrescente 1.6 - 29 à 19L/min Métricas Estatísticas.



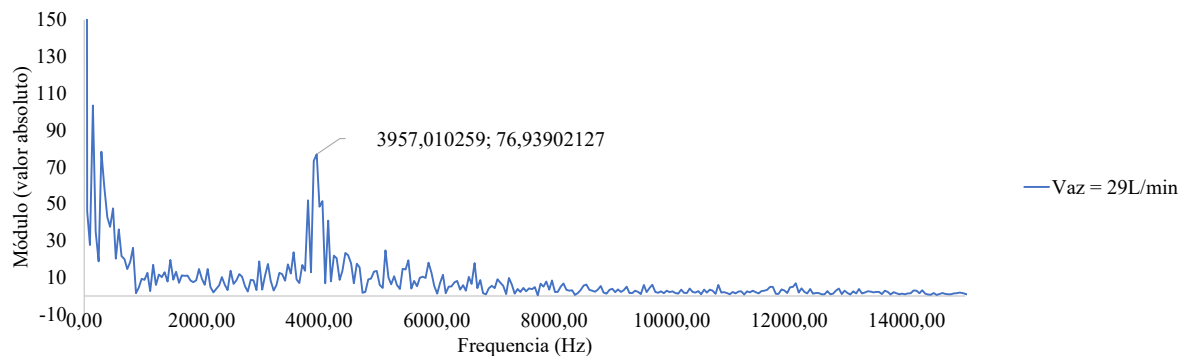
Fonte: Autor (2025)

4.2.2.2 Análise no domínio da frequência

Nesta subseção iremos analisar os resultados obtidos da transformada de Fourier para os cinco níveis de vazão decrescente analisados anteriormente no domínio do tempo.

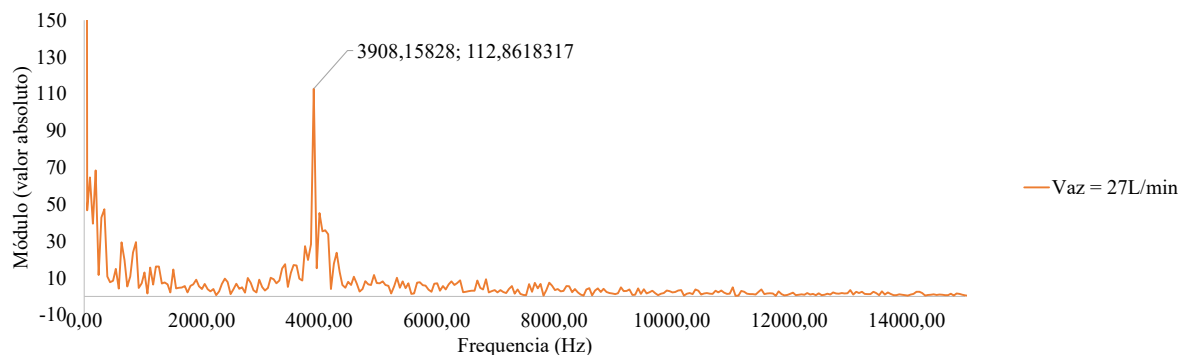
Analisando os dados obtidos na vazão de 29L/min, e logo em seguida efetuar o seu devido tratamento em uma planilha, foi possível realizar a transformada de Fourier do sinal por meio de uma função específica para a Transformada Rápida de Fourier na própria planilha. Com os dados gerados foi possível gerar um gráfico onde podemos visualizar a frequência dominante para o fluxo de 29L/min. Como a transformada de Fourier solicita uma quantidade de pontos que seja igual a uma potência com base dois (por exemplo, para a transformada utilizando a função da planilha, são necessários 2, 4, 8, 16, 32 etc), ou seja, utilizou-se uma janela de 2048 pontos para a transformada, correspondendo a 2^{11} (dois elevado à décima primeira potência). Os resultados obtidos para as vazões de 29L/min e 27L/min, podem ser visualizados nas Figuras 85 e 86, respectivamente.

Figura 85 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.1 - 29L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

Figura 86 – laser 758 nm Vazão decrescente 1.2 - 27L/min - Gráfico isolado na frequência

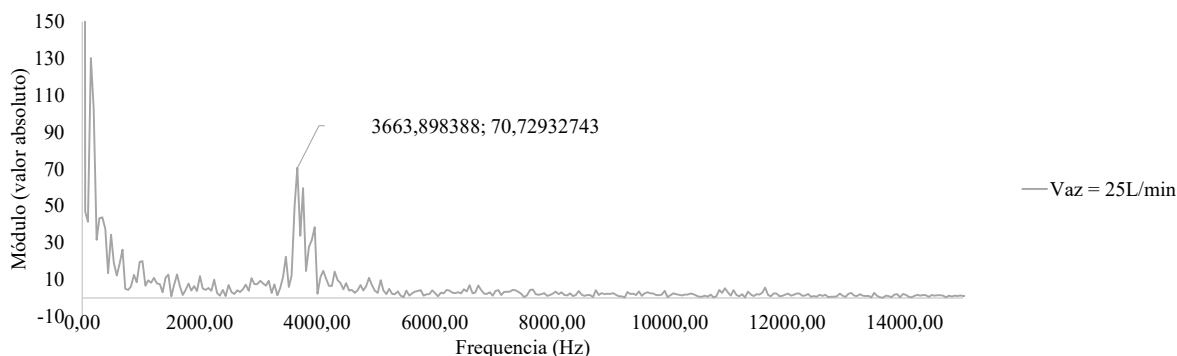


Fonte: Autor (2025)

Nas Figuras 85 e 86 é possível observar que ocorre um deslocamento sutil para a esquerda à medida que a vazão diminui, mas essa característica será analisada mais adiante, com os resultados seguintes.

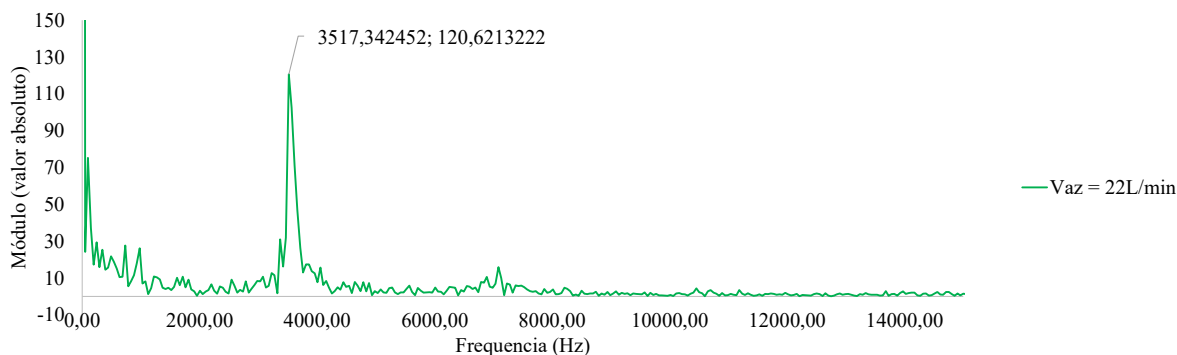
Diminuindo o fluxo de água, e ainda gerando as transformadas de Fourier para as vazões de 25L/min e 22L/min, ainda é possível notar um sutil deslocamento para a esquerda, como pode ser visualizado nas Figuras 87 e 88 respectivamente.

Figura 87 – laser 758 nm vazão decrescente 1.3 - 25L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

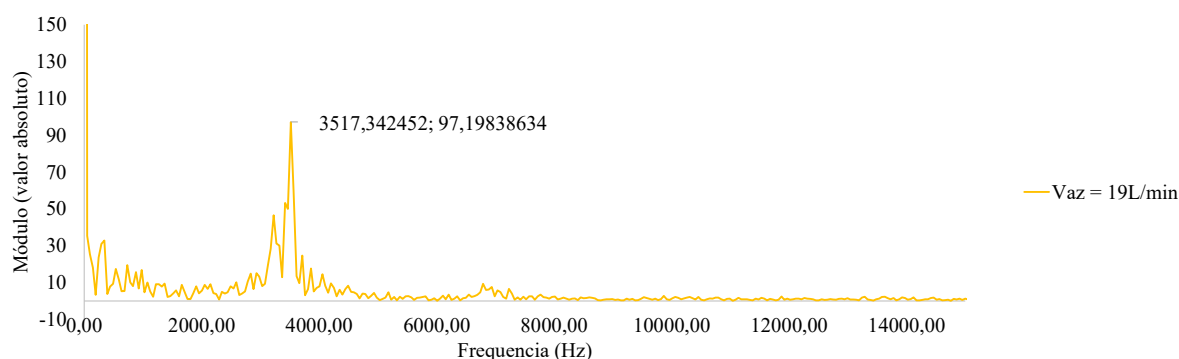
Figura 88 – laser 758 nm vazão decrescente 1.4 - 22L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

Diminuindo o fluxo para o menor nível que é 19L/min, ainda é possível observar um deslocamento sutil para a esquerda, entretanto o pico do sinal varia de uma maneira que não é possível correlacionar de maneira linear. O sinal da frequência para a vazão de 19L/min pode ser visualizado na Figura 89.

Figura 89 – laser 758 nm vazão decrescente 1.5 - 19L/min - Gráfico isolado na frequência.



Fonte: Autor (2025)

Apesar dos picos do sinais também variarem, a característica predominante é o deslocamento da frequência. Variando o fluxo do nível de 29L/min até 19L/min é possível visualizar a variação da frequência dominante entre aproximadamente 3,5kHz à 4kHz, sendo isso devido a variação do sinal de tensão enviado pelo fotodiodo no intervalo de 25 ms, ou seja, quando maior a intensidade com que o sinal varia, maior será a frequência dominante.

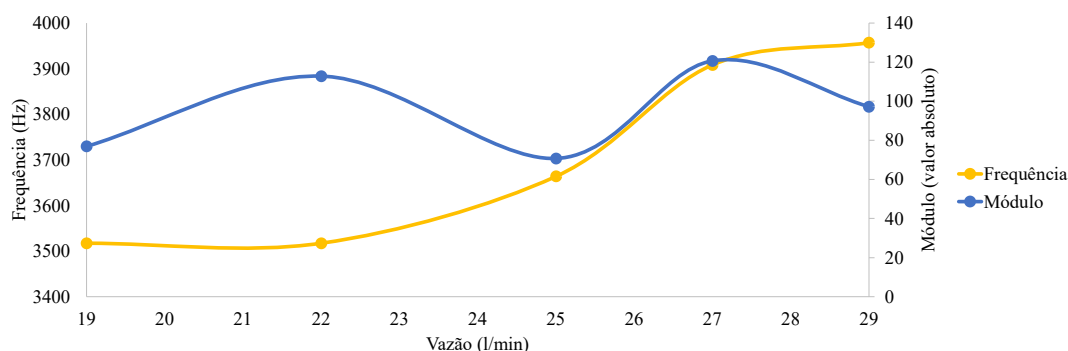
Após coletar os valores da frequência de cada vazão, foram plotadas as curvas referentes às frequências dominantes e aos seus respectivos módulos. Os valores de cada frequência bem como o seu respectivo módulo foram organizados na Tabela 10.

Tabela 10 – Laser 785 nm: Relação Vazão x Frequência x Módulo do Sinal Vazão 29L/min até 19L/min.

Vazão L/min)	Frequência (Hz)	Módulo (valor absoluto)
29	3957,0103	76,9390
27	3908,1583	112,8620
25	3663,8984	70,7293
22	3517,3424	120,6210
19	3517,3424	97,1983

Por meio da Tabela 10 é possível visualizar que a frequência dominante, possui uma tendência linear em relação ao decréscimo de vazão, respeitando o sentido do ensaio proposto neste seção, já os valores dos módulos, tiveram uma tendência mais inclinada em relação aos ensaios anteriores. As curvas com as frequências dominantes de cada ensaio, bem como o módulo de cada frequência podem ser visualizadas na Figura 90

Figura 90 – Laser 785 nm Vazão 1.6 - 29-19L/min - Vazão, frequência e módulo do sinal.



Fonte: Autor (2025)

Por meio da Figura 90 é possível destacar que os módulos do sinal não possuem uma relação diretamente linear com a frequência das vazões. O módulo apresenta valores que oscilam entre 80 e 120, sendo mais complexo de assimilar uma relação linear. Já os valores de frequência de cada vazão apresentam uma relação semelhante ao ensaio crescente das vazões, respeitando o sentido do ensaio decrescente.

4.2.3 3º Ensaio - Vazão de 19L/min até 29L/min e de 29L/min até 19L/min

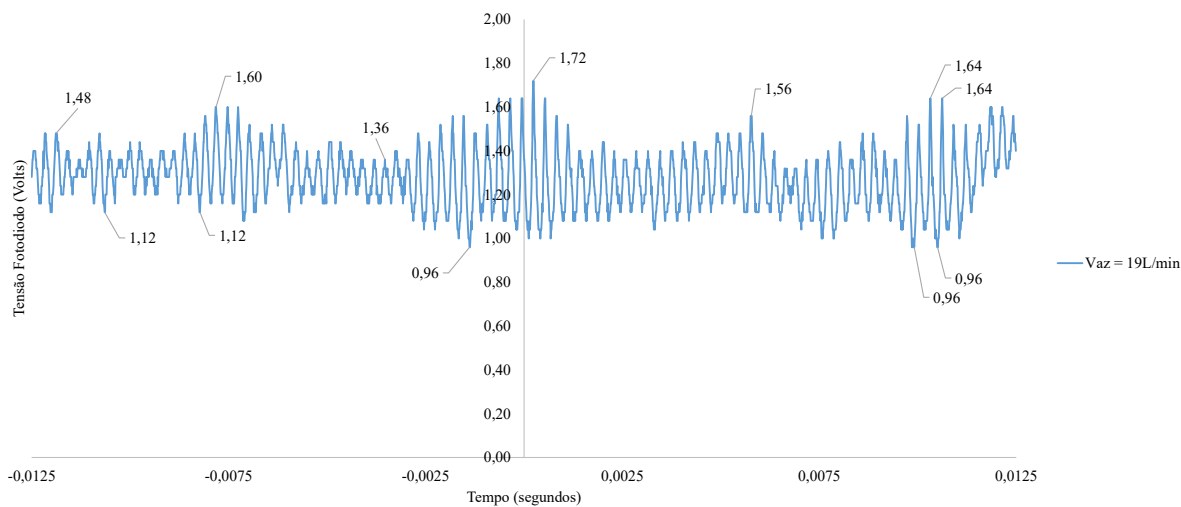
Nesta etapa iremos analisar os resultados obtidos no terceiro ensaio do sensor de vazão óptico. No terceiro ensaio foi realizado o aumento progressivo de vazão até o nível de 29L/min, e em seguida, foi realizado o decréscimo da vazão até o nível de 19 L/min.

4.2.3.1 Análise no Domínio do Tempo

A análise no domínio do tempo para este ensaio foi semelhante à que foi abordada nos ensaios anteriores. Foi observado que ao aumentar o nível de vazão, observou-se uma maior perturbação no sinal de tensão do fotodiodo. Dessa maneira, aumentando e diminuindo o nível do fluxo de água é constatado a sensibilidade do sensor.

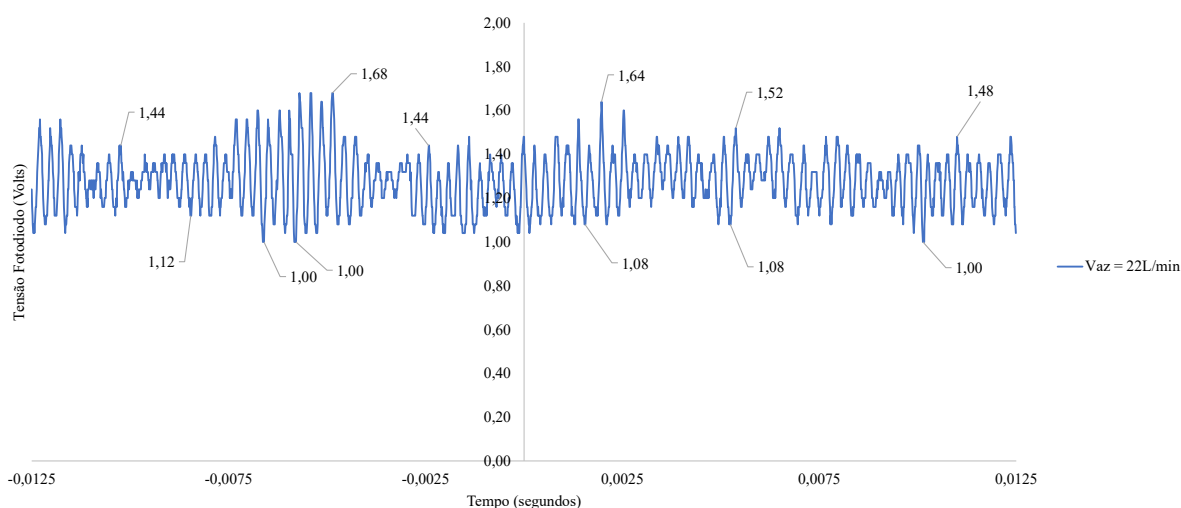
Nesta etapa do ensaio, o nível do fluxo hídrico foi iniciado com 19L/min e aumentado até 29L/min, em seguida, o nível foi diminuído até 19L/min, que é o nível inicial de testes. Os resultados para a variação do nível 1 ao nível 2 estão ilustrados nas Figuras 91 e 92, respectivamente.

Figura 91 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.1 - 19L/min - Gráfico isolado



Fonte: Autor (2025)

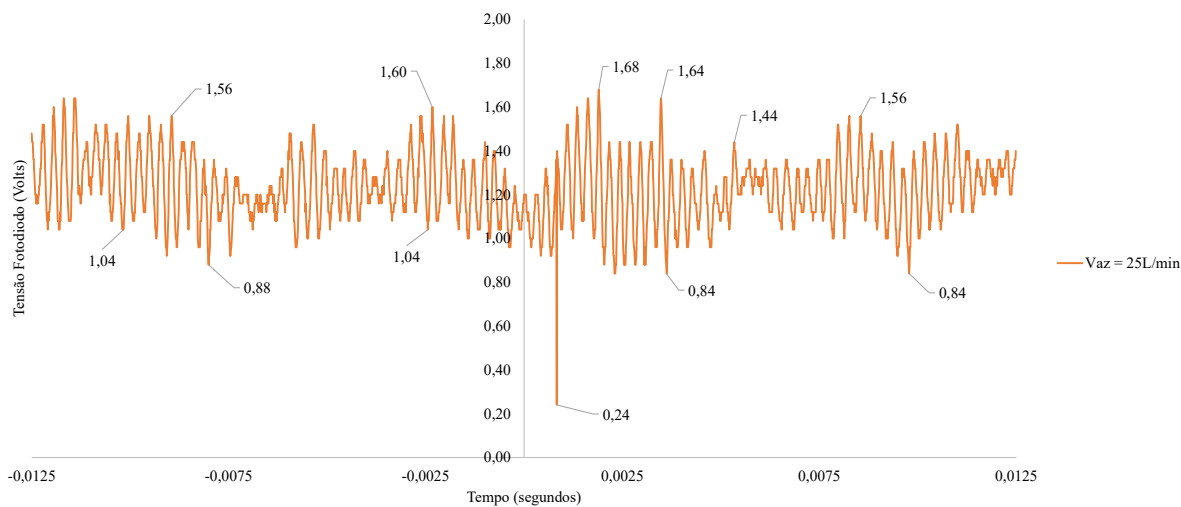
Figura 92 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.2 - 22L/min - Gráfico isolado



Fonte: Autor (2025)

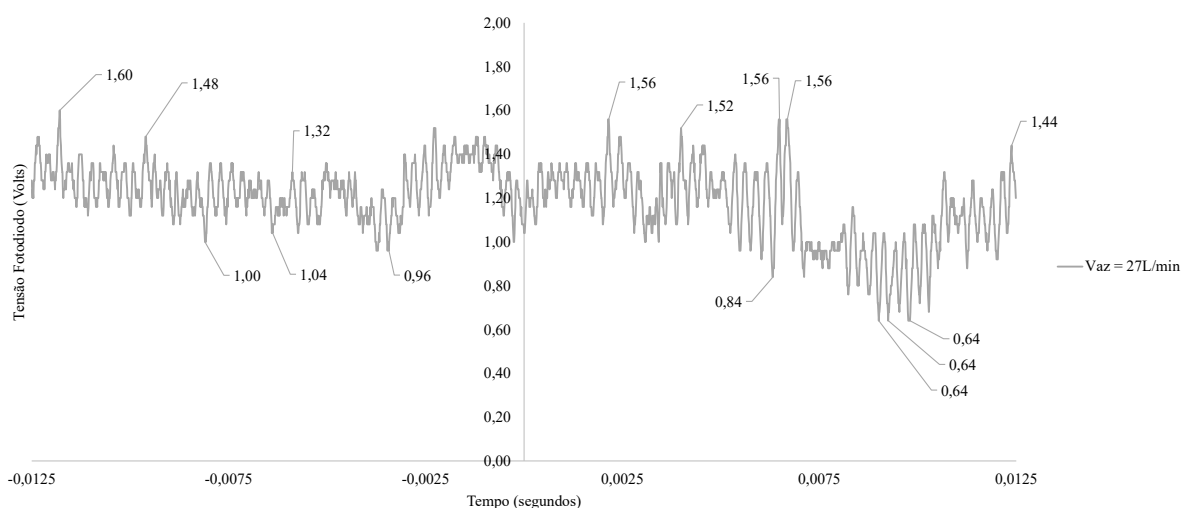
Aumentando o nível do fluxo, ainda é possível visualizar a influência do impacto do fluxo na fibra multimodo, pois aumentando o fluxo para a vazão de 25L/min, é possível notar uma turbulência maior em relação às vazões anteriores. Os resultados obtidos para as vazões de 25L/min e 27L/min podem ser visualizados nas Figuras 93 e 94.

Figura 93 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.3 - 25L/min - Gráfico isolado



Fonte: Autor (2025)

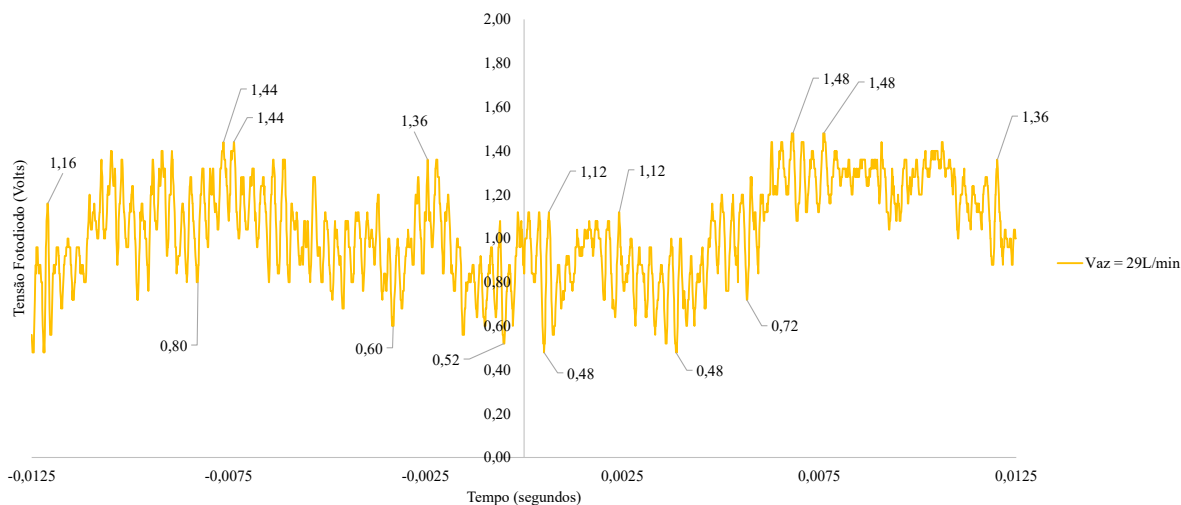
Figura 94 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.4 - 27L/min - Gráfico isolado



Fonte: Autor (2025)

Aumentando o fluxo para 29L/min é possível observar uma maior variação e turbulência do sinal em relação ao vazão anterior, constatando a relação entre o fenômeno da interferência multimodal e o fluxo de água que atravessa a tubulação. O resultado para a vazão de 29L/min pode ser visualizado na Figura 95.

Figura 95 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.5 - 29L/min - Gráfico isolado

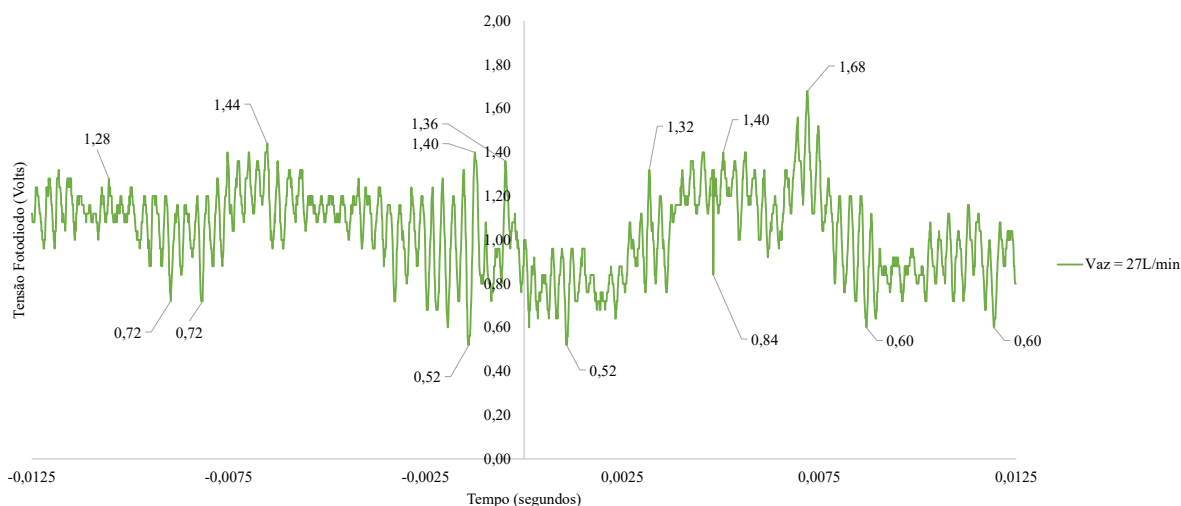


Fonte: Autor (2025)

Como neste ensaio estamos analisando o aumento progressivo de vazão e logo em seguida à sua diminuição progressiva, agora iremos analisar os resultados obtidos para a vazão decaindo de 29L/min até 19L/min.

Ao chegar no nível máximo, neste momento foi reduzido o fluxo de água para a 27L/min, e o resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 96.

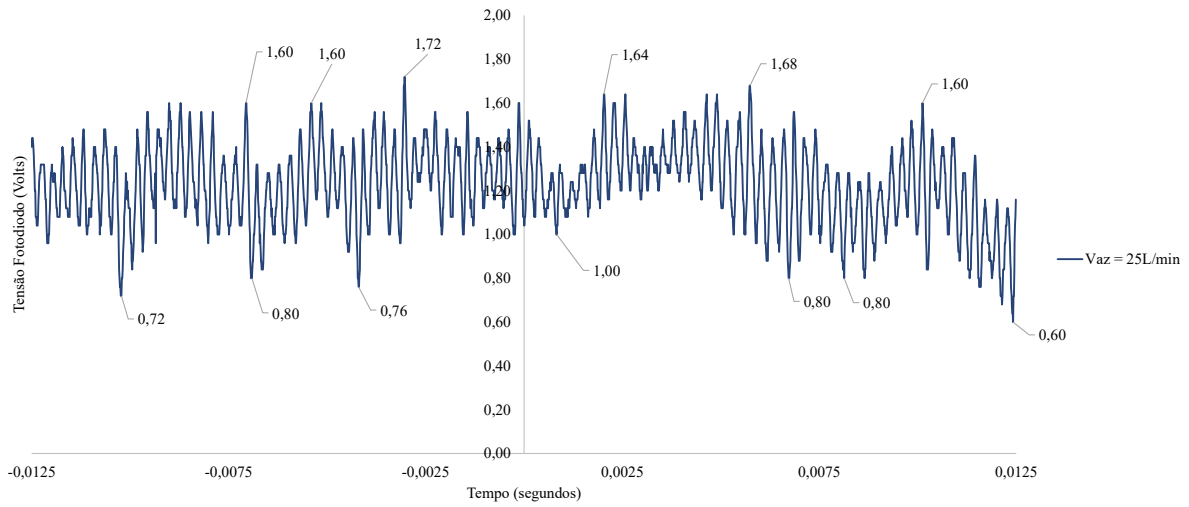
Figura 96 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.6 - 27L/min - Gráfico isolado



Fonte: Autor (2025)

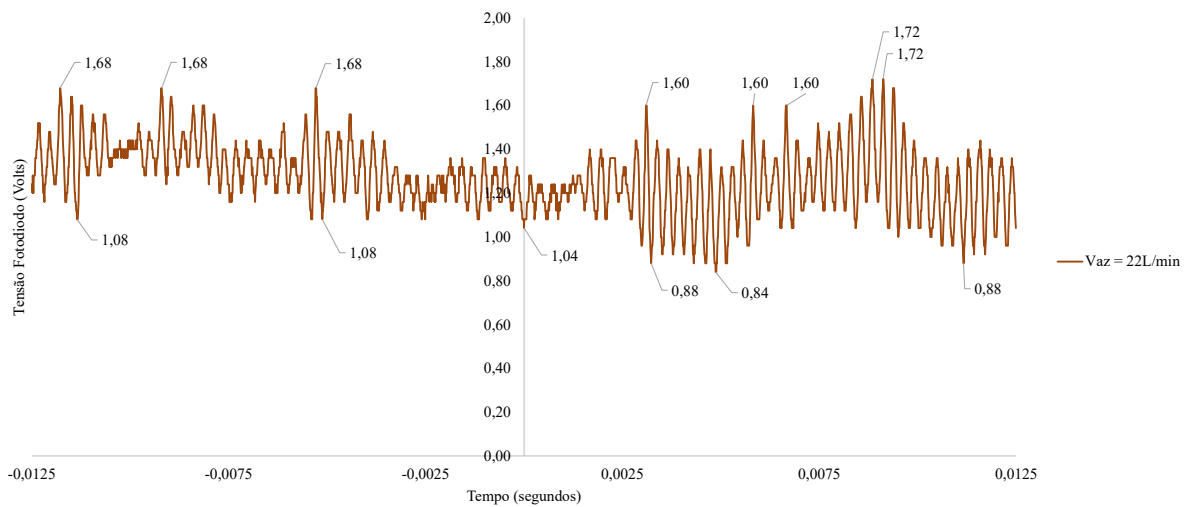
Logo em seguida, o fluxo foi reduzido para 25L/min e logo após, para 22L/min. A variação no domínio do tempo para esse intervalo não é muito perceptível, mas ainda é possível notar uma pequena mudança no comportamento inicial, ou seja, entre a vazão de 25L/min e 22L/min, é possível notar uma pequena diminuição na turbulência. Os resultados obtidos para as vazões de 25L/min e 22L/min, podem ser visualizados nas Figuras 97 e 98 respectivamente.

Figura 97 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.7 - 25L/min - Gráfico isolado



Fonte: Autor (2025)

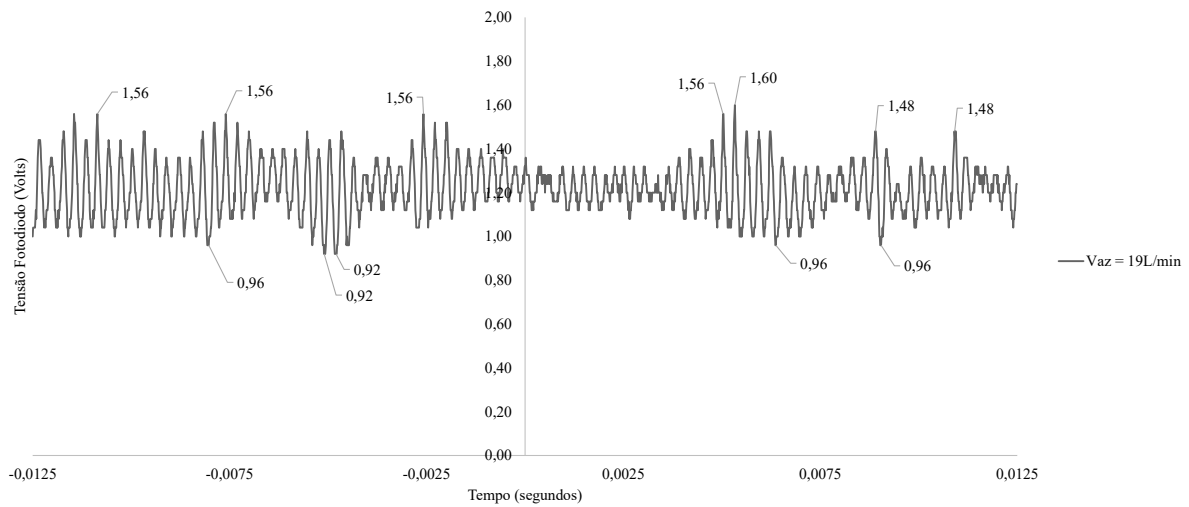
Figura 98 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.8 - 22L/min - Gráfico isolado



Fonte: Autor (2025)

E no final do ensaio, foi analisado os resultados obtidos para a vazão inicial de 19L/min. O objetivo desse ensaio foi analisar o comportamento da vazão aumentando e diminuindo progressivamente, e assim constatar a relação entre a interferência multimodal e a variação do fluxo de água em uma tubulação. Os resultados obtidos para o fluxo de 19L/min podem ser visualizados na Figura 99.

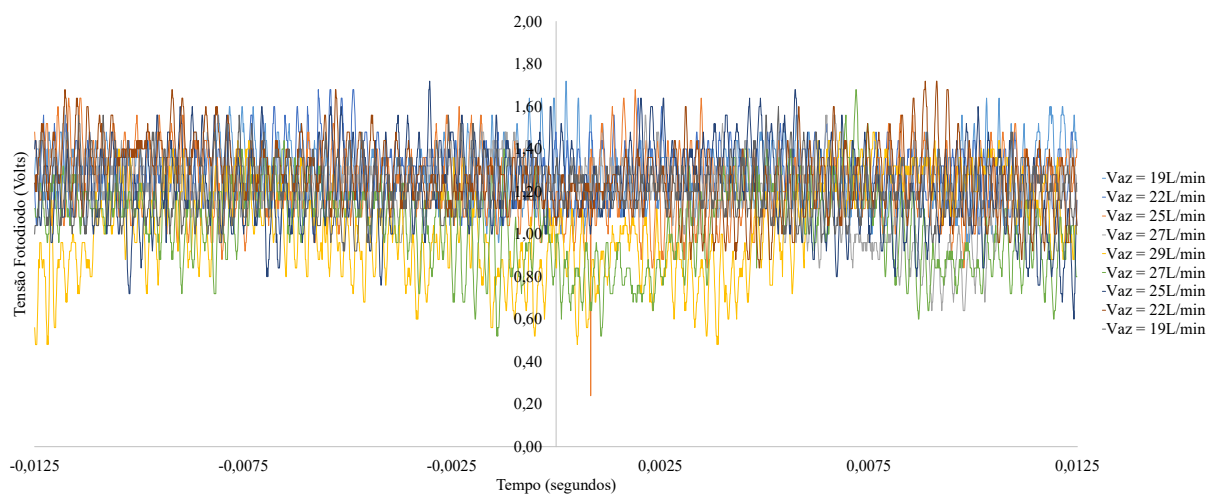
Figura 99 – Laser 758 nm vazão Crescente e decrescente 1.9 - 19L/min - Gráfico isolado



Fonte: Autor (2025)

Para uma melhor análise dos resultados obtidos neste ensaio, todas as curvas foram plotadas sobrepostas e o resultado pode ser observado na Figura 100.

Figura 100 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.9 - 19 à 29 e 29 à 19L/min - Gráfico isolado.



Fonte: Autor (2025)

Devido a grande perturbação, amplitude e variação de valores, as curvas ficaram muito entrelaçadas, sendo possível observar que ao menos a vazão de 29L/min se destaca entre as demais.

Reunindo todas as informações dos resultados no domínio do tempo, foi possível resumir todos em média, moda, mediana, desvio médio, desvio padrão e variância para cada ensaio. As métricas obtidas por meio dos resultados dos ensaios podem ser visualizadas na Tabela 11.

Dentre todas as outras métricas a que podemos destacar com mais intensidade é a da variância, onde é possível visualizar que a intensidade da variância inicia com um valor menos intenso, aumenta gradativamente e logo em seguida cai, indo de encontro com o sentido do

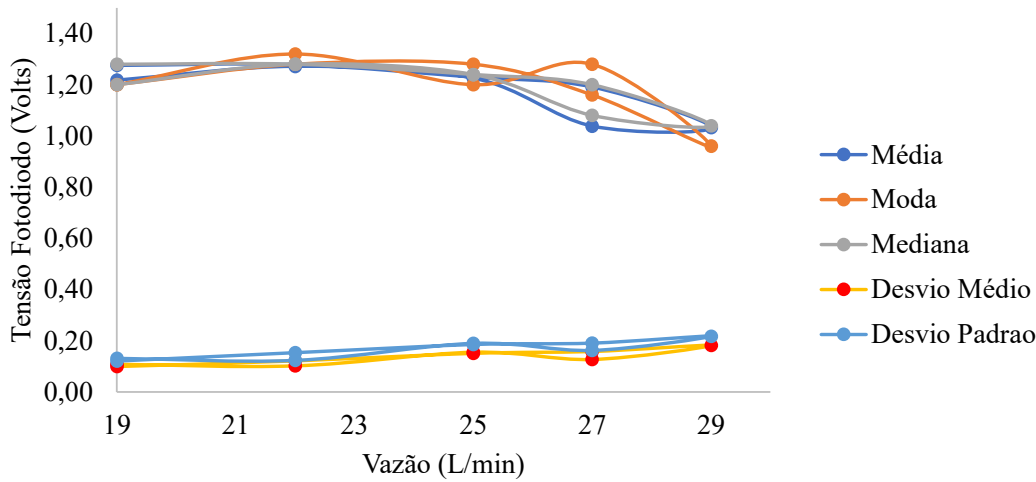
Tabela 11 – Análise estatística dos resultados - 3º Ensaio vazão 19L/min até 29L/min - 29L/min até 19L/min.

Vazão L/min)	Média	Moda	Mediana	Desvio médio	Desvio padrão	Variância
19,0000	1,2759	1,2000	1,2800	0,1078	0,1314	0,0105
22,0000	1,2782	1,3200	1,2800	0,1013	0,1234	0,0213
25,0000	1,2295	1,2000	1,2400	0,1550	0,1898	0,0360
27,0000	1,1910	1,2800	1,2000	0,1266	0,1619	0,0350
29,0000	1,0332	0,9600	1,0400	0,1815	0,2175	0,0498
27,0000	1,0386	1,1600	1,0800	0,1581	0,1902	0,0448
25,0000	1,2261	1,2800	1,2400	0,1506	0,1848	0,0308
22,0000	1,2720	1,2800	1,2800	0,1214	0,1531	0,0256
19,0000	1,2182	1,2000	1,2000	0,0989	0,1201	0,0131

Fonte: Autor (2025).

aumento e a diminuição da vazão realizado no ensaio. Os resultados das métricas podem ser visualizados nas Figuras 101 e 102.

Figura 101 – Laser 785 nm Vazão crescente e decrescente - 19 à 29L/min e 29 À 19L/min métricas estatísticas.



Fonte: Autor (2025)

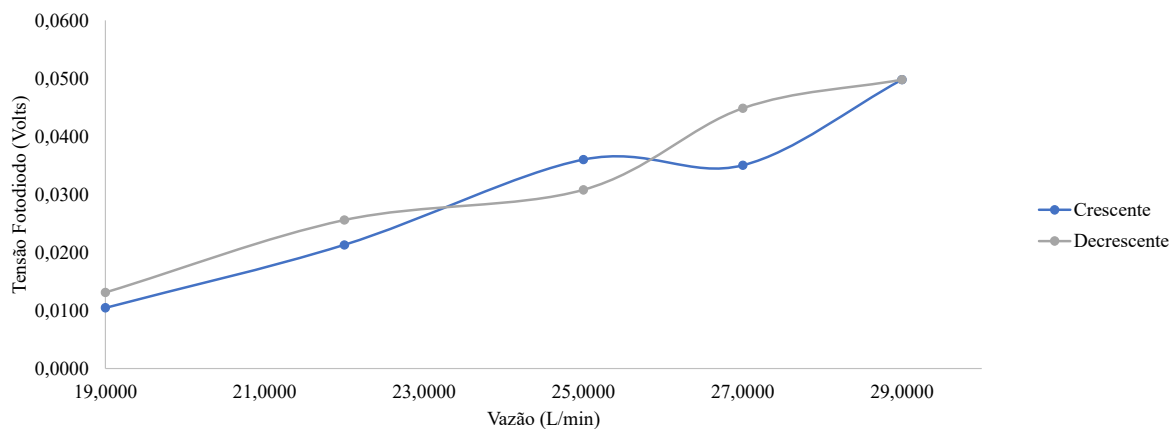
Na Figura 102 podemos visualizar o gráfico da variância do ensaio 3, onde a curva em azul é referente ao sentido crescente do fluxo de água e a curva de cor cinza está relacionada ao sentido decrescente do fluxo, onde a sua medida começa com um valor abaixo de 0,0105 e aumenta para 0,0213, e depois para 0,0360, alcançando o seu ápice em 0,0498, e depois começa a diminuir até o seu valor final de 0,0131, que é próximo do valor inicial do ensaio.

Com os resultado obtidos, podemos concluir que ocorre uma pequena relação, mas iremos analisar esses resultados agora no domínio da frequência.

4.2.3.2 Análise no domínio da frequência

Nesta etapa iremos analisar os resultados do ensaio 3 no domínio da frequência. Cada vazão gerou uma grande quantidade de pontos e nesses pontos foi utilizada a transformada rápida

Figura 102 – Laser 785 nm vazão crescente e decrescente - 19 à 29L/min e 29 À 19L/min métricas Estatísticas.

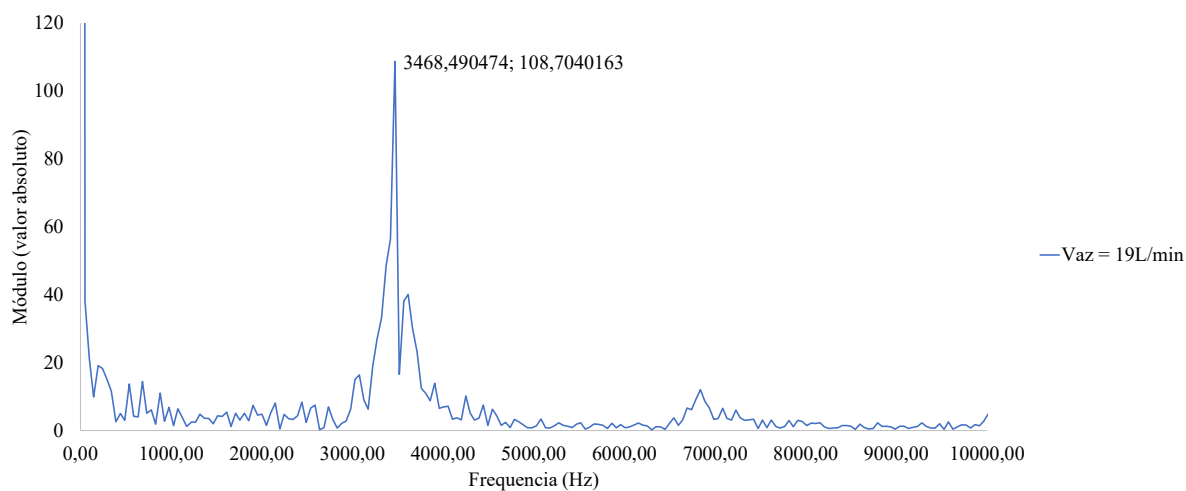


Fonte: Autor (2025)

de Fourier para plotar os gráficos das frequências de cada um.

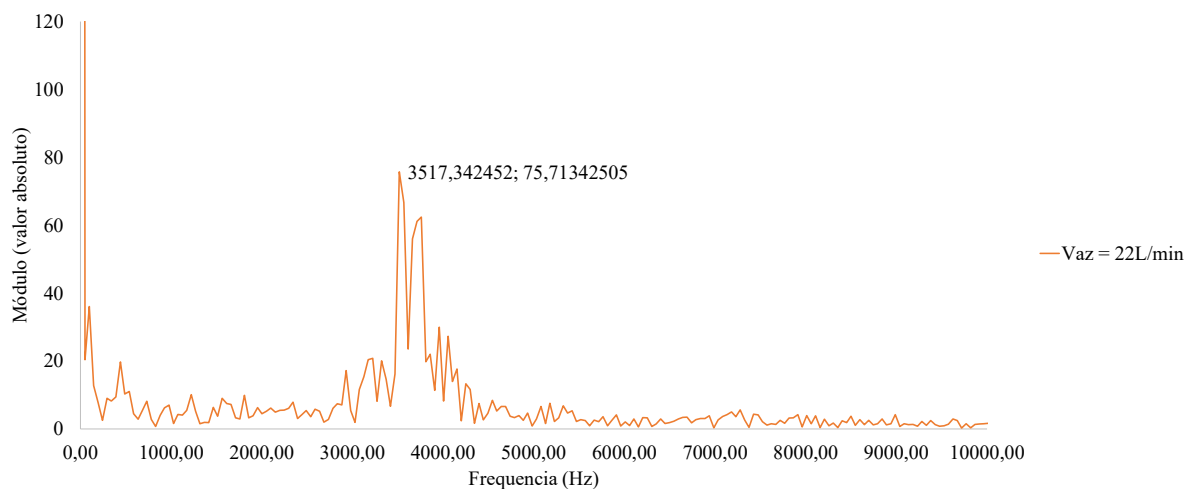
Inicialmente foi plotado os gráficos referentes às vazões de 19L/min e 22L/min e foi observado que a frequência dominante do sistema começou próximo de 3,5Hz. Os resultados obtidos para as vazões de 19L/min e 22L/min podem ser visualizados nas Figuras 103 e 104, respectivamente.

Figura 103 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.1 - 19L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

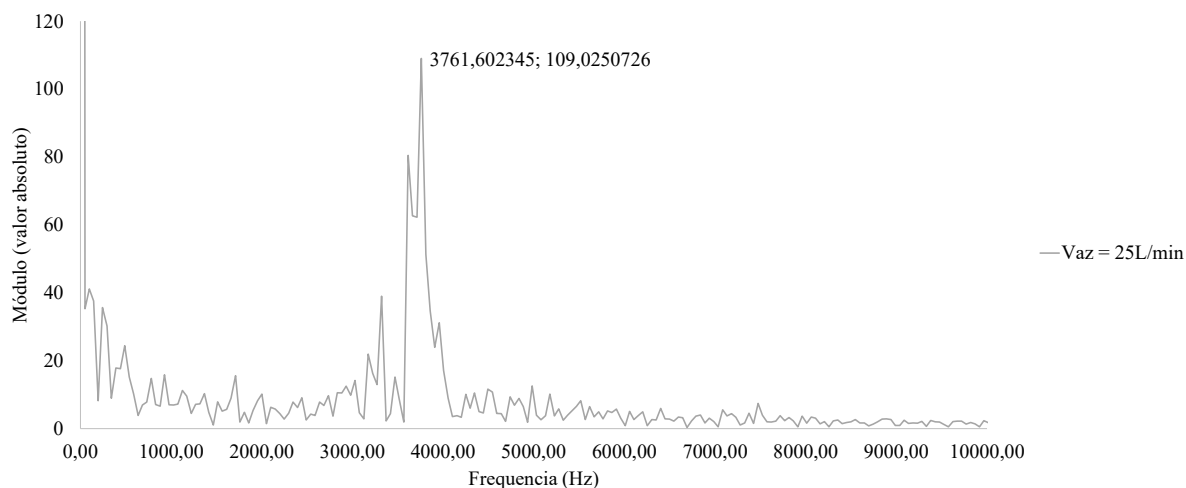
Figura 104 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.2 - 22L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

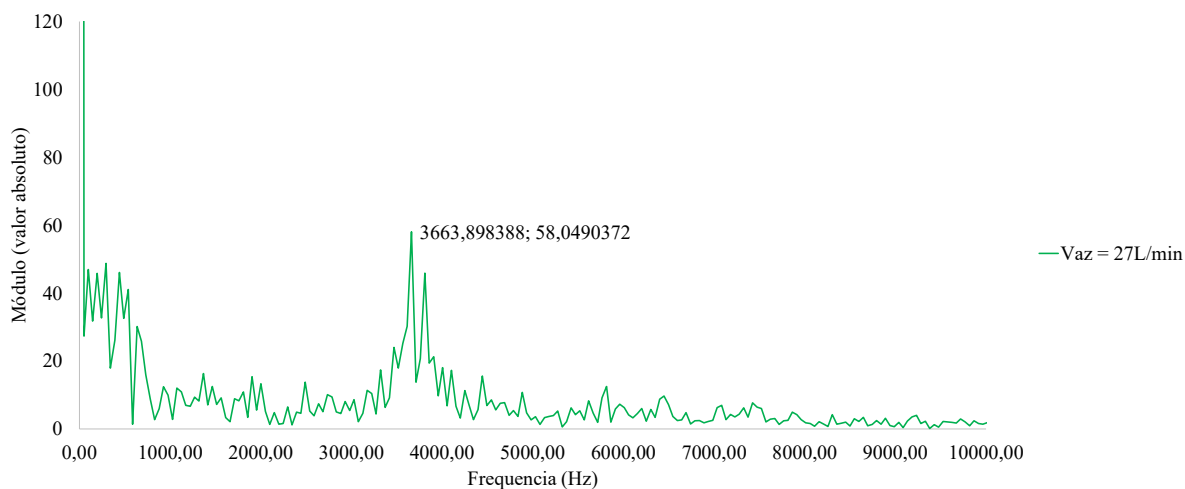
Já nas vazões de 25L/min e 27L/min é possível visualizar o deslocamento da frequência para a direita, ou seja, a frequência dominante do sistema tende a ir para a frequência de 4KHz. Os resultados obtidos para as vazões de 25L/min e 27L/min podem ser visualizados nas Figuras 105 e 106 respectivamente.

Figura 105 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.3 - 25L/min - Gráfico Isolado na Frequência



Fonte: Autor (2025)

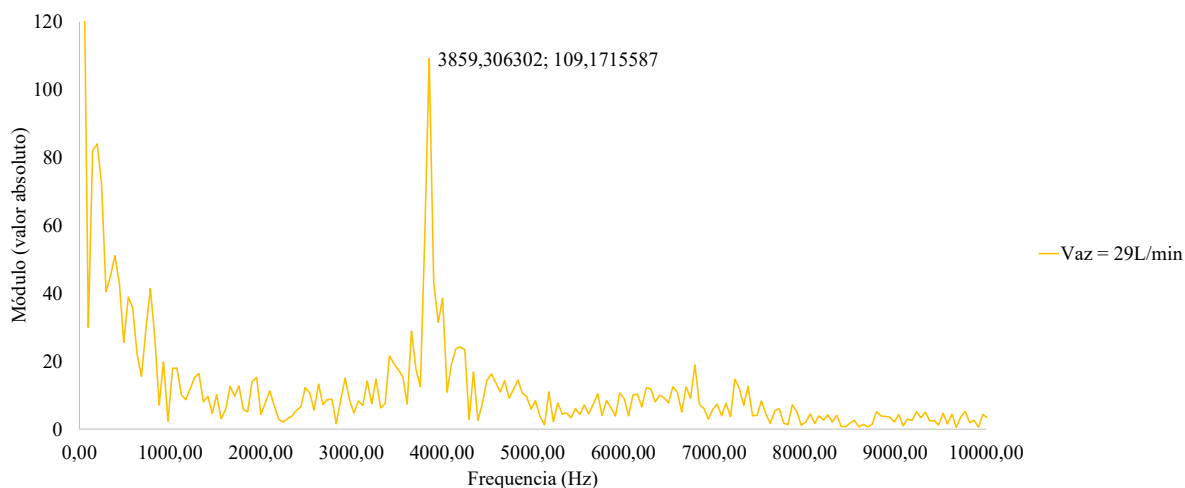
Figura 106 – Laser 758 nm vVazão crescente e decrescente 1.4 - 27L/min - Gráfico Isolado na Frequência



Fonte: Autor (2025)

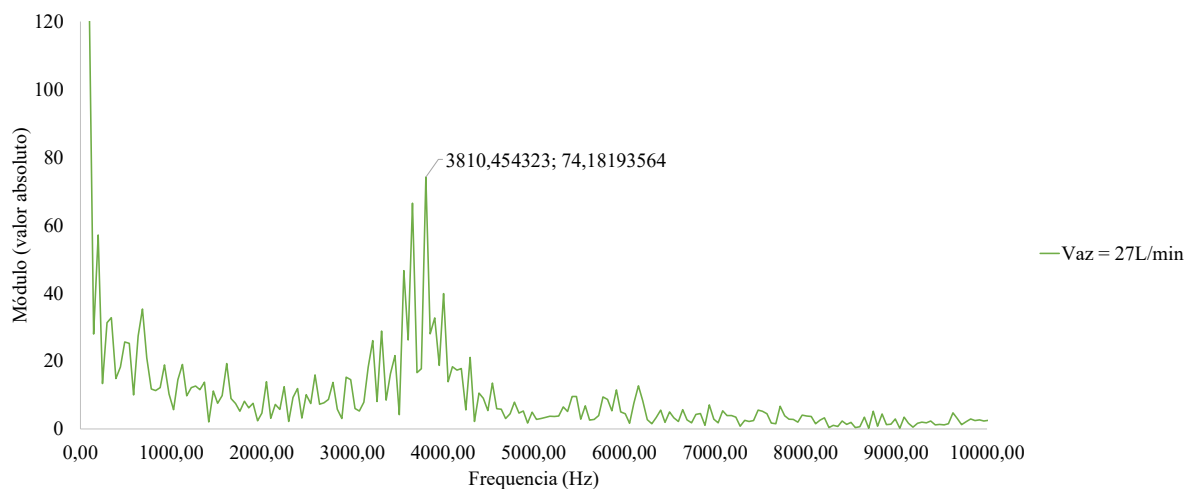
Aumentando a vazão para 29L/min, e logo em seguida diminuindo para 27L/min, é possível visualizar o deslocamento sutil da frequência dominante indo para a direita, e logo em seguida retornando para esquerda, constatando assim, a influência do fluxo de água e da interferência multimodal. Os gráficos para as frequências das vazões de 29L/min e a segunda vazão de 27L/min podem ser visualizados nas Figuras 107 e 108 respectivamente.

Figura 107 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.5 - 29L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

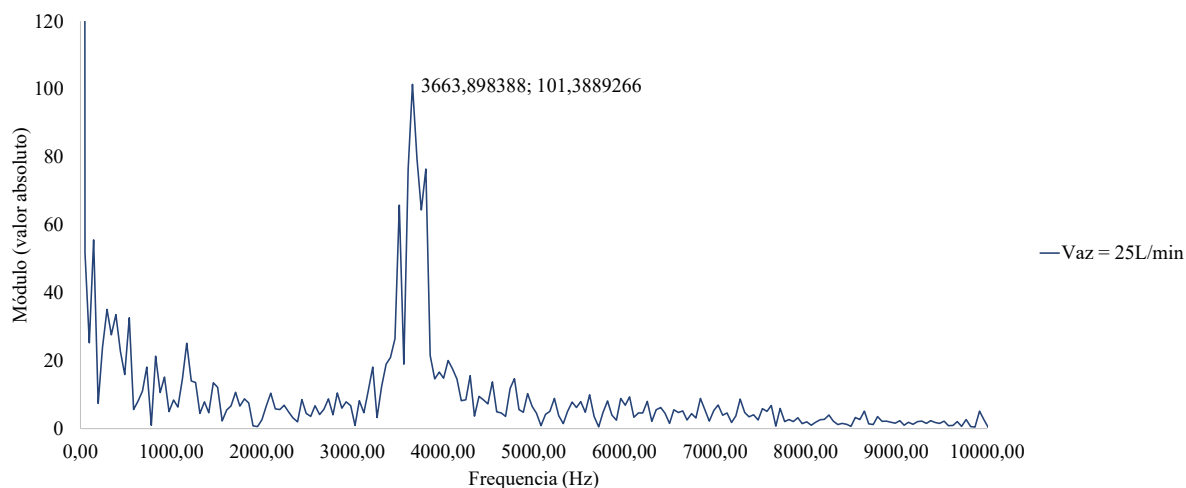
Figura 108 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.6 - 27L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

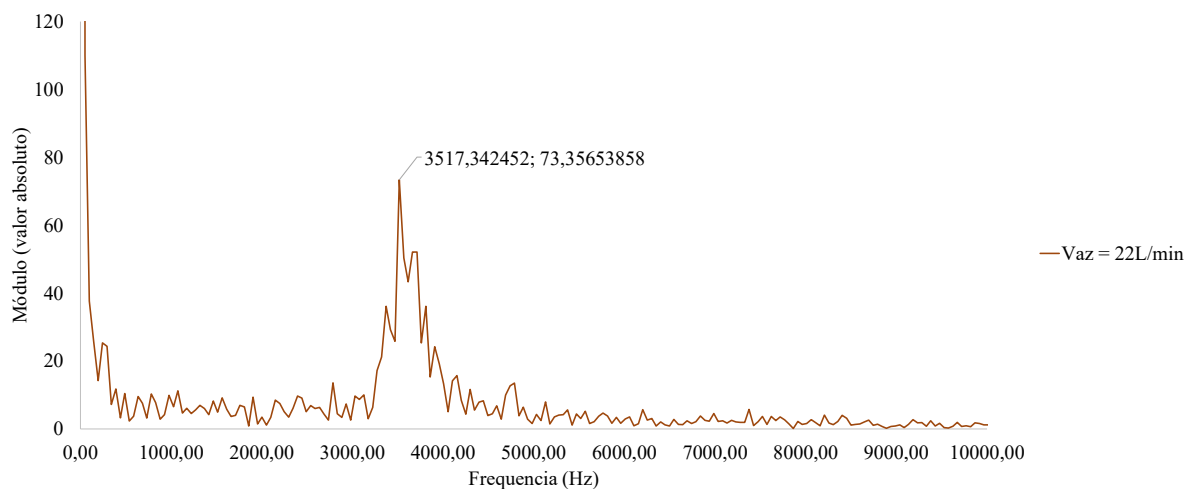
Ao diminuir ainda mais o fluxo de água na tubulação, foram obtidos os resultados das frequências para as vazões de 25L/min e 22L/min, confirmando o deslocamento da frequência dominante do sinal. Os resultados para as frequências das vazões de 25L/min e 22L/min podem ser visualizados nas Figuras 109 e 110 respectivamente.

Figura 109 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.7 - 25L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

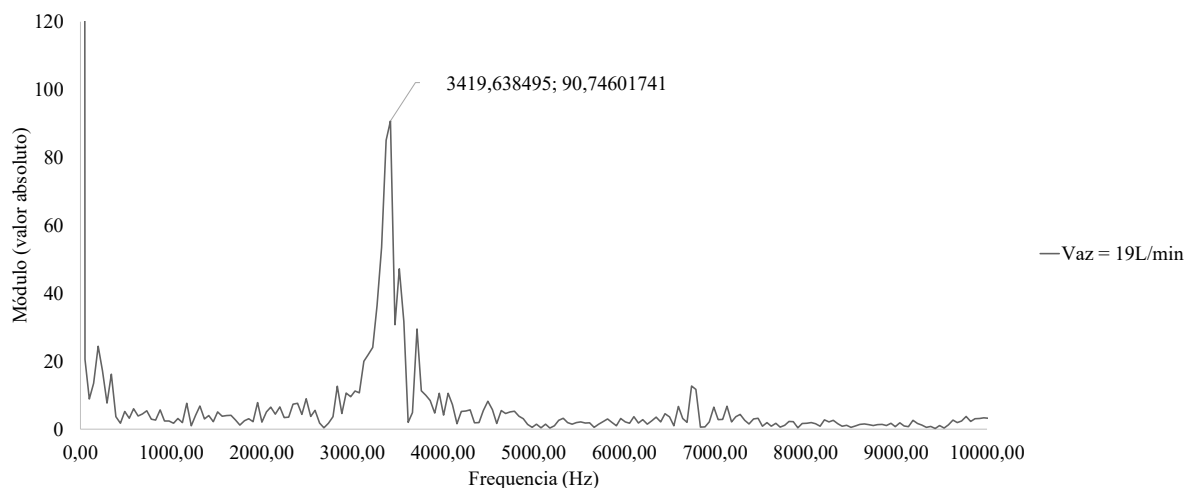
Figura 110 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.8 - 22L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

E no ultimo nível da vazão, é possível confirmar que as variações do fluxo de água na tubulação de 19,05 mm de diâmetro, influencia diretamente na variação da frequência dominante do sinal, ou seja, aumentando a vazão, a frequência dominante do sinal aumenta, e diminuindo a vazão, a frequência do sinal tende a diminuir, considerando o laser com comprimento de onda de 785 nm. O segundo resultado para a vazão de 19L/min pode ser visualizado na Figura 111.

Figura 111 – Laser 758 nm vazão crescente e decrescente 1.9 - 19L/min - Gráfico isolado na frequência



Fonte: Autor (2025)

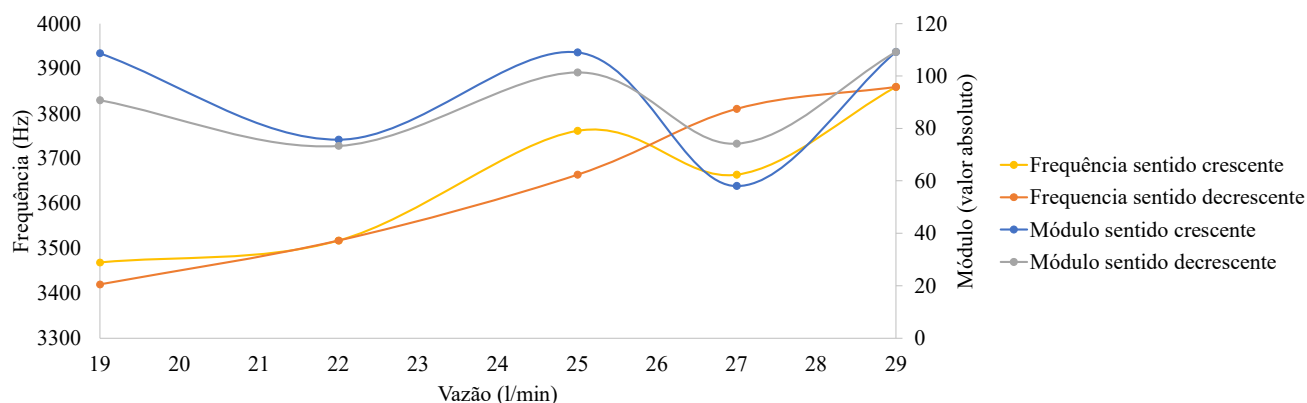
Para cada curva no domínio frequência foi coletado as suas frequências dominantes destacando os picos, e os seus respectivos modulo, e essas informações foram organizadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Laser 785 nm: Relação Vazão x Frequência x Módulo do Sinal Vazão 19 à 29 e de 29 à 19 L/min.

Vazão L/min)	Frequência (Hz)	Módulo (valor absoluto)
19,0000	3468,4904	108,704
22,0000	3517,3424	75,7134
25,0000	3761,6023	109,025
27,0000	3663,8983	58,049
29,0000	3859,3063	109,1716
27,0000	3810,4543	74,1819
25,0000	3663,8983	101,3889
22,0000	3517,3424	73,3565
19,0000	3419,6384	90,746

Utilizando os dados da Tabela 12 de cada curva da frequência deste ensaio foi possível plotar e analisar de maneira semelhante às análises anteriores, plotando as curvas das frequências dominantes bem como dos módulos, e essas curvas podem ser visualizadas na Figura 112.

Figura 112 – Laser 785 nm Vazão 1.10 - 19 à 29 e 29 à 19 L/min - Vazão, frequência e módulo do sinal.



Fonte: Autor (2025)

Por meio da Figura 112 podemos observar que há quatro curvas, sendo duas referentes ao ensaio no sentido crescente e duas no sentido decrescente. A curva em amarelo refere-se aos valores das frequências dominantes de vazão no sentido crescente do fluxo. Nela, é possível notar que, com o aumento da vazão, as frequências tendem a aumentar. Já a curva em azul (que representa o módulo das frequências) também corresponde ao sentido crescente do ensaio. Entretanto, seu comportamento aparente não apresenta uma relação linear, diferentemente do observado nas frequências. A curva em laranja está relacionada ao sentido decrescente do ensaio. Nela, verifica-se que, à medida que o fluxo é reduzido, as frequências dominantes de vazão também diminuem, seguindo uma tendência linear. Por outro lado, na curva em cinza, nota-se que não ocorre um comportamento semelhante ao da curva laranja, não apresentando relação de linearidade.

Considerando que o aumento da intensidade do fluxo de água causa perturbações mecânicas — como pressão, impactos e turbulência no interior da tubulação —, tais perturbações alteram o índice de refração e o comprimento efetivo da fibra, modificando a fase relativa dos modos de propagação da luz. Dessa forma, conclui-se que, como a interferência multimodal depende da fase relativa entre os modos, maiores vazões resultam em mudanças mais significativas no padrão de interferência.

4.3 Aplicativo Android de monitoramento

Para o monitoramento do sensor de vazão, foi projetado um aplicativo Android capaz de acompanhar a variação do fluxo de água na tubulação, bem como os valores de tensão elétrica enviados pelo fotodiodo. No aplicativo os níveis de tensão e vazão são enviados por meio da plataforma de desenvolvimento ESP32. A tela inicial da primeira versão do aplicativo de monitoramento pode ser visualizada na Figura 113.

Figura 113 – Tela de monitoramento do sensor.



Fonte: Autor (2025)

O aplicativo está mostrando dois valores inicialmente. A Tensão F.D. é a tensão que o fotodiodo envia para a unidade de tratamento de dados e a Vazão 1 L/min é o valor enviado pelo sensor de vazão. O valor de 1915 que o aplicativo está mostrando é o valor analógico do pino, que foi configurado assim apenas para testar a comunicação.

4.4 Conclusão

Considerando que o aumento da intensidade do fluxo de água causa perturbações mecânicas — como pressão, impactos e turbulência no interior da tubulação tais perturbações alteram o índice de refração e o comprimento efetivo da fibra, modificando a fase relativa dos modos de propagação da luz. Dessa forma, conclui-se que, como a interferência multimodal depende da fase relativa entre os modos, maiores vazões resultam em mudanças mais significativas no padrão de interferência.

Devido às características dos resultados obtidos nas duas situações analisadas referentes ao laser de 1550 nm e ao laser de 785 nm, pode-se concluir que os melhores resultados foram alcançados com o laser de 785 nm. Isso ocorre porque esse sistema possui um Controlador de Diodo Laser e Temperatura TC4020 para Bancada (20A, 225W), o que garante maior estabilidade e precisão. Essa superioridade foi comprovada pela análise dos resultados no domínio da frequência.

Devido a pequena vibração provocada pelo fluxo de água que atravessou a tubulação, a unidade do transdutor óptico atendeu de maneira satisfatória o seu objetivo, pois ela suportou os conectores, bem como o suporte da fibra multimodo, garantindo uma estabilidade mecânica ao sistema conectado à tubulação.

Em relação à unidade de aquisição de dados também teve um resultado satisfatório, pois por meio dela foi possível enviar o sinal corretamente para o fotodiodo, e o fotodiodo também conseguiu atender ao seu objetivo, pois ele enviou corretamente os dados para a o pino de sinal analógico da plataforma de desenvolvimento ESP32, e esta por sua vez atendeu as expectativas, e através deste dispositivo, foi possível enviar corretamente os dados para o aplicativo android, responsável por monitorar o sinal enviado.

Além disso, o laser de 785 nm apresentou melhor desempenho em termos de sensibilidade do sistema. O controlador TC4020 permite um ajuste fino da temperatura e da corrente do laser, assegurando maior estabilidade e eficiência na geração do sinal luminoso ao longo do meio de propagação.

Os resultados demonstram que a interferência multimodal apresenta uma resposta mais acentuada às variações de vazão, especialmente em vazões elevadas, pois nessas vazões elevadas, ocorrer uma maior variação de tensão elétrica.

Além disso, com base nas análises realizadas ao longo dos ensaios, verificou-se que a sensibilidade do sistema em relação às vazões torna-se mais perceptível a partir de 25 L/min.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho de mestrado, apresentou-se um sensor de fluxo hídrico capaz de mensurar a variação do fluxo que atravessa uma tubulação de 3/4” em PVC por meio da interferência multimodal. A variação do fluxo hídrico na tubulação, controlada por uma bomba hidráulica, gerou alterações na frequência do sinal captado pelo fotodiodo, permitindo assim correlacionar e validar os valores de vazão que atravessaram a tubulação projetada para esta pesquisa.

O estudo foi conduzido com cinco níveis de vazão: 19 L/min, 22 L/min, 25 L/min, 27 L/min e 29 L/min. Cada valor foi calibrado e validado utilizando um sensor de fluxo comercial FS300A 3/4”. Por meio de um *script* específico desenvolvido para este sensor, realizou-se a programação adequada na plataforma ESP32, e as medições de vazão foram monitoradas em um display LCD 20x4 durante a variação dos parâmetros.

A análise dos resultados no domínio da frequência revelou que o aumento da vazão está diretamente associado ao incremento tanto da frequência quanto da amplitude do sinal.

Embora em alguns momentos a amplitude não tenha apresentado variação expressiva, a frequência associada a cada vazão demonstrou resultados consistentes e satisfatórios.

5.1 Trabalhos Futuros

Para o desenvolvimento do projeto proposto neste trabalho, podem ser implementadas ideias e inovações referentes aos seguintes aspectos:

- Ampliação da faixa de vazões: implementação de uma bomba hidráulica com capacidade de fornecer maior variedade de vazões, visando ampliar a análise;
- Modificação dos acoplamentos da fibra multimodo: Alteração da disposição da fibra na tubulação, como por exemplo, posicionando a fibra multimodo circundando externamente o acoplador;
- Desenvolvimento de novo modelo de acoplador: Projeto de um acoplador para fibra multimodo com capacidade de variação angular em sua disposição na tubulação;
- Compactação do sistema eletrônico: implementação de um sistema embarcado compacto para a eletrônica do sistema;
- Miniaturização do dispositivo: desenvolvimento de um aparato mais compacto capaz de acomodar adequadamente a fibra multimodo e seus conectores;
- Aprimoramento do sistema com dados existentes: Refinamento do sistema utilizando os dados já obtidos, estabelecendo as correlações entre as frequências medidas e suas respectivas vazões;

- Otimização do aplicativo de comunicação: Calibração do *software* de comunicação de acordo com as vazões de validação dos dados e suas respectivas frequências dominantes.

Referências

- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR NM 212: Medidores velocimétricos de água potável fria até 15 m³/h**. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.
- ALLIL, A. S. et al. Fbg-based sensor applied to flow rate measurements. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, IEEE, v. 70, p. 1–8, 2020.
- BARNOSKI, M. et al. Optical time domain reflectometer. **Applied optics**, Optica Publishing Group, v. 16, n. 9, p. 2375–2379, 1977.
- BERNINI, R.; MINARDO, A.; ZENI, L. Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated brillouin scattering. **Optics letters**, Optica Publishing Group, v. 34, n. 17, p. 2613–2615, 2009.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. [S.l.]: Pearson Educação, 2008.
- BUSSAB, W. d. O.; MORETTIN, P. A. Estatística básica. In: **Estatística básica**. [S.l.: s.n.], 2010. p. xvi–540.
- COSTA, J. W. et al. Macrobending sms fiber-optic anemometer and flow sensor. **Optical Fiber Technology**, Elsevier, v. 52, p. 101981, 2019.
- DING, M. et al. A low-flow fiber-optic flowmeter based on bending measuring using a cladding fiber bragg grating. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 23, n. 4, p. 3609–3614, 2023.
- FUENTES-FUENTES, M. A. et al. Highly sensitive liquid core temperature sensor based on multimode interference effects. **Sensors**, v. 15, n. 10, p. 26929–26939, 2015. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/10/26929>.
- HARTOG, A.; LEACH, A.; GOLD, M. Distributed temperature sensing in solid-core fibres. **Electronics letters**, v. 23, n. 21, p. 1061–1062, 1985.
- KAWA, T. et al. Temperature sensing based on multimodal interference in plastic optical fibers: Sensitivity enhancement by annealing. In: **2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–3.
- KEISER, G. **Comunicações por Fibras Ópticas-4**. [S.l.]: AMGH Editora, 2014.
- KURASHIMA, T.; HORIGUCHI, T.; TATEDA, M. Distributed-temperature sensing using stimulated brillouin scattering in optical silica fibers. **Optics letters**, Optica Publishing Group, v. 15, n. 18, p. 1038–1040, 1990.
- LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares-2**. [S.l.]: Bookman, 2006.
- LIM, J. et al. Dp flow sensor using optical fibre bragg grating. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 92, n. 1-3, p. 102–108, 2001.

LV, R.-q. et al. An optical fiber sensor for simultaneous measurement of flow rate and temperature in the pipeline. **Optical Fiber Technology**, Elsevier, v. 45, p. 313–318, 2018.

MAIA, L. **Sensor de corrente elétrica e campo magnético alternados utilizando modulação da luz pela interferência multimodal em fibras ópticas. 90 p.** Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado)—Programa de Pós-Graduação em Engenharia de ..., 2020.

MEJIA-ARANDA, A. et al. Fiber optic pressure sensor of 0-0.36 psi by multimode interference technique. **Journal of applied research and technology**, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias Aplicadas y ..., v. 11, n. 5, p. 695–701, 2013.

MILNE, D. et al. An analysis of railway track behaviour based on distributed optical fibre acoustic sensing. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Elsevier, v. 142, p. 106769, 2020.

MORSLED, A. H.; ATTA, R.; PACKIRISAMY, M. Fluidic flow measurement using single mode–multimode–single mode optical fiber sensor. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 21, n. 12, p. 13316–13326, 2021.

OLIVERO, M. et al. Single-mode–multimode–single-mode optical fiber sensing structure with quasi-two-mode fibers. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, IEEE, v. 67, n. 5, p. 1223–1229, 2017.

RIBEIRO, J. A.; ANTÔNIO, J. Comunicações ópticas (4ª edição). **Editora Érica**, p. 155–169, 2005.

ROTA-RODRIGO, S. et al. Multimodal interferometer based on a suspended core fiber for simultaneous measurement of physical parameters. **Journal of Lightwave Technology**, v. 33, n. 12, p. 2468–2473, 2015.

RUIZ-VARGAS, A. et al. Optical flow sensor for continuous invasive measurement of blood flow velocity. **Journal of biophotonics**, Wiley Online Library, v. 12, n. 10, p. e201900139, 2019.

SILVA, S.; FRAZÃO, O. Refractive index sensing using a multimode interference-based fiber sensor in a cavity ring-down system. In: **2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4.

SOLDANO, L. B.; PENNINGS, E. C. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications. **Journal of lightwave technology**, IEEE, v. 13, n. 4, p. 615–627, 1995.

TRONCO, T. R.; AVILA, L. F. de. Fundamentos de comunicações ópticas. **1a Edição: Abril de**, v. 12, 2007.

WANG, J. et al. A flexible multimodal sensor for fully decoupled crosstalk-free pressure and temperature sensing via laser direct writing. In: **2023 IEEE 18th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)**. [S.l.: s.n.], 2023. p. 45–49.

WANG, K. et al. Advances in optical fiber sensors based on multimode interference (mmi): A review. **IEEE Sensors Journal**, v. 21, n. 1, p. 132–142, 2021.

WU, Q. et al. Singlemode-multimode-singlemode fiber structures for sensing applications—a review. **IEEE sensors journal**, IEEE, v. 21, n. 11, p. 12734–12751, 2020.

WU, W. et al. Compact magnetic field sensor based on a magnetic-fluid-integrated fiber interferometer. **IEEE Magnetism Letters**, v. 10, p. 1–5, 2019.

YUAN, L.; YANG, J.; LIU, Z. A compact fiber-optic flow velocity sensor based on a twin-core fiber michelson interferometer. **IEEE sensors journal**, IEEE, v. 8, n. 7, p. 1114–1117, 2008.