

Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

Leandro Procópio Alves

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR A FIBRA ÓPTICA, PARA
MEDIDAS DE VIBRAÇÕES, BASEADO NO PRINCÍPIO DE
MODULAÇÃO DE INTENSIDADE

São José dos Campos
2007

Leandro Procópio Alves

**Desenvolvimento de um sensor a fibra óptica, para medidas de vibrações,
baseado no princípio de modulação de intensidade**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Biomédica, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Egberto Munin
Co-Orientadora: Prof^ª. Dra. Viviane Pilla

São José dos Campos

2007

A48d

Alves, Leandro Procópio

Desenvolvimento de um sensor a fibra óptica, para medidas de vibrações, baseado no princípio de modulação de intensidade/Leandro Procópio Alves. São José dos Campos: Univap, 2007.

1 Disco Laser. Color.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – Universidade do Vale do Paraíba, 2007.

1. Fibras ópticas 2. Instrumentação I. Munin, Egberto, Orient. II. Pilla, Viviane, Co-Orient. III. Título

CDU: 681.7.068

Autorizo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, por processos fotocopiadores ou transmissão eletrônica.

Assinatura do aluno: *Leandro Procópio Alves*

Data: *27/11/2007*

LEANDRO PROCÓPIO ALVES

**“DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR A FIBRA ÓPTICA, PARA
MEDIDAS DE VIBRAÇÕES, BASEADO NO PRINCÍPIO DE
MODULAÇÃO DE INTENSIDADE”**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Biomédica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. **MARCOS TADEU TAVARES PACHECO** (UNIVAP)

Prof. Dr. **EGBERTO MUNIN** (UNIVAP)

Prof^a. Dra. **VIVIANE PILLA** (UNIVAP)

Prof. Dr. **ADSON FERREIRA DA ROCHA** (UNB)

Prof. Dr. Marcos Tadeu Tavares Pacheco

Diretor do IP&D – UniVap

São José dos Campos, 27 de novembro de 2007.

***Dedico** este trabalho primeiramente aos meus pais, José Alves e Odete Aparecida Procópio Alves, por todo o incentivo e dedicação buscando sempre meu crescimento pessoal, profissional e moral.*

Aos meus irmãos, Eliane, Danilo e Daniel que sempre me apoiaram em minhas decisões.

E a uma pessoa muito especial em minha vida, minha namorada Fernanda Maria Prado Braga que em muito ajudou nesta etapa da minha vida. Incentivando, aconselhando, me permitindo sonhar e principalmente me fazendo acreditar nos sonhos.

Agradeço

A Deus por me conceder saúde e equilíbrio para alcançar todos os meus sonhos.

Em especial a meu orientador Prof^o. Dr^o. Egberto Munin, por ter me acolhido em seu laboratório com muita atenção e paciência, agradeço pela imensa ajuda e orientação em todo este percurso.

A todos os meus familiares, pelo amor e carinho.

Ao Prof^o. Dr^o. Marcos Tadeu Tavares Pacheco, pelo incentivo ao meu crescimento profissional.

Ao Prof^o. Dr^o.Baptista Gargione Filho, pelo apoio em forma de bolsa de estudo.

A Valéria Maeda Alves da Silva e Ivone Paranaiba Vilela Monteiro pelo incentivo, e indispensável ajuda durante o curso.

A todos os colegas do IP&D que de alguma forma contribuíram para a realização do meu trabalho.

Muito obrigado.

“Desenvolvimento de um sensor a fibra óptica, para medidas de vibrações, baseado no princípio de modulação de intensidade”

Resumo

Os sensores a fibras ópticas devem seu desenvolvimento a dois dos mais importantes avanços que ocorreram nos anos 1960s: a demonstração prática do primeiro laser em 1960 e às fibras ópticas com baixo índice de perdas em 1966. Na década de 1970 aconteceram os primeiros experimentos com fibras ópticas de baixa perda para aplicações em sensores. Existem sistemas sensores que oferecem excelentes capacidades para medidas, porém estes requerem hardware sofisticado e freqüentemente apresentam custo elevado. Geralmente, a alta resolução e a sofisticada capacidade de medidas realizadas por estes sensores são desnecessárias e, como tal, outros métodos baseados em fibras ópticas mais simples e de menor custo podem oferecer uma alternativa viável para determinadas aplicações. Os sistemas baseados em modulação de intensidade oferecem um excelente potencial para suprir essa necessidade. Este estudo teve por objetivo desenvolver e caracterizar um sensor de vibração a fibra óptica baseado no princípio de modulação em espaço livre do acoplamento de radiação óptica entre fibras ópticas utilizando uma lâmina livre para se movimentar perpendicularmente as fibras. A geometria proposta foi composta por duas fibras ópticas com o mesmo diâmetro de núcleo e com as faces alinhadas, e separadas por uma distância fixa. Entre as fibras foi adicionada uma lâmina móvel que eclipsa o diâmetro de uma das fibras. Conforme a penetração da lâmina varia, varia também a área eclipsada formando uma função de área por posição da lâmina. Foram escolhidas fibras ópticas multimodo de 50 μm , 100 μm e 200 μm de diâmetro de núcleo. Como dispositivo modulador foi adotada uma lâmina de aço fixada em um atuador eletromecânico. O conjunto lâmina-atuador foi posicionado perpendicularmente a frente da fibra óptica receptora. De modo que, com o deslocamento da lâmina, parte da radiação emitida pela fibra emissora fosse bloqueada, modulando a quantidade de luz acoplada na fibra. Como fonte de luz foi utilizado um LED emitindo em 635 nm. O sensor foi caracterizado analiticamente e experimentalmente, verificando-se a região linear de resposta e o comportamento do sensor em diferentes freqüências. A curva característica de resposta do sensor obtida analiticamente foi reproduzida experimentalmente. A comparação entre os resultados alcançados nessa etapa foi suficiente para validar o modelo matemático desenvolvido. A região linear de resposta do sensor encontrada foi de 50% do diâmetro do núcleo da fibra óptica com desvio da linearidade inferior a 1%. A montagem composta por fibras de 50 μm apresentou uma divergência da curva de resposta experimental quando comparada com a teoria, sugerindo ser este o limite prático para a montagem do sensor.

Palavras-chave: Sensor, fibra óptica, vibração.

“Development of an optical fiber vibration sensor based on intensity modulation”

Abstract

The development of the optical fiber sensors is due to two of the more important advances that happened in the 1960's: the practical demonstration of the laser in 1960 and the low loss optical fibers in 1966. After 1970, the first experiments with low loss optical fiber for sensor proposes were performed. Nowadays we have sensor systems that have excellent measurement resolution, but the majority of them are too expensive as they require sophisticate hardware. Often the high resolution is unnecessary for most of the applications. The systems based on the intensity modulation have great potential for those applications. The purpose of this work is to develop and to describe a sensor for vibration measurement based on the intensity modulation of the light guided by an optical fiber. The proposed configuration comprises two optical fibers with the same core diameter and aligned relatively to the blade. The intensity of the received radiation is modulated by the vertical position of the blade in the gap between the fibers. The movement of the blade changes the intensity of the light coupled into the collection fiber. Optical fibers with core diameters of 50, 100 and 200 μm with the same numerical aperture was chosen. To modulate the light a steel blade was chosen. The light supplied by a LED was coupled into the emission optical fiber. The sensor was characterized analytically and experimentally. The linear region of response was identified. Different modulation frequencies were employed for the experimental characterization of the sensor. The obtained results were in agreement with the theory. The range of response with less than 1% of deviation from linearity was 50% of the fiber core diameter. The sensor mounted with 50 μm optical fibers presented a small divergence between experimental response and mathematical model, suggesting that the practical fiber core limit for the assembly of the sensor would be 50 μm .

Keywords: Sensor, optical fiber, vibration.

Lista de figuras

Figura 1: Estrutura básica de uma fibra óptica de perfil em degrau, com gráfico demonstrando a diferença dos índices de refração entre núcleo (n_1) e casca (n_2) e a propagação da luz.	7
Figura 2: Fibra óptica com perfil de índices tipo gradual. Ilustração da modificação dos índices de refração entre o núcleo e a casca, e a propagação da luz.	8
Figura 3: Cone de aceitação de uma fibra óptica imersa no ar.	9
Figura 4: Arranjo de um sensor extrínseco genérico, onde são observadas duas fibras ópticas alinhadas a um modulador que oscila conforme varia o sinal proveniente do ambiente, influenciando na intensidade de luz transmitida entre as fibras.	12
Figura 5: Arranjo simplificado de um sensor intrínseco genérico, onde apenas uma fibra óptica é observada. O sinal proveniente do ambiente atua diretamente sobre a fibra.	13
Figura 6: Esquema ilustrativo do bloqueio gradual exercido pela lâmina sobre a fibra de coleta.	22
Figura 7: Representação do eclipse, em cinza, sobre o núcleo da fibra óptica.	23
Figura 8: Detalhe da terminação mecânica acrescentada à extremidade das fibras ópticas.	25
Figura 9: Atuador eletromecânico com lâmina de aço acoplada. Alto-falante com diâmetro de 55 mm, impedância de 8Ω e potência máxima de 250 mW.	26
Figura 10: LED escolhido para compor o dispositivo sensor, montado em um suporte dissipador de calor	27
Figura 11: Conexão da fibra de coleta com o fotodetector.	28
Figura 12: Etapa de montagem do sensor com o (a) alinhamento das fibras de emissão e coleta e (b) posicionamento da lâmina acoplada ao atuador eletromecânico entre as fibras.	30
Figura 13: Visão geral do sensor com (A) diagrama ilustrativo do sensor a fibra óptica desenvolvido e (B) montagem física experimental. a) atuador eletromecânico com lâmina acoplada, b) gerador de sinais, c) detector de silício, d) osciloscópio, e) fonte CC, f) LED, g) fibra óptica de emissão e h) fibra óptica de coleta.	32

Figura 14: Curva de resposta do sensor gerada analiticamente por meio das equações 2 e 3. A reta corresponde ao ajuste linear para $0,21 \geq a/\phi \leq 0,79$.	35
Figura 15: Desvio da linearidade calculado analiticamente pela equação 4.	35
Figura 16: Medida do espectro de emissão do LED utilizado neste trabalho.	36
Figura 17: Eficiência de acoplamento de luz em função da distância entre fibras, para fibra com núcleo de $50 \mu\text{m}$. A linha cheia corresponde ao ajuste teórico segundo equação 4.	38
Figura 18: Eficiência de acoplamento de luz em função da distância entre fibras, para fibra com núcleo de $100 \mu\text{m}$. A linha cheia corresponde ao ajuste teórico segundo equação 4.	39
Figura 19: Eficiência de acoplamento de luz em função da distância entre fibras, para fibra com núcleo de $200 \mu\text{m}$. A linha cheia corresponde ao ajuste teórico segundo equação 4.	40
Figura 20: Curva de resposta do sensor em função do eclipsamento gradual do núcleo da fibra de coleta. Sensor construído com fibras de $50 \mu\text{m}$, com ajuste teórico conforme equação 2.	41
Figura 21: Curva de resposta para o sensor construído com fibras de $50 \mu\text{m}$ de diâmetro de núcleo com ajuste na região linear de resposta.	42
Figura 22: Curva de resposta do sensor em função do eclipsamento gradual do núcleo da fibra de coleta. Sensor equipado com fibras de $100 \mu\text{m}$, com ajuste teórico conforme equação 2.	43
Figura 23: Curva de resposta para o sensor construído com fibras de $100 \mu\text{m}$ de diâmetro de núcleo com ajuste na região linear de resposta.	44
Figura 24: Curva de resposta do sensor em função do eclipsamento gradual do núcleo da fibra de coleta. Sensor equipado com fibras de $200 \mu\text{m}$, com ajuste teórico conforme equação 2.	45
Figura 25: Curva de resposta para o sensor montado com fibras de $200 \mu\text{m}$ de diâmetro de núcleo com ajuste na região linear de resposta.	46
Figura 26: Amplitude do sinal acoplado pela fibra de coleta para cada frequência aplicada no atuador eletromecânico. ($\phi=50 \mu\text{m}$)	47
Figura 27: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 10 Hz . ($\phi=50 \mu\text{m}$)	48

Figura 28: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 50 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	49
Figura 29: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 100 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	49
Figura 30: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 150 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	50
Figura 31: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 200 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	50
Figura 32: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 250 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	51
Figura 33: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 300 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	51
Figura 34: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 350 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	52
Figura 35: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 400 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	52
Figura 36: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 450 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	53
Figura 37: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 500 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	53
Figura 38: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 550 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	54
Figura 39: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 600 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	54
Figura 40: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 650 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	55
Figura 41: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 700 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)	55
Figura 42: Contagem da quantidade de harmônicas superiores à freqüência de excitação, presentes no sinal de saída do sensor, para cada freqüência de excitação testada. ($\phi=50\mu\text{m}$)	56

Figura 43: Contagem da quantidade de harmônicas superiores à frequência de excitação, presentes no sinal de saída do sensor, para cada frequência de excitação testada. ($\phi=100\mu\text{m}$).	57
Figura 44: Contagem da quantidade de harmônicas superiores à frequência de excitação, presentes no sinal de saída do sensor, para cada frequência de excitação testada. ($\phi=200\mu\text{m}$).	57
Figura 45: Amplitude do sinal acoplado pela fibra de coleta para cada frequência aplicada no atuador eletromecânico. ($\phi=100\mu\text{m}$)	72
Figura 46: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 10 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)	73
Figura 47: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 50 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)	74
Figura 48: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 100 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)	74
Figura 49: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 150 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)	75
Figura 50: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 200 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)	75
Figura 51: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 250 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)	76
Figura 52: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 300 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)	76
Figura 53: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 350 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)	77
Figura 54: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 400 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)	77
Figura 55: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 450 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)	78
Figura 56: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 500 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)	78
Figura 57: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 550 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)	79

Figura 58: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 600 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$).....	79
Figura 59: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 650 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$).....	80
Figura 60: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 700 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$).....	80
Figura 61: Amplitude do sinal acoplado pela fibra de coleta para cada freqüência aplicada no atuador eletromecânico. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	81
Figura 62: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 10 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	82
Figura 63: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 50 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	83
Figura 64: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 100 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	83
Figura 65: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 150 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	84
Figura 66: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 200 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	84
Figura 67: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 250 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	85
Figura 68: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 300 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	85
Figura 69: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 350 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	86
Figura 70: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 400 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	86
Figura 71: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 450 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	87
Figura 72: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 500 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	87
Figura 73: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 550 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$).....	88

- Figura 74: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 600 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)..... 88
- Figura 75: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 650 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)..... 89
- Figura 76: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 700 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)..... 89

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

AN – abertura numérica;

FFT – fast fourier transform;

FWHM – full width at half maximum

GaAs – arseneto de gálio;

He-Ne – hélio e Neônio;

LASER – light amplification by stimulated emission of radiation;

LED – light emitting diode;

OEM – original equipment manufacturer.

nm – nanometro;

μm – micrometro;

mg – miligrama;

mm^2 – milímetros quadrados

ϕ - Letra Grega fi, utilizada para representar o diâmetro da fibra óptica

δ - Letra Grega delta, utilizada para representar o desvio da linearidade

Hz – hertz;

dB – decibel;

mV – milivolt;

mm – milímetro.

Sumário

1.	Introdução	2
2	Objetivo	5
3	Revisão de Literatura	7
3.1	Fibras Ópticas	7
3.1.1	Classificação das fibras ópticas	9
3.1.2	Vantagens da fibra óptica sobre condutores metálicos.....	10
3.1.3	Classificação dos sensores a fibra óptica	12
3.2	Fontes de luz	13
3.2.1	LASER	14
3.2.2	Lasers Semicondutores	15
3.2.3	LED	15
3.3	Detectores ópticos	16
3.3.1	Detectores quânticos	16
3.3.2	Detectores térmicos	17
3.4	Sensores de vibração a fibra óptica	17
3.5	Aplicabilidade na Engenharia Biomédica	19
4	Material e Métodos.....	22
4.1	Metodologia analítica	22
4.2	Configuração do sensor	24
4.3	Dispositivo modulador de intensidade.....	25
4.4	Fonte de luz	26
4.5	Fotodetector	27
4.6	Caracterização do sensor	29
4.7	Captura e tratamento do sinal.....	31
4.8	Visão geral do arranjo experimental.....	31
5	Resultados	34
5.1	Caracterização analítica.....	34
5.2	Caracterização da fonte de luz	36
5.3	Caracterização da eficiência de acoplamento de luz entre fibras	37
5.4	Caracterização experimental do sensor proposto.....	40
5.5	Medidas de frequência de vibração	46
6	Discussão.....	59

7 Conclusão	64
Referências	66
Anexos	Erro! Indicador não definido.
Anexo A	72
Anexo B	81

1 Introdução

Desde o início da civilização humana, a instrumentação e as medições representam um importante papel na ciência, indústria, comércio, defesa, segurança, saúde e proteção ao meio ambiente, entre outros. O campo de medições está indubitavelmente envolvido com o gênero humano, e não há razões para assumir que esta evolução caminhe para uma estagnação. **(1)**

Os campos de medidas, de instrumentação e em particular o desenvolvimento de sensores se destacam pela rápida expansão nos últimos anos. Com a chegada do século XXI, a necessidade de sensores de maior qualidade integrados a sofisticados sistemas de medidas e instrumentação, é evidente. Em paralelo com o desenvolvimento de sensores baseados em microeletrônica, os baseados em técnicas ópticas se expandiram significativamente nos últimos anos, particularmente com o desenvolvimento e a incorporação das fibras ópticas. **(2)**

A óptica aplicada na engenharia tem sido uma importante ferramenta para resolução de problemas e conseqüentemente uma área em constante desenvolvimento.

As aplicações da óptica são inúmeras. Como exemplos, têm-se as aplicações em sistemas de armazenamento e processamento de informações, transmissão de dados a longas distâncias com elevadas taxas de transmissão, métodos de diagnóstico e sensores, entre outras. **(3)**

Uma das aplicações da óptica que vem avançando tecnologicamente em velocidade acelerada são os sensores ópticos.

Os elementos sensores são responsáveis pela transformação da energia, fazendo papel fundamental para o desenvolvimento do controle sobre todo e qualquer sistema.

Dentre as classes de sensores ópticos, os sensores que utilizam a tecnologia de fibras ópticas se destacam por suas diversas vantagens. **(4)** Esses sensores podem possuir diferentes configurações de acordo com a aplicação de interesse, podendo ser empregados para medir vibração, deslocamentos, deformação mecânica, posição, pressão, aceleração, rotação, nível, radiação ionizante, campo

elétrico e magnético, campo acústico, corrente elétrica, tensão elétrica, temperatura, dentre outras. **(5)**

O desenvolvimento da tecnologia de fibras ópticas foi impulsionado pelas aplicações em telecomunicações que conseqüentemente contribuiu para o desenvolvimento de sensores com esta tecnologia. **(6)**

A disponibilidade de fibras de sílica com baixa perda de sinal conduziu a uma revolução não apenas no campo de fibras ópticas para comunicação, mas também no campo de sensores a fibras ópticas que podem ser utilizados adequadamente como uma ferramenta para medidas de precisão. **(7)**

Após pouco mais de trinta anos do primeiro trabalho envolvendo fibras ópticas em sensores, diversas idéias foram propostas e muitas técnicas foram desenvolvidas para as mais variadas aplicações. **(5)**

Embora hoje se encontre muitos sensores comercialmente disponíveis, estes compõem um pequeno grupo de técnicas que obtiveram sucesso.

As fibras ópticas oferecem muitas vantagens em relação às técnicas convencionais no que tange às aplicações em sensoriamento. Dentre elas estão velocidade mais rápida de operação, sem contato, não destrutivo, **(8)** imunidade a interferências eletromagnéticas, tamanho reduzido, possibilidade de aplicação em ambientes hostis, com alta ou baixa temperatura e embutidos em estruturas, além da possibilidade de multiplexar diversos sensores, baixo custo em dispositivos de alta performance, capacidades multifuncionais e longas distâncias entre ponto de medida e ponto de leitura. **(9, 10)**

Sensores a fibra óptica oferecem imunidade à interferência eletromagnética e inerente isolação elétrica, o que representa vantagens sobre as soluções eletromecânicas, onde ruídos, alta voltagem e alta temperatura são problemas. Além da possibilidade de serem instalados em áreas previamente inacessíveis, devido ao seu tamanho reduzido e à flexibilidade da fibra. Assim, eles possuem grande potencial para uso em maquinário de alta rotação, biomedicina e aplicações que requerem sensoriamento remoto como em ambientes de alta temperatura ou radiativos. **(11)**

2 Objetivo

Este estudo tem por objetivo desenvolver e caracterizar um sensor de vibração a fibra óptica baseado no princípio de modulação em espaço livre do acoplamento de radiação óptica entre fibras ópticas, utilizando uma lâmina livre para se movimentar perpendicularmente ao eixo das fibras.

3 Revisão de Literatura

3.1 Fibras Ópticas

A fibra óptica é um meio por onde radiações luminosas são guiadas e transmitidas até um destino. Seu desenvolvimento teve início nos anos 1960, visando aplicações em endoscópios (6) e avançou brutalmente até os dias atuais, em que é possível aplicá-las nos mais variados projetos inclusive em sistemas de transmissão de dados em longas distâncias sem perdas significativas de sinal.

Ela é composta basicamente por um núcleo de material dielétrico e por uma casca de material dielétrico com índice de refração ligeiramente inferior ao do núcleo. Como ilustrado na Figura 1, em corte longitudinal identificando casca, núcleo e o gráfico do perfil de índices de refração da fibra óptica. (12, 2)

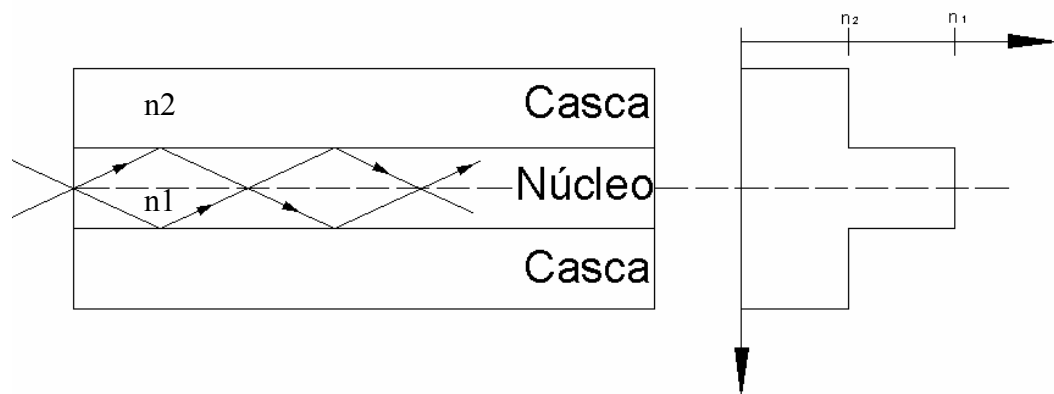


Figura 1: Estrutura básica de uma fibra óptica de perfil em degrau, com gráfico demonstrando a diferença dos índices de refração entre núcleo (n_1) e casca (n_2) e a propagação da luz.

A diferença do índice de refração do núcleo com relação à casca pode ser conseguida usando-se materiais dielétricos distintos ou através de dopagens controladas com materiais semicondutores. A variação do índice de refração pode ser gradual ou descontínuo, originando diferentes formatos de perfis de índices. Por exemplo, a Figura 1 exhibe uma fibra com perfil de índices descontínuo do tipo degrau, ou seja, tanto o núcleo quanto a casca possuem índices de refração uniformes porém diferentes, por outro lado poderíamos ter um núcleo com índice de

refração não uniforme ou gradual, (13) como ilustrado na Figura 2, onde o núcleo apresenta um maior índice de refração no centro e uma redução gradual até as bordas.

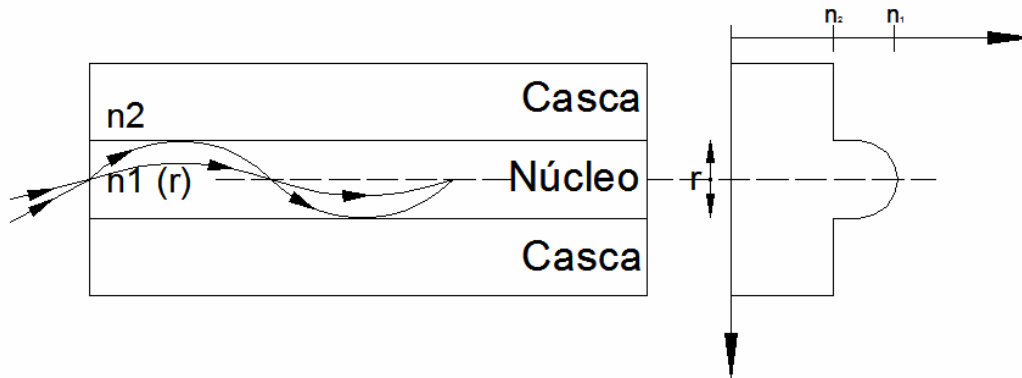


Figura 2: Fibra óptica com perfil de índices tipo gradual. Ilustração da modificação dos índices de refração entre o núcleo e a casca, e a propagação da luz.

A propagação da luz no interior de uma fibra óptica pode ser determinada pelos fenômenos de reflexão e refração. A refração no interior da fibra óptica ocorre na passagem do raio de luz da região do núcleo (n_1) para a região da casca (n_2). Porém existe uma situação limite para a refração em que um raio incidente com um ângulo menor que 90° , conhecido como ângulo crítico, implica em um raio refratado que se propaga paralelamente na interface entre os dois dielétricos. Qualquer raio incidente com um ângulo superior ao ângulo crítico não será mais refratado, ocorrendo então a reflexão total. Esse efeito de reflexão interna total é o mecanismo básico de propagação da luz em fibras ópticas.

Existe um ângulo de incidência limite para o acoplamento de luz na fibra óptica, acima do qual os raios não satisfazem as condições de reflexão interna total, portanto, não são transmitidos. Esse ângulo é conhecido como ângulo de aceitação da fibra, conforme ilustrado na Figura 3 em que observa-se que os raios com ângulos menores que θ_a são acoplados e guiados com reflexão interna total, e os raios com ângulos maiores que θ_a são acoplados porém refratados e então desacoplados da fibra óptica.

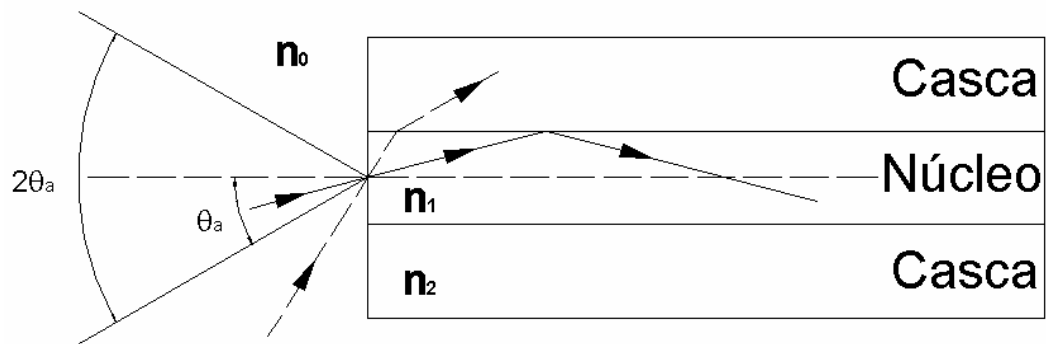


Figura 3: Cone de aceitação de uma fibra óptica imersa no ar.

A partir da noção de ângulo de aceitação é definido um importante parâmetro de uma fibra óptica que é a sua abertura numérica (AN), expressa por:

$$AN = \text{sen}\theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$

A abertura numérica de uma fibra óptica é muito útil para medir sua capacidade de captar e transmitir luz, independentemente do diâmetro do núcleo da fibra óptica.

As características de transmissão de luz compõem o parâmetro de classificação das fibras ópticas, sendo os mais importantes o perfil de índices de refração e a capacidade de guiar um ou vários modos de propagação.

3.1.1 Classificação das fibras ópticas

Basicamente, as fibras são classificadas em três diferentes grupos:

- **Multimodo ou índice degrau:** as fibras ópticas pertencentes a este grupo são largamente utilizadas em diferentes áreas devido, principalmente, a simplicidade na fabricação, facilidade operacional, grande capacidade de

coletar luz, possibilidade de utilizar fontes luminosas de baixa coerência e por requerem pouca precisão nos conectores.

- **Multimodo índice gradual:** as fibras ópticas pertencentes a este grupo apresentam complexidade intermediária na fabricação, conectividade simples e alta capacidade de transmissão, além de dimensões menores que as fibras índice degrau, porém com menor capacidade para coletar luz.
- **Monomodo:** as fibras ópticas pertencentes a este grupo apresentam dimensões pequenas, conectividade complexa, alto custo. Porém apresentam uma capacidade de transmissão superior às fibras multimodo, por transmitir um único modo.

3.1.2 Vantagens da fibra óptica sobre condutores metálicos

O condutor metálico é comumente utilizado em sensores convencionais. Porém, quando comparado com a tecnologia de fibra óptica, o condutor apresenta deficiências que muitas vezes inviabilizam sua aplicação, tornando ainda mais interessante o desenvolvimento de novas aplicações envolvendo fibras ópticas.

Os fótons caracterizam a principal vantagem que as fibras ópticas levam em relação aos condutores metálicos.

O fluxo de elétrons pelo condutor causa o aquecimento do condutor, o que pode resultar em instabilidade térmica do dispositivo. Adicionalmente, o campo magnético gerado pelo fluxo de elétrons se estende para além do limites do condutor e pode criar correntes indesejadas e influenciar o movimento dos elétrons em outros fios próximos.

Outra característica dos fios é a possibilidade de atuarem como antenas não desejadas, onde a radiação eletromagnética que passa pelo fio pode estimular um fluxo de elétrons, além de atrair descargas elétricas que, sem dúvida, seriam desastrosas para o sistema. **(14)**

Os fótons não apresentam nenhuma dessas condições associadas com sua implementação em fibras ópticas, principalmente por não criarem um campo elétrico ou magnético, eliminando efetivamente o efeito de interferência. **(16)**

O efeito de interferência que existe entre condutores metálicos separados ocorre também no uso de um único condutor para enviar sinais em ambas as direções ao mesmo tempo. Esse fenômeno é facilmente descartado com o uso da tecnologia de fibras ópticas, devido à falta de interação entre fótons adjacentes conduzidos através da fibra, na mesma direção ou em direções opostas. **(11)**

Como um fóton não interfere em outro, em condições normais, torna-se possível combinar um extraordinário número de sinais em uma mesma fibra. Na realidade, comparando-se a fibra com um condutor metálico, o potencial para transmissão de informação na fibra é milhares de vezes maior. Esta tecnologia é chamada de multiplexação por divisão de comprimentos de onda. **(16, 6)**

Como nenhum sinal elétrico é transportado pela fibra, esta se torna segura em aplicações onde gases explosivos ou combustíveis estão presentes e também em ambientes onde o campo magnético gerado pelo condutor metálico pode induzir erros nas medidas, como, por exemplo, em equipamentos que monitoram o campo magnético gerado por um corpo onde o controle de interferências eletromagnéticas deve ser rigoroso. **(17)**

Qualquer condutor metálico tem potencial para produzir uma faísca, até mesmo com um avançado sistema de segurança. No entanto, esse potencial real é eliminado com o uso de fibras ópticas.

Outro ponto onde as fibras ópticas levam vantagem é em relação ao peso do sistema. Os condutores metálicos, geralmente, são acondicionados em cabos com dezenas, centenas, ou até milhares de outros condutores, **(15)** como podem ser encontrados em diversas aplicações, barcos, submarinos, aviões, automóveis e em qualquer lugar onde comunicações ou dados são trocados. Cabos contendo um grande número de fios contribuem para o excesso de peso e volume na aplicação. Em algumas aplicações, peso e volume não são críticos, como em linhas de comunicação subterrâneas. No entanto, para diversas outras aplicações, peso e volume podem ser extremamente decisivos, e minimizá-los torna-se um fator crítico e fundamental, em que as fibras ópticas compõem a opção mais atraente para esta tarefa.

3.1.3 Classificação dos sensores a fibra óptica

Os sensores a fibra óptica podem ser classificados basicamente em dois grandes grupos, sensores extrínsecos e intrínsecos. **(18)**

Sensores extrínsecos

Nos sensores classificados como extrínsecos, todo o efeito exercido sobre a radiação ocorre fora da fibra óptica, isto é, a fibra óptica é usada apenas como canal óptico de transporte da radiação até o local de monitoração. **(16, 6)**

Um esquema de sensor extrínseco pode ser visto na Figura 4.

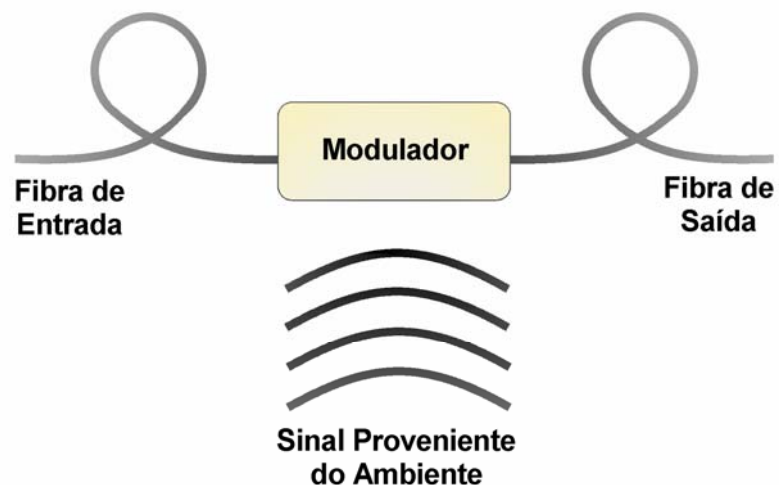


Figura 4: Arranjo de um sensor extrínseco genérico, onde são observadas duas fibras ópticas alinhadas a um modulador que oscila conforme varia o sinal proveniente do ambiente, influenciando na intensidade de luz transmitida entre as fibras.

Sensores intrínsecos

Nos sensores intrínsecos, todo o efeito exercido sobre a radiação ocorre quando esta está sendo guiada no interior da fibra óptica, alterando uma ou mais propriedades ópticas da radiação guiada. **(16, 6)**

Um esquema de sensor intrínseco pode ser visto na Figura 5.

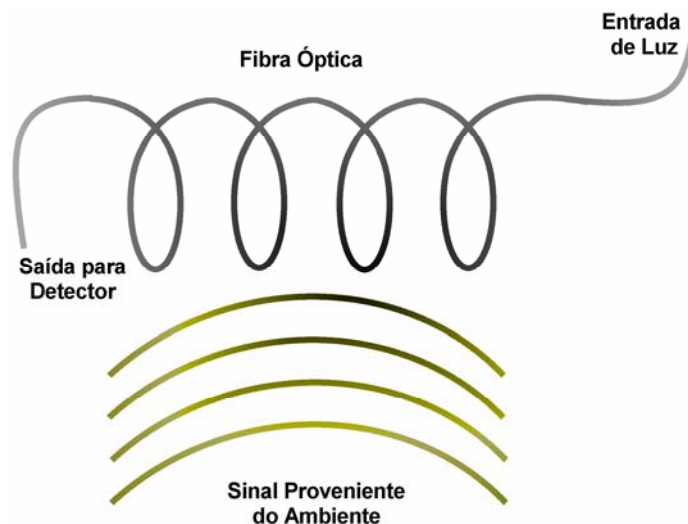


Figura 5: Arranjo simplificado de um sensor intrínseco genérico, onde apenas uma fibra óptica é observada. O sinal proveniente do ambiente atua diretamente sobre a fibra.

Além das fibras ópticas, outros componentes são necessários para completar o sistema sensor. Estes componentes podem ser divididos em dois grupos, os complementos passivos, como conectores e acopladores, e os complementos ativos como os lasers, LEDs e detectores, entre outros. A montagem desses sistemas faz uso ainda de equipamentos e de ferramentas especiais como clivadores, desencapadores, politrizes e outros. **(2)**

3.2 Fontes de luz

O desenvolvimento da tecnologia laser abriu novas perspectivas aos pesquisadores da área de ótica, possibilitando a criação de dispositivos e circuitos ópticos que até então só eram possíveis na imaginação.

O sucesso no desenvolvimento de fontes de luz semicondutoras tem sido uma das chaves que permitiu a introdução da tecnologia dos sistemas de comunicação óptica, tocadores de disco compacto, leitores de códigos de barras, impressoras a laser, e uma variedade de outros dispositivos que afetam nossas vidas.

Para sensores por fibras ópticas, geralmente são utilizadas fontes de luz que emitem comprimentos de onda curtos operando próximo da região visível do espectro, na região do vermelho. Essas fontes de luz são de interesse por aumentar

a sensibilidade de certas classes de sensores em que sinais visíveis são de interesse. **(19)**

3.2.1 LASER

Lasers são dispositivos que produzem feixes intensos de luz com propriedades especiais, sendo elas a monocromaticidade, a coerência e a colimação. Devido a essas propriedades, os lasers podem ser utilizados em uma grande variedade de aplicações, incluindo os sensores ópticos.

O princípio básico de operação do laser foi apresentado por Charles Townes e Arthur Schawlow do Laboratório Bell Telephone em 1958, **(20)** e o primeiro laser atual, baseado em um cristal de rubi, foi demonstrado em 1960 por Theodor Maiman no Hughes Research Laboratories. **(21, 22)** Desde então, literalmente milhares de lasers têm sido inventados, mas apenas um pequeno número encontrou aplicações práticas na ciência, na indústria, no comércio, e nas áreas militares. O laser He-Ne (o primeiro laser de onda contínua), o laser de diodo semicondutor, e lasers de íon refrigerados a ar encontraram muitas aplicações OEM (Original equipment manufacturer). Recentemente o uso de lasers de estado sólido bombeados por diodos em aplicações OEM tem crescido rapidamente. **(23)**

O termo “laser” é um acrônimo para *(L)ight (A)mplification by (S)timulated (E)mission of (R)adiation*. Para entender o laser, é necessário entender o significado destes termos.

O termo “*light*” é geralmente aceito como sendo uma radiação eletromagnética que varia em uma faixa de comprimentos de onda. O espectro visível varia de aproximadamente 400 até 700 nm. Os comprimentos de onda acima de 700 nm são considerados como infravermelho. Reciprocamente, abaixo de 400 nm são considerados ultravioleta. **(23)**

O termo “*amplification*” é empregado para representar o processo onde uma realimentação de fótons para a cavidade ressonante do laser resulta em um ganho de sinal sob condição de inversão de população no meio ativo.

Os termos “*stimulated emission of radiation*” são utilizados para definir o resultado do processo de amplificação onde a realimentação de fótons interage com

os átomos do meio ativo, sob condição de inversão de população, desencadeando o processo de emissão estimulada e amplificação óptica. A inversão de população, associada à emissão estimulada, resulta em uma liberação de grande volume de energia em forma de luz com as propriedades especiais do laser.

3.2.2 Lasers Semicondutores

Lasers semicondutores são construídos de maneira muito semelhante aos LEDs comuns. A maior diferença está na característica espectral da luz emitida, os LEDs emitem uma ampla faixa de comprimentos de onda, geralmente na ordem de 100 nm de largura de banda. Um laser semicondutor geralmente possui uma largura de banda bastante estreita, da ordem de unidades de nm.

Os mecanismos de emissão desses componentes também diferem entre si. Os lasers semicondutores emitem radiação através do processo de emissão estimulada, enquanto que os LEDs emitem radiação por emissão espontânea, o que resulta em diferença na potência óptica emitida. Em comparação com outros tipos de lasers, os semicondutores possuem grandes vantagens: tamanho reduzido, alta eficiência, possibilidade de integração com componentes eletrônicos e facilidade de bombeio e modulação por injeção de corrente elétrica. Porém, a banda espectral da linha de um laser semicondutor é mais larga que a linha de outros lasers. **(24)**

3.2.3 LED

Para a maioria dos sensores ópticos as fontes de luz baseadas em semicondutores oferecem vantagens em relação a consumo de energia, confiabilidade, tamanho e custo, fatores estes que freqüentemente impossibilitam a seleção de fontes de luz alternativas. Esses semicondutores são chamados de diodos emissores de luz ou, simplesmente, LED (do inglês *Light Emitting Diode*) e podem emitir luz nas regiões visível, infravermelha ou ultravioleta. **(25)**

Existem dois tipos básicos de LEDs que são comumente utilizados em sensores a fibra óptica: o diodo com emissão de superfície e o diodo com emissão lateral. Tipicamente, estes dispositivos são usados associados com fibras multimodo de grande diâmetro de núcleo. Um segundo tipo de diodo emissor de luz, com

emissão lateral, confina a radiação luminosa em uma região do dispositivo que funciona como guia de luz. Algumas das características dos diodos emissores de luz que são de interesse para sensores ópticos incluem comprimento de coerência muito baixo, freqüentemente resultando em uma banda larga de emissão, na ordem de 40 a 80 nm. **(19)**

Quando um diodo é polarizado diretamente, uma grande quantidade de portadores atravessa a região de depleção na qual, alguns deles, recombina-se com átomos ionizados. Nesse processo, os elétrons perdem energia na forma de radiação. Nos diodos de silício ou germânio, essa radiação é liberada principalmente na forma de calor, mas, em compostos de arseneto de gálio (GaAs), existe a liberação de energia na forma de luz.

Esse fenômeno ocorre principalmente quando o tamanho da banda proibida é igual ao comprimento das ondas de luz, favorecendo a emissão de fótons. **(25)**

3.3 Detectores ópticos

Detectores de luz podem ser divididos em duas categorias básicas. Os detectores quânticos, que convertem a radiação de entrada diretamente em um elétron e processam a corrente resultante através de um circuito eletrônico, e os detectores térmicos que simplesmente absorvem a energia e operam pela medida da variação de temperatura como um termômetro. **(26)**

3.3.1 Detectores quânticos

Em todos os detectores quânticos, um fóton é absorvido e um elétron é liberado na estrutura com a energia do fóton. É importante reconhecer que semicondutores aparentam a propriedade básica de que elétrons existem apenas em certos níveis de energia. Se o dispositivo usado para detectar a radiação não permitir elétrons com energia do fóton incidente, o fóton poderá não ser absorvido, e não haverá sinal. Por outro lado, se o fóton carregar uma quantidade de energia que é “suportada” por um elétron no semicondutor, este poderá ser absorvido. Uma vez absorvido, o elétron move-se livremente dentro do dispositivo, sujeito a campos elétricos e outros efeitos. **(26)**

3.3.2 Detectores térmicos

Detectores térmicos operam pela absorção de radiação e medem o aumento de temperatura do detector com um termopar. Geralmente, a performance dos detectores térmicos é limitada pela disponibilidade de termopares com sensibilidade e capacidade de medir pequenas diferenças de temperaturas. **(26)**

Uma importante vantagem dos detectores térmicos é a ausência de relação entre o comprimento de onda da radiação absorvida e a resposta do detector. Toda energia absorvida causa uma resposta no detector, resultando em um dispositivo com resposta plana em uma ampla faixa espectral.

3.4 *Sensores de vibração a fibra óptica*

Os sensores a fibras ópticas devem seu desenvolvimento a dois dos mais importantes avanços que ocorreram nos anos 1960s, a demonstração prática do primeiro laser em 1960 **(20, 21)** e as fibras ópticas com baixo índice de perdas em 1966. Esses dois avanços partiram de dois trabalhos desenvolvidos anteriormente, o maser, **(22)** predecessor do laser, e as fibras de baixa transparência e comprimentos curtos até então utilizadas em endoscópios para aplicações médicas e industriais. Já na década de 1970 aconteceram os primeiros experimentos com fibras ópticas de baixa perda para aplicações em sensores. **(6)** A partir desse momento a área de sensores e medidas despertou interesse de muitos grupos de pesquisa que contribuíram para sua evolução.

Este campo se encontra em pleno crescimento e se desenvolveu expressivamente desde sua criação. O principal objetivo das pesquisas nesta área é produzir técnicas baseadas em fibras ópticas para sensoriamento que possam suprir a necessidade de monitoramento em determinados ambientes onde os sensores convencionais não dão suporte. **(6, 27)**

O grande interesse em sistemas de medidas de vibração e deslocamento empregando fibras ópticas está baseado em sua simplicidade, tamanho reduzido, mobilidade, capacidade para trabalhar em uma larga faixa de frequências, alta resolução para detecção de deslocamentos e capacidade para executar a medida

sem ser necessário contato ou sem afetar o sistema vibrante. **(16)** Recentemente as fibras ópticas têm sido empregadas como sensores para medidas de amplitude de vibração. **(28)**

Embora um grande número de sensores a fibra óptica, como *fibre Bragg gratings* e sensores *Fabry-Perot* a fibra óptica, ofereçam excelentes capacidades para medidas, estes sistemas requerem hardware sofisticado para processamento de sinal e geralmente de custo elevado. Frequentemente, a alta resolução e sofisticada capacidade de medidas realizada por estes sensores são desnecessárias e, como tal, outros métodos baseados em fibras ópticas mais simples e de menor custo podem oferecer uma alternativa viável para determinadas aplicações. **(15)**

Os sensores extrínsecos a fibra óptica para medidas de deslocamento são considerados os sensores mais simples para este tipo de medida, porém são os mais utilizados. Podem ser utilizados como sensores de deslocamento, vibração ou proximidade. Neste sensor a luz é transmitida por um conjunto de fibras inseridas em um cabo. Os principais fatores que limitam a resolução em faixas nanométricas são as flutuações, principalmente nas variações da intensidade da fonte de luz e o nível de ruído. Um modo para minimizar as flutuações é a utilização de uma tensão de referência de alta estabilidade. **(18)**

Entre os sensores por fibras ópticas reportados na literatura, os sensores baseados em modulação de intensidade foram os primeiros e mais básicos tipos de sensores por fibra óptica aplicados para monitorar estruturas. Em aplicações onde o parâmetro de medida de interesse envolve apenas a aquisição de informações de frequências em estruturas vibrantes, os sistemas baseados em modulação de intensidade oferecem um excelente potencial para monitoramento. **(29)**

As vantagens dos sensores por fibras ópticas baseados em modulação da intensidade são a simplicidade na construção e a compatibilidade com a tecnologia de fibras multimodo. Em alguns casos a sensibilidade é reduzida para satisfazer essas vantagens. Porém, sensibilidade extrema não é importante para a maioria das aplicações, fazendo com que estes dispositivos se tornem competitivos frente a outros dispositivos existentes. Há um grande mercado em expansão para este tipo de sensor. **(30)**

Sensores por fibras ópticas para medir vibrações são promissores para vibrações incomuns em equipamentos ou ambientes especiais, como transformador de alta tensão, carro ou até mesmo equipamentos médicos, devido a este não ser

afetado por campos eletromagnéticos quando comparado com sensores de vibração baseados em princípios capacitivos ou piezoelétricos. **(31)**

Sensores de vibração podem ser úteis para monitorar a condição de um sistema, onde sobre-aquecimento ou vibração excessiva pode indicar carga excessiva, lubrificação inadequada, ou desgaste, **(32)** fornecendo informações sobre as variações que estiverem ocorrendo no sistema e também disponibilizar uma realimentação de sinal visando minimizar erros durante a tomada de decisão.

3.5 Aplicabilidade na Engenharia Biomédica

Os sensores representam componentes indispensáveis na grande maioria dos projetos. Sua função fundamental é alimentar o sistema com informações decisivas para o gerenciamento do processo. Essa necessidade de monitoramento exige informações adquiridas com rapidez e precisão sem gerar qualquer interferência no processo.

O rápido avanço da indústria microeletrônica possibilitou o desenvolvimento de uma variedade de novos sensores biomédicos. Este desenvolvimento deve-se ao uso de tecnologias originalmente desenvolvidas para outros propósitos. O progresso em sensores ópticos biomédicos se baseou nas fibras ópticas e dispositivos até então empregados em comunicação óptica. Os sensores acústicos e piezoelétricos surgiram a partir do desenvolvimento da tecnologia de rádio frequência em telecomunicações. Outros tipos de sensores biomédicos baseados em calorimetria, técnicas magnéticas, entre outras também foram afetados significativamente pelo desenvolvimento de áreas como a micromecânica e micro-eletrônica. **(33)**

Recentes avanços em óptica e eletrônica geraram pesquisa e desenvolvimento de muitos dispositivos biomédicos utilizando fibras ópticas. A utilidade da fibra óptica deve-se a fatores tais como a possibilidade de miniaturização, rápida velocidade e segurança. Dentre as aplicações dos sensores biomédicos a fibra óptica pode-se citar medidas de amplitude de vibração, pressão e diversos outros parâmetros físicos. **(34)**

Propriedades dos tecidos biológicos também podem ser analisadas utilizando sensores, como proposto por **Padula em 2006**, onde a viscoelasticidade de tecidos biológicos foi analisada objetivando diferenciar tecido normal de canceroso.

Utilizando um alto-falante para excitação e um sensor magnetoresistivo para medida de deslocamento foi possível diferenciar amostras com diferentes propriedades mecânicas. A variação da frequência de excitação produziu uma variação na amplitude do deslocamento do tecido permitindo a obtenção de conclusões sobre as propriedades mecânicas do tecido sob teste. **(35)**

Sinais biomecânicos foram avaliados por **Scilingo em 2005** utilizando sensores para detectar respiração e sinais de atividade motora. Mudanças na respiração foram detectadas satisfatoriamente por sensores piezoresistivos inseridos em um tecido, que envolveu regiões pré-determinadas do corpo do paciente, e comparados com sensores piezelétricos. A atividade motora foi avaliada também com sensores piezoresistivos inseridos em um tecido e comparada com a resposta de um eletrogoniômetro, demonstrando boa eficiência. **(36)**

Na medicina de reabilitação sensores ópticos podem ser empregados para avaliar dentre outras coisas o grau de liberdade no movimento dos membros do paciente. As informações obtidas com esses sensores podem auxiliar os médicos a prescrever melhor o tratamento nos casos de danos neuro-musculares. **Jensen em 1989** estudou a resposta de um sensor reflexivo a fibra óptica sensível à variação da distância e ângulo da superfície de referência, com proposta de aplicação em medidas, como por exemplo, do grau de tremor em pacientes com doença de Parkinson. **(37)**

Veltink em 2004, empregou sensores para analisar a biomecânica do caminhar de um paciente. O autor acoplou dois sensores para medida de força e momento, com seis graus de liberdade, em um calçado. Com esta implementação poderá ser possível realizar uma análise biomecânica completa dos movimentos de um paciente durante atividades normais em casa e no trabalho. **(38)**

Além das aplicações diretas ao paciente, para análise biomecânica, os sensores podem ser aplicados de maneira indireta, ou seja, monitorando equipamentos hospitalares com o objetivo de informar possíveis desgastes ou funcionamento não adequado ou ainda aplicado em sistemas robóticos utilizados em procedimentos cirúrgicos.

4 Material e Métodos

4.1 Metodologia analítica

Na geometria proposta, duas fibras ópticas com o mesmo diâmetro de núcleo e com as alinhadas no mesmo eixo, e separadas por uma distância fixa, são fixadas em um suporte rígido. Entre as fibras é adicionada uma lâmina móvel que eclipsa o diâmetro de uma das fibras, Figura 6. Neste modelo, conforme a penetração da lâmina entre as fibras varia, varia também a área eclipsada, formando uma função de área por posição da lâmina.

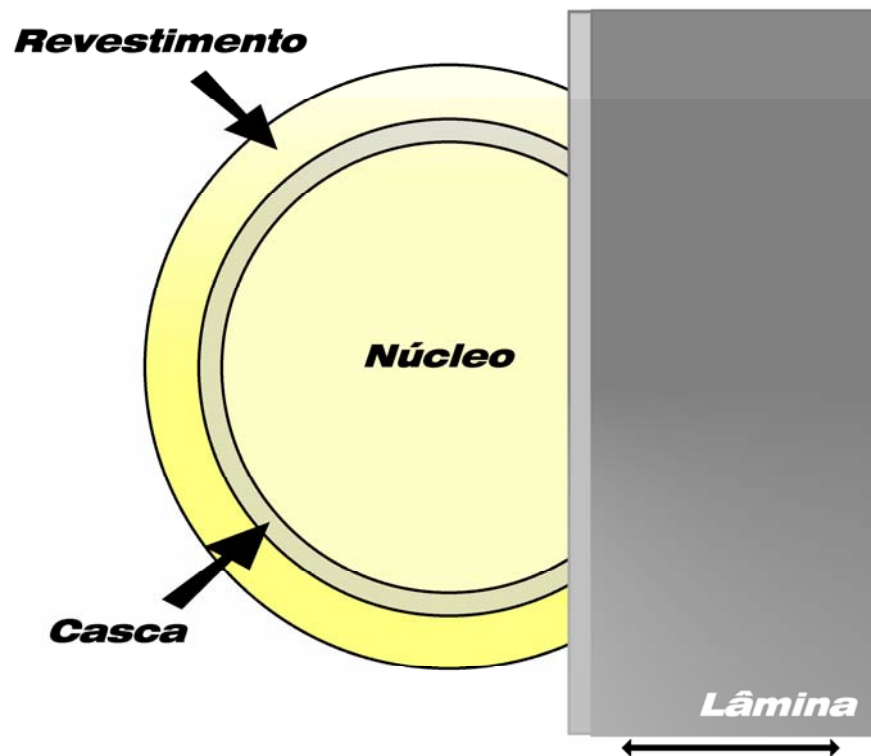


Figura 6: Esquema ilustrativo do bloqueio gradual exercido pela lâmina sobre a fibra de coleta.

Considerando o acoplamento da luz na fibra óptica, realizada por uma fonte de radiação que permite a incidência na fibra como uma onda plana, ou seja, há uma homogeneidade na distribuição de intensidade de luz por toda a área no núcleo, e ainda, com o advento do posicionamento variável de uma lâmina através de banco micrométrico sobre o núcleo da mesma, pode-se adotar a formação de eclipse crescente sobre a circunferência do guia de onda, como é mostrado na

Figura 6. A equação para o cálculo da área eclipsada pode ser escrita da seguinte forma: **(39)**

$$S = \frac{r^2}{2} [\alpha - \text{sen}(\alpha)] \quad (2)$$

em que α é dado em radianos.

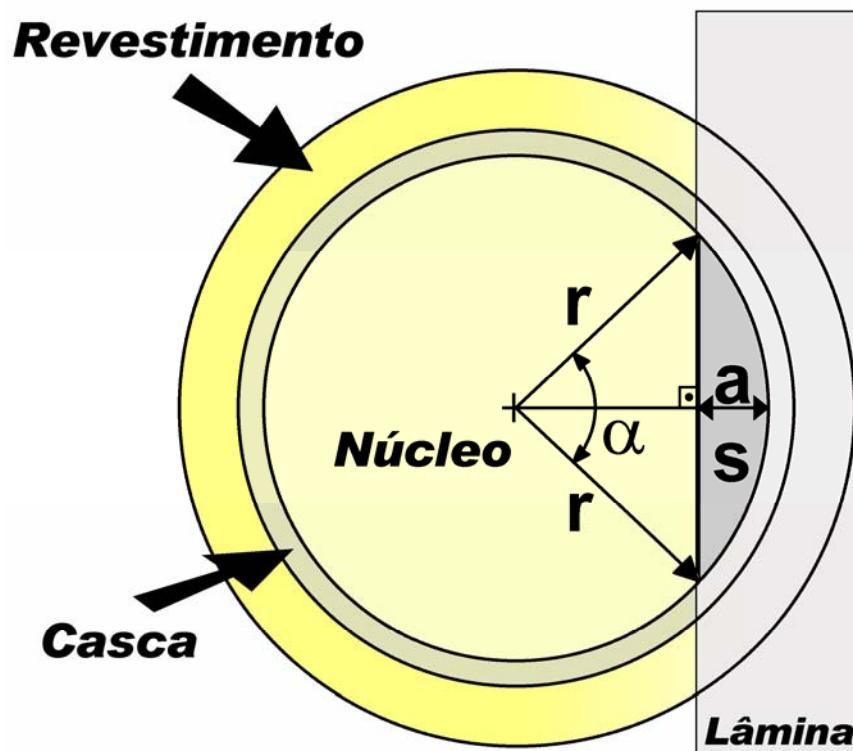


Figura 7: Representação do eclipse, em cinza, sobre o núcleo da fibra óptica.

Na Figura 7, pode-se notar que com o avanço da lâmina, o valor da cota “a” (posição da lâmina) aumenta, o que resulta também em um aumento do setor de área “S” (área eclipsada), acarretando assim uma diminuição do sinal junto ao fotodetector. O valor de “α” citado na equação (2) da área do setor sombreado inscrito na circunferência (núcleo da fibra óptica), trigonometricamente pode ser representado como:

$$\alpha = 2 \times \cos^{-1} \left(\frac{r - a}{r} \right), \quad (3)$$

onde r é o raio do núcleo da fibra e a é a posição da lâmina.

Substituindo a equação (3) na equação (2), obtém-se o valor da área S em função do avanço da lâmina junto ao núcleo da fibra óptica, ou seja, com o aumento da cota “ a ”, obtém-se como resultado a diminuição do sinal acoplado na outra extremidade da fibra óptica.

Foi realizada a simulação do deslocamento da lâmina e representado graficamente a fim de demonstrar a variação da intensidade de luz acoplada pela fibra de coleta em função da posição da lâmina. A partir dos resultados alcançados foram realizados também uma análise da região linear de resposta e o desvio da linearidade para todo o diâmetro da fibra.

4.2 Configuração do sensor

O dispositivo sensor foi constituído com duas fibras ópticas de mesmo diâmetro de núcleo dispostas no mesmo eixo com as faces alinhadas e separadas por uma distância determinada através de um estudo de eficiência do acoplamento de luz entre as fibras ópticas.

Foram preparados três pares de fibras ópticas de diferentes diâmetros de núcleo, porém com a mesma abertura numérica, para se avaliar a influência na resposta do sensor em função do diâmetro de núcleo da fibra óptica.

Foram escolhidas fibras ópticas multimodo fabricadas pela *Fiberguide Industries* de 50 μm , 100 μm e 200 μm de diâmetro de núcleo com abertura numérica de 0,22. Todas as fibras ópticas receberam terminais confeccionados em alumínio e foram inseridas em um conduíte de teflon[®] para promover uma maior resistência e proteção, conforme apresentado na Figura 8.



Figura 8: Detalhe da terminação mecânica acrescentada à extremidade das fibras ópticas.

A fibra emissora foi fixada em um suporte rígido e a fibra receptora foi fixada em um suporte com ajuste nas duas direções transversais ao longo-eixo da fibra. Este suporte foi fixado em uma base transladora, modelo 07TPD003 da marca Melles Griot, com curso total de deslocamento igual a 25000 μm e resolução de 10 μm .

4.3 Dispositivo modulador de intensidade

Como dispositivo modulador foi adotada uma lâmina de aço, com peso de 177,9 mg, espessura de 100 μm e apresentando uma borda com deformações irrelevantes.

A lâmina foi fixada em um atuador eletromecânico, (Figura 9) de modo que este exercesse uma vibração sobre a lâmina forçando-a um deslocamento controlado perpendicular ao eixo das fibras do sensor. O atuador eletromecânico escolhido foi um alto-falante com 55 mm de diâmetro, uma impedância de 8 Ω e potência máxima de 250 mW.



Figura 9: Atuador eletromecânico com lâmina de aço acoplada. Alto-falante com diâmetro de 55 mm, impedância de 8 Ω e potência máxima de 250 mW.

O conjunto lâmina-atuador foi posicionado perpendicular e a frente da fibra óptica receptora, com a borda da lâmina alinhada com o centro do núcleo das fibras. De modo que, com o deslocamento da lâmina, parte da radiação emitida pela fibra emissora fosse bloqueada, modulando a quantidade de luz acoplada na fibra coletora e conseqüentemente influenciando na intensidade do sinal medido pelo fotodetector.

4.4 Fonte de luz

Como fonte de luz optou-se por utilizar um LED devido a este se tratar de um dispositivo de custo mais baixo quando comparado com o laser e principalmente por disponibilizar uma boa potência óptica com opção de ajuste da intensidade, favorecendo os testes com fibras ópticas de diferentes diâmetros de núcleo. Além de possuir dimensões reduzidas.

O LED escolhido foi o modelo LUXEON III Star da Philips - Lumileds, com emissão espectral na região do vermelho, Figura 10.

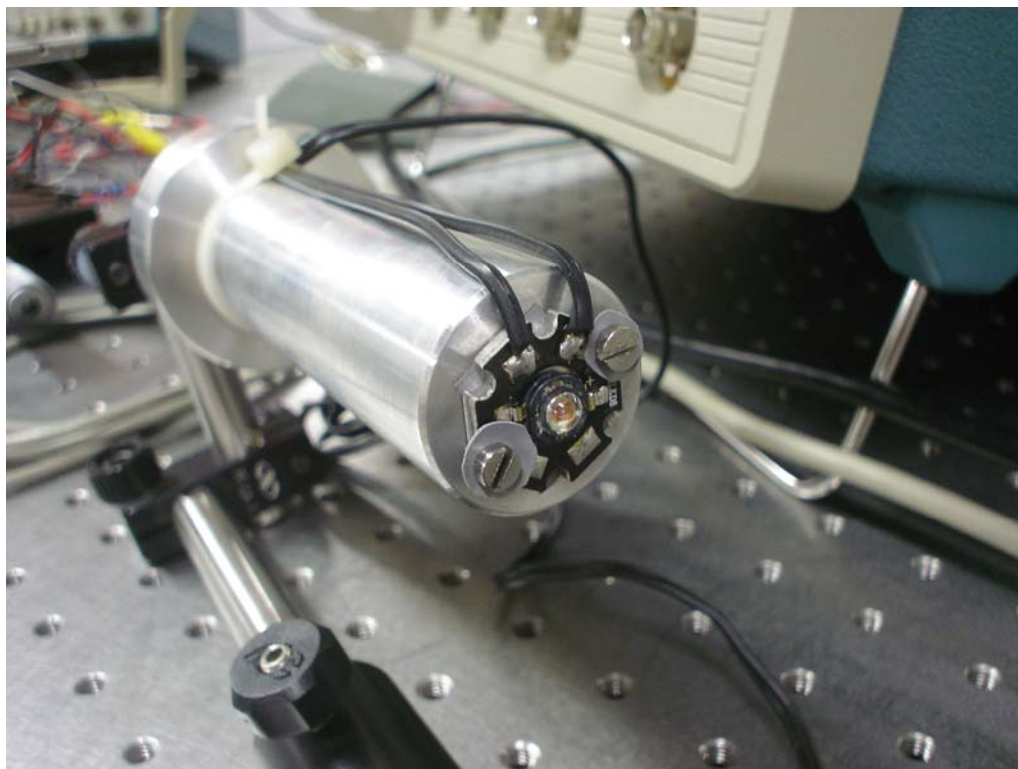


Figura 10: LED escolhido para compor o dispositivo sensor, montado em um suporte dissipador de calor .

O espectro de emissão do LED foi caracterizado utilizando-se um espectrômetro modelo 77702 da Oriel Instruments.

Foi acoplada ao LED uma lente fornecida pelo fabricante para reduzir o ângulo de divergência da radiação emitida. A radiação emitida pelo LED foi acoplada na extremidade distal da fibra óptica emissora. Para alimentação do LED foi utilizada uma fonte DC, da marca Tektronix, modelo CPS250, com recurso limitador de corrente para ajustar a intensidade luminosa do LED à região linear de resposta do detector.

4.5 Fotodetector

A fibra óptica receptora foi acoplada a um fotodetector de silício, modelo 13DSI007, com 10 mm^2 de área, da marca Melles Griot, para medida da intensidade do sinal acoplado. O fotodetector recebeu o acoplamento da fibra de coleta de maneira que apenas o sinal proveniente dessa fibra fosse acoplado. Na Figura 11

pode-se observar o acoplamento da fibra óptica no fotodetector. A interface mecânica entre a fibra e o fotodetector recebeu vedações para evitar interferência da luz ambiente. Foi assegurado que o sinal óptico enviado ao fotodetector se mantivesse dentro da faixa linear de trabalho do mesmo.

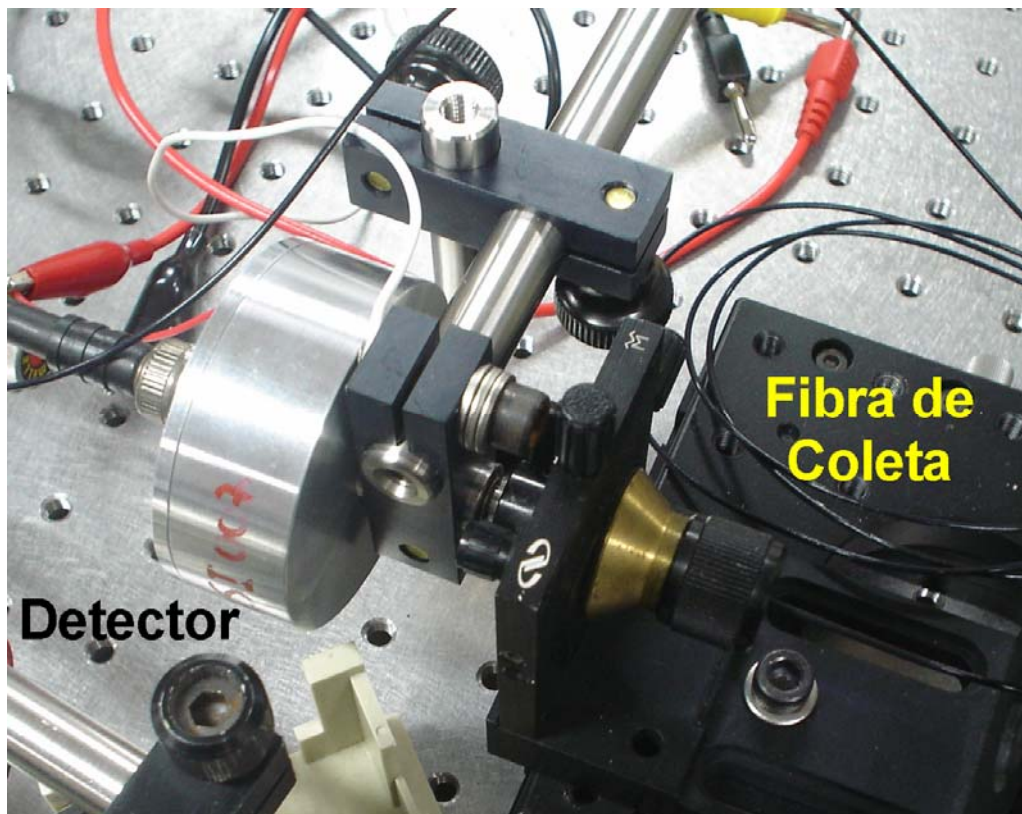


Figura 11: Conexão da fibra de coleta com o fotodetector.

O fotodetector foi conectado a um osciloscópio digital, modelo TDS 724C da marca Tektronix. O osciloscópio foi configurado para medir o nível de tensão, com recurso automatizado presente no instrumento, a fim de monitorar a dependência da intensidade de sinal de resposta do sensor com a interferência gradual de uma lâmina.

4.6 Caracterização do sensor

A distância entre a fibra óptica de emissão e a fibra óptica de recepção é um fator limitante para a eficiência no acoplamento de luz entre fibras. Quanto maior for a distância entre as fibras, menor será a intensidade de sinal acoplado pela fibra óptica de coleta. Porém se as fibras ópticas estiverem muito próximas, o alinhamento da lâmina torna-se crítico podendo influenciar negativamente no sinal coletado. Para cada par de fibras ópticas foi medida a eficiência de acoplamento da radiação óptica emitida pela fibra emissora em função da distância entre as fibras. A medida foi realizada simulando um deslocamento da fibra óptica receptora partindo da posição de contato entre as fibras ópticas considerada como zero e prosseguiu, em passos de 10 μm , até o sinal acoplado pela fibra receptora se extinguir. Na Figura 12 (a) é demonstrada a etapa de alinhamento entre as fibras de emissão e coleta. Para o alinhamento a fibra de coleta foi fixada em uma região da base com ajustes nos três eixos e a fibra de emissão foi fixada em uma região rígida da base. Foi deixado um espaço vazio entre as fibras onde será adicionada a lâmina, conforme Figura 12 (b).

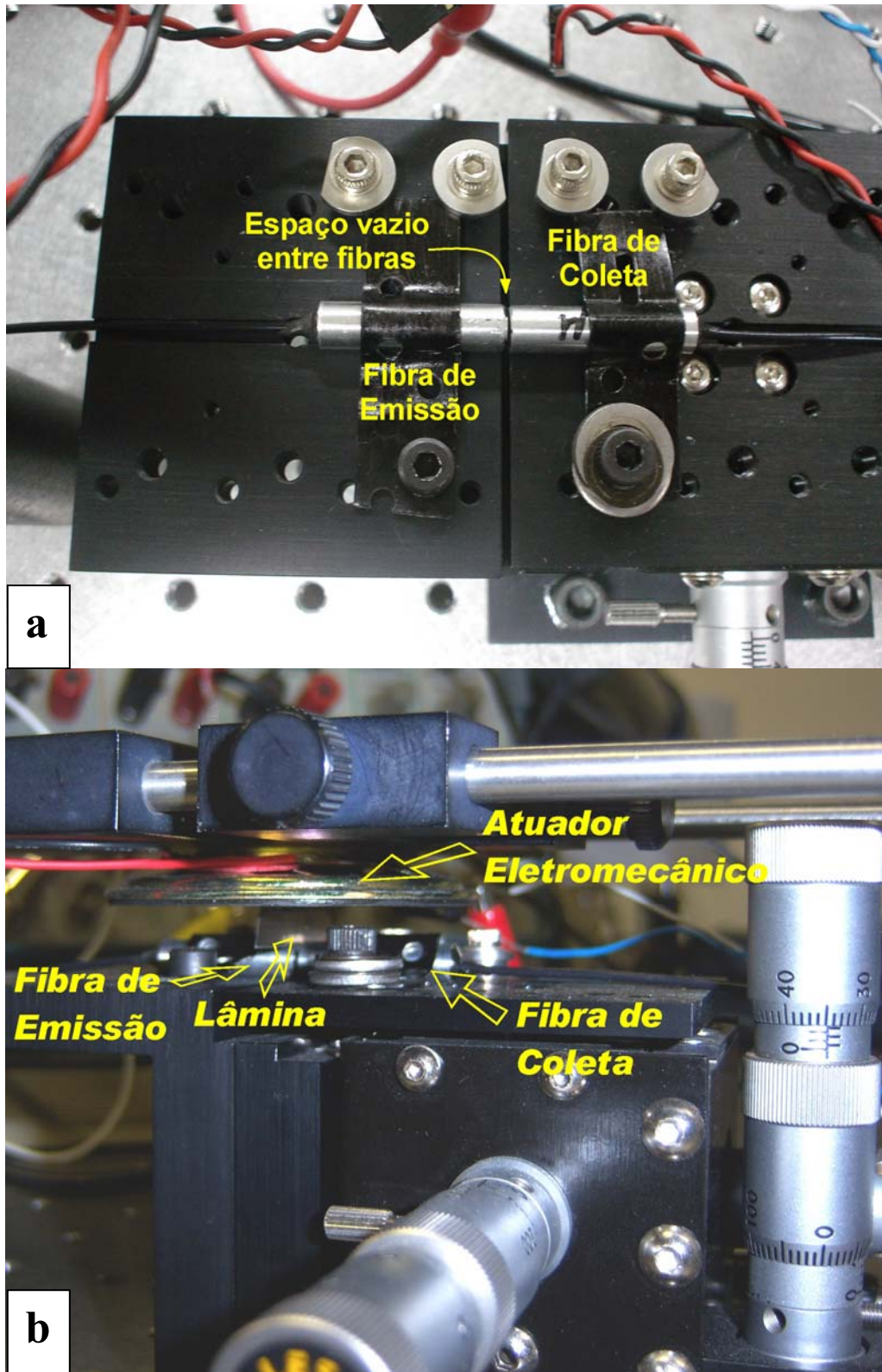


Figura 12: Etapa de montagem do sensor com o (a) alinhamento das fibras de emissão e coleta e (b) posicionamento da lâmina acoplada ao atuador eletromecânico entre as fibras.

Foi realizado o eclipsamento gradual da fibra de coleta. Utilizou-se uma lâmina acoplada a uma base com deslocamento micrométrico. Para cada posição da lâmina foi medido o sinal acoplado pela fibra a fim de validar os estudos teóricos.

Com a lâmina acoplada ao atuador eletromecânico foi realizada a caracterização do sensor em diferentes frequências, variando a excitação do atuador eletromecânico de 10 a 700 Hz. As frequências foram geradas por um gerador de sinal Tektronics, modelo CFG250, e enviados ao atuador eletromecânico o qual imprimiu um movimento oscilatório na lâmina modulando o sinal coletado pela fibra de coleta.

O sinal coletado pela fibra de coleta foi convertido em sinal elétrico pelo fotodetector. O sinal elétrico foi registrado em um osciloscópio modelo TDS 724C da marca Tektronix onde foi calculada e registrada a transformada rápida de Fourier (FFT). Foram consideradas a amplitude do sinal coletado e a frequência informada pela FFT.

4.7 Captura e tratamento do sinal

Para melhorar a relação sinal/ruído das medidas, foram empregadas algumas funções presentes no osciloscópio: a função de alta definição para o sinal coletado e a função de média para o sinal da FFT, sendo estabelecido como padrão a quantia de 40 acumulações.

Os dados de posição, intensidade de sinal e FFT foram organizados em uma planilha de dados, utilizando o software Microcal Origin 6.0[®] onde foram realizadas as análises e gerados os gráficos.

4.8 Visão geral do arranjo experimental

O funcionamento do sensor proposto, construído conforme as informações disponibilizadas nos tópicos anteriores, é demonstrado esquematicamente na Figura 13 (a) e na Figura 13 (b) é apresentada uma visão geral da montagem física. A lâmina de aço acoplada a um atuador eletromecânico, responsável por simular uma vibração controlada, eclipsa a fibra de coleta. Conforme a vibração da lâmina, a

intensidade da radiação óptica desacoplada pela fibra óptica de emissão é modulada. A radiação modulada em intensidade é acoplada e guiada pela fibra de coleta até um detector de silício onde o sinal óptico é convertido em sinal elétrico. O sinal elétrico é enviado a um osciloscópio, onde será calculada a Transformada Rápida de Fourier para posterior análise das componentes em frequência do sinal modulado.

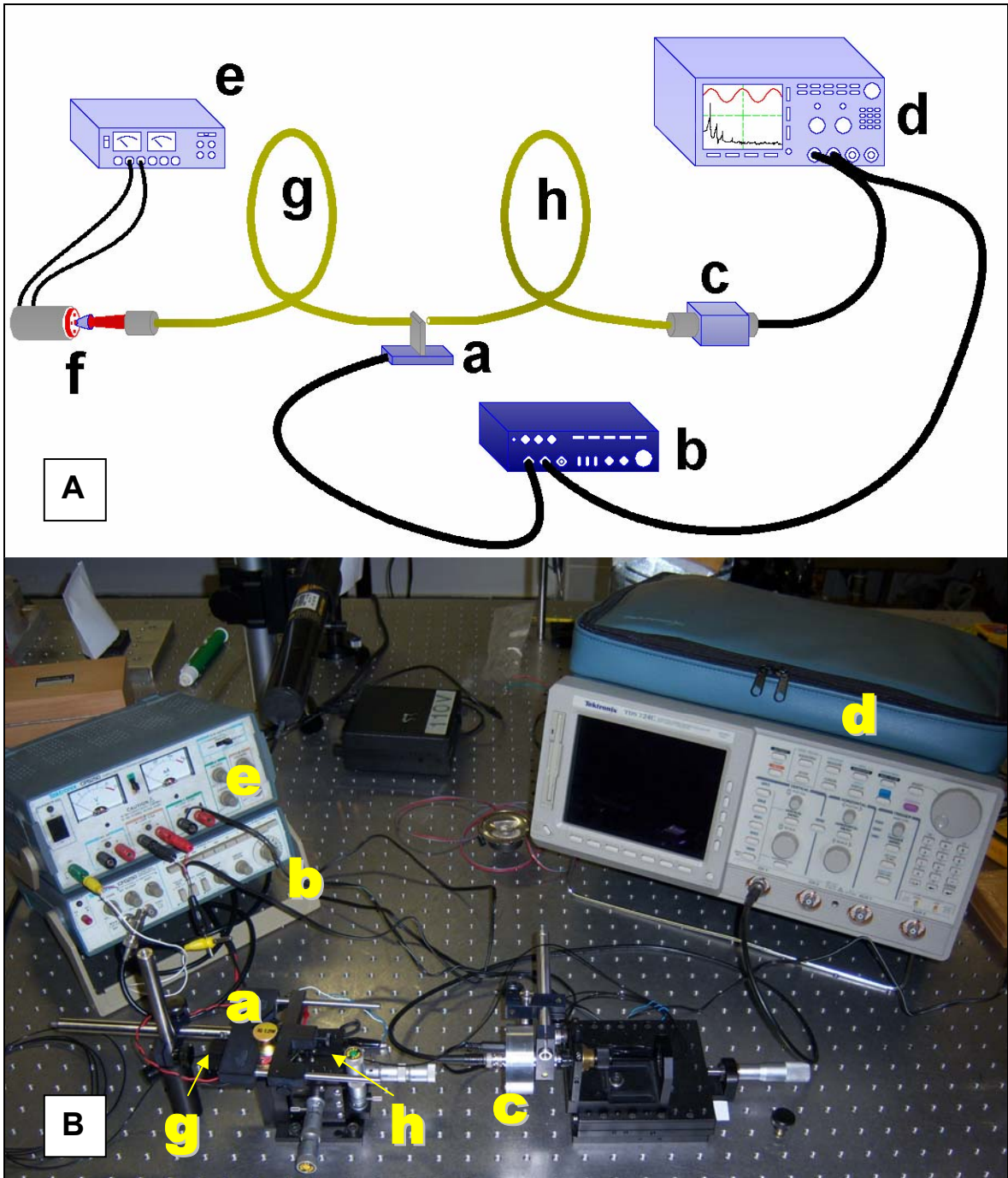


Figura 13: Visão geral do sensor com (A) diagrama ilustrativo do sensor a fibra óptica desenvolvido e (B) montagem física experimental. a) atuador eletromecânico com lâmina acoplada, b) gerador de sinais, c) detector de silício, d) osciloscópio, e) fonte CC, f) LED, g) fibra óptica de emissão e h) fibra óptica de coleta.

5 Resultados

5.1 Caracterização analítica

Utilizando os recursos matemáticos apresentados, equações 2 e 3, foi caracterizada analiticamente a resposta do sensor para uma fibra de diâmetro genérico, Figura 14. Foi simulado um avanço gradativo de uma lâmina bloqueando o núcleo da fibra óptica utilizada para coleta. Esse avanço gradativo é representado pela cota “**a**” apresentada na Figura 7. Este modelo não inclui perturbações geradas por difração do feixe na borda da lâmina. Conforme o valor de “**a**” cresce, cresce também a fração da área bloqueada da fibra óptica de coleta implicando em uma redução proporcional na intensidade de luz acoplada pela mesma fibra óptica. O resultado encontrado a partir da simulação matemática pode ser aplicado para os três conjuntos de fibras ópticas utilizados.

Na Figura 14 a curva característica de resposta do sensor estudado esta representada pela função f_c . A curva é válida para os diâmetros dos núcleos das fibras ópticas utilizadas. O eixo das abscissas, que neste caso representa a posição da lâmina, foi normalizado e representa a relação entre o deslocamento da lâmina (cota “**a**”) e o diâmetro do núcleo da fibra (ϕ). Desta forma, o modelo pode ser aplicado para qualquer diâmetro de núcleo em que os efeitos difrativos na borda da lâmina possam ser negligenciados. A função linear (f_l) na mesma figura representa o ajuste linear para o sensor ao intervalo de aproximadamente

$$0,22 \leq \frac{a}{\phi} \leq 0,73 .$$

Neste intervalo, que corresponde a 50 % do diâmetro do núcleo da fibra óptica, obteve-se uma linearidade com desvio inferior a 1%. O desvio da linearidade (δ) ao longo da curva de operação do sensor, calculado pela equação 4, está apresentado na Figura 15.

$$\delta = \frac{f_l - f_c}{f_l} \quad (4)$$

em que f_l representa a função linear e f_c representa a curva característica de resposta do sensor.

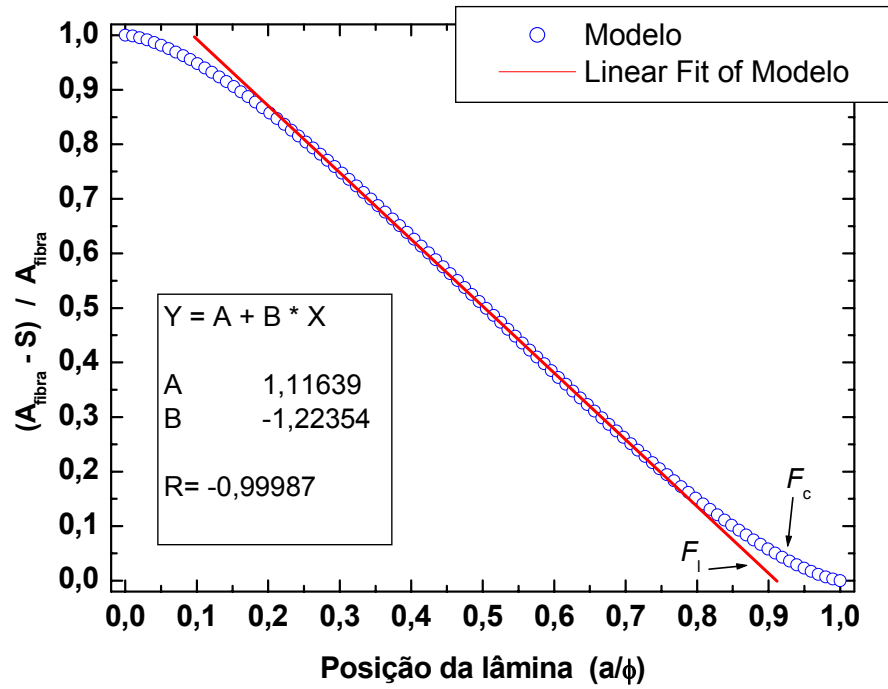


Figura 14: Curva de resposta do sensor gerada analiticamente por meio das equações 2 e 3. A reta corresponde ao ajuste linear para $0,21 \geq a/\phi \leq 0,79$.

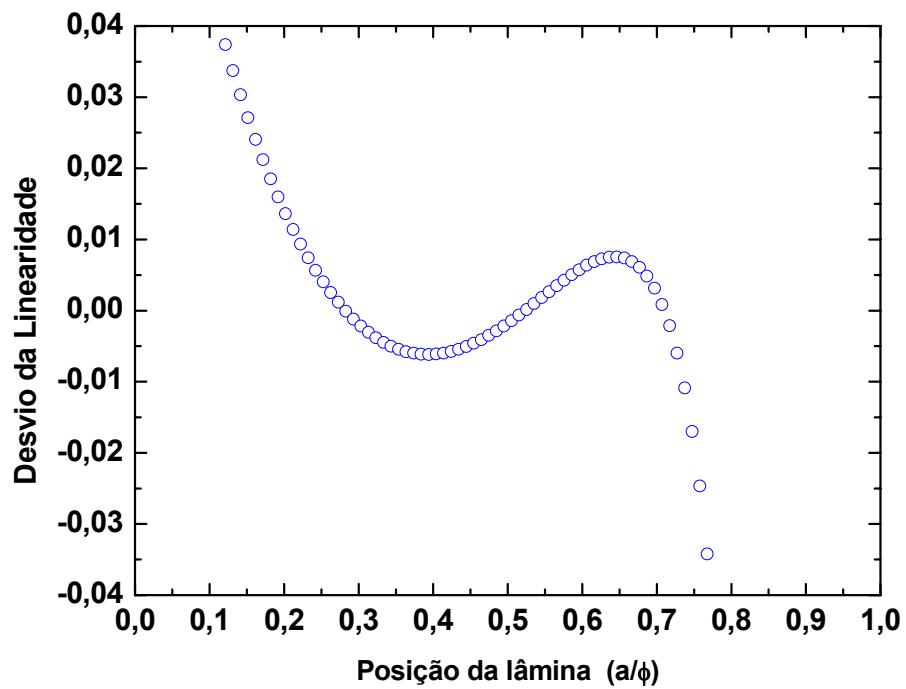


Figura 15: Desvio da linearidade calculado analiticamente pela equação 4.

5.2 Caracterização da fonte de luz

Após a definição da curva de resposta teórica do sensor frente ao deslocamento gradual de uma lâmina, procedeu-se à etapa da montagem física.

A fonte de luz é um componente de grande importância para o funcionamento do sensor. Deve ser estável, com tamanho reduzido, emitir luz em comprimento de onda adequado à aplicação e com potência óptica suficiente para alimentar o sistema.

Para a montagem do sensor proposto foi adotado um LED de alta intensidade modelo LUXEON III Star da Philips – Lumileds, e este foi caracterizado quanto ao comprimento de onda de emissão conforme demonstrado na Figura 16.

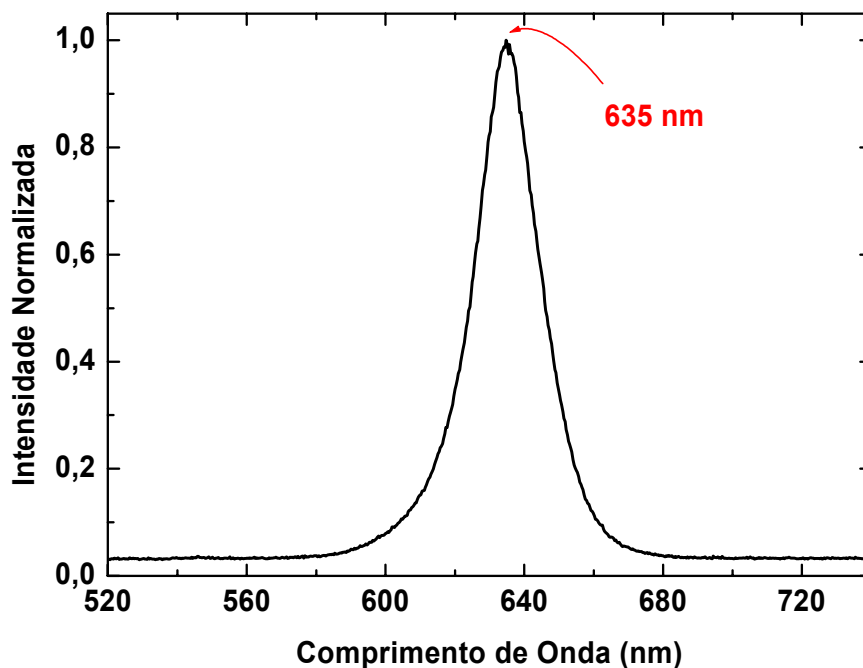


Figura 16: Medida do espectro de emissão do LED utilizado neste trabalho.

Analisando a Figura 16 nota-se um pico de emissão em 635 nm e uma largura de banda de aproximadamente 22 nm (FWHM), características apropriadas para a aplicação sugerida.

5.3 Caracterização da eficiência de acoplamento de luz entre fibras

Foi medida a intensidade do sinal coletado variando a distância entre as fibras, para cada conjunto de fibras ópticas estudado. Promovendo um deslocamento em passos de 10 μm . Os resultados encontrados para as fibras estudadas estão demonstrados nas figuras 17, 18 e 19. Os dados encontrados experimentalmente para os três conjuntos de fibras ópticas foram ajustados pela equação 5: **(32)**

$$P_m = P_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{r_c}{b(\delta_x)} \right)^2 \right] \right\}, \quad (5)$$

em que P_0 representa a intensidade de luz emitida pela fibra emissora, δ_x representa o deslocamento da fibra receptora em relação à fibra emissora, r_c representa o raio da fibra óptica e P_m representa a intensidade de luz acoplada pela fibra receptora. Após ser desacoplada da fibra emissora, a luz sofre divergência, seu raio “ b ” aumenta com a distância “ x ” da fibra de acordo com a equação 6: **(32)**

$$b(\delta x) = b_0 \sqrt{1 + \left(\frac{AN * \delta_x}{R_c} \right)^2}, \quad (6)$$

sendo AN a abertura numérica da fibra óptica e R_c é o raio do núcleo da fibra óptica.

Para a configuração com fibras de 50 μm foi adotada a distância de 250 μm entre a fibra de emissão e a fibra de coleta, por esta ser suficientemente ampla para a introdução da lâmina, cuja espessura era de 100 μm , e por outro lado não comprometer excessivamente a intensidade de sinal, conforme medidas mostradas na Figura 17. A atenuação devido ao acoplamento para o deslocamento adotado foi aproximadamente 60%, ou -4,44 dB.

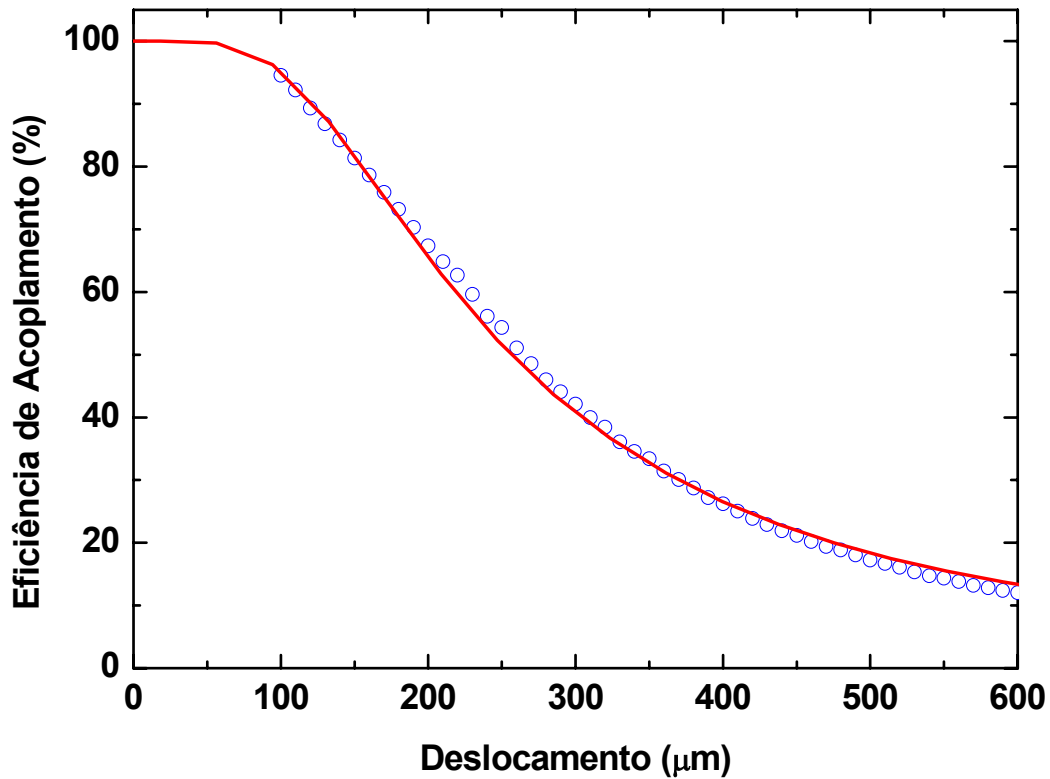


Figura 17: Eficiência de acoplamento de luz em função da distância entre fibras, para fibra com núcleo de 50 μm. A linha cheia corresponde ao ajuste teórico segundo equação 4.

Nos experimentos com a fibra de 100 μm foi adotada a distância de 660 μm entre a fibra de emissão e a fibra de coleta. Para esta distância, a atenuação devido ao acoplamento é de aproximadamente 60% ou -4,44 dB, semelhante à atenuação adotada para o caso da fibra de 50 μm. A Figura 18 mostra as medidas de eficiência de acoplamento de luz em função da distância entre fibras, para fibra com núcleo de 100 μm.

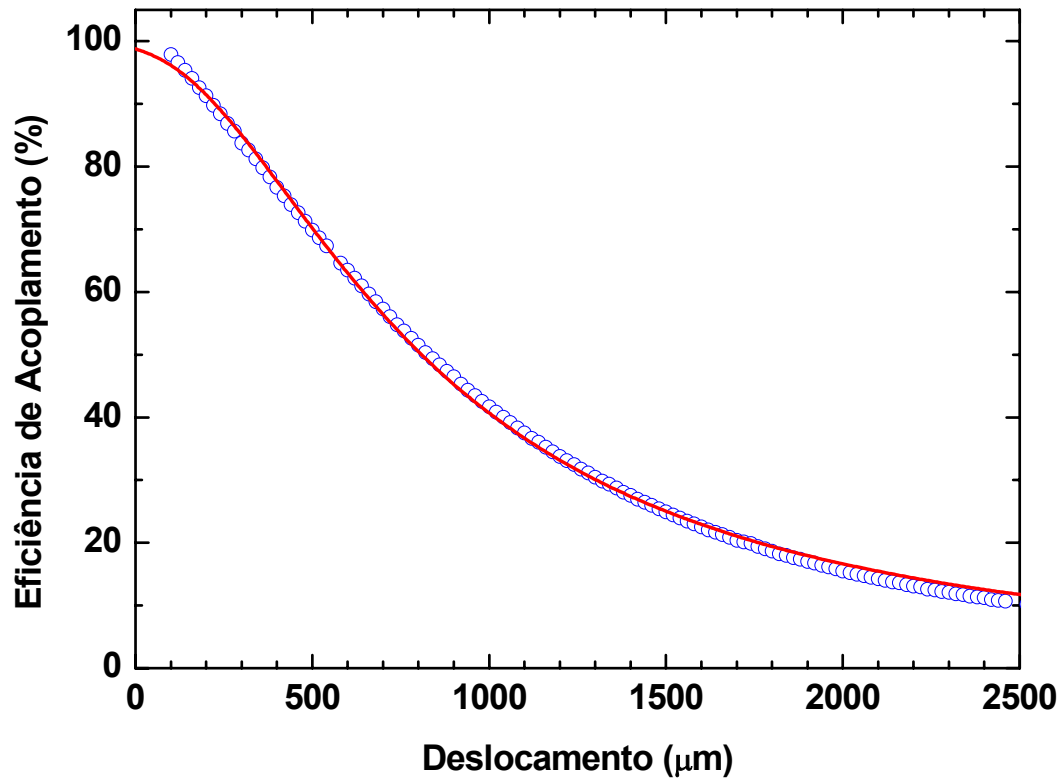


Figura 18: Eficiência de acoplamento de luz em função da distância entre fibras, para fibra com núcleo de 100 μm. A linha cheia corresponde ao ajuste teórico segundo equação 4.

Nos experimentos com a fibra de 200 μm foi adotada a distância de 1100 μm entre a fibra de emissão e a fibra de coleta. Para esta distância, a atenuação devido ao acoplamento é de aproximadamente 60% ou -4,44 dB, semelhante à atenuação adotada para o caso da fibra de 50 e 100 μm. A Figura 19 mostra as medidas de eficiência de acoplamento de luz em função da distância entre fibras, para fibra com núcleo de 200 μm.

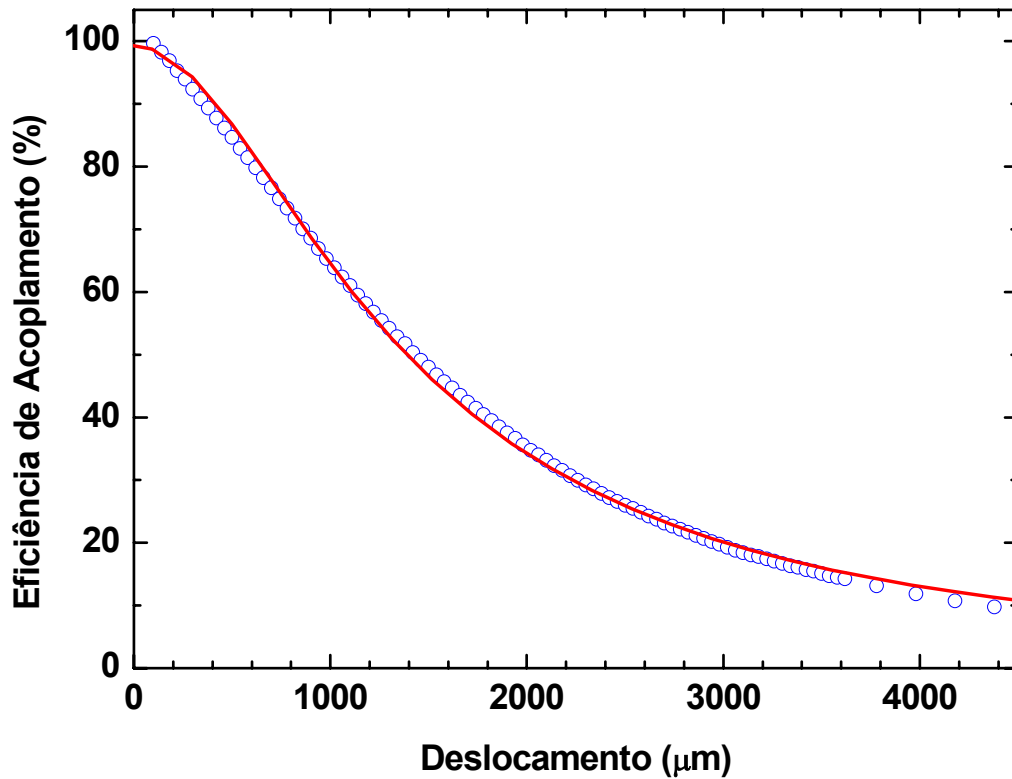


Figura 19: Eficiência de acoplamento de luz em função da distância entre fibras, para fibra com núcleo de 200 μm . A linha cheia corresponde ao ajuste teórico segundo equação 4.

5.4 Caracterização experimental do sensor proposto

Concluída a montagem física do sensor foram realizadas medidas experimentais para caracterizar sua curva de resposta e validar o modelo teórico expresso matematicamente pelas equações 2 e 3. Para a caracterização foi utilizada uma lâmina acoplada a uma base móvel que eclipsou o diâmetro da fibra de coleta em passos micrométricos. Para cada posição da lâmina, foi medida a intensidade de luz acoplada pela fibra de coleta.

A curva de resposta experimental para o sensor construído com fibras de 50 μm de núcleo está exibida na Figura 20 com ajuste teórico pela equação 2.

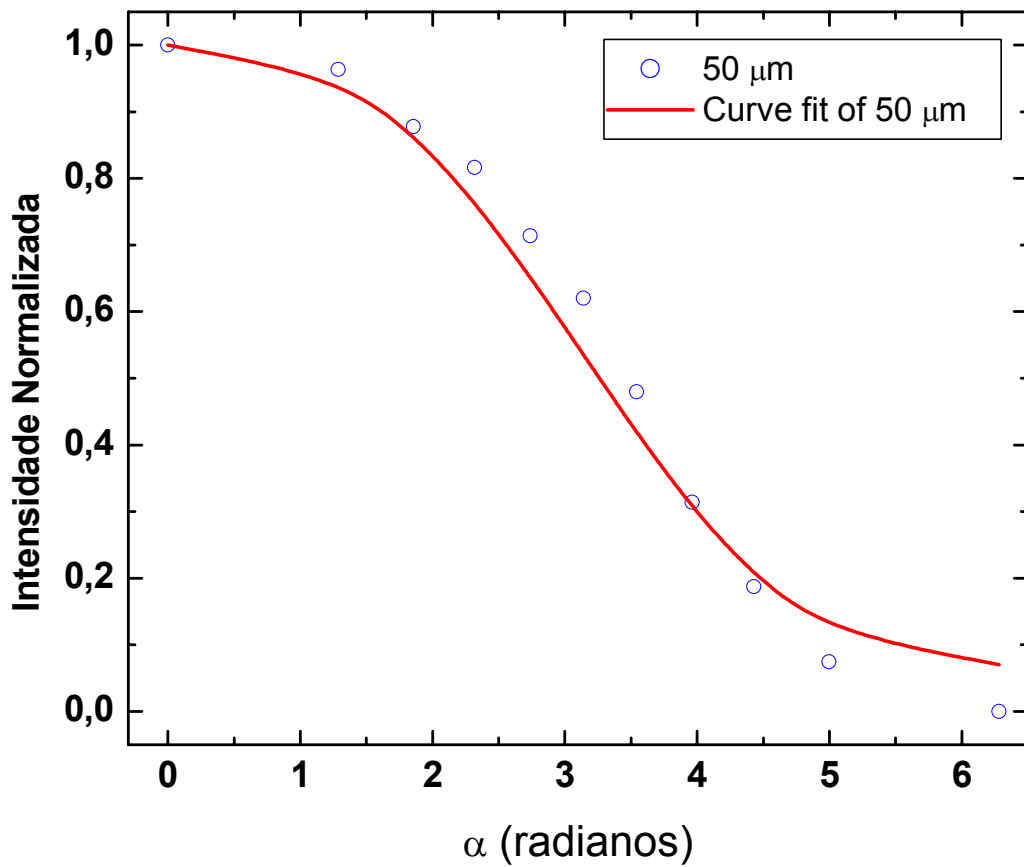


Figura 20: Curva de resposta do sensor em função do eclipsamento gradual do núcleo da fibra de coleta. Sensor construído com fibras de 50 μm , com ajuste teórico conforme equação 2.

Analisando a Figura 20 nota-se que a equação não se ajustou perfeitamente aos dados experimentais.

Aplicando-se o ajuste linear aos pontos experimentais compreendidos na faixa entre 15 e 35 μm , obtém-se a curva mostrada na Figura 21. A região linear para esta configuração está restrita ao intervalo de aproximadamente 20 a 45 μm , ou 50 % do diâmetro do núcleo da fibra óptica, conforme previsto pelo modelo teórico.

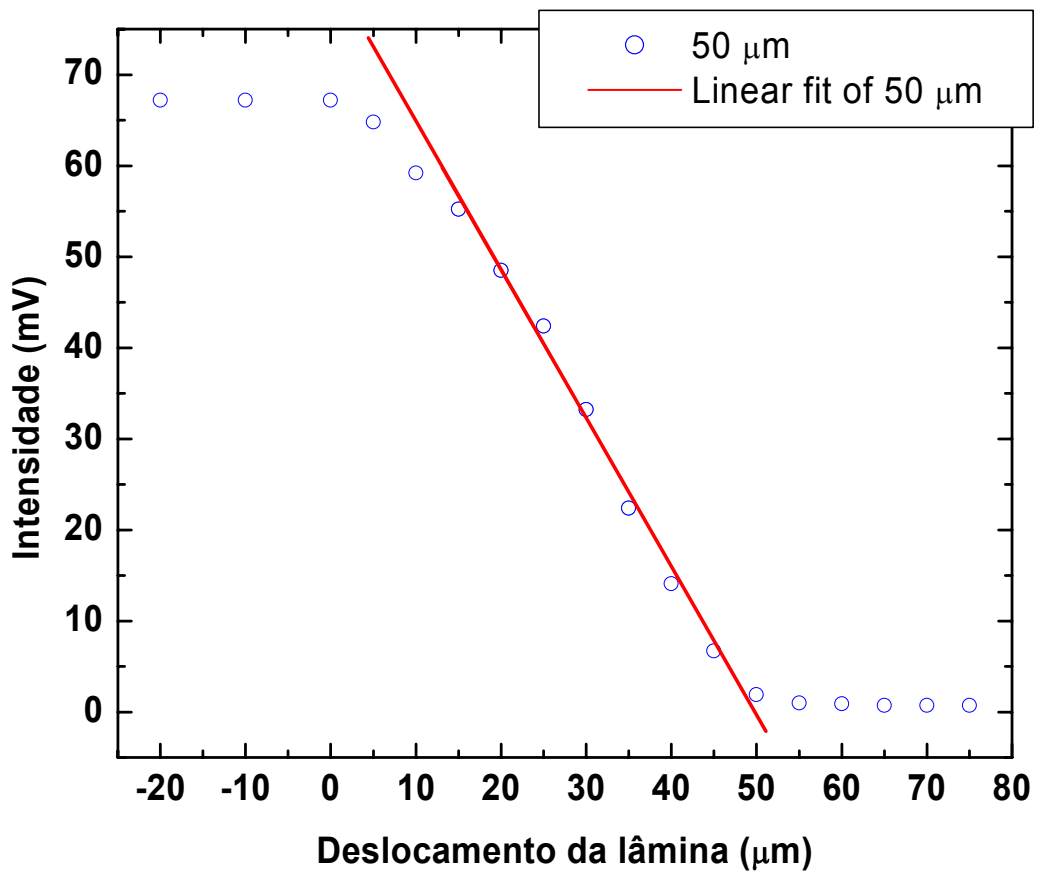


Figura 21: Curva de resposta para o sensor construído com fibras de 50 μm de diâmetro de núcleo com ajuste na região linear de resposta

A curva de resposta experimental para o sensor construído com fibras de 100 μm de núcleo está exibida na Figura 22 com ajuste teórico pela equação 2. Analisando a Figura 22 nota-se que a equação teórica apresentou um excelente ajuste aos dados experimentais.

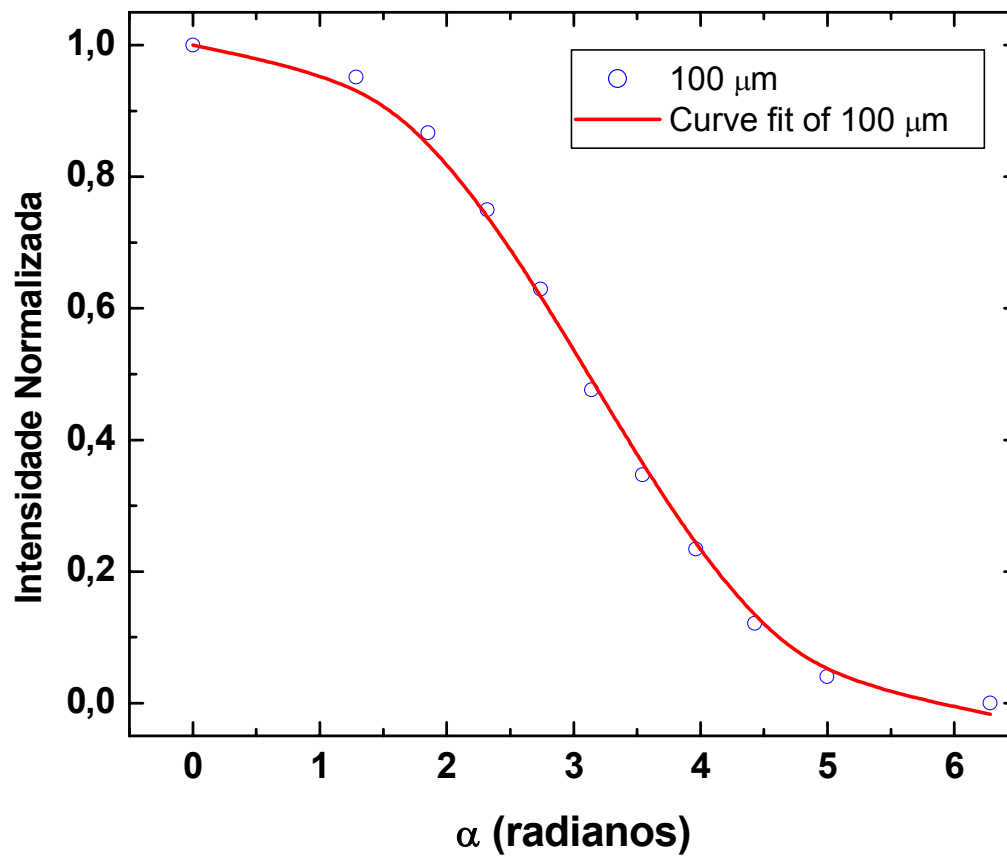


Figura 22: Curva de resposta do sensor em função do eclipsamento gradual do núcleo da fibra de coleta. Sensor equipado com fibras de 100 μm , com ajuste teórico conforme equação 2.

Aplicando-se o ajuste linear nos pontos experimentais compreendidos na faixa entre 20 e 80 μm , obtém-se a curva mostrada na Figura 23. A região linear para esta configuração está restrita ao intervalo de aproximadamente 20 a 70 μm , ou 50 % do diâmetro do núcleo da fibra óptica, conforme previsto pelo modelo teórico.

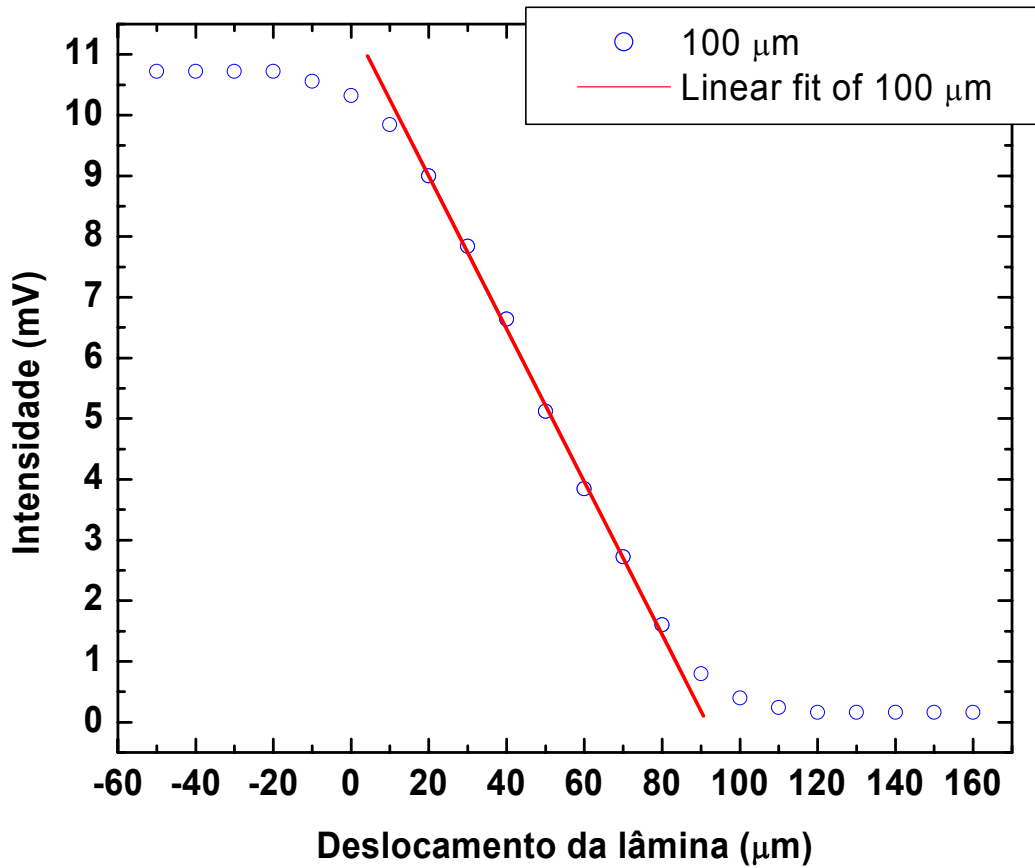


Figura 23: Curva de resposta para o sensor construído com fibras de 100 μm de diâmetro de núcleo com ajuste na região linear de resposta.

A curva de resposta experimental para o sensor construído com fibras de 200 μm de núcleo está exibida na Figura 24 com ajuste teórico pela equação 2. Analisando a Figura 24 nota-se que a equação teórica apresentou um excelente ajuste aos dados experimentais.

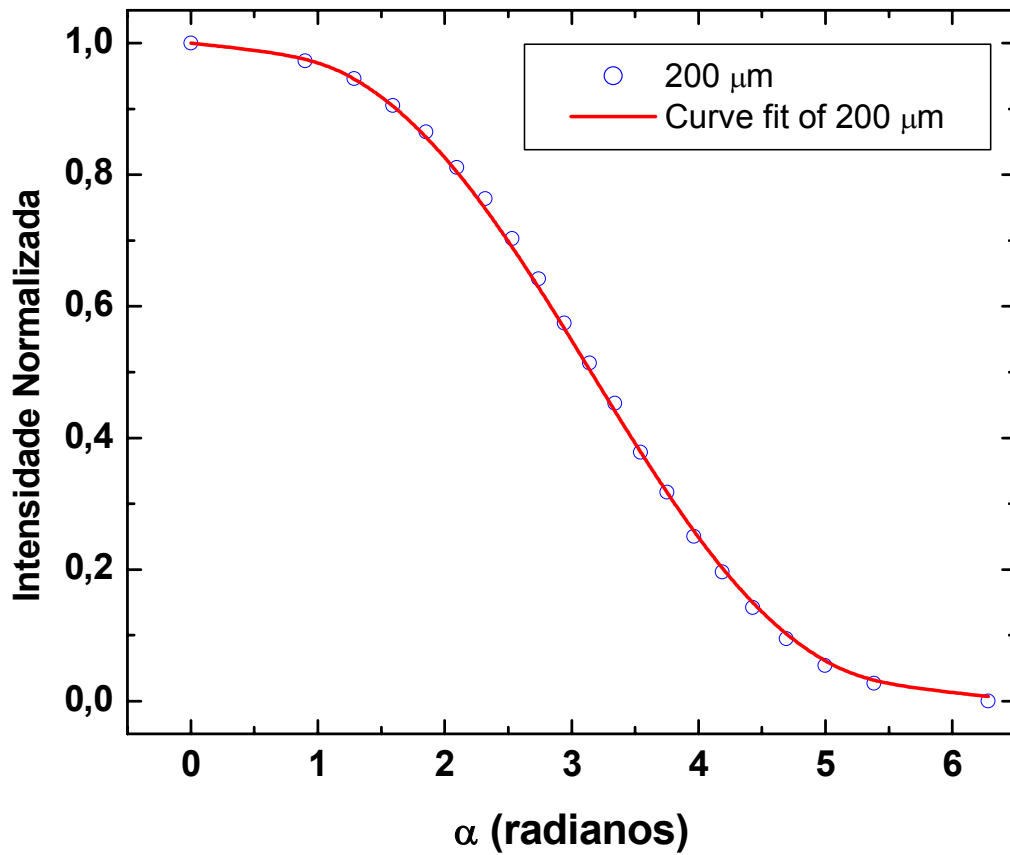


Figura 24: Curva de resposta do sensor em função do eclipsamento gradual do núcleo da fibra de coleta. Sensor equipado com fibras de 200 μm , com ajuste teórico conforme equação 2.

Aplicando-se o ajuste linear nos pontos experimentais compreendidos na faixa entre 50 e 160 μm , obtém-se a curva mostrada na Figura 25. A região linear para esta configuração está restrita ao intervalo de aproximadamente 60 a 160 μm , ou 50 % do diâmetro do núcleo da fibra óptica, conforme previsto pelo modelo teórico.

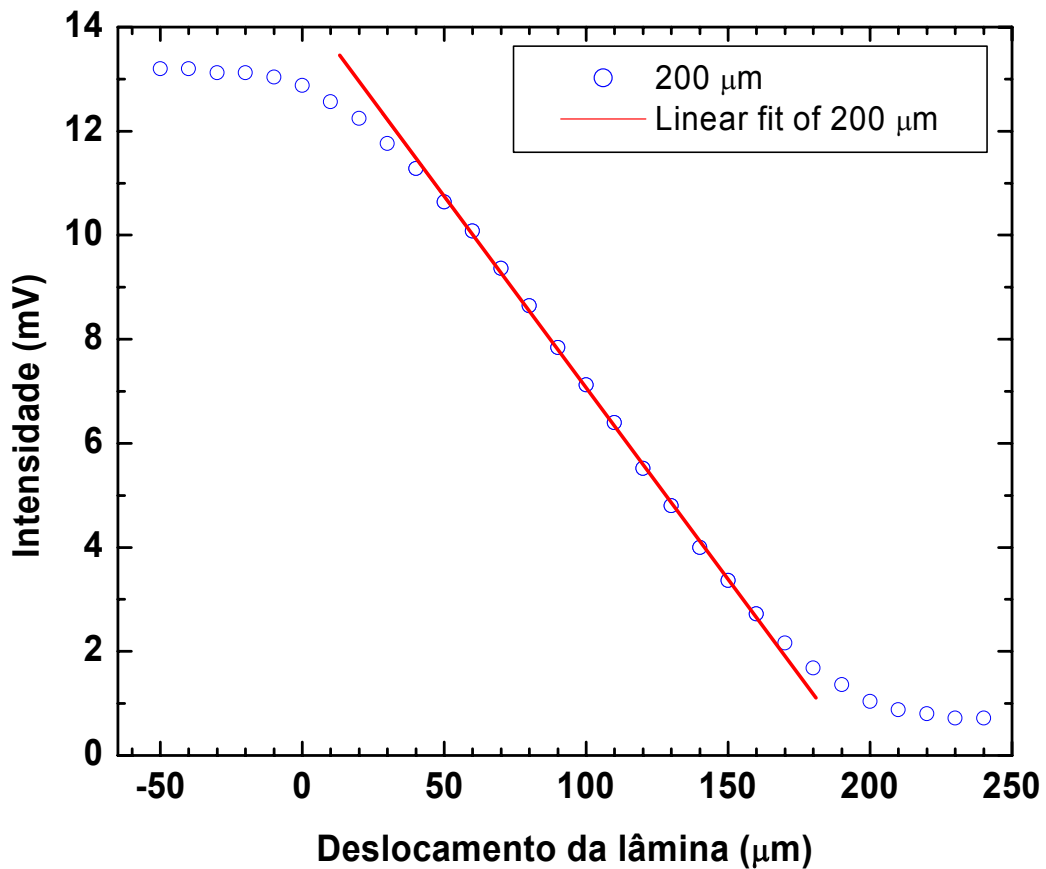


Figura 25: Curva de resposta para o sensor montado com fibras de 200 μm de diâmetro de núcleo com ajuste na região linear de resposta.

5.5 Medidas de frequência de vibração

Após a construção do sensor e após a confirmação experimental da teoria proposta, o sensor foi utilizado para caracterizar o comportamento em frequência e amplitude de um objeto vibrante.

Para realizar essas medidas, fixou-se uma lâmina no atuador eletromecânico, ilustrado na Figura 9, e este foi excitado através de um gerador de sinais com frequências variando de 10 Hz a 700 Hz.

Foi realizado um conjunto de medidas utilizando os sensores construídos com os distintos diâmetros de fibras e simultaneamente foi calculada a Transformada Rápida de Fourier (FFT) utilizando os recursos presentes no osciloscópio digital utilizado.

Os resultados alcançados com a FFT mostram claramente que a saída do sensor de vibração pode ser resolvida de acordo com as características da frequência de vibração. Nos gráficos também são exibidas as harmônicas correspondentes.

A Figura 26 mostra, para essa configuração do sensor, a medida da amplitude de pico a pico do sinal acoplado pela fibra coletora para cada frequência aplicada na excitação do atuador eletromecânico, o sinal foi normalizado pela maior amplitude.

Para a realização dessa medida foi adotado 200 mV de amplitude para o sinal aplicado ao atuador eletromecânico. Esse valor de amplitude foi suficiente para as medidas e manteve o sensor trabalhando dentro das dimensões do núcleo da fibra. Desta forma, evitou-se o ceifamento do sinal de saída.

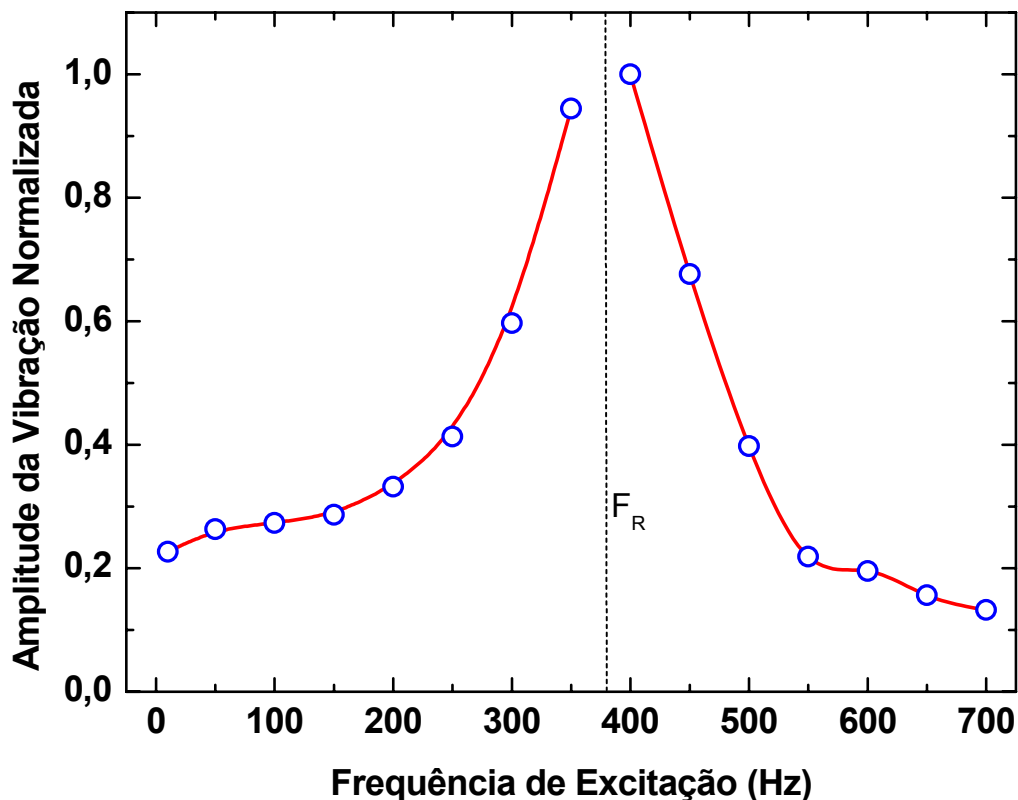


Figura 26: Amplitude do sinal acoplado pela fibra de coleta para cada frequência aplicada no atuador eletromecânico. ($\phi=50 \mu\text{m}$)

De acordo com a Figura 26, a amplitude do sinal de saída do sensor aumenta rapidamente quando a frequência de excitação se aproxima da frequência de

ressonância (F_R) do atuador eletromecânico, aproximadamente 380 Hz, e decai da mesma forma para frequências maiores.

A seguir são apresentados os resultados da análise em frequência do sinal de saída do dispositivo, via FFT, obtidos com o sensor construído com fibras de 50 μm de diâmetro de núcleo. Os resultados obtidos para as fibras de 100 e 200 μm estão apresentados nos Anexos 1 e 2, respectivamente.

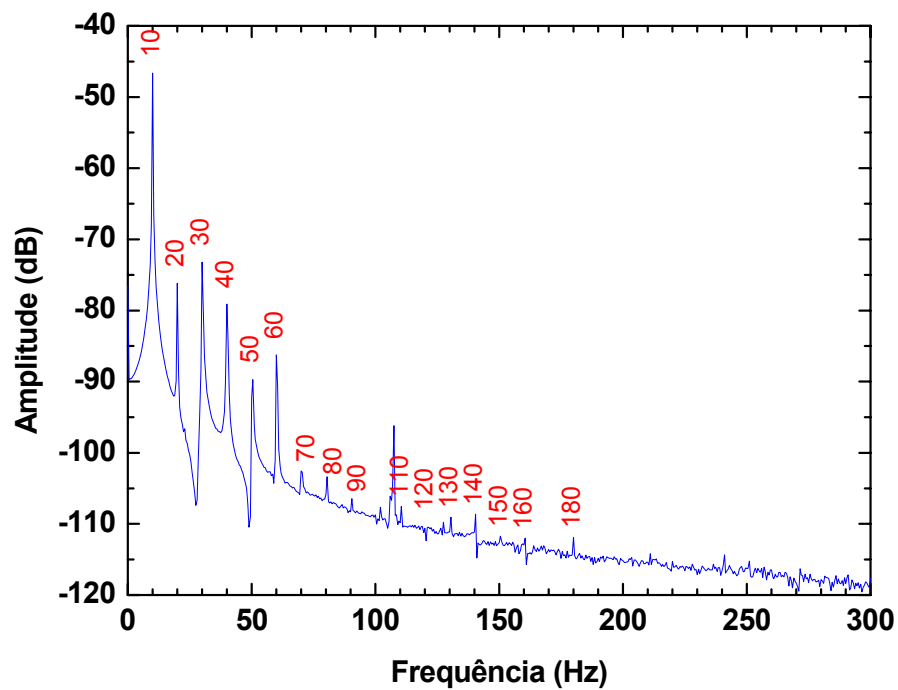


Figura 27: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 10 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

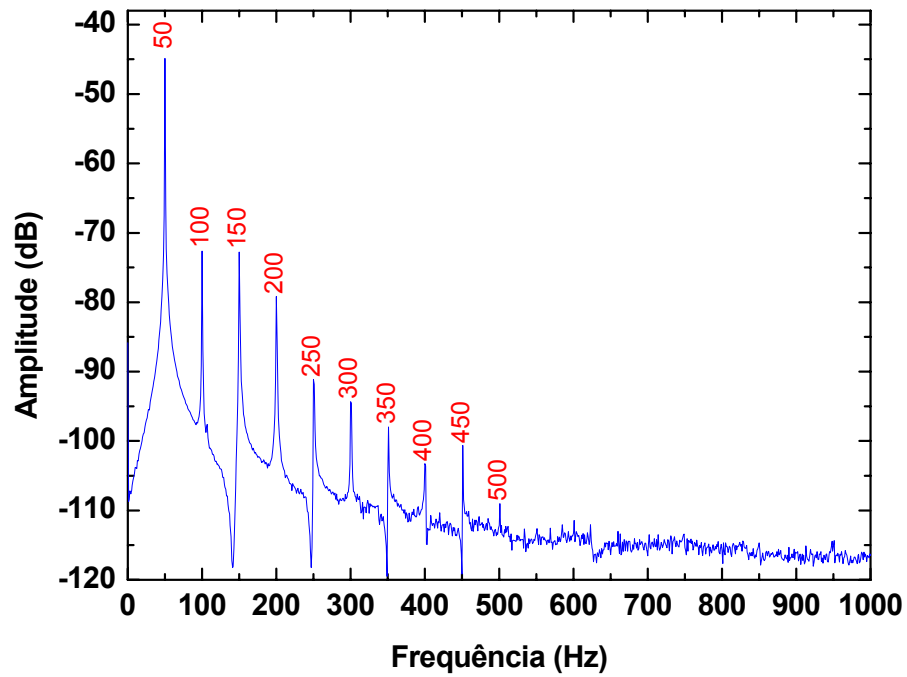


Figura 28: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 50 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

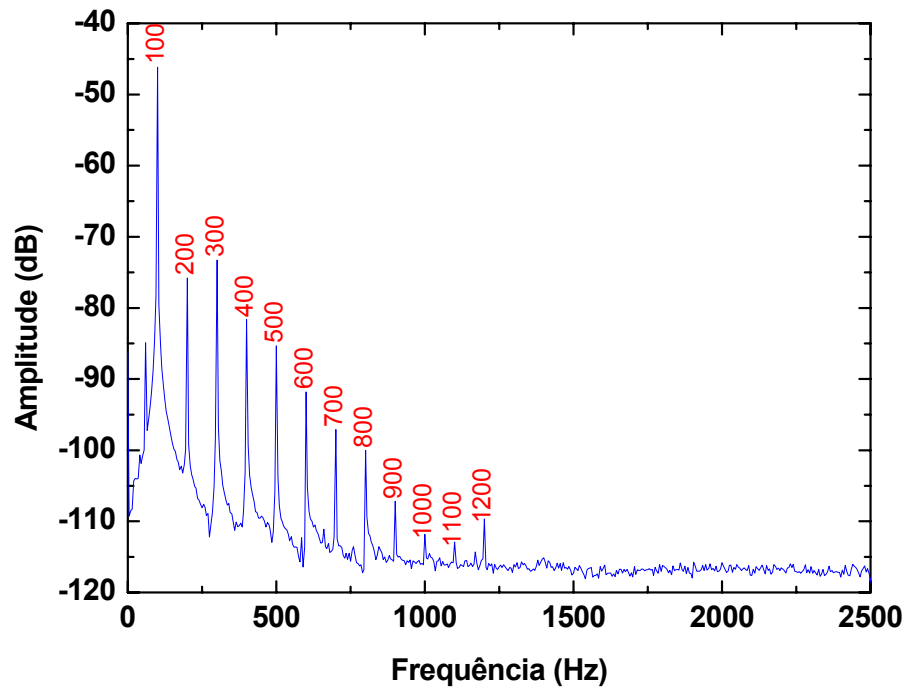


Figura 29: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 100 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

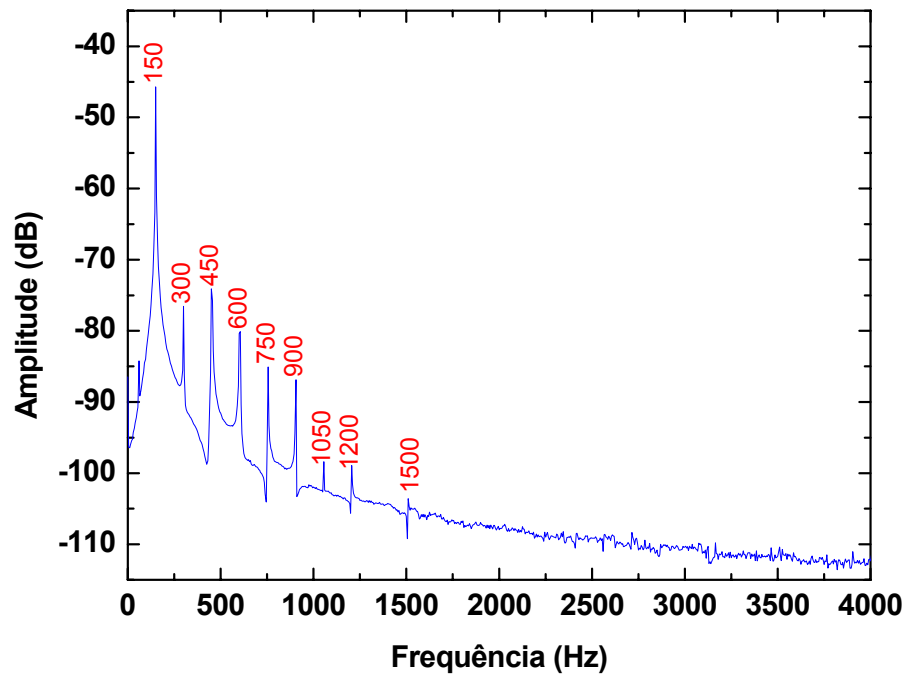


Figura 30: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 150 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

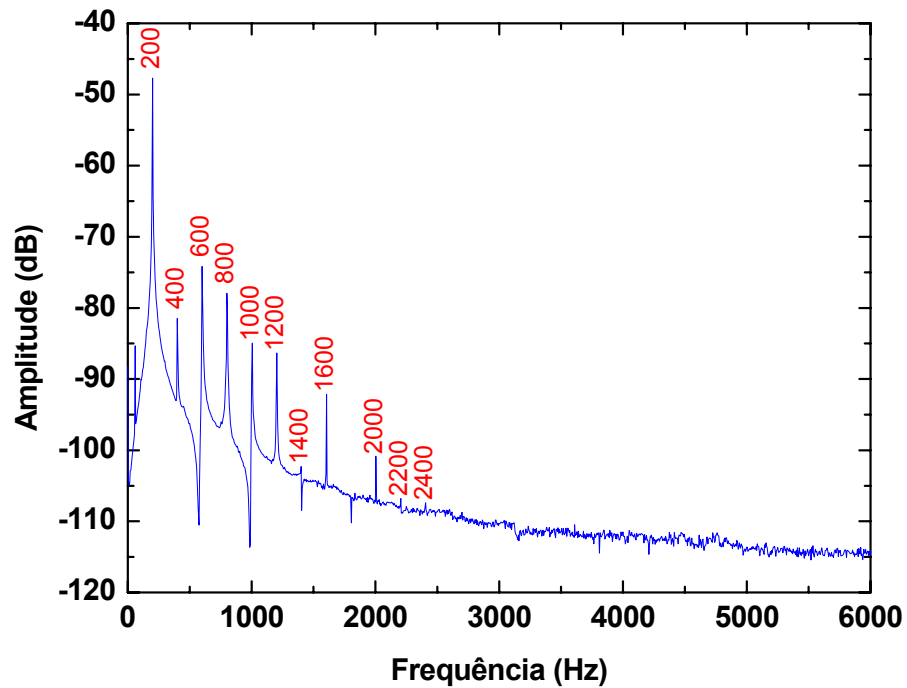


Figura 31: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 200 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

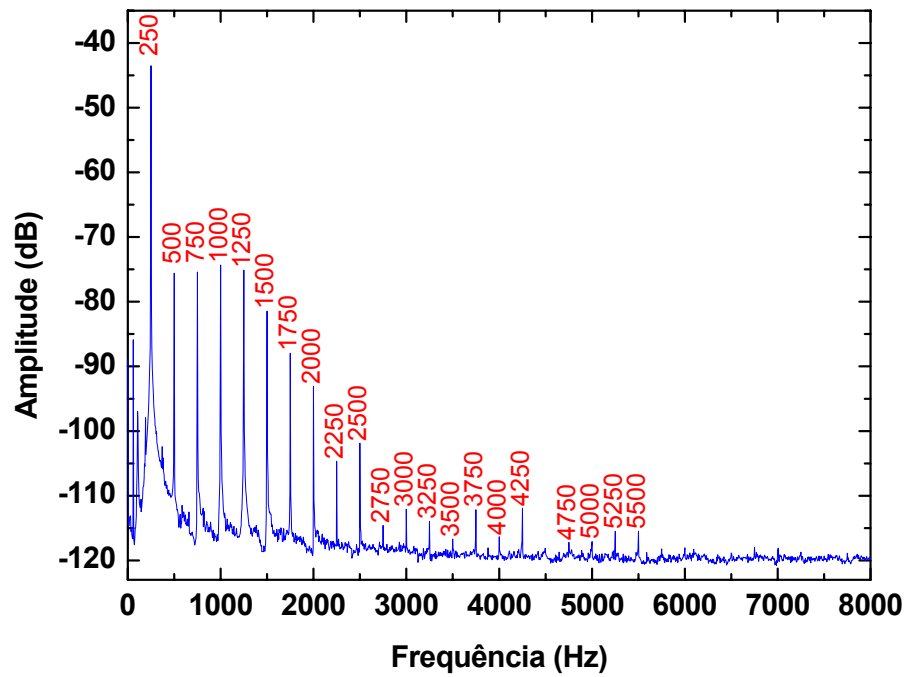


Figura 32: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 250 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

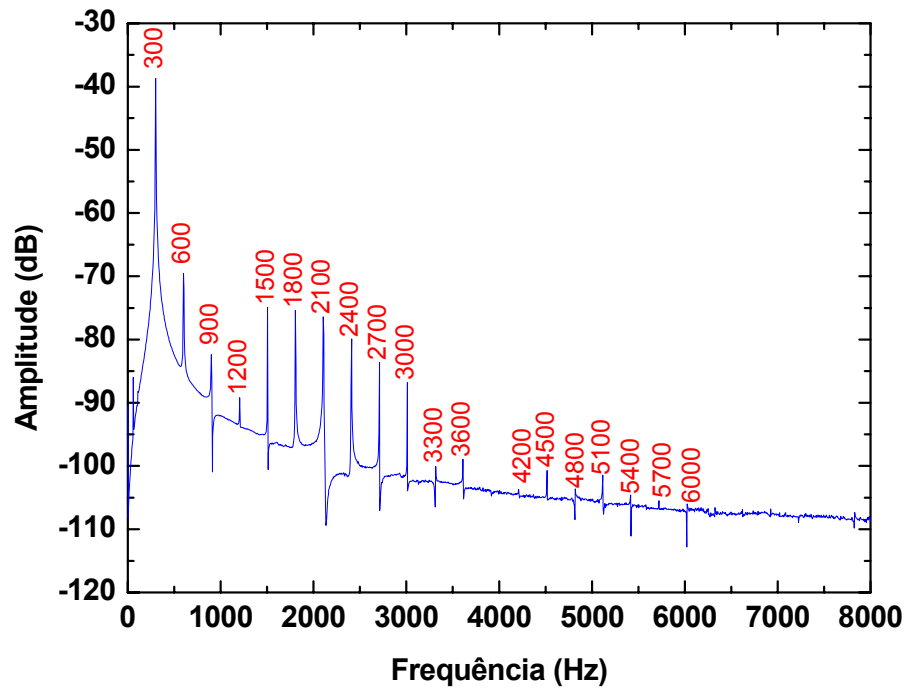


Figura 33: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 300 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

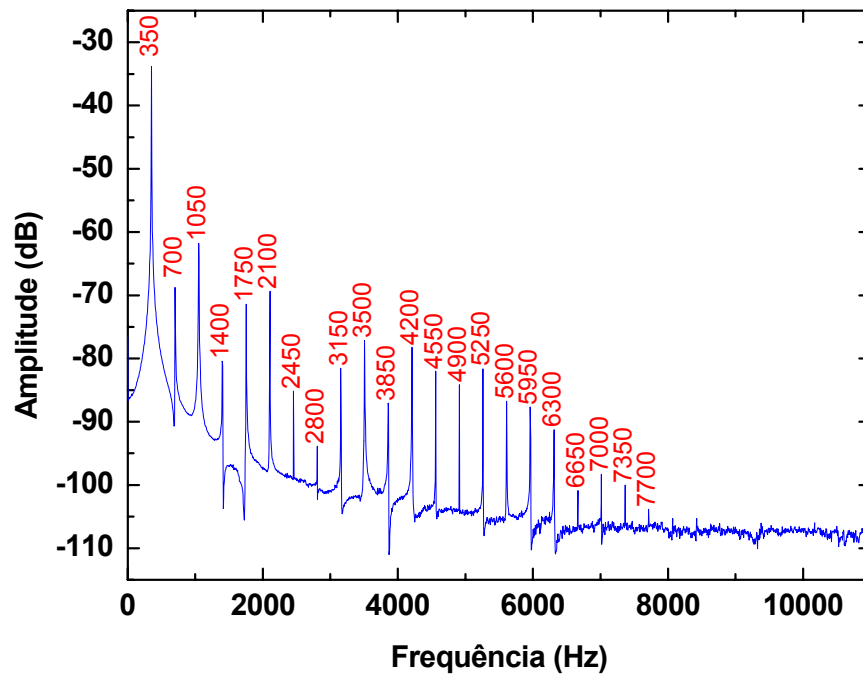


Figura 34: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 350 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

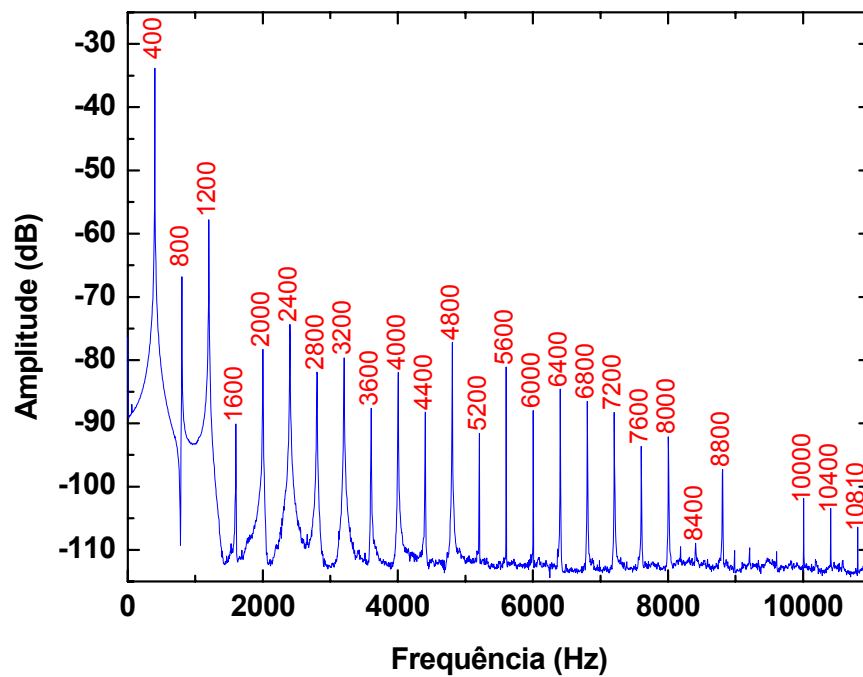


Figura 35: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 400 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

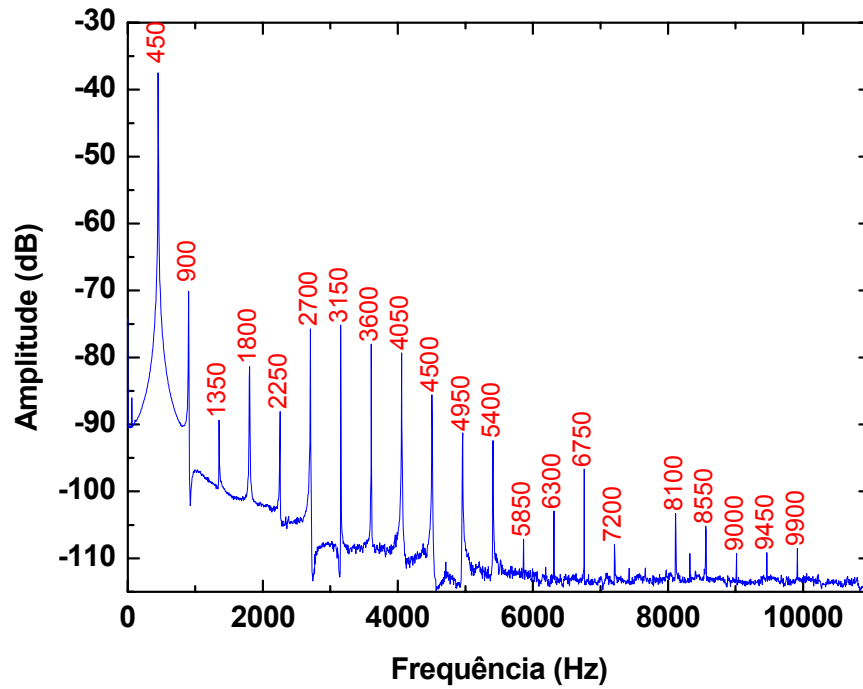


Figura 36: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 450 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

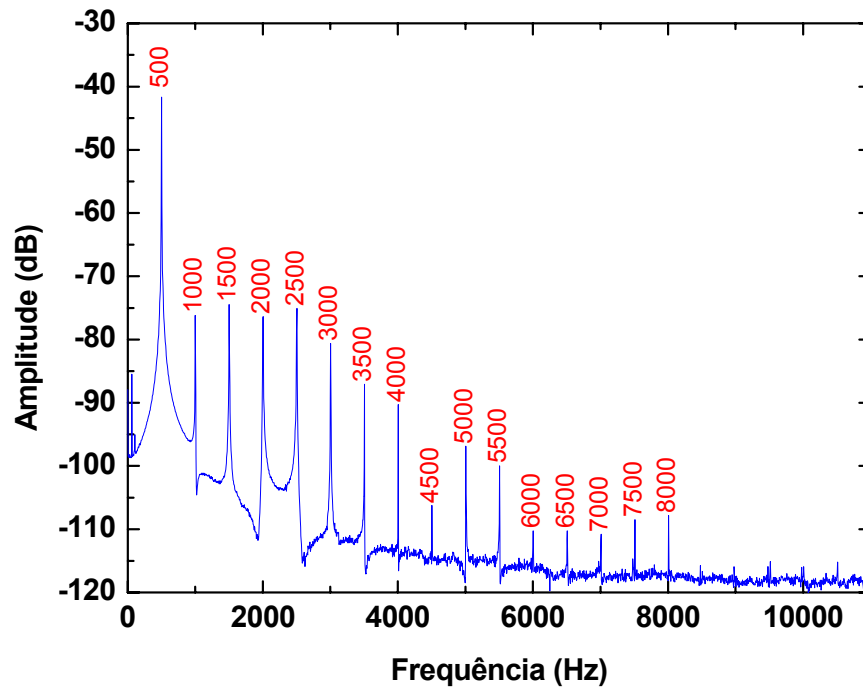


Figura 37: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 500 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

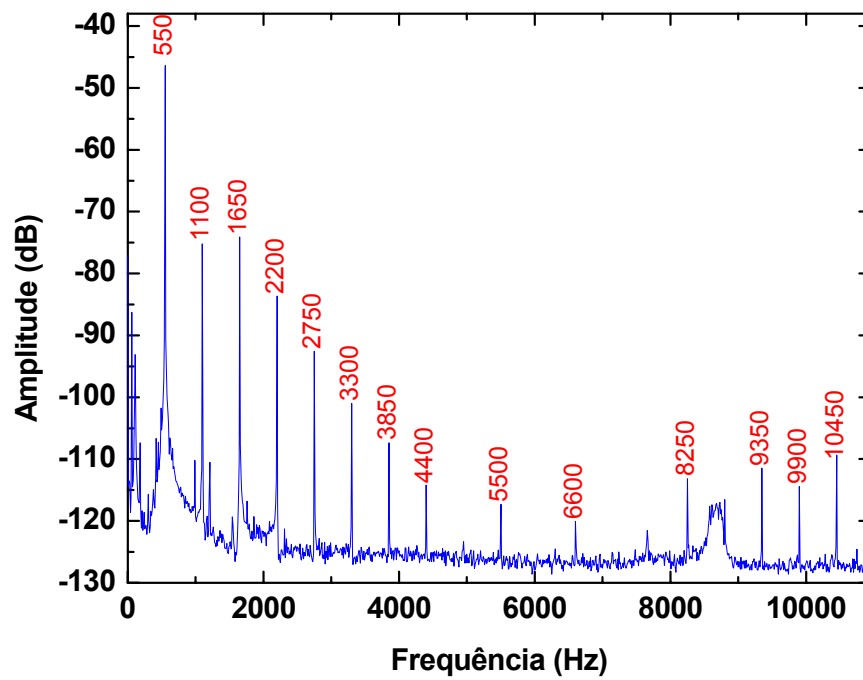


Figura 38: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 550 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

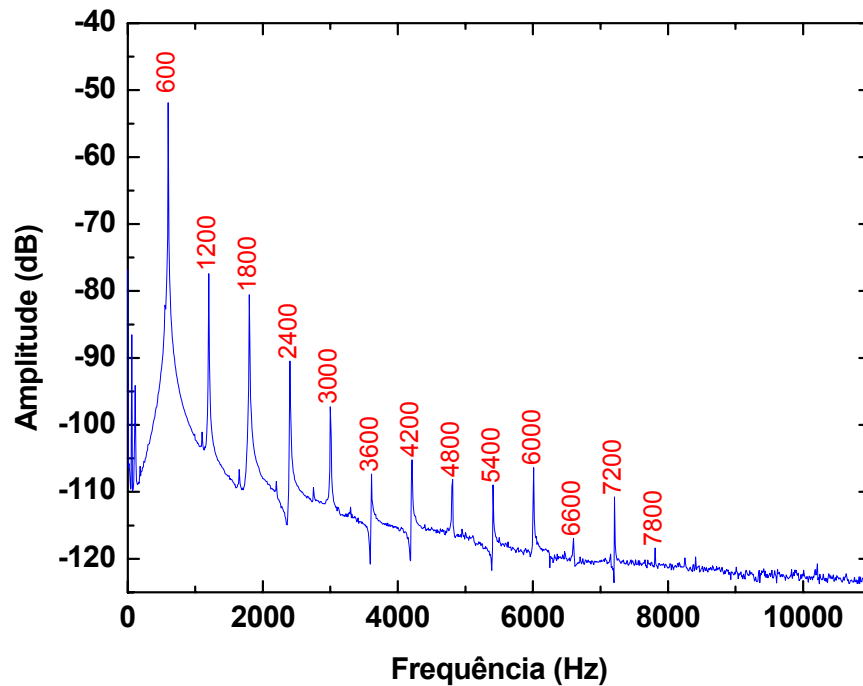


Figura 39: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 600 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

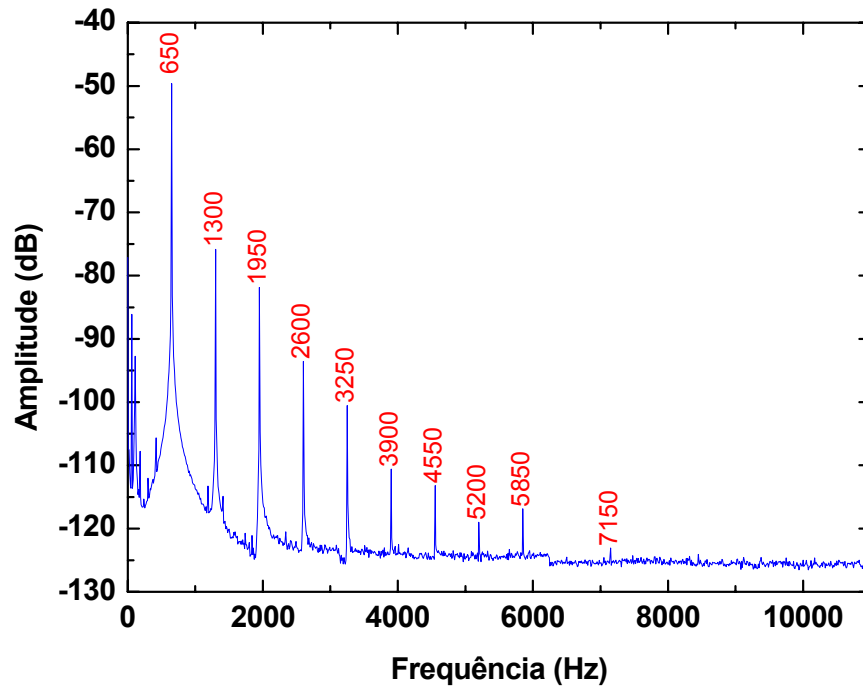


Figura 40: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 650 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

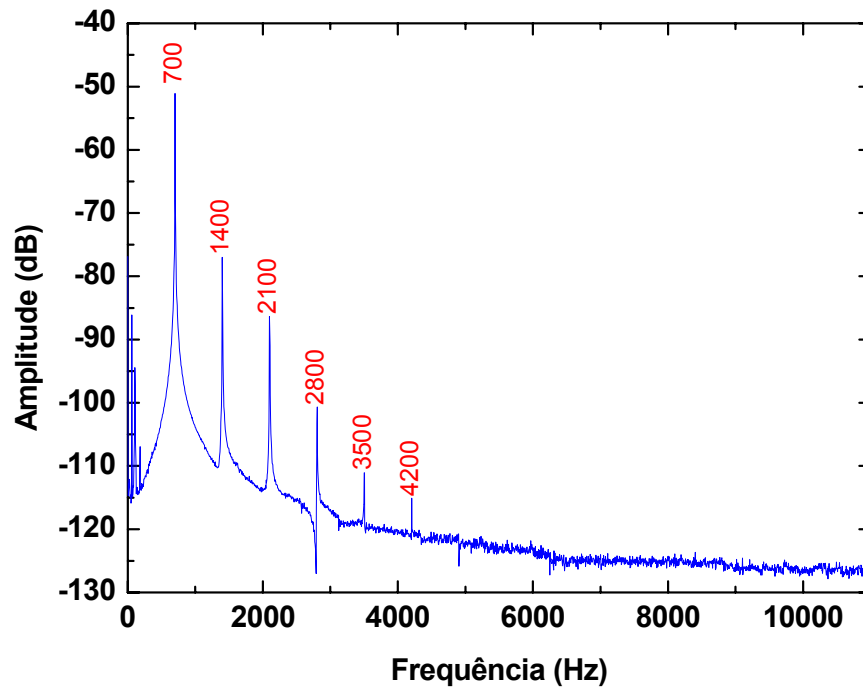


Figura 41: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 700 Hz. ($\phi=50\mu\text{m}$)

Analisando os resultados obtidos a partir do cálculo da FFT, nota-se que os espectros de freqüências do sinal de saída do sensor, com o atuador excitado em freqüências próximas à de ressonância, apresentam uma maior quantidade de harmônicas. Conforme pode ser visualizado nas figuras 42, 43 e 44, para a montagem de $50\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$ e $200\ \mu\text{m}$ respectivamente. Aparentemente, na região onde a freqüência de excitação coincide com submúltiplos da freqüência de ressonância ocorre uma interferência no aparecimento de harmônicas.

As linhas tracejadas indicam a posição da freqüência de ressonância (F_R) do atuador eletromecânico e submúltiplos da mesma.

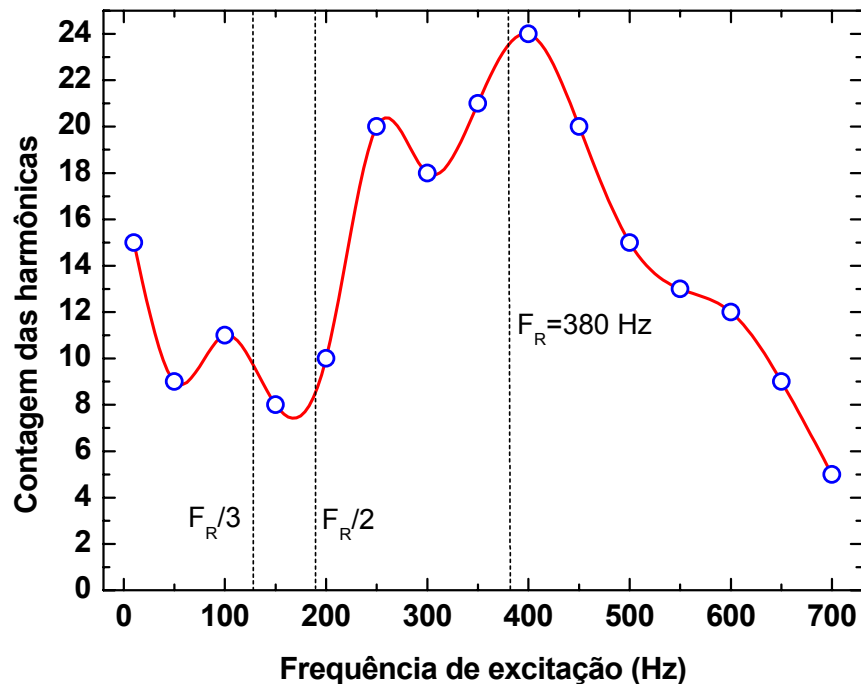


Figura 42: Contagem da quantidade de harmônicas superiores à freqüência de excitação, presentes no sinal de saída do sensor, para cada freqüência de excitação testada. ($\phi=50\ \mu\text{m}$).

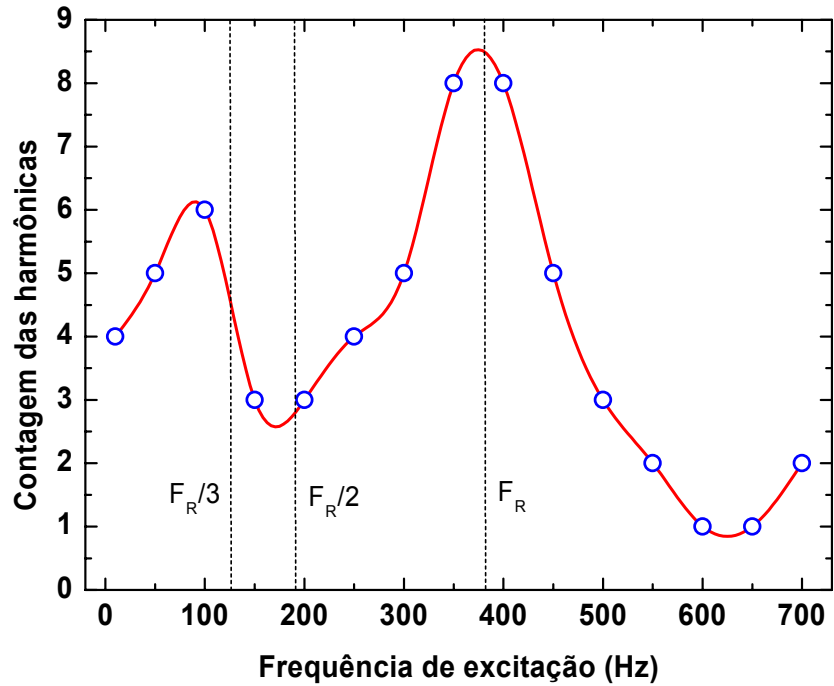


Figura 43: Contagem da quantidade de harmônicas superiores à frequência de excitação, presentes no sinal de saída do sensor, para cada frequência de excitação testada. ($\phi=100\mu\text{m}$).

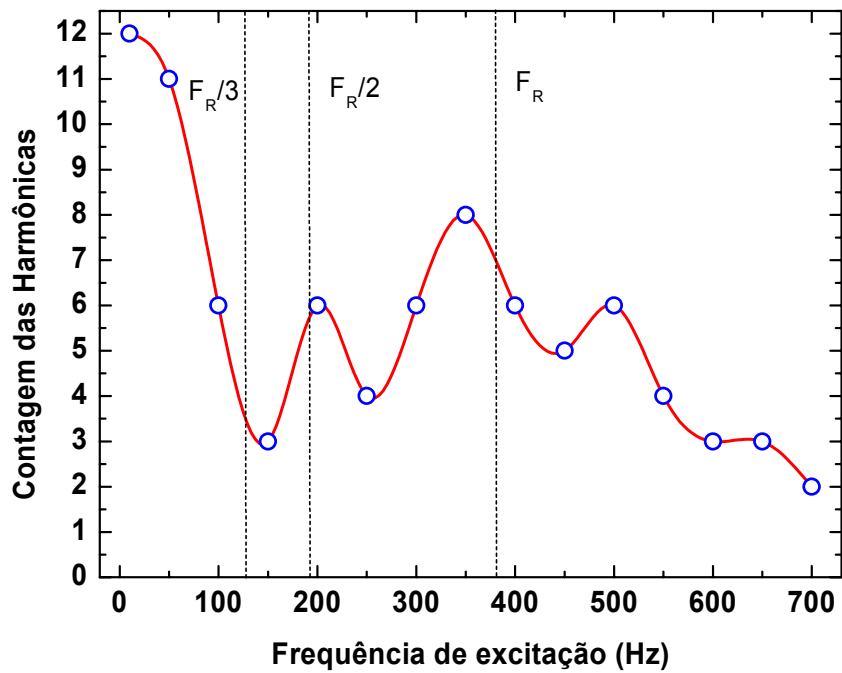


Figura 44: Contagem da quantidade de harmônicas superiores à frequência de excitação, presentes no sinal de saída do sensor, para cada frequência de excitação testada. ($\phi=200\mu\text{m}$).

6 Discussão

Com o advento da tecnologia das fibras ópticas e principalmente com a evolução que esta tecnologia sofreu ao longo dos anos, surgiram diversas aplicações em áreas onde as tecnologias tradicionais não davam suporte.

Muitos sistemas de sensoriamento foram desenvolvidos baseados na tecnologia de fibras ópticas, porém poucos obtiveram sucesso em aplicações comerciais.

Dentre os sistemas que se destacaram pode-se citar *fibre Bragg gratings* e os sensores *fabry-perot* que oferecem excelentes capacidades de medidas, porém ao mesmo tempo em que estes sistemas oferecem boa resolução nas medidas torna-se necessária aplicação de um hardware muito sofisticado que exige precisão nos alinhamentos e um alto custo para implantação e manutenção.

Na maioria dos projetos a alta resolução e sofisticada capacidade de medidas realizada por estes sensores são desnecessárias gerando uma necessidade por sensores mais simples e de baixo custo.

Visando suprir essa necessidade foram desenvolvidos sensores mais simples baseados em diferentes geometrias utilizando: fibras ópticas alinhadas a uma haste com a ponta livre **(40)**, fibras ópticas paralelas alinhadas com uma superfície de referência, **(3, 18, 28)** fibras ópticas plásticas alinhadas, sendo a fibra de referência fixa e a fibra de emissão com um comprimento de ponta livre para se mover de acordo com a vibração a ser medida **(15)**, fibras ópticas plásticas alinhadas que se afastam entre si de acordo com a vibração **(29)**, apenas uma fibra óptica, sendo avaliada a variação dos *speckles* **(14)**, fibras ópticas alinhadas, sendo a fibra de referência fixa e a fibra de emissão com a ponta em forma de lente e livre para se mover de acordo com a vibração a ser medida **(31)**.

Neste trabalho desenvolveu-se um sensor a fibra óptica para medidas de vibração baseado no princípio de modulação de intensidade de luz. Foi utilizada a geometria composta por duas fibras alinhadas e fixas, entre elas foi adicionada uma lâmina livre para se mover de acordo com a vibração a ser medida.

Como fonte de luz optou-se por um LED **(18, 41, 42)** de alta intensidade emitindo radiação luminosa na região do vermelho, em 635 nm, **(19)** que foi acoplado a fibras ópticas com diferentes diâmetros de núcleo, 50, 100 e 200 μm ,

formando a etapa de emissão. A etapa de coleta foi configurada com fibras ópticas de mesmo diâmetro da emissão formando então três configurações diferentes. As fibras de emissão e coleta foram fixadas em um suporte e entre elas foi inserida uma lâmina livre para se movimentar, perpendicular às fibras, de acordo com a vibração.

(40)

A curva característica de resposta do sensor obtida analiticamente foi reproduzida experimentalmente. A comparação entre os resultados alcançados nessa etapa foi suficiente para validar o modelo matemático desenvolvido. O modelo desenvolvido se ajustou satisfatoriamente aos dados experimentais.

A região linear de resposta do sensor encontrada de acordo com os ensaios realizados foi de 50% do diâmetro do núcleo da fibra óptica com desvio da linearidade inferior a 1%.

A distância entre fibras adotada nas montagens é dependente da eficiência do acoplamento de luz entre as fibras. A máxima distância é limitada pela sensibilidade do fotodetector e a mínima distância deve ser suficientemente ampla para possibilitar a inserção da lâmina. Para caracterizar a perda por acoplamento foi medida a eficiência no acoplamento de luz variando a distância entre as fibras. **(40)** Na construção dos sensores para realização das medidas de vibração foram padronizadas as distâncias de 1,1 mm para a configuração de 200 μm , Figura 17, 0,66 mm para a configuração de 100 μm , Figura 18, e 0,25 mm para a configuração de 50 μm , Figura 19, que oferecem uma eficiência de acoplamento de 60% ou -4,44 dB.

Após a realização das medidas de caracterização dos componentes do sensor foi acoplada uma lâmina de aço em um atuador eletromecânico e posicionada entre as duas fibras. Com o atuador desligado a borda da lâmina foi posicionada no centro da fibra de coleta através da medida da intensidade de luz acoplada pela fibra. Com o atuador em movimento a lâmina realiza movimentos positivos e negativos em relação à referência central com amplitude controlada de modo a não extrapolar a região linear de resposta do sensor, 50 % do diâmetro do núcleo da fibra.

Para cada configuração do sensor foram realizadas medidas variando a frequência aplicada ao atuador. Para cada sinal coletado foi aplicada a função de transformada rápida de Fourier no próprio osciloscópio e o espectro resultante foi

registrado para posterior tratamento. Foi registrada também a amplitude do sinal coletado, a fim de verificar seu comportamento com relação à variação de frequência.

Com a informação de amplitude do sinal coletado foi possível registrar a frequência de ressonância do atuador eletromecânico em cada configuração do sensor. Pode ser visualizado na Figura 26, Figura 45 e Figura 61, um rápido aumento da amplitude do sinal medido, tendendo para o infinito, e depois um retorno para a amplitude inicial com mesma velocidade indicando claramente a posição onde a excursão é máxima e esse fenômeno só ocorre quando o atuador entra em ressonância.

Conforme verificado por **Kimura em 1998** e **Binu em 2007**, nos espectros registrados para a transformada rápida de Fourier das frequências analisadas são encontrados outros picos além da frequência fundamental, os quais na maioria são harmônicas da frequência fundamental geradas pelo atuador eletromecânico.(28, 31)

De acordo com os resultados encontrados para a montagem com fibras de 50 μm , Figura 27 até Figura 41, o pico equivalente à frequência fundamental apresentou boa relação sinal ruído, o que também ocorreu com os picos equivalentes às harmônicas, porém foram mais bem resolvidos nas frequências próximas da ressonância. Aparentemente, na região onde a frequência de excitação coincide com submúltiplos da frequência de ressonância ocorre uma interferência no aparecimento de harmônicas. Fenômeno semelhante ocorre na frequência de 500 Hz e 250 Hz possivelmente devido às vibrações dos postes de sustentação do alto-falante. Observa-se um aumento na quantidade de harmônicas nas frequências mais baixas, próximas de 10 Hz, aparentemente devido à vibração predial.

Nos resultados para a montagem com fibras de 100 μm , anexo 1, foi encontrado comportamento semelhante aos resultados da configuração de 50 μm com relação à frequência fundamental. Porém, nem todas as harmônicas distantes foram encontradas. Verificou-se também uma influência nas frequências de 500 Hz e 250 Hz.

Nos resultados obtidos para a montagem com fibras de 200 μm , anexo 2, observa-se uma grande interferência nas frequências próximas da frequência de ressonância, aparentemente gerada por vibrações indesejadas no suporte de

sustentação do alto-falante. As frequências mais baixas apresentaram um número muito superior de harmônicas quando comparado com as demais frequências nesta montagem. Sugere-se que influências externas, como vibração predial, vibrações induzidas por equipamentos eletromecânicos, entre outras são responsáveis pelas interferências.

7 Conclusão

Neste trabalho um sensor de vibração a fibra óptica por modulação de intensidade foi analisado analiticamente e experimentalmente. Concluindo-se que:

O modelo teórico proposto inicialmente foi confirmado pelos experimentos de desenvolvimento e caracterização, indicando que a região linear de resposta do sensor é restrita a 50% do diâmetro do núcleo da fibra óptica de coleta.

As três geometrias testadas registraram de maneira satisfatória a frequência de ressonância do atuador eletromecânico utilizado.

Os espectros da FFT para as três montagens registraram com exatidão a frequência aplicada no atuador eletromecânico.

Novas medidas são necessárias para avaliar o comportamento do sensor quanto ao aparecimento das harmônicas da frequência de excitação do atuador. Para essas medidas devem-se eliminar as influências externas, isolando o plano de trabalho com um sistema pneumático, por exemplo. Deve-se também implementar suportes mais rígidos evitando possível absorção ou geração de frequências harmônicas.

A montagem composta por fibras de 50 μm apresentou uma divergência da curva de resposta experimental quando comparada com a teoria, sugerindo ser este o limite prático para a montagem do sensor.

Referências

- 1- DAMEAN, N.; REGTIEN, P.P.L. Measurement concepts: from classical transducers to new MEMS. **Measurement**. v.27, p. 159–178, 2000.
- 2- MOSZKOWICZ, V. N. Monitoração de deformações em dutos utilizando sensores a fibra óptica com base em redes de Bragg. **Bol. téc. PETROBRAS**. v.45, n. 2, p. 160-176, 2002.
- 3- SAKAMOTO, J. M. S. **Sensor em fibra óptica aplicado à caracterização de atuadores piezoelétricos flexensionais**. 2006. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2006.
- 4- KLEMPA, F.; KAMIKAWACHI, R. C.; ROSADO, R.; KULLER, F.; MÜLLER, M.; FABRIS, J. L. Sensores A Fibra Ótica Para Detecção De Hidrocarbonetos E Monitoração Da Temperatura Em Polidutos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3., Salvador. **Anais... . v. 1. p. 1-9. 2005.**
- 5- LEE, B. Review of the present status of optical fiber sensors. **Optical Fiber Technology**. v.9, p. 57–79, 2003.
- 6- GRATTAN, K.T.V., SUN, T. Fiber optic sensor technology: an overview. **Sensors and Actuators**. v. 82, p. 40–61, 2000.
- 7- GANGOPADHYAY, T. K.; CHAKRAVORTI, S.; BHATTACHARYA, K.; CHATTERJEE, S. Wavelet analysis of optical signal extracted from a non-contact fibre-optic vibration sensor using an extrinsic Fabry–Perot interferometer. **Meas. Sci. Technol**. v. 16, p. 1075–1082, 2005.
- 8- YANG, Y.; YAMAZAKI, K.; AOYAMA, H.; MATSUMIYA, S. Fiber optic surface topography measurement sensor and its design study. **Precision Engineering**. v. 24, p. 32–40, 2000.
- 9- FALATE, R.; KAMIKAWACHI, R.C.; MULLER, M.; KALINOWSKI, H.J.; FABRIS, J.L. Fiber optic sensors for hydrocarbon detection. **Sensors and Actuators B**. v. 105, p. 430–436, 2005.

- 10- YUAN, L.; ZHOU, L.; WU, J. Fiber optic temperature sensor with duplex Michleson interferometric technique. **Sensors and Actuators**. v. 86, p. 2–7, 2000.
- 11- HASTINGS, M. C.; CHIU, B.; NIPPA, D. W. Engineering the development of Optical Fiber Sensors for adverse environments. **Nuclear Engineering and Design**. v. 167, p. 239-249, 1997.
- 12- GIOZZA, W. F.; CONFORTI, E.; WALDMAN, H. **Fibras Ópticas: Tecnologia e Projetos de Sistemas**. Rio de Janeiro: MAKRON Books, 1991. 734p.
- 13- DAVIS, C. M.; CAROME, E. F.; WEIK, M. H.; EZEKIEL, S.; EINZING, R. E. **Fiberoptic sensor technology handbook**. Herndon: Optical Technologies (OPTECH), 1986. 112p.
- 14- LENG, J. S.; ASUNDI, A. NDE of smart structures using multimode fiber optic vibration sensor. **NDT&E International**. v. 35, p. 45-51, 2002.
- 15- KUANG, K. S. C.; CANTWELL, W. J. The use of plastic optical fibre sensors for monitoring the dynamic response of fibre composite beams. **Meas. Sci. Technol**. v. 14, p. 736–745, 2003.
- 16- RIBEIRO, A. B. L. **Esquemas de multiplexagem de sensores de fibra óptica**. 1996. 225f. Tese (Doutorado na Especialidade de Eletromagnetismo e Eletrônica) – Departamento de Física da Faculdade de Ciências, Universidade de Porto, 1996.
- 17- KLEMB, F.; KAMIKAWACHI, R. C.; MÜLLER, M.; KALINOWSKI, H. J.; FABRIS, J. L. Sensor a fibra ótica para detecção de hidrocarbonetos em oleodutos. **Rio Oil & Gas Expo and Conference**. p. 1-4, 2004.
- 18- ALAYLI, Y.; TOPÇU, S.; WANG, D.; DIB, R.; CHASSAGNE, L. Applications of a high accuracy optical fiber displacement sensor to vibrometry and profilometry. **Sensor and Actuators**. v. 116, p. 85-90, 2004.
- 19- UDD, E. **Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 476p.
- 20- MAIMAN, T. H. Optical an Microwave-Optical Experiments in Ruby. **Physical Review Letters**. v. 4, n. 11, p. 564-566, 1960.

- 21- MAIMAN, T. H. Stimulated Optical Radiation in Ruby. **Nature**. n. 187, p. 493-494, 1960.
- 22- SCHAWLOW, A. L.; TOWNES, C. H. Infrared and Optical Masers. **Physical Review**. v. 112, n. 6, p. 1940-1949, 1958.
- 23- Introduction to Laser Technology: Basic Laser Principles. In: **Catálogo Melles Griot**. Disponível em: http://www.mellesgriot.com/pdf/CatalogX/X_36_2-5.pdf. Acesso em: 08 Out. 2007.
- 24- GÖRDÉN, B. **Optical Microphone with digital signal analysis of the resulting signal, to be used on string instruments**. 1994. 38f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) Centre for Computer Architecture, Halmstad University, 1994.
- 25- MARQUES, A. E. B.; CRUZ, E. C. A.; JÚNIOR, S. C. **Dispositivos Semicondutores: Diodos e Transistores**. 4. ed. São Paulo: Érica, 1998. 389p.
- 26- WILSON, J. **Sensor Technology Handbook**. Burlington: Elsevier, 2005.
- 27- Di Sante, R.; Scallise, L. A novel fiber optic sensor for multiple and simultaneous measurement of vibration velocity. **Review of Scientific Instruments**. v. 75, n. 6, p. 1952-1958, 2004.
- 28- BINU, S.; PILLAI, V. P. M.; CHANDRASEKARAN, N. Fibre optic displacement sensor for the measurement of amplitude and frequency of vibration. **Optics & Laser Technology**. v. 39, p. 1537-1543, 2007.
- 29- KUANG, K. S. C.; MAALEJ, M.; QUEK, S. T. An application of a plastic optical fiber sensor and genetic algorithm for structural health monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 17, p. 361-379, 2006.
- 30- GIALLORENZI, T. G.; BUCARO, J. A.; DANDRIDGE, A.; SIGEL, G. H.; COLE, J. H.; RASHLEIGH, S.; PRIEST, R. G. Optical fiber sensor technology. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. v. MTT-30, n. 4, p. 472-511, 1982.
- 31- KIMURA, M.; TOSHIMA, K. Vibration sensor using optical-fiber cantilever with bulb-lens. **Sensors and Actuators A**. v. 66, p. 178-183, 1998.

- 32- ZOOK, J. D.; HERB, W. R.; BASSETT, C. J.; STARK, T.; SCHOESS, J. N.; WILSON, M. L. Fiber-optic vibration sensor based on frequency modulation of light-excited oscillators. **Sensors and Actuators**. v. 83, p. 270-276, 2000.
- 33- COTÉ, G. L.; LEC, R. M.; PISHKO, M. V. Emerging Biomedical Sensing Technologies and Their Applications. **IEEE Sensors Journal**. v.3, n. 3, p. 251-266, 2003.
- 34- CHITNIS, V. T.; KUMAR, S.; SEN, D. Optical Fiber Sensor for Vibration Amplitude Measurement. **Journal of Lightwave Technology**. v. 7, n. 4, p. 687-691, 1989.
- 35- PADULA, D. P. F.; CARNEIRO, A. A. O.; BAFFA, O. Biomechanical sensor to analyze the viscoelastic properties of biological tissues. In: International Summer School and Symposium on Medical Devices and Biosensors, **3.**, Boston. **Proceedings...** v. 1. p. 77-78. 2006.
- 36- SCILINGO, E. P.; GEMIGNANI, A.; PARADISO, R. TACCINI, N.; GHELARDUCCI, B.; ROSSI, D. Performance Evaluation of Sensing Fabrics for Monitoring Physiological and Biomechanical Variables. **IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine**. v. 9, n. 3, p. 345-352, 2005.
- 37- JENSEN, J. C.; LI, J. K-J.; SIGEL, G. A Fiber Optic Angular Sensor for Biomedical Applications. **Position Sensors and Mechano Sensors**. v. 4, p. 1118-1119, 1989.
- 38- VELTINK, P. H.; LIEDTKE, C. DROOG, E. Ambulatory Measurement of Ground Reaction Forces. **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**. p. 701-703, 2004.
- 39- SPIEGEL, M. R. **Manual de fórmulas, métodos e tabelas de matemática**. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1992. 420p.
- 40- PEINER, E.; SCHOLZ, D.; SCHLACHETZKI, A.; HAUPTMANN, P. A micromachined vibration sensor based on the control of power transmitted between optical fibres. **Sensors and Actuators A**, v. 65, p. 23-29, 1998.

- 41- ALAYLI, Y.; TOPCU, S.; CHASSAGNE, L.; VIENNET, J. Compensation of the thermal influence on a high accuracy optical fibre displacement sensor. **Sensors and Actuators A**. v. 120, p. 343-348, 2005.
- 42- BRANZALOV, P. P.; IVANOV, L. M.; PAVLOV, L. I. Displacement sensor using a hollow metal optical waveguide. **Rev. Sci. Instrum.** v. 65, n. 6, p. 1889-1892, 1994.

Anexo A

Medidas de frequência de vibração para o sensor construído com fibras de 100 μm de diâmetro de núcleo. A Figura 45 mostra, para essa configuração do sensor, a medida da amplitude do sinal acoplado pela fibra coletora para cada frequência aplicada na excitação do atuador eletromecânico.

Para a realização dessa medida foi adotado 480 mV de amplitude para o sinal aplicado ao atuador eletromecânico. Esse valor de amplitude foi suficiente para as medidas e manteve o sensor trabalhando dentro das dimensões do núcleo da fibra. Desta forma, evitou-se o ceifamento do sinal de saída.

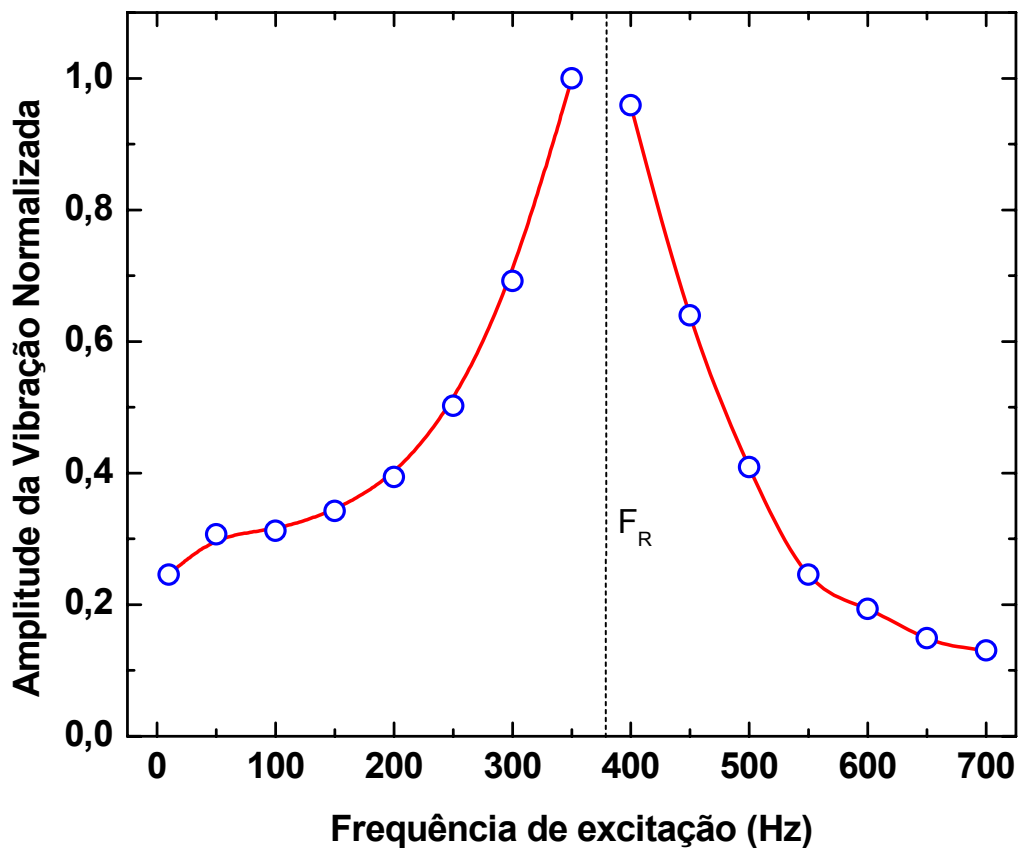


Figura 45: Amplitude do sinal acoplado pela fibra de coleta para cada frequência aplicada no atuador eletromecânico. ($\phi=100\mu\text{m}$)

De acordo com a Figura 45 a amplitude do sinal coletado aumenta rapidamente quando a frequência de excitação se aproxima da frequência de

ressonância (F_R) do atuador eletromecânico, aproximadamente 380 Hz, e decai da mesma forma para frequências maiores.

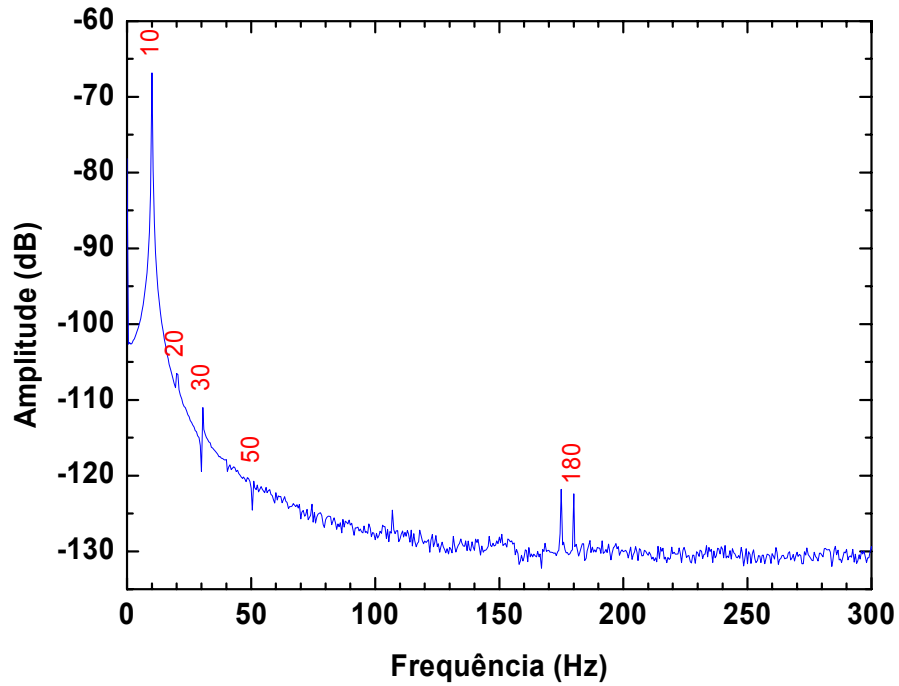


Figura 46: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 10 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

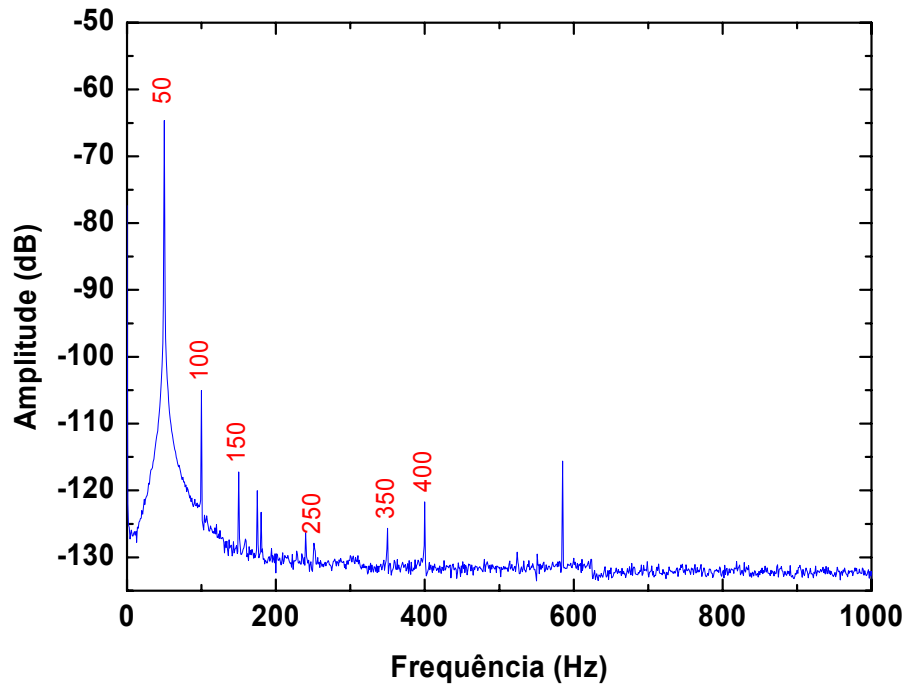


Figura 47: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 50 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

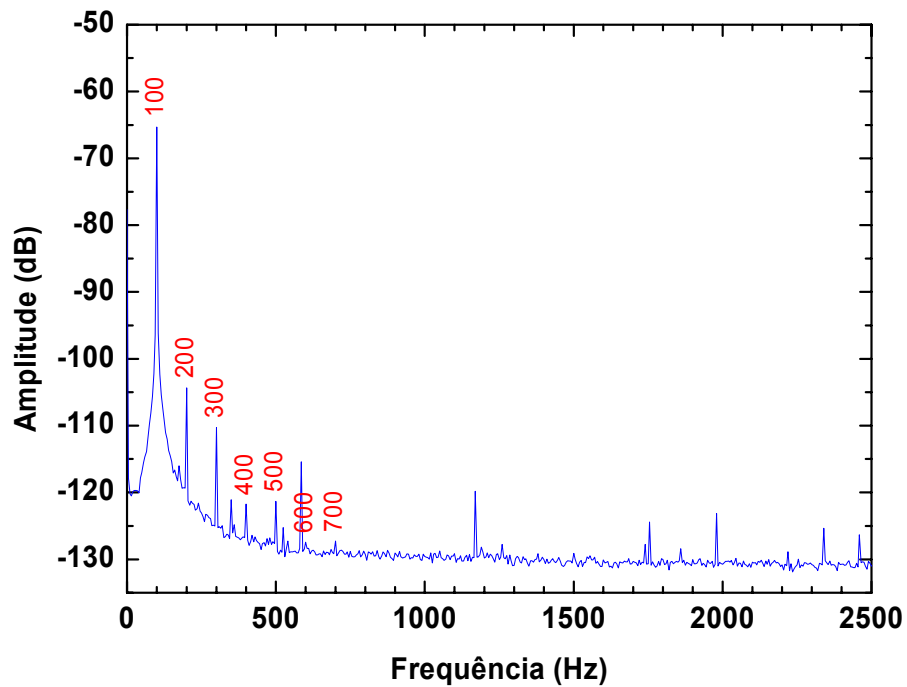


Figura 48: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 100 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

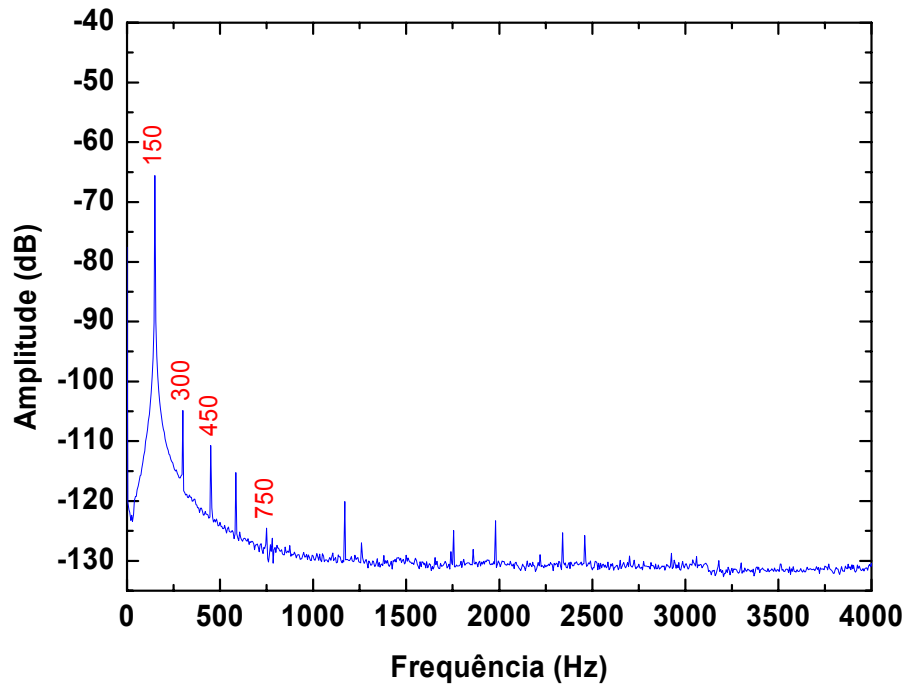


Figura 49: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 150 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

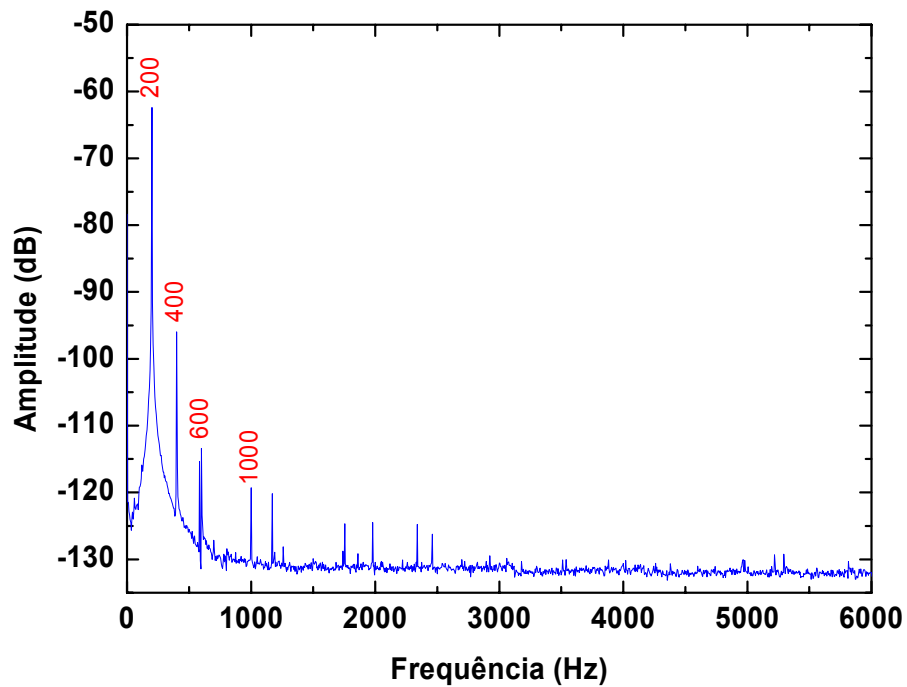


Figura 50: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 200 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

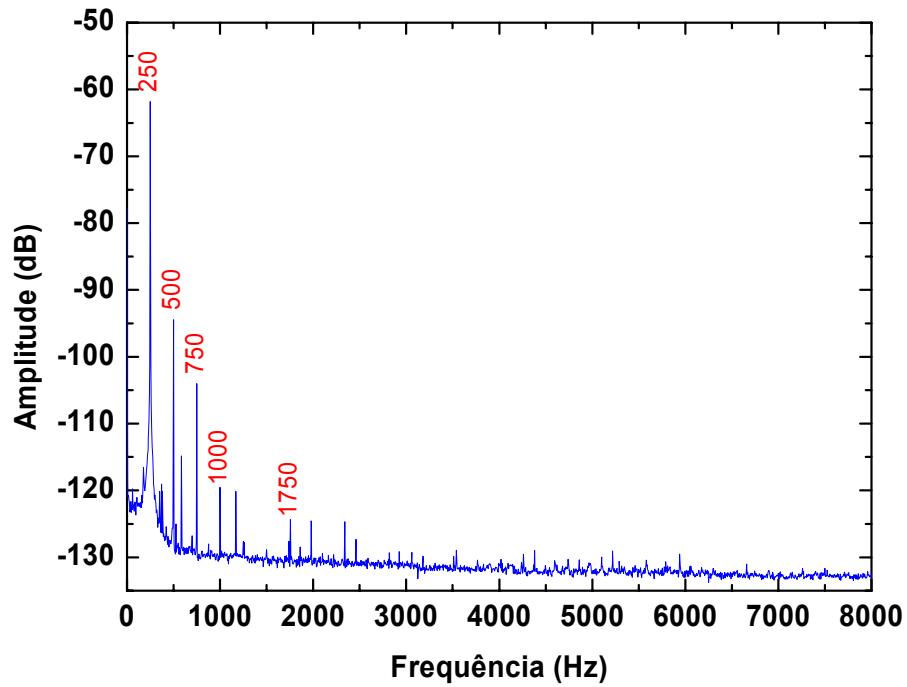


Figura 51: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 250 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

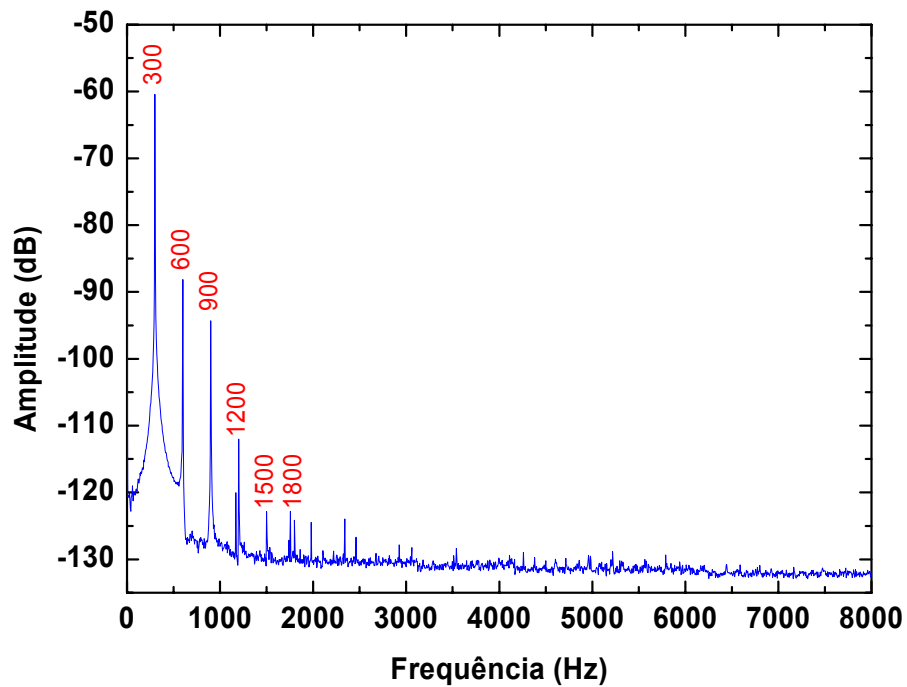


Figura 52: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 300 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

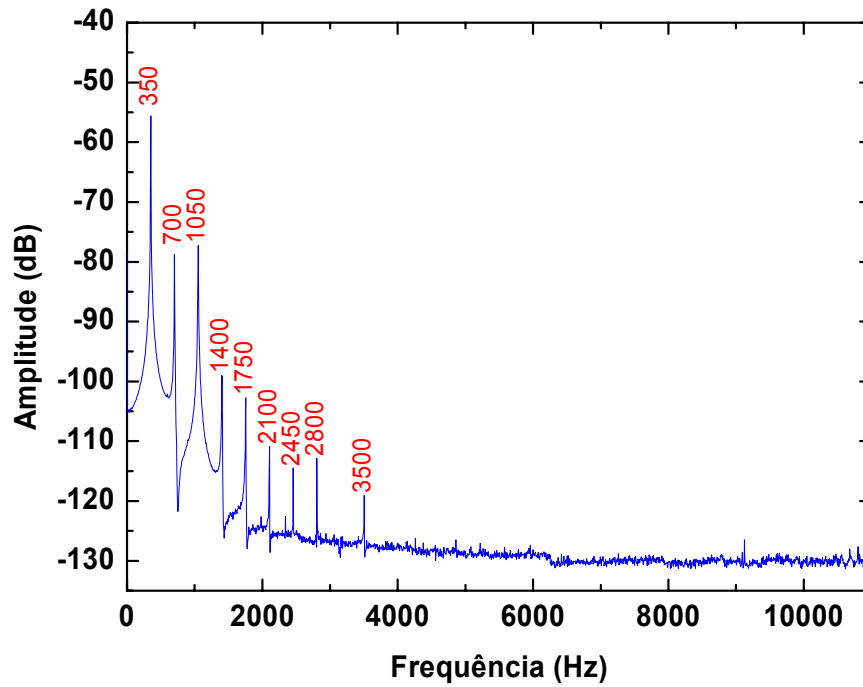


Figura 53: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 350 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

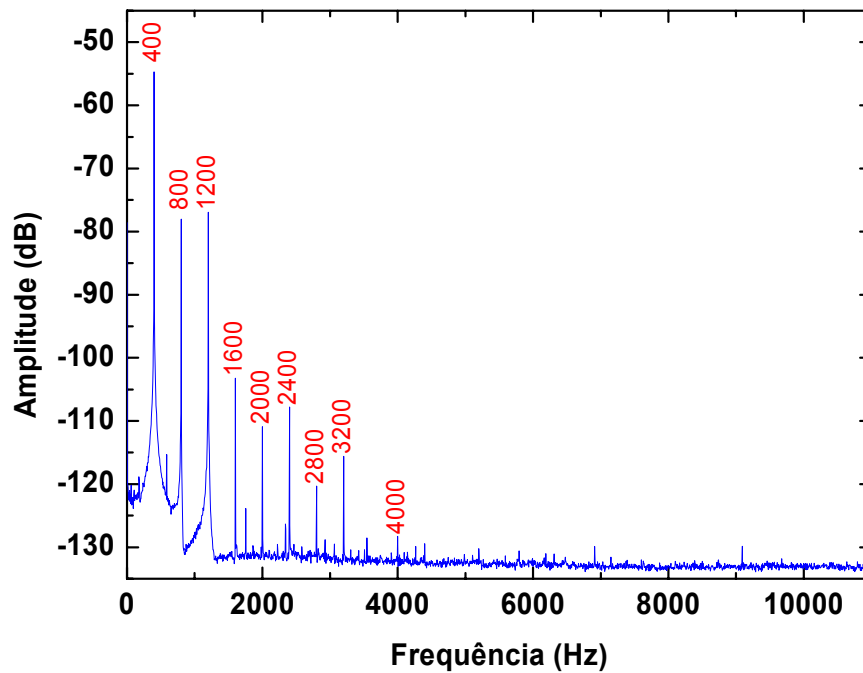


Figura 54: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 400 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

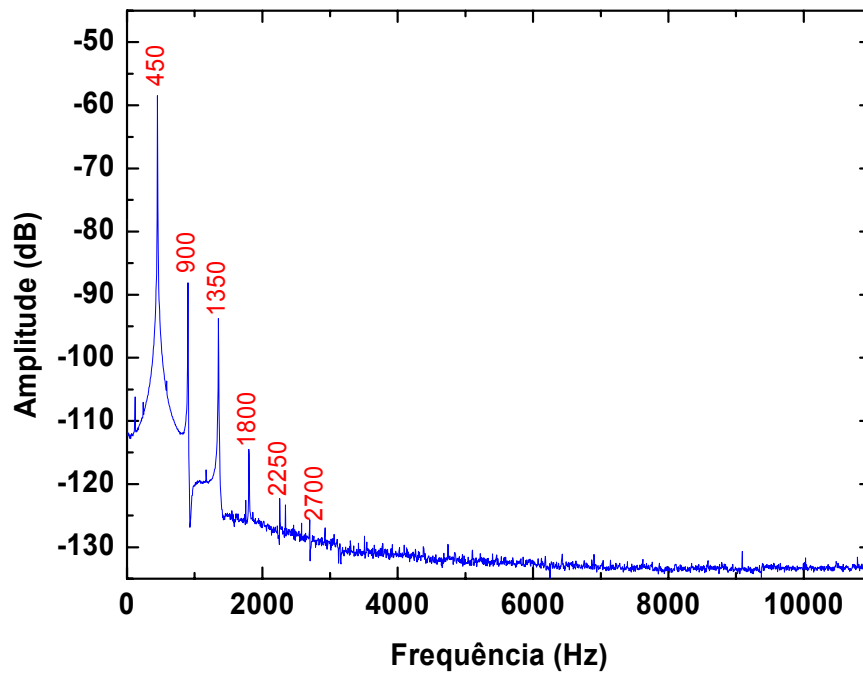


Figura 55: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 450 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

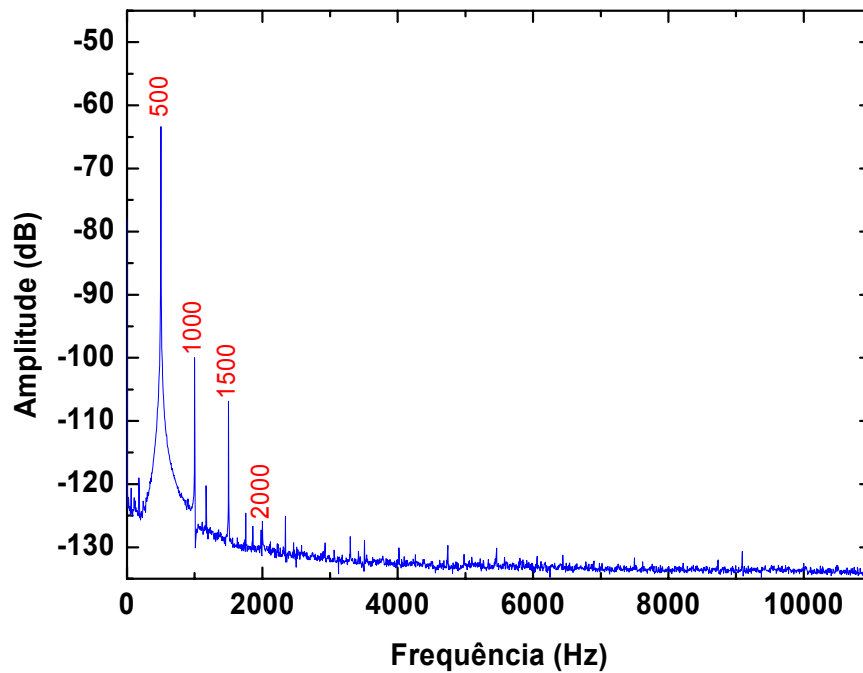


Figura 56: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 500 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

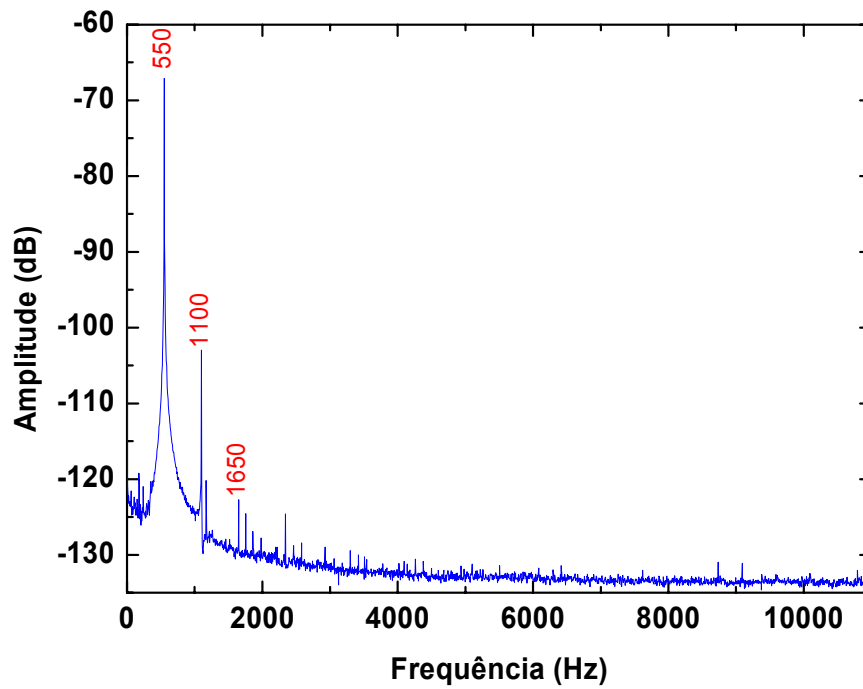


Figura 57: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 550 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

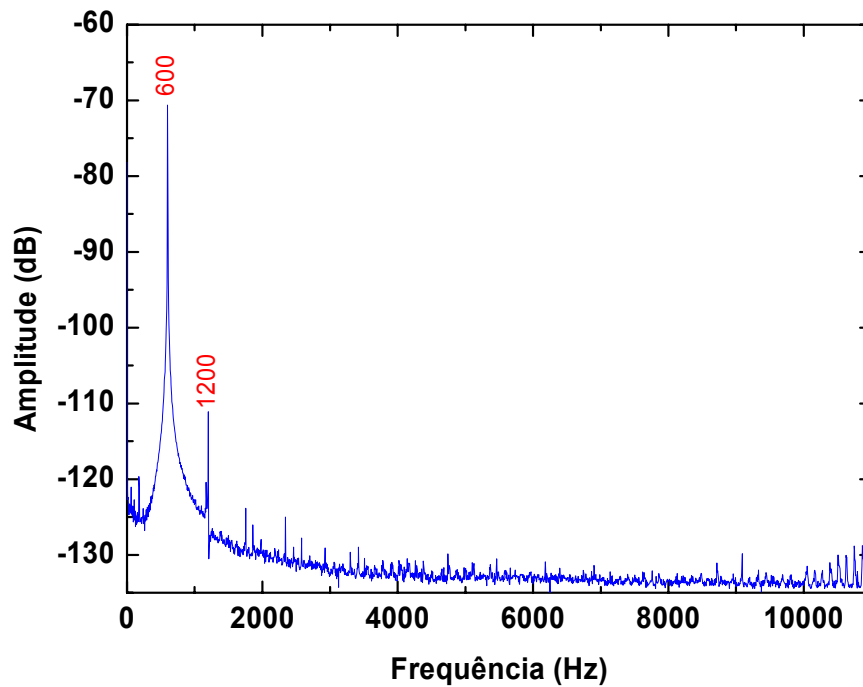


Figura 58: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 600 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

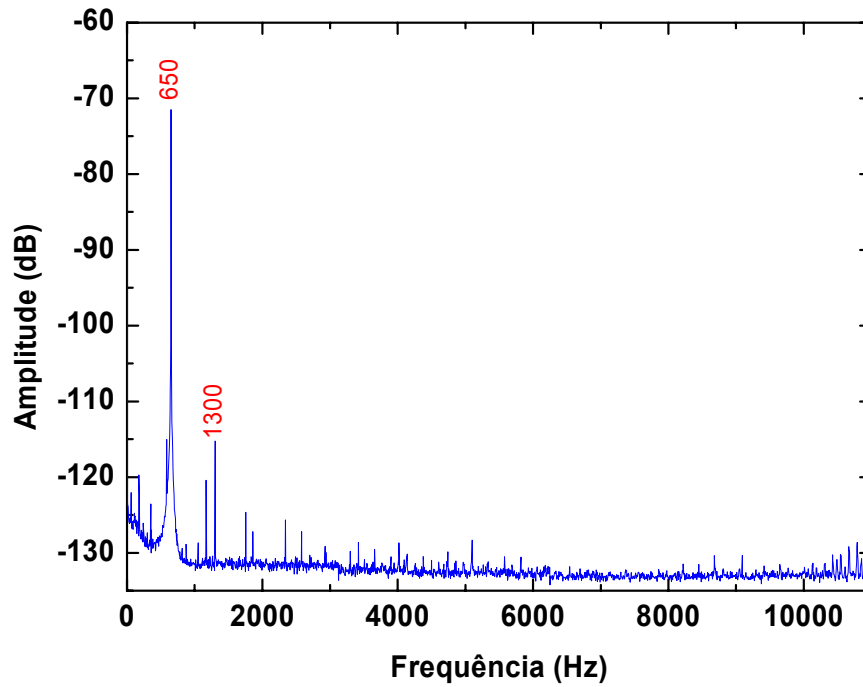


Figura 59: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 650 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

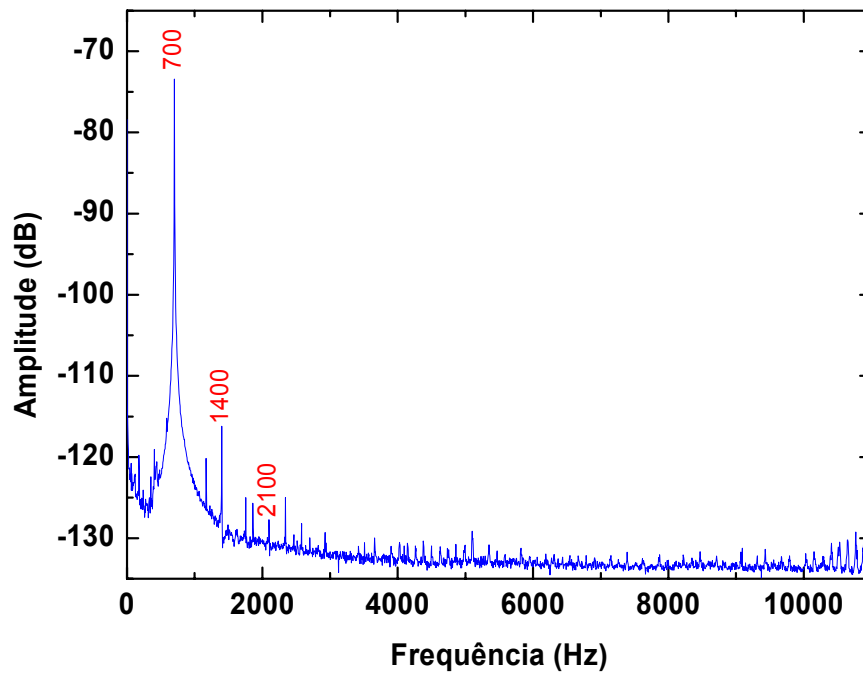


Figura 60: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 700 Hz. ($\phi=100\mu\text{m}$)

Anexo B

Medidas de freqüência de vibração para o sensor construído com fibras de $200\ \mu\text{m}$ de diâmetro de núcleo. A Figura 61 mostra, para essa configuração do sensor, a medida da amplitude do sinal acoplado pela fibra coletora para cada freqüência aplicada na excitação do atuador eletromecânico.

Para a realização dessa medida foi adotado $960\ \text{mV}$ de amplitude para o sinal aplicado ao atuador eletromecânico. Esse valor de amplitude foi suficiente para as medidas e manteve o sensor trabalhando dentro das dimensões do núcleo da fibra. Desta forma, evitou-se o ceifamento do sinal de saída.

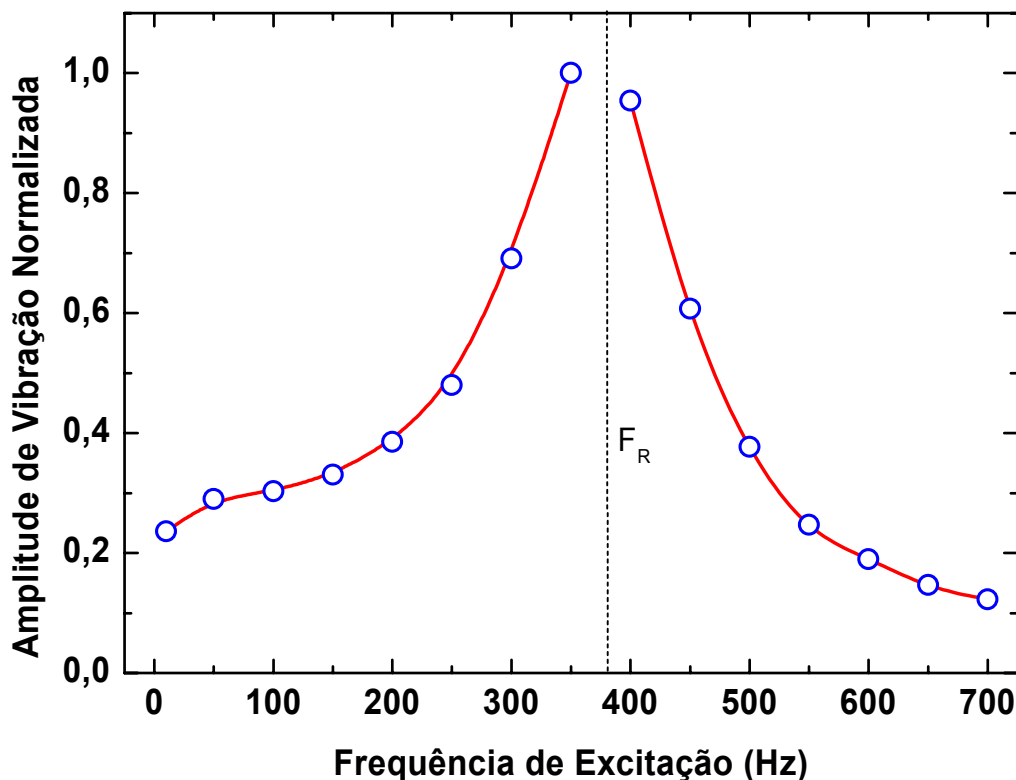


Figura 61: Amplitude do sinal acoplado pela fibra de coleta para cada freqüência aplicada no atuador eletromecânico. ($\phi=200\ \mu\text{m}$)

De acordo com a Figura 61 a amplitude do sinal coletado aumenta rapidamente quando a freqüência de excitação se aproxima da freqüência de

ressonância (F_R) do atuador eletromecânico, aproximadamente 380 Hz, e decai da mesma forma para frequências maiores.

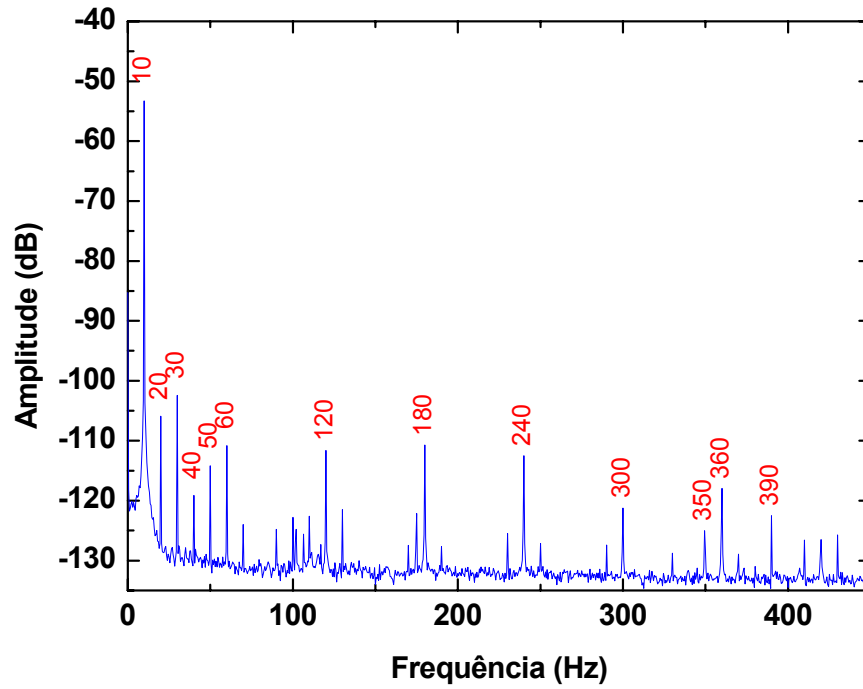


Figura 62: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 10 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

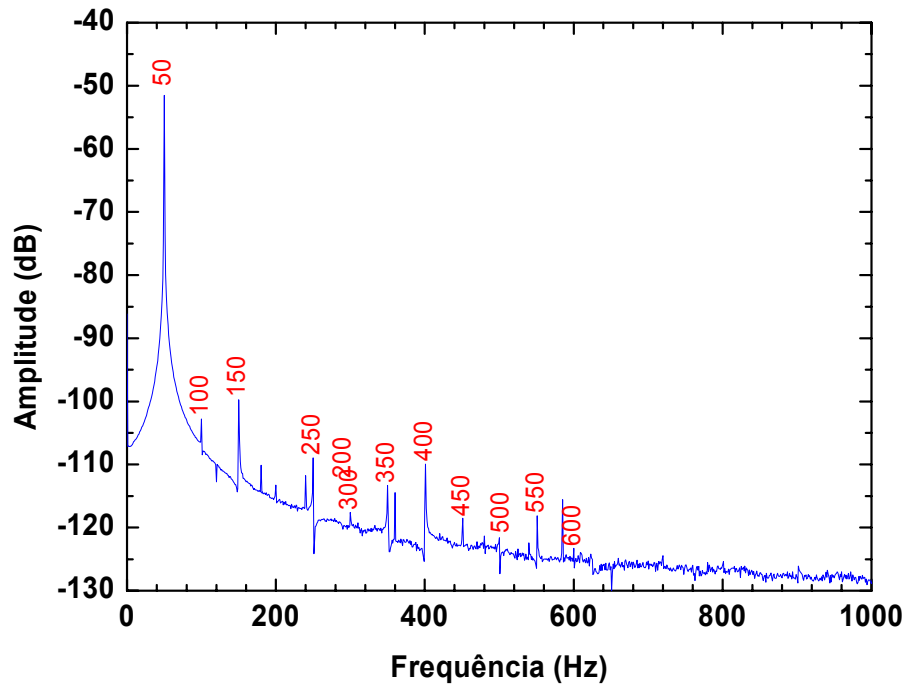


Figura 63: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 50 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

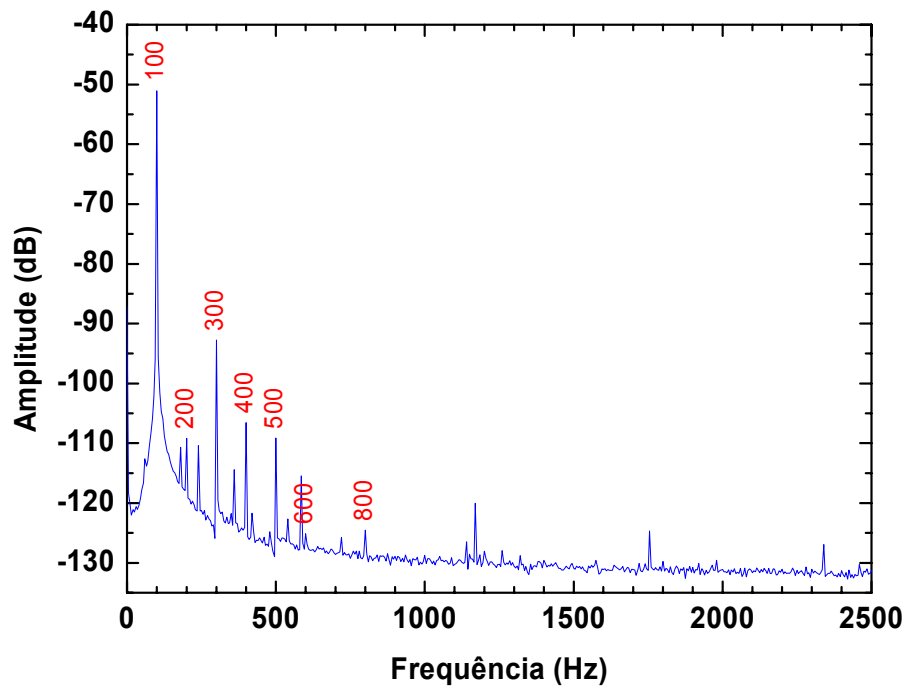


Figura 64: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 100 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

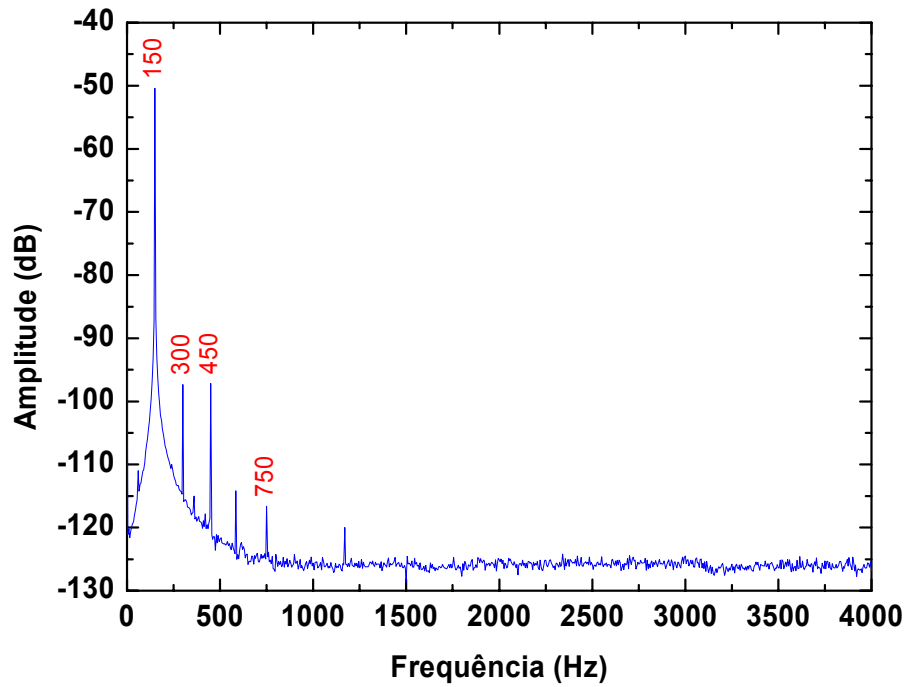


Figura 65: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 150 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

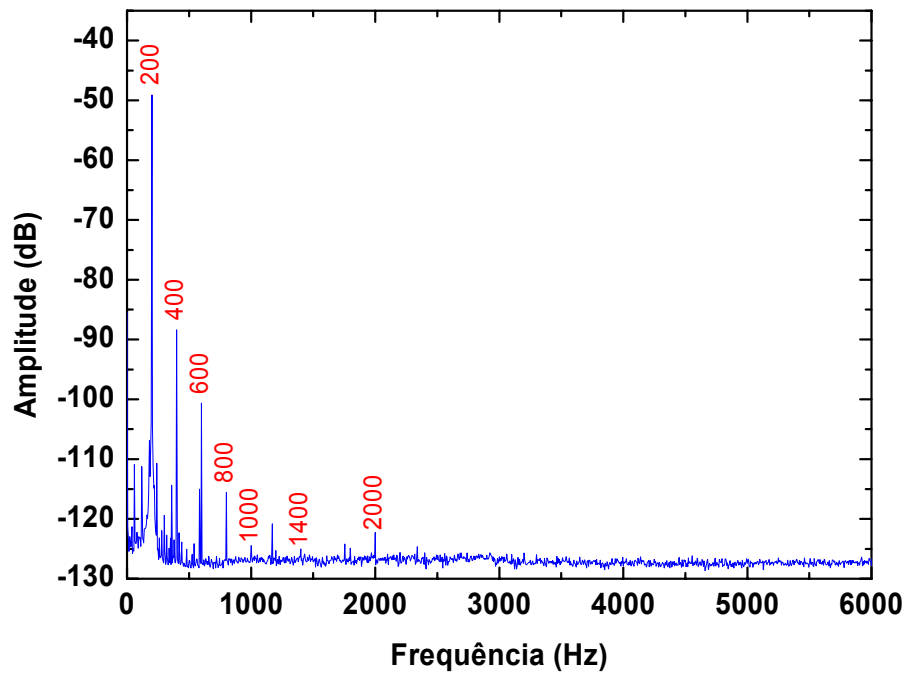


Figura 66: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na freqüência de 200 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

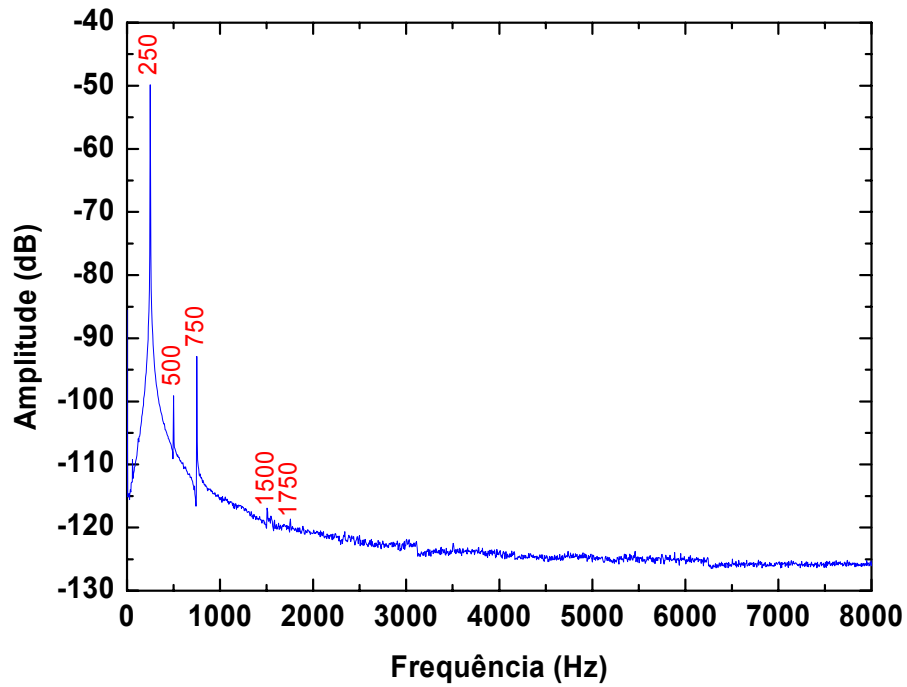


Figura 67: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 250 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

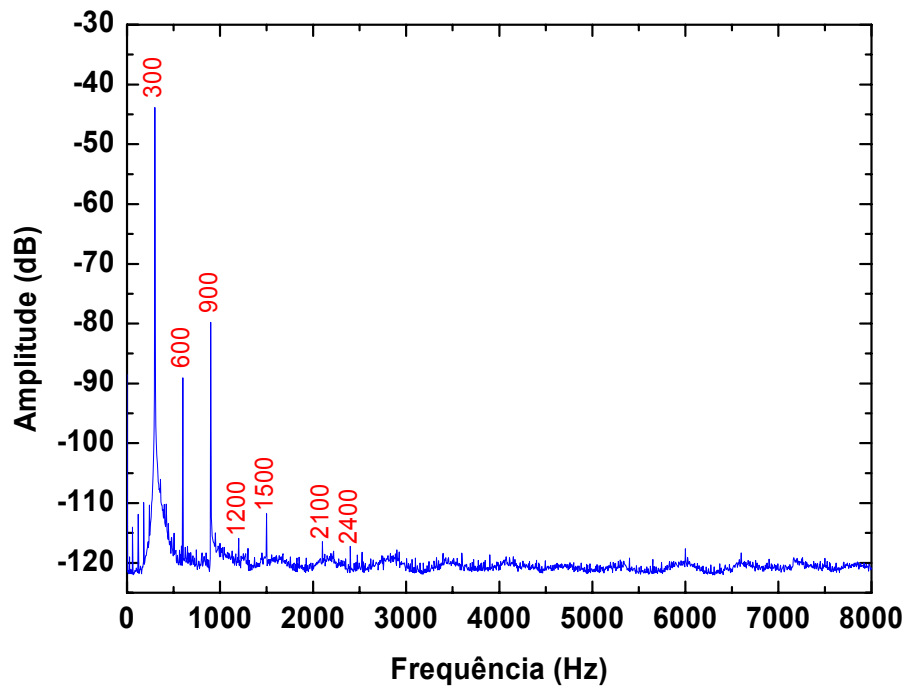


Figura 68: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 300 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

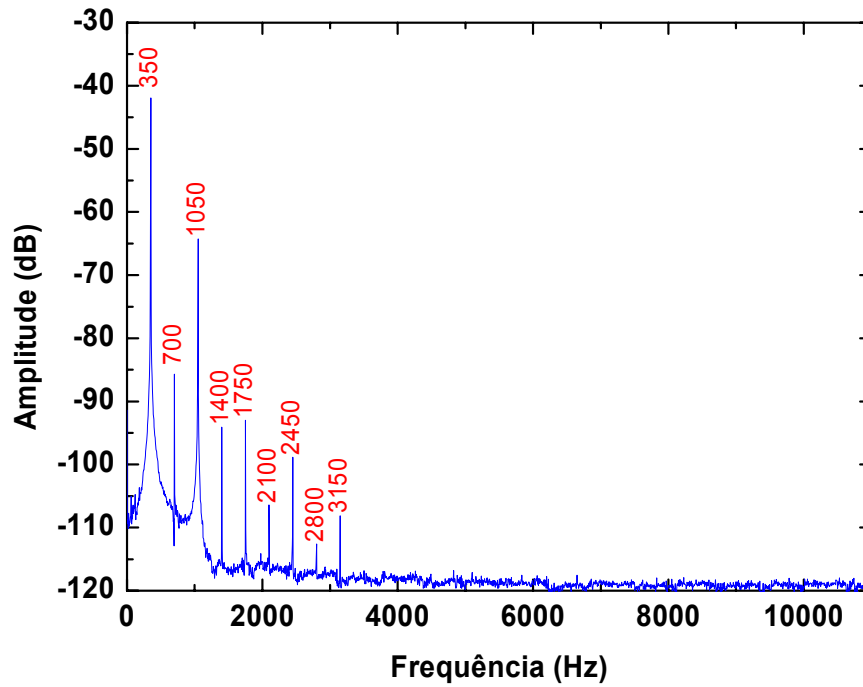


Figura 69: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 350 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

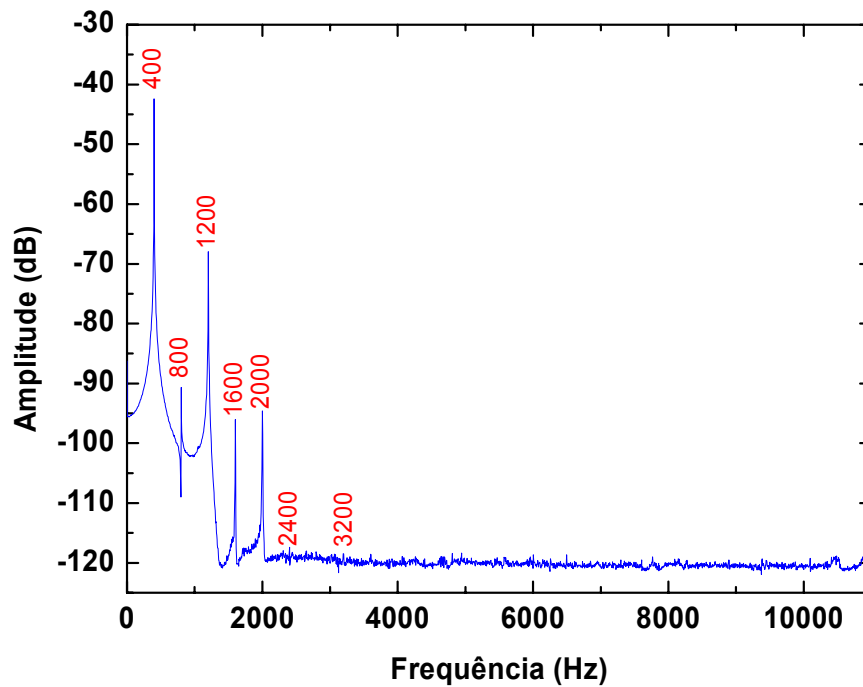


Figura 70: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 400 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

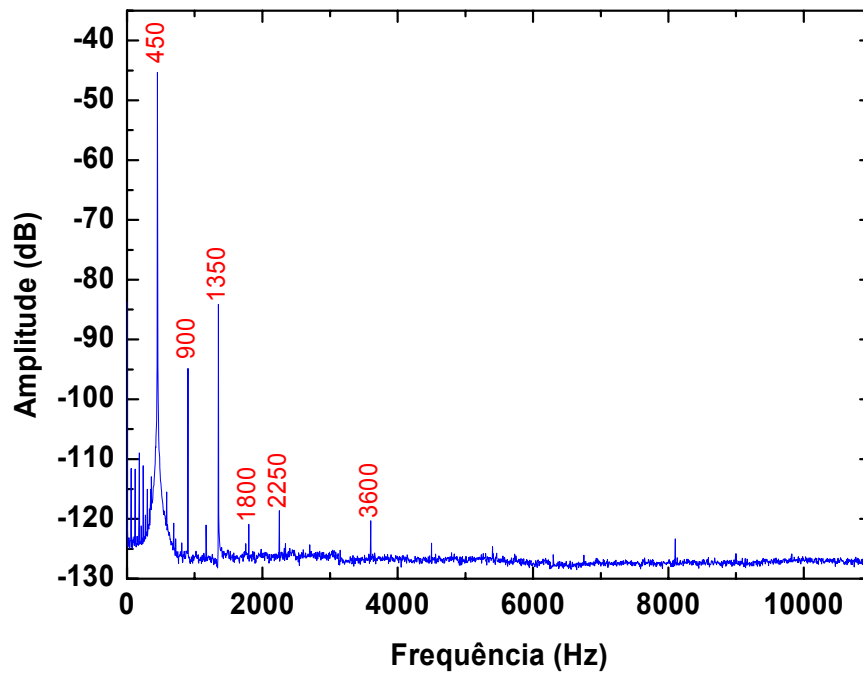


Figura 71: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 450 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

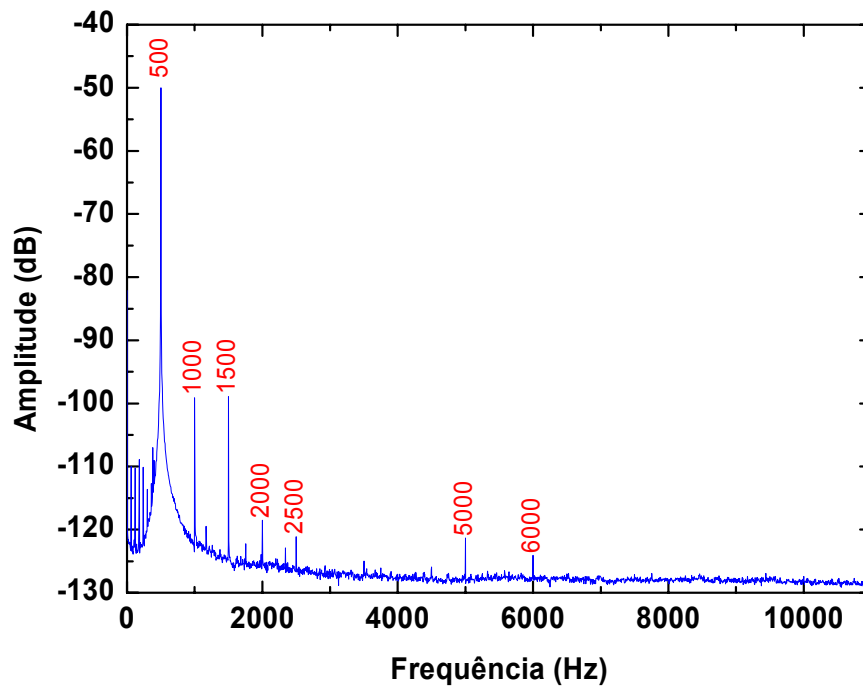


Figura 72: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 500 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

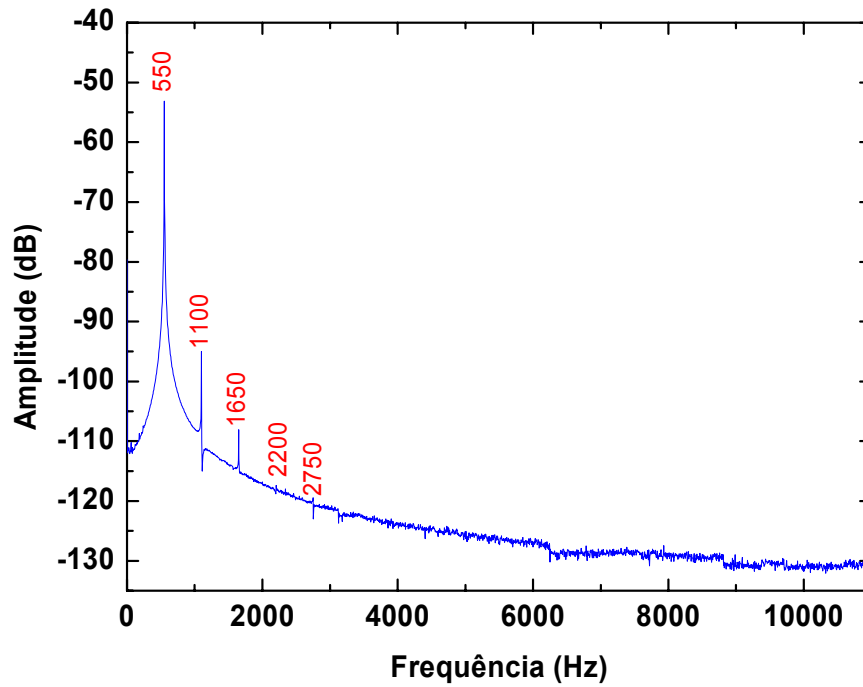


Figura 73: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 550 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

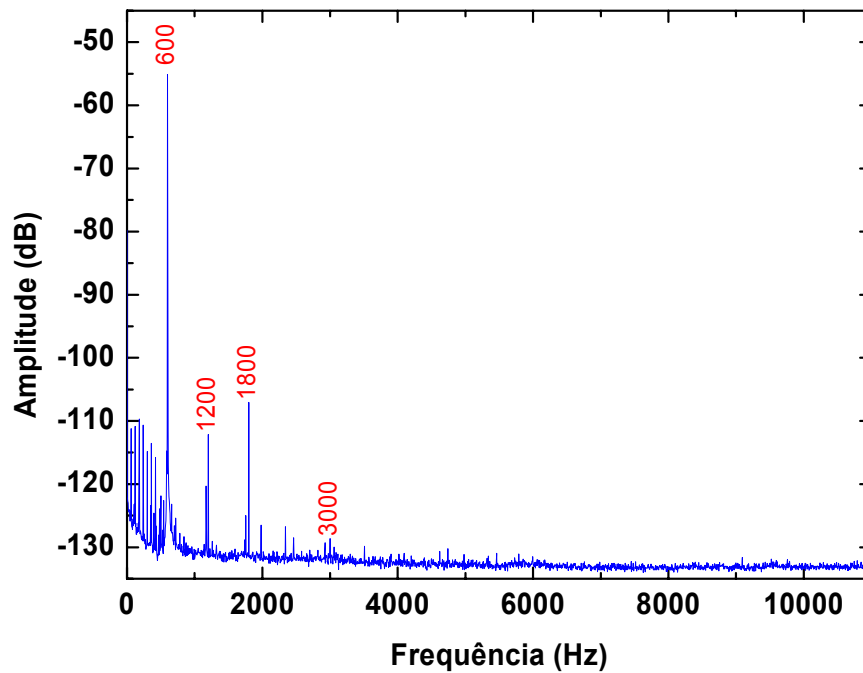


Figura 74: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 600 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

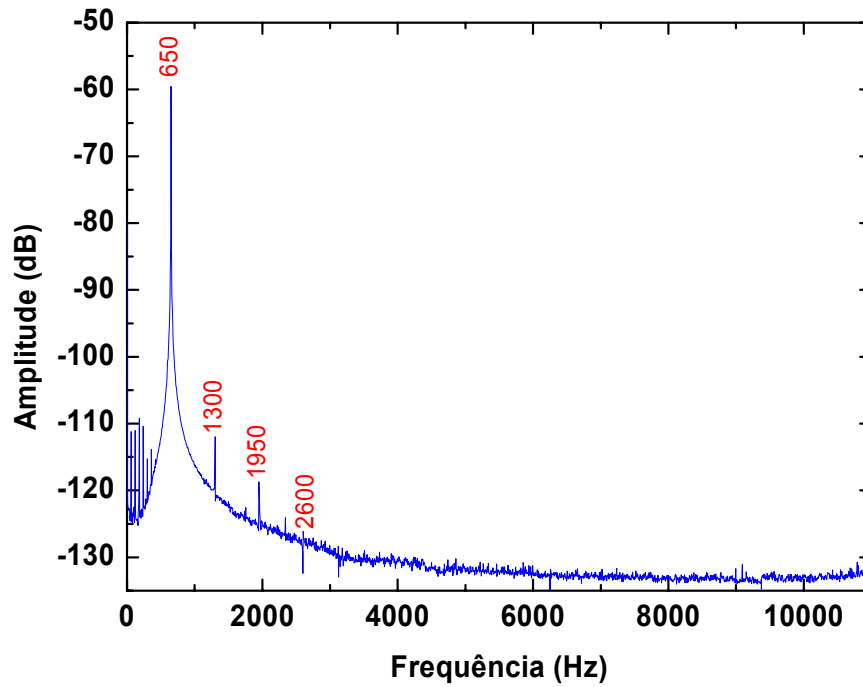


Figura 75: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 650 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)

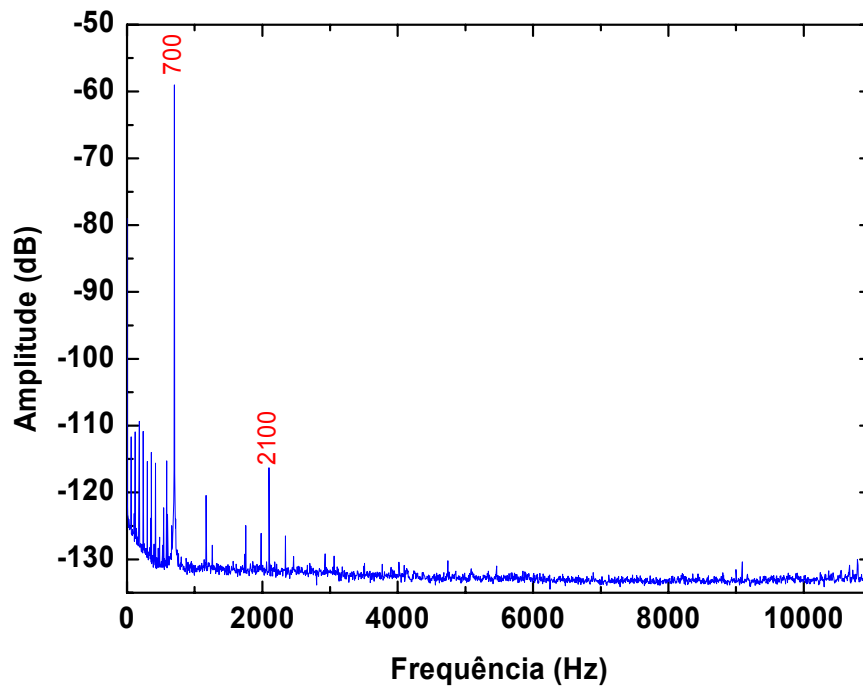


Figura 76: FFT do sinal fornecido pelo sensor quando o atuador eletromecânico foi excitado senoidalmente na frequência de 700 Hz. ($\phi=200\mu\text{m}$)