

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

JOEL GONÇALVES PEREIRA

**SENSORES DE VIBRAÇÃO BASEADOS EM REDE DE BRAGG EM
FIBRA ÓTICA AFINADA – COMPARAÇÃO E APLICAÇÃO NO
MONITORAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS**

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA
2016**

JOEL GONÇALVES PEREIRA

**SENSORES DE VIBRAÇÃO BASEADOS EM REDE DE BRAGG EM
FIBRA ÓTICA AFINADA – COMPARAÇÃO E APLICAÇÃO NO
MONITORAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências – Área de Concentração: Fotônica em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Valmir de Oliveira

Curitiba

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P436s
2016
Pereira, Joel Gonçalves
Sensores de vibração baseados em rede de Bragg em fibra
ótica afinada : comparação e aplicação no monitoramento de
motores elétricos / Joel Gonçalves Pereira.-- 2016.
74 f. : il. ; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês
Disponível também via World Wide Web
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal
do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica
e Informática Industrial, Curitiba, 2016
Bibliografia: f. 72-74

1. Redes de Bragg. 2. Detectores de fibra óptica. 3. Motores
elétricos. 4. Informática industrial – Dissertações. I. Oliveira, Val-
mir de. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Progra-
ma de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática In-
dustrial. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Dissertação N.º. _____

Sensores de Vibração Baseados em rede de Bragg em Fibra Óptica Afinada – Comparação e Aplicação no Monitoramento de Motores Elétricos

por

Joel Gonçalves Pereira

Orientador: Prof. Dr. Valmir de Oliveira (UTFPR)

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: **Fotônica em Engenharia** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 14h do dia 20 de setembro 2016. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

Prof. Dr. Valmir de Oliveira
(Presidente – UTFPR)

Prof.ª Dr.ª Francelli Klemba Coradin
(UNESA)

Prof. Dr. Paulo de Tarso Neves Junior
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do CPGEI.

DEDICATÓRIA

À minha esposa e companheira Regina e às minhas queridas filhas Aline e Susan, por tudo que elas representam na minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela oportunidade de participar deste processo educacional que proporcionou um enriquecimento profissional e a sua equipe de professores que compartilharam conosco seus conhecimentos e experiências.

Ao Professor Doutor Valmir de Oliveira pelo tempo e dedicação dispensados na orientação deste trabalho.

Aos colegas do laboratório de fotônica, pelo apoio e colaboração, em especial à Camila Carvalho de Moura.

Ao amigo Rafael Linessio pelo apoio nos ensaios para caracterização do acelerômetro.

A Capes, Finep, CNPq, Fundação Araucária e Unicamp, pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, pelos seus ensinamentos, dedicação e amor.

Aos meus familiares, em especial minha esposa Regina e minhas filhas Aline e Susan, pela compreensão e apoio durante o período de estudos.

RESUMO

PEREIRA, Joel Gonçalves . Sensores de Vibração Baseados em Redes de Bragg em Fibras Óticas Afinadas – Comparação e Aplicação no Monitoramento de Motores Elétricos. 2016. 74 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

Este trabalho apresenta a comparação entre as respostas à vibração, de sensores baseados em redes de Bragg em fibra ótica, sendo um em fibra padrão G-652 (FBG) e outros na mesma fibra, porém afinada – *taper* (TFBG) com diâmetros de 60 μ m e 80 μ m. Os sensores foram submetidos à vibração na faixa de frequência entre 50Hz e 240Hz, geradas por um alto falante alimentado através de um amplificador por um gerador de ondas senoidais com controle de frequência e amplitude. A faixa de frequência utilizada é de interesse para aplicação no monitoramento de vibração em motores elétricos, cujas frequências de trabalho são de 57,0Hz a 59,2Hz e suas harmônicas. Os resultados mostraram que os sensores à vibração baseados em TFBG, tiveram resultado superior ao da FBG, obtendo-se um ganho médio de 2,1 para a TFBG 80 μ m e de 2,7 para a TFBG 60 μ m. Utilizando, como referência, um acelerômetro baseado em redes de Bragg em fibra ótica de sensibilidade 98pm/g, o sensor TFBG 80 μ m apresentou uma sensibilidade de 64,4pm/g e o sensor TFBG 60 μ m apresentou uma sensibilidade de 84,8pm/g.

Palavras-chave : Sensor de Vibração, FBG, TFBG, *Taper*.

ABSTRACT

PEREIRA, Joel Gonçalves. Fiber Bragg Gratings Tapered Vibration Sensors - Comparison and Application in Electric Motors Monitoring. 2016. 74 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

This work presents results of a comparison of the responses to vibration sensors based on Bragg gratings in optical fiber, being a standard fiber G-652 (FBG) and others in the same fiber, but tapered (TFBG) with diameters of 60 micrometers and 80 micrometers. The sensors were subjected to vibration in the frequency range between 50Hz and 240Hz, generated by a speaker through an amplifier powered by a sinusoidal wave generator with a frequency and voltage control. The frequency range used is of interest for use in the vibration monitoring of electric motors, whose working at frequencies of 57.0Hz to 59.2Hz and its harmonics. The results showed that the vibration sensors based on TFBG, exhibited superior results to the FBG, yielding a gain of 2.1 for TFBG 80 micrometers and of 2.7 for the TFBG 60 μm . Using, as a reference, an fiber Bragg gratings accelerometer with a sensitivity of 98pm/g, the TFBG 80 micrometers sensor had a sensitivity of 64.4pm/g and the TFBG 60 micrometers sensor had a sensitivity of 84.8pm/g.

Keywords: Vibration Sensors, FBG, TFBG, Taper.

Lista de Figuras

Figura 1 -	Ilustração da interferência entre os feixes difratados da máscara de fase	20
Figura 2 -	Ilustração da rede de Bragg gravada no núcleo de uma fibra ótica e resposta espectral.....	21
Figura 3 -	Espectro de reflexão de uma FBG. A refletividade máxima ocorre no comprimento de onda de Bragg.....	22
Figura 4 -	Esquema ilustrativo do sensor de deformação utilizando TFBG.....	25
Figura 5 -	Desenho do processo de fabricação de uma fibra ótica afinada – com <i>taper</i>	27
Figura 6 -	<i>Taper</i> obtido pela corrosão da casca com ácido fluorídrico.....	28
Figura 7 -	Gravação da rede de Bragg em fibra afinada (<i>taper</i>).....	28
Figura 8 -	Curva de deformação para a FBG e para a TFBG 80 μm	29
Figura 9 -	Estrutura ótica para aquisição de dados dos sensores óticos (FBG e TFBG)	30
Figura 10 -	Estrutura de suporte e fixação para as fibras em comparação (FBG x TFBG).....	31
Figura 11 -	Curva de resposta em frequência do microfone de eletreto WM 61B.....	32
Figura 12 -	Curva de resposta em frequência do alto falante 8SW17A, da marca Selenium - Fabricante.....	33
Figura 13 -	Curva de resposta em frequência do alto falante 8SW17A, da marca Selenium. Ensaio prático.....	34
Figura 14 -	Curva de resposta do sinal amplificado aplicado ao gerador de vibração (RMS)..	35
Figura 15 -	Dimensionamento do suporte para ensaio dos sensores	36
Figura 16 -	Distribuição das massas no sensor preso ao suporte	38
Figura 17 -	Tabela de dados de comprimento de onda de Bragg, obtidos pelo interrogador, para cada amostra. Plotagem no tempo dos comprimentos de onda da tabela.....	40
Figura 18 -	Tabela de dados da variação do comprimento de onda de Bragg (picometro), obtidos pelo interrogador, para cada amostra. Plotagem no tempo da variação do comprimento de onda da tabela.....	41
Figura 19 -	Tabela de dados da variação do comprimento de onda de Bragg (picometro) e a nova tabela com valor médio igual a zero. Plotagem da variação do comprimento de onda da tabela para cada amostra	42
Figura 20 -	Tabela de dados das senóides simuladas calculadas, com valores para cada amostra e os valores da resposta resultante da soma amostra por amostra. Plotagem das componentes senoidais da resultante ‘Soma’ e para as 2500 amostras no tempo	44
Figura 21 -	Tabela resultante da aplicação da função FFT, na tabela de dados da resposta resultante da soma amostra por amostra. Plotagem da resposta espectral da resultante ‘Soma’	45
Figura 22 -	Acelerômetro biaxial baseado em FBG, montado sobre a estrutura de ensaio sobre o gerador de vibração	46
Figura 23 -	Resposta em frequência do acelerômetro biaxial baseado em FBG	47
Figura 24 -	Variação temporal do comprimento de onda de uma FBG, para as frequências de vibração de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz	49
Figura 25 -	Variação temporal do comprimento de onda de uma TFBG 80 μm , para as frequências de vibração de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz	49
Figura 26 -	Variação temporal do comprimento de onda de uma TFBG 60 μm , para as frequências vibração de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz	50
Figura 27 -	Variação temporal do comprimento de onda para o acelerômetro biaxial, para as frequências vibração de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz	50

Figura 28 -	Gráfico com a variação do comprimento de onda RMS, para os sensores de vibração FBG e TFBG e o acelerômetro de referência, relativo à vibração do gerador de vibração, para a faixa de frequência de 50Hz a 240Hz, com um sinal de entrada, de 60 mV _{RMS} , no amplificador do gerador de vibração	52
Figura 29 -	Resposta espectral da variação do comprimento de onda para o sensor FBG, para vibração nas frequências de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz	53
Figura 30 -	Resposta espectral da variação do comprimento de onda para o sensor TFBG 80µm, para vibração nas frequências de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz	53
Figura 31 -	Resposta espectral da variação do comprimento de onda da rede de Bragg da TFBG 60 µm, para vibração nas frequências de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz ...	53
Figura 32 -	Resposta espectral da variação do comprimento de onda de Bragg do acelerômetro de referência, para a vibração gerada nas frequências de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz	54
Figura 33 -	Amplitude da variação do comprimento de onda (FFT), para os sensores de vibração FBG e TFBGs e o acelerômetro de referência, relativo à vibração do gerador de vibração, para a faixa de frequência de 50Hz a 240Hz, com um sinal de entrada, de 60mV _{RMS} , no amplificador do gerador de vibração	55
Figura 34 -	Gráfico de comparação da variação do comprimento de onda em valores RMS entre os sensores baseados em FBG, TFBG 60µm e TFBG 80µm, para as frequências de vibração de 57Hz e 114Hz, pela variação do sinal de entrada no amplificador do gerador de vibração	56
Figura 35 -	Estrutura para o ensaio para medição de vibração utilizando os sensores baseados em FBG e TFBG. Motor trifásico de indução acoplado mecanicamente ao gerador CC. Tacômetro ligado ao eixo do gerador	57
Figura 36 -	Esquema de ligação elétrica do gerador CC acoplado ao eixo do motor sob ensaio, para produzir uma carga variável ao motor	58
Figura 37 -	Suporte para acoplamento o sensor de vibração ao motor sob ensaio	59
Figura 38 -	Local fixação do sensor de vibração ao motor sob ensaio. Detalhe do suporte do sensor	59
Figura 39 -	Resposta temporal para o sensor de vibração FBG gerado pela vibração do motor sob ensaio, ligação direta à rede, para carga do motor: sem carga, 0,3 CV e 1,0CV. Taxa de amostragem de 600Hz	60
Figura 40 -	Resposta temporal para o sensor de vibração TFBG 60 gerado pela vibração do motor sob ensaio, ligação direta na rede, para carga do motor: sem carga, 0,3CV e 1,0CV. Taxa de amostragem de 720Hz	61
Figura 41 -	Resposta espectral do sensor de vibração FBG quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor, com ligação direta de alimentação, sem carga, com carga de 0,3CV e de 1,0CV	62
Figura 42 -	Resposta espectral do sensor de vibração FBG quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor, com ligação através de um inversor em 60Hz, sem carga, com carga de 0,3CV e de 1,0CV	62
Figura 43 -	Visão ampliada da resposta espectral do sensor de vibração FBG, especificamente para a região de 120Hz	63
Figura 44 -	Resposta espectral do sensor de vibração FBG quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor com ligação através de um inversor, na frequência de 30Hz, sem carga e para 0,3CV de carga	63
Figura 45 -	Visão ampliada da resposta espectral do sensor de vibração FBG, especificamente para a região de 60Hz	64
Figura 46 -	Resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60 quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor com ligação direta de alimentação, em 60Hz, sem carga, 0,3CV e 1,0CV de carga	64
Figura 47 -	Visão ampliada da resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60, especificamente para a região de 120Hz	65

Figura 48 -	Resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60 quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor com ligação através de um inversor, em 60Hz, sem carga, com 0,3CV e 1,0CV de carga	65
Figura 49 -	Visão ampliada da resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60, especificamente para a região de 120Hz	66
Figura 50 -	Resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60 quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor com ligação através de um inversor, na frequência de 30Hz, sem carga e para 0,3CV de carga	66
Figura 51 -	Visão ampliada da resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60, especificamente para a região de 60Hz	67
Figura 52 -	Gráfico da tabela 6 – Comparação dos resultados do pico da variação de comprimento de onda de Bragg (FFT), em picômetros, para os sensores FBG e TFBG 60, devido à vibração do motor, quando sujeito à alimentação direta e via inversor, para as cargas à vazio e de 0,3CV	68
Figura 53 -	Resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60 quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor com ligação direta de alimentação, em 60Hz, sem a conexão de uma das fases, para as condições sem carga e carga de 0,3CV..	69
Figura 54 -	Visão ampliada da resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60, especificamente para a região de 120Hz	69

Lista de Tabelas

Tabela 1 - RELAÇÃO ENTRE SINAL APLICADO AO ALTO FALANTE E O SINAL DO GERADOR DE ONDAS SENOIDAIS PARA AS FAIXAS DE 50HZ A 240HZ.....	34
Tabela 2 - CÁLCULO DO VALOR EFICAZ (RMS), PARA A FORMA DE ONDA GERADA PELA VIBRAÇÃO EM 60HZ	43
Tabela 3 - COMPARAÇÃO ENTRE O VALOR DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA RMS, PARA OS SENSORES DE VIBRAÇÃO FBG E TFBG E O ACELERÔMETRO DE REFERÊNCIA, RELATIVO À VIBRAÇÃO DO GERADOR DE VIBRAÇÃO, PARA A FAIXA DE FREQUÊNCIA DE 50HZ A 240HZ	51
Tabela 4 - COMPARAÇÃO ENTRE O VALOR DA AMPLITUDE DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA FFT, PARA OS SENSORES DE VIBRAÇÃO FBG E TFBG E O ACELERÔMETRO DE REFERÊNCIA, RELATIVO À VIBRAÇÃO DO GERADOR DE VIBRAÇÃO, PARA A FAIXA DE FREQUÊNCIA DE 50HZ A 240HZ	54
Tabela 5 - COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA EM VALORES RMS ENTRE OS SENSORES BASEADOS EM FBG, TFBG 60 µm E TFBG 80 µm, PARA A FREQUÊNCIA DE 57HZ E 114HZ DEVIDO À VIBRAÇÃO, PELA VARIAÇÃO DO SINAL DE ENTRADA NO AMPLIFICADOR DO GERADOR DE VIBRAÇÃO	56
Tabela 6 - VALOR DA AMPLITUDE DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA FFT, OBTIDAS PARA OS SENSORES DE VIBRAÇÃO FBG E TFBG 60, GERADA PELA VIBRAÇÃO DO MOTOR SOB ENSAIO	67

LISTA DE ABREVIATURAS

FBG	Rede de Bragg em fibra ótica (<i>Fiber Bragg Grating</i>)
TFBG	Rede de Bragg em fibra ótica afinada (<i>Tapered Fiber Bragg Grating</i>)
SMF	Fibra ótica monomodo (<i>Single Mode Fiber</i>)
FFT	Transformada rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
UV	Ultravioleta
G-652	Código para a fibra monomodo padrão
IMON	Monitor interrogador (<i>Interrogation Monitor</i>)
RMS	Valor eficaz ou raiz do valor quadrático médio (<i>Root Mean Square</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

Λ_B	Período da rede de difração
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
Ω	Coefficiente de acoplamento
Δn	Amplitude de modulação no índice de refração
M_p	Fração de potência do modo confinado no núcleo da fibra
η_{eff}	Índice de refração efetivo no núcleo da fibra
Δl	Variação do período da rede
ΔT	Variação da temperatura
ε	Deformação longitudinal
p_{ij}	Coefficientes fotoelásticos do material
ν	Coefficiente de Poisson
F	Força aplicada
d	Diâmetro do cilindro
E	Módulo de Young do material
$\mu\varepsilon$	Micro <i>strain</i> (micrometro/metro)
dB	Decibel
$\Delta\lambda_B$	Variação do comprimento de onda da rede de Bragg
ω	Frequência natural de vibração
I	Momento de inércia
ρ	Densidade do material
r	Raio da fibra
l	Comprimento da fibra
βl	Frequência natural ponderada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PERSPECTIVAS E MOTIVAÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	15
2	REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS	18
2.1	DADOS HISTÓRICOS	19
2.2	SENSORES BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS	23
2.3	SENSIBILIDADE À DEFORMAÇÃO	24
3	FABRICAÇÃO DA FIBRA AFINADA - TAPER	27
3.1	GRAVAÇÃO DA REDE DE BRAGG NO TAPER.....	28
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES DE VIBRAÇÃO FBG E TFBG	29
4	MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO UTILIZANDO SENSORES EM FIBRA ÓTICA AFINADA E PADRÃO	30
4.1	SISTEMA PARA CARACTERIZAÇÃO	30
4.2	CURVA DE RESPOSTA DO MICROFONE	32
4.3	LEVANTAMENTO DA CURVA DE RESPOSTA DO ALTO FALANTE	32
4.4	GANHO DO AMPLIFICADOR	34
4.5	CÁLCULO TEÓRICO DA FREQUÊNCIA NATURAL DO SENSOR	36
4.6	PROCEDIMENTO PARA O LEVANTAMENTO DA RESPOSTA À VIBRAÇÃO DOS SENSORES BASEADOS EM REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA	39
4.6.1	Resposta Temporal	40
4.6.2	Cálculo do Valor Eficaz (RMS) da Forma de Onda	42
4.6.3	Resposta Espectral	43
4.7	ENSAIO DO ACELERÔMETRO BIAxIAL BASEADO EM REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA – FBG	46
5	RESULTADOS	48
5.1	RESPOSTA DE SENSORES DE VIBRAÇÃO BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA (FBG E TFBGS) PARA A VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA VIBRAÇÃO	48
5.1.1	Resposta Temporal	48
5.1.2	Valor Eficaz (RMS) da Resposta Temporal	51
5.1.3	Resposta Espectral	52
5.2	RESPOSTA DE SENSORES DE VIBRAÇÃO BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA (FBG E TFBGS) PARA A VARIAÇÃO DA INTENSIDADE DA VIBRAÇÃO	55

5.3	RESPOSTA DE SENSORES DE VIBRAÇÃO BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA FBG E TFBGS, APLICADAS A MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	57
5.3.1	Estrutura para Medição da Vibração do Motor com Carga Variável	57
5.3.2	Ensaio do Motor	60
5.3.3	Resultado da Resposta dos Sensores FBG e TFBG 60 µm para o Ensaio de Vibração do Motor	60
5.3.4	Resultado da Resposta do Sensor TFBG 60 µm para o Ensaio de Vibração do Motor sob Condição de Anomalia na Rede de Alimentação	68
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE	74

1 INTRODUÇÃO

1.1 PERSPECTIVAS E MOTIVAÇÃO

Os motores elétricos de indução são largamente empregados nos diversos setores industriais, utilizados em elevadores, bombas, esteiras, compressores e muitas outras aplicações. Os fatores que contribuem para sua larga empregabilidade são seu baixo custo, alta robustez e facilidade na adequação com os diversos tipos e potências de carga. Além disso, os motores elétricos de indução podem ser empregados em processos com velocidade constante ou variável [1, 2]. O motor de indução com rotor em gaiola representa aproximadamente 97% do total de motores elétricos comercializados no Brasil [3].

Como qualquer outro equipamento, os motores de indução têm limitações que, quando excedidas, podem provocar falhas prematuras no enrolamento estatório ou em seu rotor [1].

Com o uso crescente dos motores elétricos nos sistemas industriais de produção e a crescente necessidade de melhoria na qualidade dos produtos e redução de custos, aumenta o interesse por técnicas de manutenção preditivas, nas quais a adequada monitoração dos equipamentos permite a programação das paradas para manutenção e a substituição de máquinas e peças, minimizando os tempos de interrupção da produção e os custos de manutenção [4].

Entre as técnicas utilizadas nos sistemas de monitoramento dos motores elétricos estão: monitoramento de desempenho, medição e análise de vibrações, monitoramento de emissão acústica, análise de partículas do óleo, análise de gases, análise por descargas parciais, flutuações da velocidade, análise das correntes, monitoramento da temperatura, monitoramento do fluxo de dispersão, entre outros [4, 5].

Nas falhas mecânicas em motores elétricos, causadoras de vibração, as duas principais fontes são o desalinhamento e o desbalanceamento [6, 7, 8]. Aquelas vibrações podem danificar prematuramente rolamentos, acoplamentos e engrenagens. Os problemas causados por vibrações mecânicas em máquinas elétricas geram altos custos às indústrias. Tais custos são devidos principalmente às paradas para manutenção corretiva em mancais, rolamentos e à diminuição da vida útil dos equipamentos. Assim o monitoramento destas vibrações, bem como sua análise são de grande importância para a indústria, principalmente para motores de maiores potências, seja pelo seu custo seja pela sua importância no processo industrial. Para o monitoramento de vibrações são utilizados acelerômetros do tipo piezoelétrico e mais recentemente, acelerômetros óticos. A instalação de sensores na carcaça

do estator, permite detectar falhas de entreferro não uniforme, faltas no enrolamento do estator, falhas no rotor, alimentação assimétrica e desbalanceamentos na carga. Isto porque, qualquer alteração na distribuição de fluxo no entreferro irá provocar alterações no espectro das vibrações [4, 5, 9, 10].

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver sensor de vibração utilizando rede de Bragg em fibra Ótica (FBG). São utilizadas diferentes técnicas de encapsulamento do sensor e também gravação da FBG em fibra ótica monomodo padrão de telecomunicações com diâmetro original e afinada (*Taper*).

1.2.2 Objetivos Específicos

Montar amplificador de potência de áudio frequência (AF) a ser utilizado no sistema de caracterização de vibração utilizando rede de Bragg.

Caracterizar alto-falante em linearidade de resposta, utilizando microfone de alta fidelidade.

Realizar a caracterização para deformação da rede de Bragg em fibra afinada (TFBG) e em fibra de diâmetro padrão (FBG).

Implementar uma estrutura de ensaios que permita submeter os sensores de vibração em fibra baseados em FBG e TFBG a diferentes condições de excitação em frequência e intensidade.

Comparar a resposta às vibrações entre a FBG e a TFBG.

Realizar a medição de vibração em um motor de indução, variando-se a carga acoplada ao eixo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Neste trabalho o capítulo 1 descreve motivação e os objetivos para a realização deste trabalho. A proposta desta dissertação é a comparação entre a sensibilidade à vibração de um sensor de vibração baseado em rede de Bragg em fibra ótica normal - FBG e os sensores de vibração baseados em rede de Bragg em fibra ótica afinada - TFBG.

O capítulo 2 inicia com a apresentação das características principais das redes de Bragg e seus dados históricos. Também é feita uma descrição dos sensores baseados em redes de Bragg em fibras óticas, suas aplicações e vantagens, principalmente à sensibilidade à deformação, que é a característica principal utilizada para o sensoriamento de vibração.

O capítulo 3 mostra as características e alguns processos para a fabricação da fibra afinada – com *taper*. Também é abordada a caracterização da TFBG para sensibilidade à deformação.

No capítulo 4 são mostrados as diversas etapas para a construção da estrutura de medição, incluindo o sistema ótico, bem como a caracterização do sistema mecânico e elétrico de geração de vibração e a estrutura mecânica para fornecer o suporte dos sensores para os ensaios. Também é abordado o procedimento para o levantamento das curvas de resposta dos sensores, com detalhes da fixação da fibra e da massa inercial e o cálculo teórico da frequência natural de vibração do sensor. Também é abordado detalhes do acelerômetro biaxial utilizado como referência para os demais sensores ensaiados e os procedimentos de ensaio.

No capítulo 5 são mostrados os procedimentos e os resultados das variações do comprimento de onda de Bragg para os diversos sensores utilizados neste estudo. Foram utilizados sensores baseados em rede de Bragg em fibra ótica normal SMF – G652 (FBG) com diâmetro de 125 μ m e em fibra óticas afinadas – com *taper*, com os diâmetros de 60 μ m e 80 μ m. Os sensores foram submetidos à vibração, fixados à uma estrutura sobre um alto falante. Foi utilizado um gerador senoidal ligado à um amplificador, para gerar o sinal senoidal aplicado ao alto falante para gerar a vibração na estrutura à qual os sensores estavam fixados. Desta forma a vibração poderia ser controlada em frequência e amplitude. A variação do comprimento de onda da onda refletida pela rede de Bragg na fibra ótica dos sensores, causada pela vibração, foi coletada através de um interrogador, cujos dados eram armazenados em um computador. A partir dos dados coletados foi possível obter três resultados diferentes, sendo eles, a forma de onda da vibração, o valor eficaz desta onda e a resposta espectral dos sensores, utilizando-se ferramentas do *software* Excel da Microsoft e do *software* OriginPro 8. Foram realizados três tipos de ensaio nos sensores FBG e TFBGs. Como o interesse deste trabalho está na medição de vibração em motores elétricos, que são ligados à redes elétricas de 50Hz ou de 60Hz, então a faixa de frequência adotada foi entre 50Hz (fundamental da rede em 50Hz) e 240Hz (quarta harmônica da frequência da rede de 60Hz). No primeiro ensaio, foi mantida a amplitude do sinal aplicado ao gerador de vibração (alto falante), variando-se a frequência. As diferentes frequências aplicadas foram de 50Hz, 55Hz e 60Hz e suas harmônicas – até a quarta harmônica. No segundo ensaio foi levantada a resposta dos sensores para a variação da amplitude da vibração. Como o terceiro ensaio seria realizado em um motor elétrico, cuja rotação em plena carga era de 1711 rpm (57Hz), foram adotadas as frequências de 57Hz e sua segunda harmônica (114Hz), para o levantamento da

resposta para a variação da amplitude da vibração. Assim, no segundo ensaio foi mantida a frequência fixa, em uma primeira etapa em 57Hz e na segunda etapa de medições em 114Hz, variando-se a amplitude da vibração, através da variação do sinal senoidal aplicado ao alto falante. Variou-se o sinal de saída do gerador senoidal de 30mV_{RMS} e $180\text{mV}_{\text{RMS}}$, aplicado ao amplificador, que por sua vez aplicava ao alto falante um sinal senoidal de 1V_{RMS} a 6V_{RMS} . O primeiro e segundo ensaios foram realizados nos sensores FBG e TFBG fixados na estrutura do alto falante. O terceiro ensaio apresenta a comparação do desempenho dos sensores FBG e TFBG aplicados a um motor trifásico de indução, com alimentação direta e através de um inversor de frequência, neste caso alimentando o motor nas frequências de 60Hz, 50Hz, 40Hz e 30Hz. Também é feita a comparação dos sensores com um acelerômetro baseado em FBG para referência. Neste capítulo são apresentados todos os resultados obtidos inclusive a comparação entre o desempenho de cada tipo de sensor empregado.

No capítulo 6 são expostas as conclusões obtidas observando-se os resultados dos ensaios e suas comparações. Os sensores utilizando a TFBG têm uma sensibilidade maior do que o sensor que utiliza a FBG. Também são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, tais como, estudo para determinar qual o melhor tamanho para o sensor, a massa e a melhor distância para a utilização da massa inercial, ensaios para verificar a durabilidade do sensor, entre outras.

2 REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS

Nos últimos anos, com o desenvolvimento de sensores baseados em redes de Bragg em fibras óticas (FBG) houve uma maior aceitação e generalização do seu uso, principalmente nas aplicações de sensoriamento estrutural, indústria de petróleo e gás, instrumentação de máquinas elétricas, entre outras. Tais sensores têm sido aplicados nas medições de deformação, temperatura, pressão, índice de refração em líquidos, vibração e outras [11].

As vibrações mecânicas quando ultrapassam os limites toleráveis, podem vir a causar danos ou falhas nos equipamentos ou estruturas. O monitoramento de vibrações são de grande importância em diferentes áreas da engenharia, tais como mecânica, civil e elétrica. Com isso sensores de vibração tornaram-se de vital importância para o acompanhamento destes equipamentos e estruturas [12]. Há sensores eletrônicos convencionais para medição de vibração, porém, tais sensores apresentam algumas limitações, tais como a susceptibilidade à interferência eletromagnética, dificuldade de uso em ambientes corrosivos e em presença de alta temperatura, dificuldade de associação para obtenção de sensoreamento distribuído entre outros [12].

Os sensores óticos baseados em redes de Bragg em fibra ótica (FBG) apresentam várias características que os tornam mais versáteis quando comparados com os sensores convencionais, entre elas alta imunidade a interferências eletromagnéticas, elevada resistência à temperaturas altas da ordem dos 800°C [13], razoável resistência à corrosão na presença de diversos agentes, são pequenos e leves, permitem a multiplexação de vários sensores numa mesma fibra para monitoração distribuída [14, 15, 16].

Muitos sensores de vibrações com base nas FBGs têm sido apresentados. Entre eles um acelerômetro de feixe de flexão com sensibilidade de 212,5pm/g e frequência ressonante até 110Hz [17]. Um acelerômetro tipo cantilever modificado com um feixe em forma de L, com sensibilidade de 46pm/g para frequência abaixo de 50Hz e 306pm/g para a frequência acima de 150Hz [18]. Também foi proposto acelerômetro com placa cônica, com sensibilidade de 18,93µε/g, para frequência até 150Hz [19]. Em 2014, foi proposto um acelerômetro baseado em FBG com um duplo diafragma, com resposta plana entre as frequências de 50Hz a 800Hz e com sensibilidade entre 23,8pm/g e 45,9pm/g [20]. Porém estes sensores citados acima apresentam uma estrutura complexa de montagem e quando utilizam fibra ótica afinada, a gravação da rede de Bragg é feita na zona de transição do afinamento do diâmetro. Neste trabalho é utilizada uma estrutura simples de montagem e a

rede de Bragg é gravada na zona em que o diâmetro se mantém constante porém menor que o diâmetro da fibra normal (125 μ m).

2.1 DADOS HISTÓRICOS

A fotossensibilidade é o fenômeno no qual o índice de refração de um dado meio pode ser aumentado pela exposição a feixe *laser* de comprimento de onda específico. Na fibra ótica a fotossensibilidade foi descoberta no Canadian Communication Research Center em 1978 por Ken Hill *et al.* [21], durante as experiências utilizando fibra de sílica dopada com germânio e radiação laser de argônio (Kashyap, 1999) [22]. Eles observaram que com o decorrer do tempo, a luz do laser de argônio lançada na fibra sofria maior reflexão. Este fato foi reconhecido como sendo devido à gravação de uma rede no núcleo da fibra, causada por incremento no índice de refração. Uma onda estacionária formada entre as extremidades da fibra produziu uma modulação periódica no índice de refração do núcleo. Aquela modulação foi produzida graças ao efeito da fotossensibilidade. O efeito permanente de modulação no índice de refração do núcleo gerado pela absorção de dois fótons do laser de argônio ($\lambda=488\text{nm}$) resultou em um filtro ótico capaz de refletir uma estreita banda de comprimento de onda [21]. Alguns anos mais tarde, Meltz *et al.* (1989) [23] usaram um método holográfico que tornaria mais eficiente a produção da modulação periódica do índice de refração. O dispositivo gerado tornou-se conhecido como rede de Bragg em fibra (*fiber Bragg grating* - FBG). O método é baseado em um interferômetro de divisão de amplitude que permite que a superposição de dois feixes, incidentes transversalmente sobre a fibra, resulte em um padrão de interferência em seu núcleo. A interferência dos feixes é responsável pela modulação periódica do índice de refração. A gravação externa tornou mais eficiente e flexibilizou o processo de gravação de FBGs permitindo a produção de redes de Bragg com reflexão em diversos comprimentos de onda [23].

Através da iluminação direta de uma máscara de fase, como ilustrado na Figura 1, o processo de gravação torna-se mais fácil e estável. Um feixe ultravioleta (UV) incidindo normalmente sobre a máscara é difratado nas ordens +1 e -1 com intensidades aproximadamente iguais e, em sequência, se sobrepõem gerando um padrão de interferência no núcleo da fibra. A facilidade de alinhamento sobre a fibra e estabilidade do padrão permitem utilizar fontes óticas de menor coerência, aumentar o comprimento das redes com deslocamento do feixe UV sobre a máscara de fase e obter maior reprodutibilidade das FBGs [24, 25].

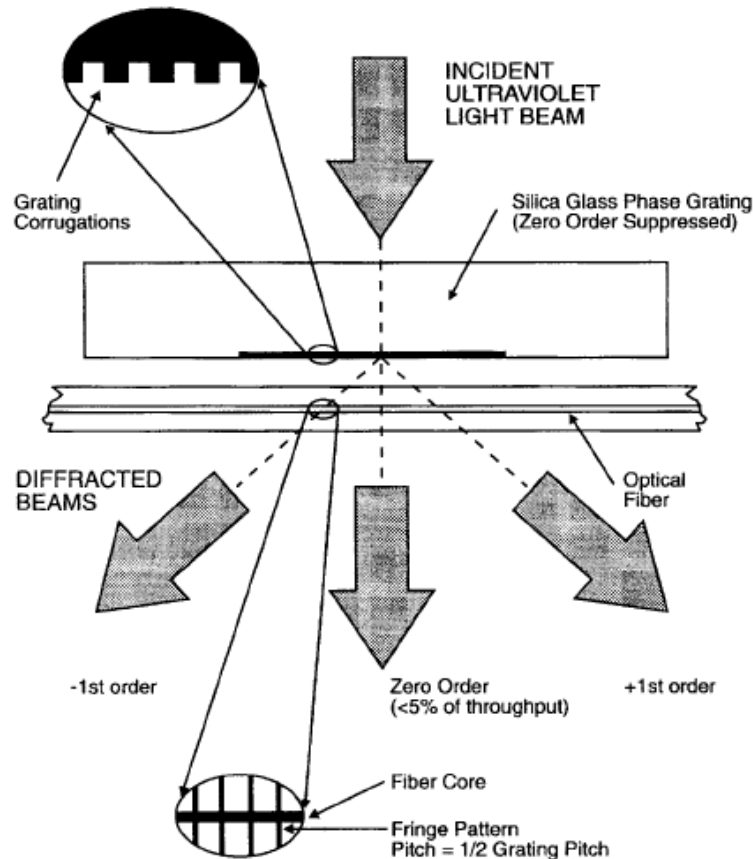


Figura 1 : Ilustração da interferência entre os feixes difratados da máscara de fase.
 Fonte: (Hill; Meltz, 1997), (Othonos; Kalli, 1999) [24, 25]

Uma rede de Bragg em fibra ótica (FBG) é um dispositivo passivo. A FBG é produzida pela modulação do índice de refração do núcleo da fibra, podendo ser representada por planos, separados por uma distância Λ_B , que corresponde à metade do período da máscara de fase [25, 26]. A modulação do índice de refração do núcleo da fibra é equivalente à montagem de um conjunto de planos de reflexão perpendiculares ao eixo longitudinal da fibra [25]. Um modo de propagação ótico no núcleo da fibra interage com os planos da rede, ou seja, com cada interface de mudança de índice. Se a condição de Bragg for satisfeita, a luz guiada é refletida em fase entre planos adjacentes, resultando em uma intensidade refletida centrada próximo a λ_B (comprimento de onda de Bragg), como ilustrado na figura 2. Por outro lado, se a condição não for satisfeita, a luz é refletida fora de fase entre os planos, resultando em uma reflexão que se anula ao longo da rede. Neste caso, a luz incidente é totalmente transmitida.

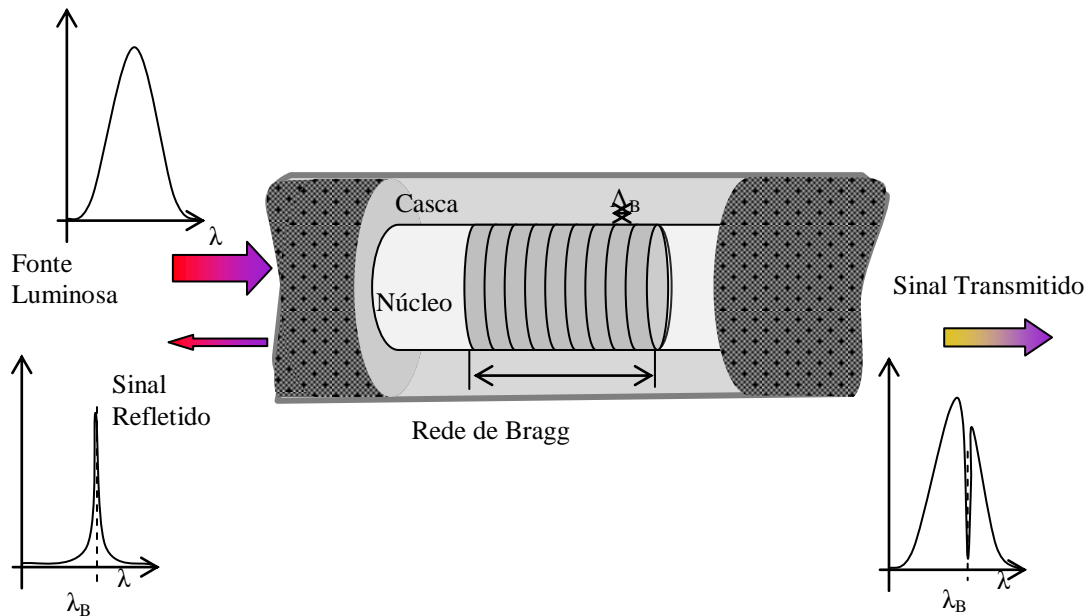


Figura 2 : Ilustração da rede de Bragg gravada no núcleo de uma fibra ótica e resposta espectral.

Fonte: (Hill; Meltz, 1997), (Othonos; Kalli, 1999) [24, 25] - adaptação

Um exemplo de espectro de reflexão de uma FBG é ilustrado na figura 3. A refletividade máxima da luz ocorre próximo ao comprimento de onda de Bragg λ_B , no caso em aproximadamente 1559 nm. Para uma rede de comprimento l , a intensidade máxima é dada pela equação Eq. 2.1 [25],

$$\tau(l, \lambda) = \tanh^2[\Omega l] \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde, $\Omega = (\pi \cdot \Delta n \cdot M_p) / \lambda$ é o coeficiente de acoplamento, que depende da amplitude de modulação no índice de refração, Δn , (valores da ordem de 10^{-5} a 10^{-3}) e da fração de potência do modo confinado no núcleo da fibra M_p .

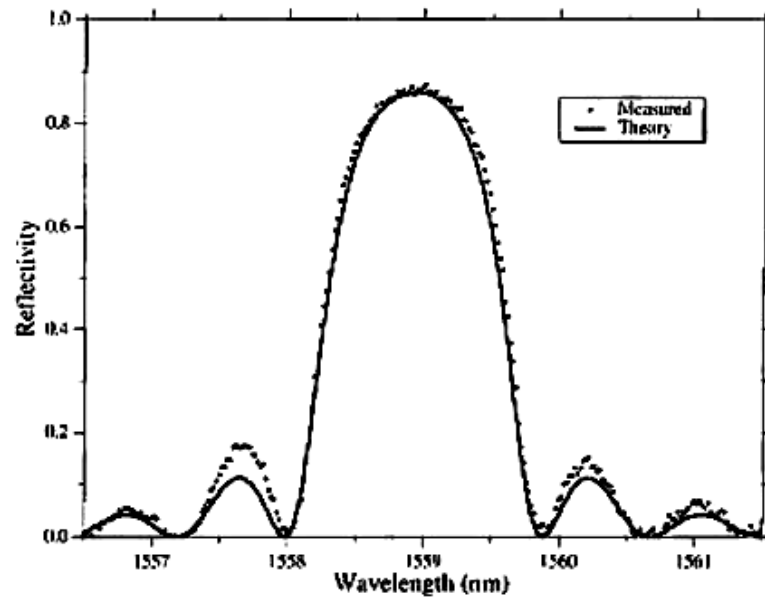


Figura 3 : Espectro de reflexão de uma FBG. A refletividade máxima ocorre no comprimento de onda de Bragg.
 Fonte: Erdogan, 1997 [27]

O espectro refletido apresenta banda estreita, quase centrada no comprimento de onda de Bragg, λ_B , dada pela condição de Bragg, como mostra a equação Eq. 2.2 [25]:

$$\lambda_B = 2\eta_{eff} A \quad (\text{Eq. 2.2})$$

onde A é o período da rede, λ_B é o comprimento de onda quase central do espectro refletido pela rede de Bragg e η_{eff} é o índice de refração efetivo no núcleo da fibra nas regiões onde ocorreram as alterações do índice de refração no núcleo.

Os estudos de Hill e Meltz (1997) [24] abriram espaço para caracterização das redes de Bragg e o desenvolvimento de novas técnicas de gravação. Erdogan (1997) , Kashyap (1999) e Othonos (1999) [27, 22, 25] utilizaram a teoria dos modos acoplados para descrever o comportamento de diversos tipos de redes, tais como, uniformes, apodizadas, com gorgeio, com fase deslocada discreta e superestruturadas.

2.2 SENSORES BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS

Um parâmetro importante das redes de Bragg em fibra ótica - FBGs, diz respeito à sensibilidade a deformações longitudinais e à temperatura. Alterações em parâmetros externos, que causam variação do período da rede Δl ou variação da temperatura ΔT , produzem variação do índice efetivo n_{eff} e/ou do período da rede Λ_B , resultando em uma mudança no comprimento de onda de Bragg λ_B , escrito na equação Eq. 2.3, [25]:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\Lambda_B \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda_B}{\partial l} \right] \Delta l + 2 \left[\Lambda_B \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda_B}{\partial T} \right] \Delta T \quad (\text{Eq. 2.3})$$

A sensibilidade à temperatura está relacionada à variação no índice de refração do material devido ao efeito termo-ótico, e à variação do período da rede provocada pelo coeficiente de dilatação térmica. A sensibilidade à tensão longitudinal está associada a uma variação no período da rede e uma mudança no índice de refração efetivo, devido ao efeito elasto-ótico, essa mudança depende da direção em que a deformação é aplicada e dos coeficientes elasto-óticos do material. A variação do comprimento de onda de Bragg para uma deformação longitudinal ε , homogênea e isotrópica é mostrada na equação Eq. 2.4, [24]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \varepsilon \quad (\text{Eq. 2.4})$$

onde, como mostrado na equação Eq. 2.5,

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (\text{Eq. 2.5})$$

está relacionado com os coeficientes fotoelásticos do material p_{ij} e com a razão de Poisson ν , onde para a sílica podem ser considerados $p_{11}=0,121$, $p_{12}=0,27$ e $\nu = 0,165$ [29, 30].

A sensibilidade da FBG à deformação permite que ondas acústicas modulem suas características espectrais. A aplicação de uma onda acústica longitudinal, com comprimento de onda menor que o comprimento total da FBG, produz campos de compressão e descompressão, que comprimem e expandem os planos da rede [30, 31].

No caso específico da utilização da rede de Bragg como sensor para medir deformações, os sistemas de medição que atualmente são mais utilizados têm um custo elevado, o que torna estes sensores pouco competitivos em relação a extensômetros elétricos em aplicações convencionais, porém, são particularmente úteis em situações nas quais se torna muito difícil, ou mesmo impossível, a utilização da extensometria convencional. Como exemplo, pode-se citar a medição de esforços mecânicos em cabos energizados, medições em que há a necessidade, ou conveniência, de se estar distante de até alguns quilômetros da peça ou estrutura, medições em ambiente hostil (fluidos inflamáveis) e medições em meio a campos eletromagnéticos fortes [25, 23].

Uma característica importante das redes de Bragg em fibra é o fato de que perturbações externas como compressão, tração ou variações de temperatura alteram o comprimento de onda central do espectro refletido e não a intensidade. Assim, a grandeza física codificada em desvio de comprimento de onda diminui problemas derivados de ruídos em intensidade que afetam outros tipos de sensores e facilita a calibração.

Outro fato interessante para o sensoriamento é a característica de que várias redes com diferentes comprimentos de onda de Bragg podem ser gravadas em uma mesma fibra ótica sem que uma perturbe o desempenho da outra. Essa característica permite o desenvolvimento de sensores óticos quase distribuídos, de grande interesse em várias áreas como, por exemplo, sensores de tração para setores da construção civil, naval e aeroespacial, sensores para plantas industriais e de energia elétrica, sensores de processos químicos e sensores para uso biomédico [25].

2.3 SENSIBILIDADE À DEFORMAÇÃO

Considerando a construção de um sensor de deformação utilizando uma rede de Bragg em fibra afinada – TFBG, mostrada na figura 4, é observado que existe três zonas distintas: a zona 1, que é o trecho onde não houve variação do diâmetro da fibra, mantido em 125 μ m para a fibra monomodo padrão G-652, a zona 2 que é um trecho onde o diâmetro não é constante e a zona 3 onde o diâmetro é constante e inferior a 125 μ m. As redes de Bragg utilizadas nesse trabalho foram gravadas na zona 3.

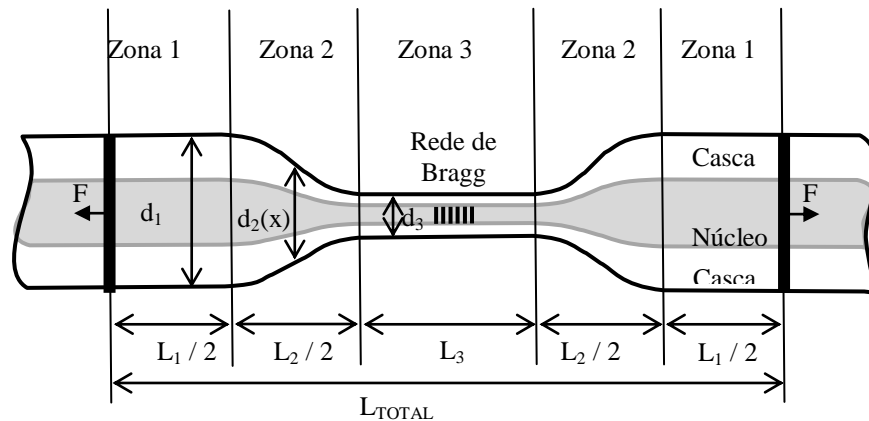


Figura 4 : Esquema ilustrativo do sensor de deformação utilizando TFBG.
Fonte: Quintela et. al., 2011 [32] (Adaptação)

Quando aplica-se força axial (F) constante entre dois pontos de um cilindro, este sofre uma compressão ou um alongamento constante dependendo do sentido da aplicação entre estes dois pontos cujo valor é dado pela equação Eq. 2.6:

$$\varepsilon = \frac{4F}{E\pi d^2} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

onde F é a força aplicada, d é o diâmetro do cilindro e E é o módulo de Young do material [32].

Considerando o sensor cuja construção está mostrada na figura 15, ao aplicar a força constante entre os dois pontos, em cada uma das três zonas, mostradas na figura 4, obtém-se valores diferentes de deformação em função dos diferentes diâmetros. A relação entre esses valores é constante e depende somente da relação entre os diâmetros de cada zona. A deformação entre os dois pontos também pode ser relacionada com a deformação em cada zona. Por exemplo, a deformação na zona 3 em relação à deformação na zona 1 é dada pela equação Eq. 2.7 [32]:

$$k_{3-1} = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} = \frac{d_{\text{fibra normal}}^2}{d_{\text{fibra afinada}}^2} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Pela equação Eq. 2.7, pode ser concluído que aplicando uma força entre os dois extremos do sensor, a deformação na zona 3 será maior que na zona 1, desta forma se a rede de Bragg for gravada na zona 3 obtém-se uma maior sensibilidade à deformação do que gravando-se a mesma rede na zona 1 [32].

A equação Eq. 2.8 mostra a relação da deformação total em relação à deformação na zona 1, que é a zona onde não existe o afinamento [32].

$$\varepsilon_T = \frac{\varepsilon_1(L_1 + k_{2-1}L_2 + k_{3-1}L_3)}{L_1 + L_2 + L_3} = \varepsilon_1 Q \quad (\text{Eq. 2.8})$$

onde Q é sempre maior que a unidade.

Aplicando a equação Eq. 2.8 e considerando as dimensões da estrutura de apoio da fibra e as dimensões aproximadas das zonas 1, 2 e 3 para o ensaio, foi calculada, em relação à deformação na FBG, uma deformação de **1,43** vezes maior para a TFBG de 80 μm ($L_1 = 5,2$ cm, $L_2 = 3,0$ cm e $L_3 = 2,0$ cm, aproximadamente) e uma deformação de **1,87** vezes maior para a TFBG de 60 μm ($L_1 = 4,0$ cm, $L_2 = 4,7$ cm e $L_3 = 1,5$ cm, aproximadamente).

3 FABRICAÇÃO DA FIBRA AFINADA - *TAPER*

O processo de fabricação de fibra afinada é análogo ao processo de fabricação de fibras convencionais e se dá a partir da produção de *tapers* - do inglês *tapered fibers*. Assim como no processo de fabricação de fibras óticas é necessária uma preforma, que neste caso será uma fibra convencional, por exemplo. Com o propósito de afiná-la até o diâmetro e comprimento desejado, a fibra é, concomitantemente, aquecida e tensionada.

Os *tapers* produzidos no Instituto de Física “Greb Wataghin” da Universidade de Campinas - UNICAMP, sob supervisão do Prof. Dr. Cristiano Monteiro de Barros Cordeiro e utilizados nesse trabalho, tem o processo de aquecimento por micro resistência elétrica, porém há outras formas de aquecimento, tais como a varredura por chama de hidrogênio [33].

Aquecendo-a a ponto de reduzir a viscosidade e, conseqüentemente, relaxando as tensões normais e tornando as tensões de cisalhamento na direção do eixo da fibra consideráveis, assim quando houver um puxamento a fibra se alongará e, pela condição de conservação da massa do sistema, o comprimento será aumentado e seu diâmetro diminuído.

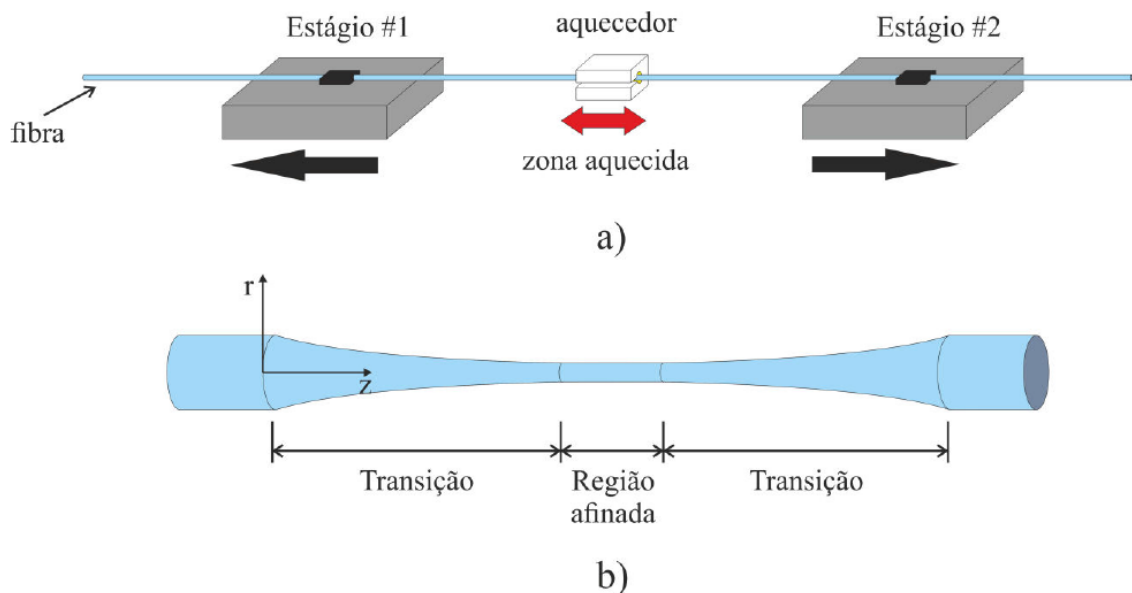


Figura 5 : Desenho do processo de fabricação de uma fibra ótica afinada – com *taper*.
Fonte: T. Birks, 1992 [33]

Um famoso - e simples - modelo matemático que descreve a dinâmica deste processo fora publicado por T. Birks em 1992 [34]. Neste modelo, o autor considerou a seguinte configuração: uma fibra fixada em dois suportes móveis, alinhados e com trajetórias opostas e uma região aquecida dependente do comprimento de alongamento da fibra que se deseja obter. A figura 5 ilustra tal configuração. As fibras obtidas possuem duas regiões: transição e região afinada - descritas na figura 5, onde esta última região é também chamada de microfibras. Com este modelo é possível se obter vários perfis de transição.

Outra maneira de se fabricar um *taper* é pela corrosão da fibra utilizando ácido fluorídrico. A corrosão inicial da casca reduz seu diâmetro, como mostra a figura 6. Como nestes *tapers* somente a casca é corroída, o diâmetro do núcleo e da casca não mantêm nenhuma relação de proporção durante o processo [33].

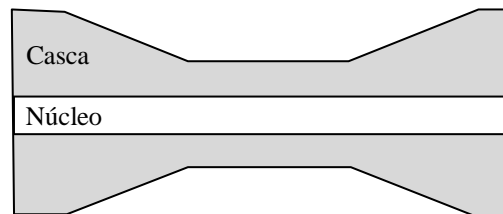


Figura 6 : *Taper* obtido pela corrosão da casca com ácido fluorídrico.
Fonte: Autor

3.1 GRAVAÇÃO DA REDE DE BRAGG NO *TAPER*

Para que a fibra afinada (*taper*) possa ser utilizada como sensor ótico de vibração nesse trabalho, foi necessário gravar em seu núcleo a rede de Bragg (TFBG). Embora o termo *taper*, caracterize a região de transição de diâmetro, a rede foi gravada na região mais fina e de diâmetro constante, como mostra a figura 7. A escolha da posição de diâmetro constante resulta em rede de Bragg com qualidade espectral adequada à detecção de pico (espectro razoavelmente simétrico e pico definido), cujo comprimento de onda da luz refletida é coletado pelo interrogador utilizado nos ensaios.

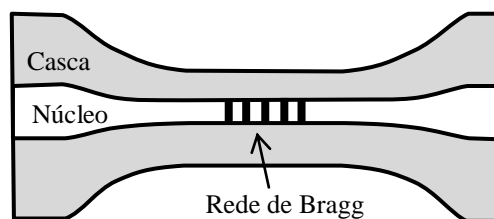


Figura 7 : Gravação da rede de Bragg em fibra afinada (*taper*).
Fonte: Autor

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES DE VIBRAÇÃO FBG E TFBG

Para se estabelecer a sensibilidade à vibração dos sensores de vibração FBG e TFBG foram feitas as caracterizações para deformação. Por indisponibilidade de *taper* de 60 μm a caracterização para a deformação foi feita somente para o *taper* de 80 μm e a FBG..

Para determinação da sensibilidade à deformação, as diferentes redes TFBG e FBG foram fixadas em uma plataforma de estiramento e submetidas à tração controlada por micrômetro indicador. Como a plataforma de estiramento possui o comprimento inicial de 8,54cm, cada passo de 10 μm de estiramento lido no micrômetro corresponde à 117,1 μE . Então, para cada passo de estiramento os correspondentes desvios no comprimento de onda foram coletados e plotados em um gráfico, mostrado na figura 8.

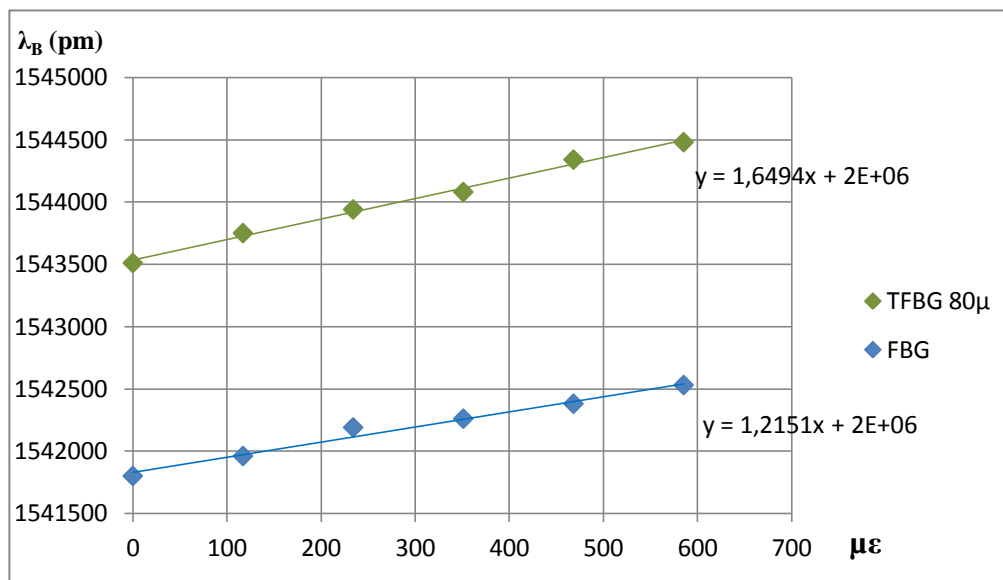


Figura 8 : Curva de deformação para a FBG e para a TFBG 80 μm .
Fonte: Autor

Utilizando *fitting* linear, para a caracterização de deformação, a FBG apresentou sensibilidade à deformação de **1,22 $\text{pm}/\mu\text{E}$** e a TFBG 80 μm apresentou sensibilidade **1,65 $\text{pm}/\mu\text{E}$** . A relação entre estas sensibilidades, de **1,36**, tem um valor próximo à relação teórica de **1,43** obtida no ítem subitem 2.3 do capítulo 2.

4 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO UTILIZANDO SENSORES EM FIBRA ÓTICA AFINADA E PADRÃO

4.1 SISTEMA PARA CARACTERIZAÇÃO

O motor submetido ao ensaio de vibração, opera em 1790rpm à vazio e em 1711rpm para regime de plena carga. Desta forma, as frequências que atendem as necessidades deste trabalho, estão na faixa entre 57Hz a 59,7Hz e suas harmônicas. Estes foram os parâmetros que balizaram a realização do presente estudo.

A figura 9 mostra a configuração ótica para a aquisição de dados do sensor. A fonte ótica é aplicada na porta 1 do circulador, o sinal inicialmente sai pela porta 2, porém como há a FBG sensora conectada a essa saída, ocorre o reacoplamento do espectro de reflexão da rede para o circulador e finalmente esse sinal refletido é direcionado à porta 3, fornecendo sinal ao interrogador I-MON. A fonte ótica utilizada é a Fiber Coupled SCD Source da THORLABS com largura espectral entre 1515 a 1600nm (-3 dB), operando em 300mA (1,6mW). O interrogador de FBG, o qual faz a medição do comprimento de onda do pico é o IMON (Interrogation Monitor), com o *software* para aquisição de dados IMON 512 E – USB2, da IBSEN PHOTONICS, programado para trabalhar com uma taxa de amostragem de 1,667ms (600Hz), assim, segundo a teoria de Nyquist, a máxima frequência mensurável é 300Hz, superior à frequência de 240Hz, desejada para este estudo.

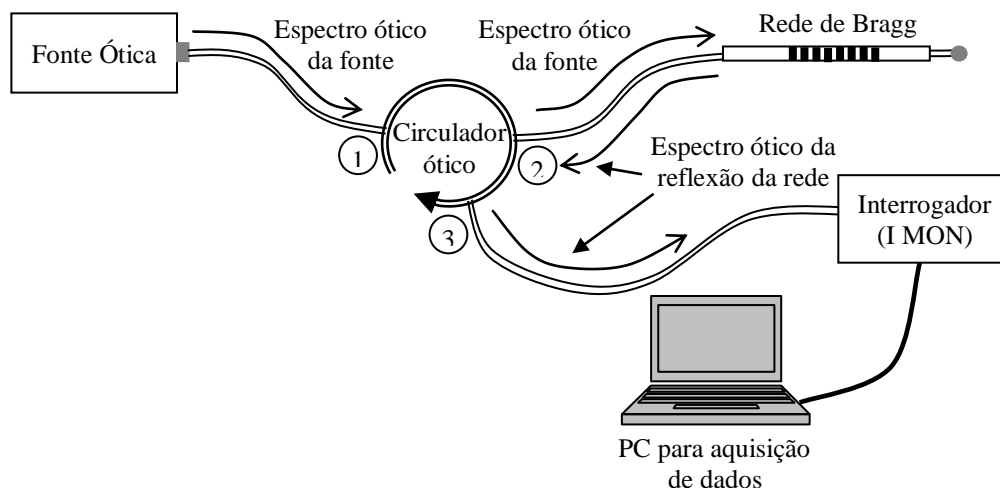


Figura 9 : Estrutura ótica para aquisição de dados dos sensores óticos (FBG e TFBG).
Fonte: Autor

Foi montada uma estrutura mecânica para alojar a fibra, fixada por grampos, de forma que a mesma pudesse ser estirada e fixada sem o uso de cola, para que os testes não fossem destrutivos. A figura 10 mostra a estrutura de suporte das fibras e o microfone utilizado para caracterização da resposta do alto falante. A FBG e as TFBGs com diâmetros de 60 e 80 μ m foram montadas de forma similar, possibilitando adequada comparação de sensibilidade à vibração.

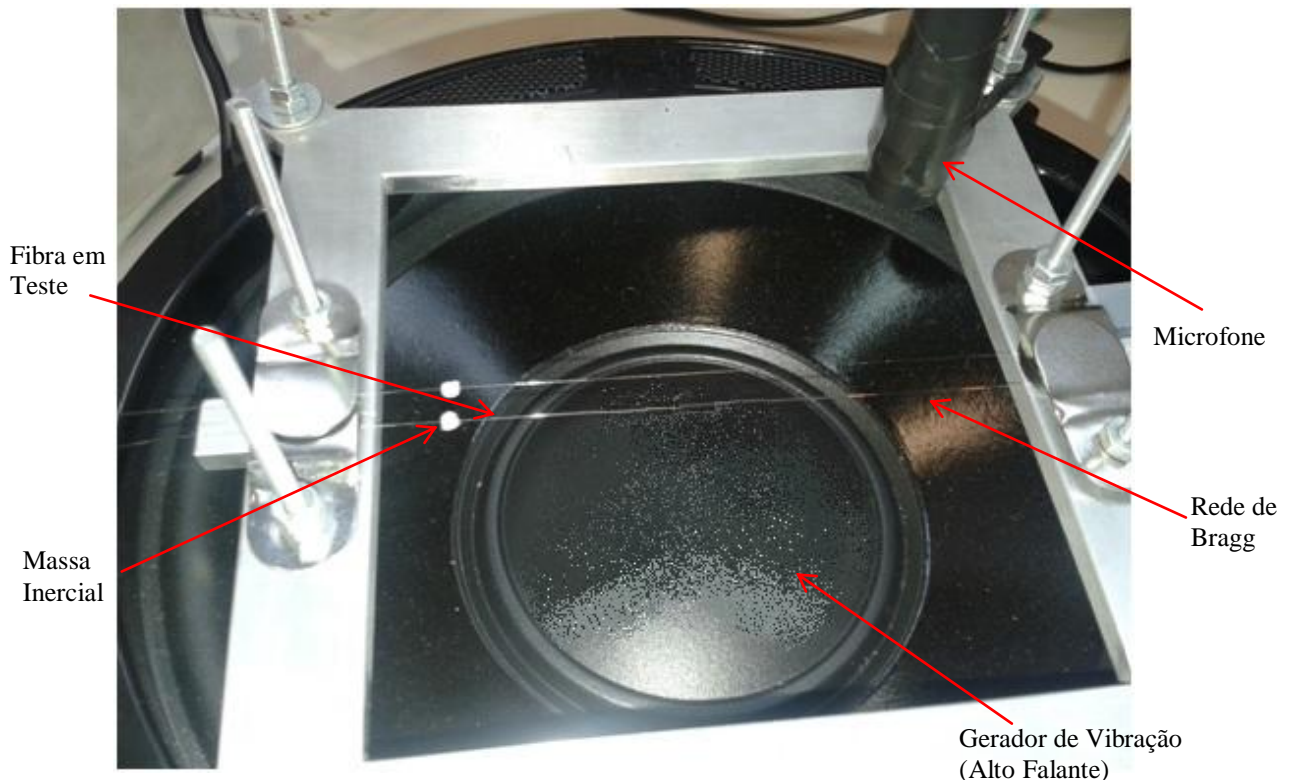


Figura 10 : Estrutura de suporte e fixação para as fibras em comparação (FBG x TFBG).
Fonte: Autor

Para produzir as vibrações em nível e frequência controlados, foi utilizado um gerador de onda senoidal e um amplificador de áudio. Como gerador de vibração, foi utilizado o alto falante 8SW17A, *subwoofer* de 8", da marca Selenium.

O gerador de funções foi selecionado para saída senoidal. Como característica geral apresenta impedância de saída de 50 Ω e baixa capacidade de potência de saída. Ao alimentar o alto falante (impedância 4 Ω) diretamente, havia grande variação da amplitude do sinal senoidal ao variar a frequência. Então era necessário corrigir o nível de sinal para cada frequência aplicada ao alto falante. A solução foi instalar um amplificador de áudio de alta fidelidade (CI TDA 7294) com alta impedância de entrada (100k Ω) e baixa impedância de saída (< 4 Ω), fornecendo adequado casamento de impedância com o alto falante. Desta

forma, pode-se manter o mesmo sinal de saída do gerador de ondas senoidais, mantendo o mesmo nível de sinal no alto falante em toda a faixa de frequência utilizada.

4.2 CURVA DE RESPOSTA DO MICROFONE

Apesar de ter a curva de resposta do alto falante dada pelo fabricante, foi feito um levantamento de resposta do alto falante utilizado. Para este levantamento utilizou-se como medidor de intensidade sonora um microfone de eletreto (WM 61B Panasonic) com resposta espectral aproximadamente plana na faixa de frequência dos ensaios (50 a 300Hz). A figura 11 mostra a curva de resposta fornecida pelo fabricante do microfone.

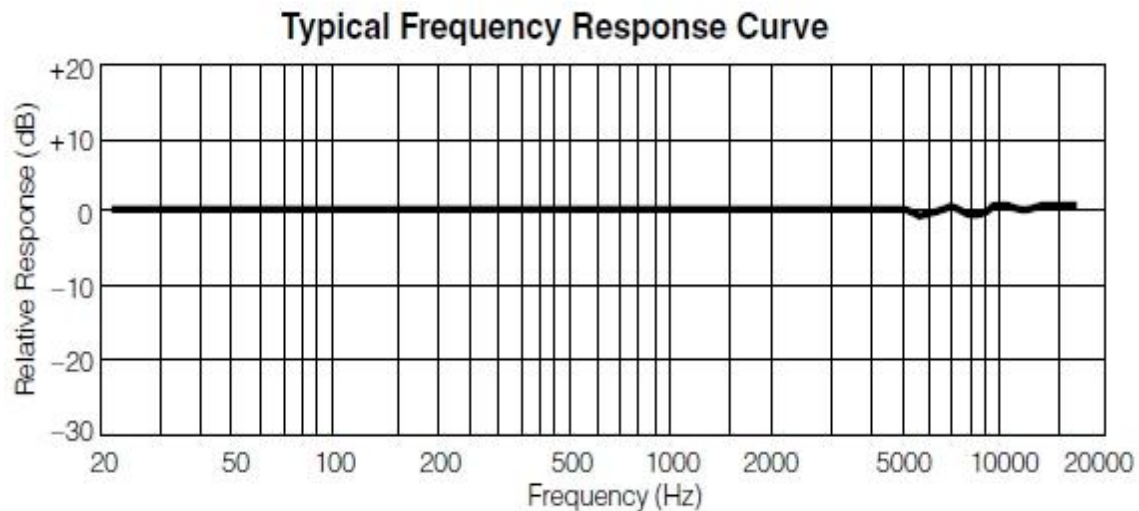


Figura 11 : Curva de resposta em frequência do microfone de eletreto WM 61B.
Fonte: Fabricante Panasonic

4.3 LEVANTAMENTO DA CURVA DE RESPOSTA DO ALTO FALANTE

Utilizando a configuração já descrita no ítem 4.2, foi feito o levantamento da curva de resposta do alto falante, utilizando um gerador de onda senoidal e o amplificador de alta fidelidade.

Para se obter a curva de resposta prática do alto falante, utilizou-se um gerador de funções, modelo Agilent 33521A, para injetar um sinal senoidal, com um valor de saída fixado em 60mV_{RMS} , na entrada do amplificador. A saída do amplificador apresentava uma amplitude de tensão $2,0\text{V}_{\text{RMS}}$ que era aplicado ao alto falante. Na saída do gerador foi colocada inicialmente um osciloscópio modelo Tektronix TDS 2002C, para visualização da

senóide e leitura do seu valor eficaz (RMS), após esta medida inicial foi utilizado um multímetro Minipa ET 2082C, para manutenção da leitura do sinal eficaz (RMS) do gerador.

Verificado um sinal senoidal com baixa distorsão na saída do gerador, utilizando-se o osciloscópio, foi verificada a forma de onda aplicada ao alto falante e medido seu valor de tensão RMS. Ao mesmo tempo foi verificada a forma de onda e o valor de tensão RMS do sinal vindo do microfone. Com outros multímetros, de mesmo modelo, foram feitas também as leituras dos valores de tensão RMS do sinal no alto falante e no microfone.

A figura 12 mostra a curva de resposta em frequência, do alto falante, fornecida pelo fabricante. A figura 13 mostra a resposta em frequência do alto falante, obtida no laboratório, através da variação da frequência e leitura do sinal vindo microfone. Para obtenção da curva em dB utilizou-se a fórmula de conversão $\text{dB} = 20 \log V_o/V_i$, onde V_o é o sinal no microfone e V_i o sinal do gerador.

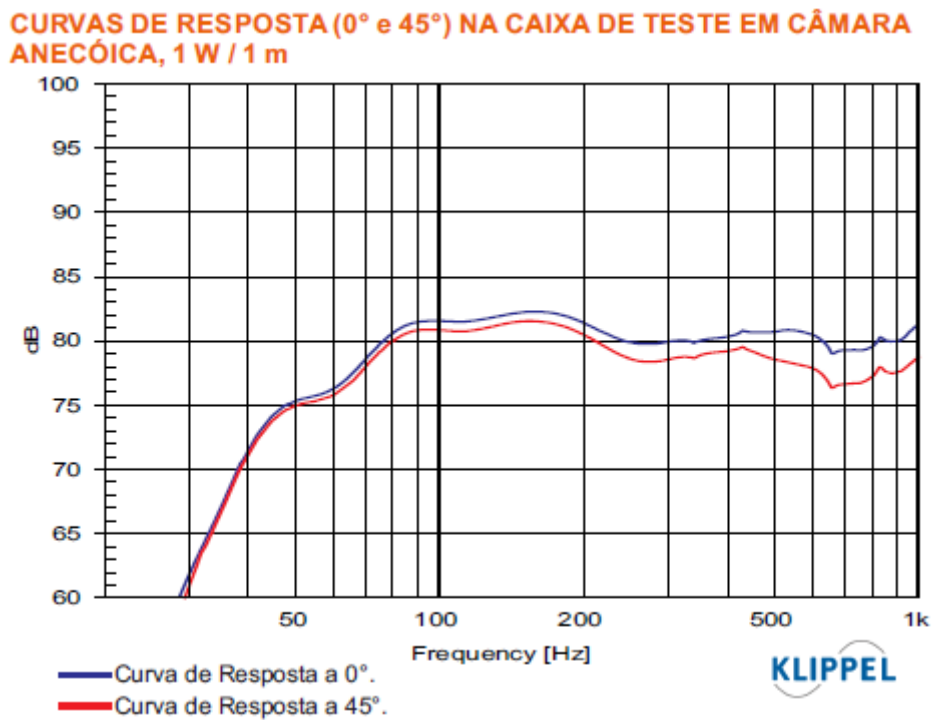


Figura 12 : Curva de resposta em frequência do alto falante 8SW17A da marca Selenium.
Fonte: Fabricante Selenium.

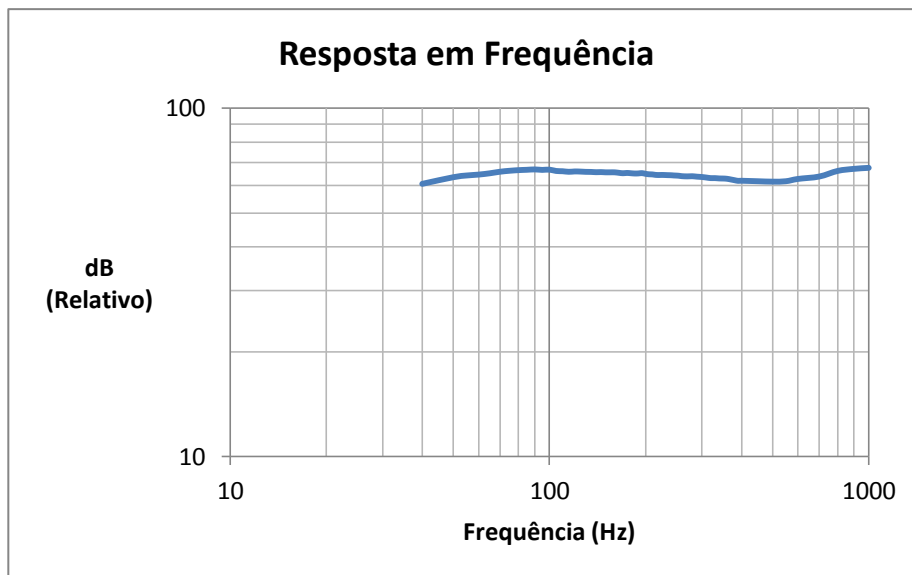


Figura 13 : Curva de resposta em frequência do alto falante 8SW17A, da marca Selenium. Ensaio prático.

Fonte: Autor

Foi observado que a resposta do alto falante levantada se assemelha com a fornecida pelo fabricante. Como não era possível, tecnicamente, fazer o levantamento da resposta do microfone, foi levado em consideração a resposta fornecida pelo fabricante, mostrada na figura 13.

4.4 GANHO DO AMPLIFICADOR

Para se estabelecer o ganho e a linearidade do amplificador carregado com o alto falante, aplicou-se um sinal senoidal através do gerador de funções ajustado para fornecer uma saída de tensão em amplitude fixa de 60mV_{RMS} . Variando-se a frequência na faixa de 50Hz a 240Hz, foi medida a tensão eficaz aplicada ao alto falante, verificando-se a qualidade da forma de onda através de um osciloscópio, os resultados são apresentados na tabela 1. Para medição foi utilizado um gerador de funções Agilent 33521A, osciloscópio Tektronix TDS 2002C e multímetros Minipa ET 2082C.

Tabela 1 : RELAÇÃO ENTRE SINAL APLICADO AO ALTO FALANTE E O SINAL DO GERADOR DE ONDAS SENOIDAIS PARA AS FAIXAS DE 50HZ A 240HZ.

Frequência (Hz)	Tensão Gerador (mV)	Tensão Alto Falante (V_{RMS})
50 a 240	60	2,10

Fonte: Autor

Anteriormente ao ensaio com o alto falante, foi feito o ensaio utilizando-se carga puramente resistiva de 4Ω e os resultados obtidos, tanto no multímetro como no osciloscópio, foram exatamente os mesmos que os resultados obtidos utilizando-se como carga o alto falante.

Analisando-se a tabela 1, concluí-se que a resposta em frequência do amplificador é razoavelmente plana para a faixa de frequência entre 50Hz e 240Hz.

Foi levantada a curva de resposta do amplificador para variação da amplitude do sinal aplicado. Em função da aplicação, como medidor de vibração em motores de indução trifásicos, o interesse fundamental está para desempenho nas frequências de 57Hz e 114Hz, respectivamente as frequências fundamental e 2ª harmônica no motor de indução trifásico à plena carga. O sinal do gerador foi ajustado entre 30mV_{RMS} e $180\text{mV}_{\text{RMS}}$ e o amplificador forneceu ao alto falante sinal entre 1V_{RMS} e 6V_{RMS} , para as frequências específicas de 57Hz e 114Hz. A figura 14 mostra a plotagem dos resultados obtidos, observando-se que há razoável linearidade na resposta do amplificador nas duas frequências.

Para se obter o ganho de tensão do amplificador foi utilizada a equação Eq. 4.1

$$\text{Ganho} = \frac{V_o}{V_i} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde V_o é a tensão de saída do amplificador, aplicada ao alto falante, e V_i é a tensão de entrada do amplificador, fornecida pelo gerador senoidal.

O ganho de tensão do amplificador obtido foi aproximadamente 33.

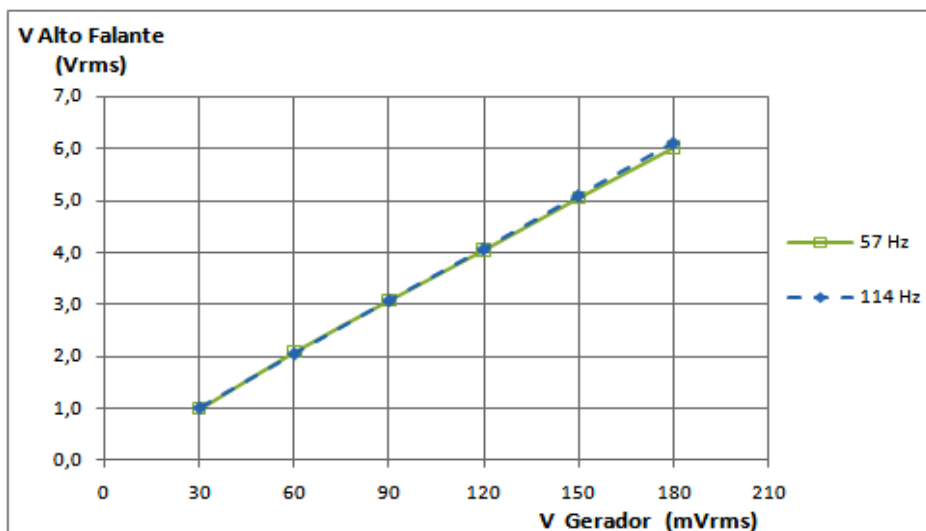


Figura 14 : Curva de resposta do sinal amplificado aplicado ao gerador de vibração (RMS) .
Fonte: Autor

4.5 CÁLCULO TEÓRICO DA FREQUÊNCIA NATURAL DO SENSOR

Os sensores baseados em FBG e TFBG, a serem ensaiados, foram fixados à estrutura de medição, de forma que a rede de Bragg ficasse à aproximadamente 1,5cm de uma das extremidades de fixação da fibra, conforme figura 15. Uma massa inercial **M** (aprox. 15mg), foi colocada à uma distância **d** de 8,5cm deste apoio, estabelecido após alguns ensaios iniciais, considerando-se a intensidade da resposta e a geração de harmônicos, quando sujeito à vibração.

Foi calculada a frequência natural do sensor para verificar se o mesmo poderia ser utilizado para a faixa de frequência adotada para este trabalho, de 50Hz a 240Hz. O cálculo teórico da frequência natural para os sensores FBG e TFBG fixados ao suporte mostrado na figura 15, considera a fibra como uma viga presa em dois pontos.

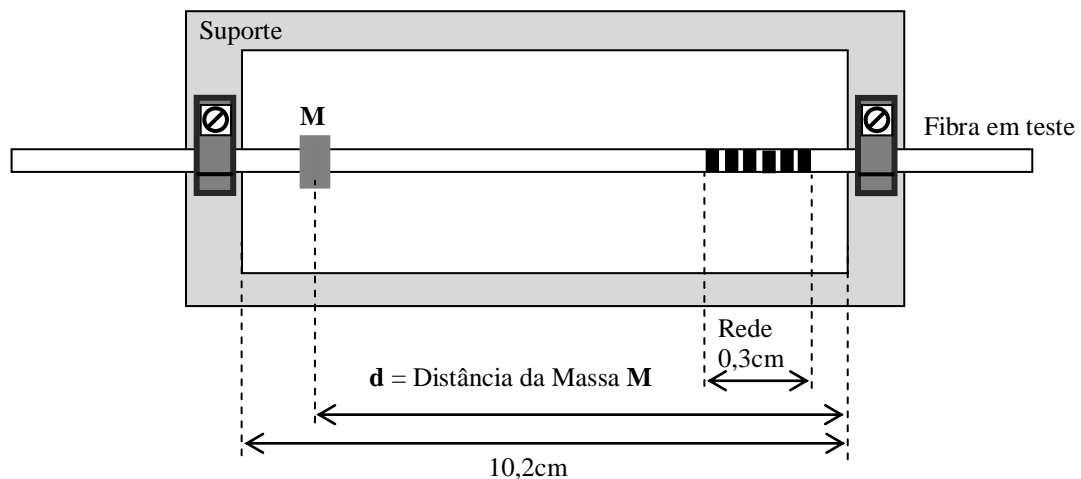


Figura 15 : Dimensionamento do suporte para ensaio dos sensores.
Fonte: Autor

A equação Eq. 4.2 mostra a expressão matemática para o cálculo teórico para a frequência natural para uma viga apoiada e fixada em dois pontos nas extremidades [28].

$$\omega = (\beta\ell)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho\pi r^2 \ell^4}} \quad \text{Eq. 4.2}$$

onde ω é a frequência natural de vibração, **E** é o módulo de elasticidade (módulo de Young) para o material, **I** é momento de inércia, ρ é a densidade do material, **r** é o raio da fibra, ℓ é o comprimento da fibra e $\beta\ell$ é frequência natural ponderada. Para este caso, a densidade da fibra

é de 2650 kg/m^3 , o módulo de elasticidade é de $7,3 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$, o momento de inércia calculado é de $5,52 \cdot 10^{-18} \text{ m}^4$ e a frequência natural ponderada igual a π . A massa da fibra é dada pela equação Eq. 4.3:

$$\text{Massa} = \rho(\pi r^2 \ell) \quad \text{Eq. 4.3}$$

sendo que o diâmetro r da fibra foi calculado em $103\mu\text{m}$, considerando os diâmetros do afinamento. Para a massa total foi acrescentada a massa M de 15mg . Assim, substituindo a massa total na equação Eq. 4.2, foi calculado uma frequência natural de **7,3Hz**, considerando a massa total no centro do sensor.

A equação Eq. 4.4 fornece a expressão matemática para o cálculo da frequência natural do conjunto sensor, considerando a massa M à $8,5\text{cm}$ do apoio e a massa da fibra posicionada no centro [28].

$$\omega = \sqrt{\frac{g(m_1 w_1 + m_2 w_2 + \dots)}{(m_1 w_1^2 + m_2 w_2^2 + \dots)}} \quad \text{Eq. 4.4}$$

onde ω é a frequência natural, m é massa, g é aceleração da gravidade e w é a deflexão resultante da massa considerada.

A equação Eq. 4.5, mostra a expressão matemática para o cálculo da deflexão da fibra resultante da ação de cada massa presente no sistema:

$$w(x) = \begin{cases} \frac{mgbx}{6EI\ell} (\ell^2 - b^2 - x^2) & 0 \leq x \leq a \\ \frac{-mga(\ell - x)}{6EI\ell} (a^2 + x^2 - 2\ell x) & a \leq x \leq \ell \end{cases} \quad \text{Eq. 4.5}$$

onde w é a deflexão da fibra no ponto considerado, m é massa, g é aceleração da gravidade, a é a distância do apoio à massa considerada, b é distância da outra massa considerada, x é a posição considerada e ℓ é o comprimento da fibra.

A figura 16 mostra a distribuição das massas e suas distâncias.

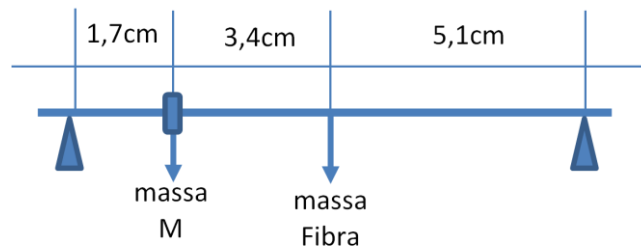


Figura 16 : Distribuição das massas no sensor preso ao suporte.
Fonte: Autor

Considerando as massas 1 e 2 na estrutura da figura 16, tem-se que:

$m_1 = 1,5 \cdot 10^{-5}$ kg (massa inercial M) e $m_2 = 2,25 \cdot 10^{-6}$ kg (massa da fibra).

Deflexão das massas em relação à massa 1:

$x = 1,7 \cdot 10^{-2}$ m $a = 1,7 \cdot 10^{-2}$ m $b = 8,5 \cdot 10^{-2}$ m
 $w_{11} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ m (deflexão resultante da massa 1 em relação à massa 1)

$x = 5,1 \cdot 10^{-2}$ m $a = 1,7 \cdot 10^{-2}$ m
 $w_{21} = 5,8 \cdot 10^{-4}$ m (deflexão resultante da massa 2 em relação à massa 1)

Deflexão das massas em relação à massa 2:

$x = 1,7 \cdot 10^{-2}$ m $a = 5,1 \cdot 10^{-2}$ m $b = 5,1 \cdot 10^{-2}$ m
 $w_{12} = 3,9 \cdot 10^{-3}$ m (deflexão resultante da massa 1 em relação à massa 2)

$x = 5,1 \cdot 10^{-2}$ m $a = 5,1 \cdot 10^{-2}$ m $b = 5,1 \cdot 10^{-2}$ m
 $w_{22} = 1,2 \cdot 10^{-2}$ m (deflexão resultante da massa 2 em relação à massa 2)

onde:

$$w_1 = w_{11} + w_{12} \quad e \quad w_2 = w_{21} + w_{22}$$

então:

$$w_1 = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad e \quad w_2 = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Utilizando a equação Eq. 4.4, pode-se calcular que a frequência natural é:

$$\omega = 39,8 \text{ rad/s} \rightarrow f_{\text{natural}} = 6,3 \text{ Hz}$$

Como as frequências naturais de 7,3Hz e 6,3Hz, calculadas, estão bem abaixo da faixa de frequência adotada para este trabalho, concluí-se que os sensores podem ser utilizados para a faixa de frequência de 50Hz a 240Hz.

4.6 PROCEDIMENTO PARA O LEVANTAMENTO DA RESPOSTA À VIBRAÇÃO DOS SENSORES BASEADOS EM REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

Neste trabalho os sensores de vibração FBG e TFBG, foram submetidos a três diferentes ensaios. No primeiro ensaio, foi verificada a resposta dos sensores relativos à variação da frequência de vibração. Para isto, a amplitude na saída do gerador senoidal foi mantida fixa em 60mV_{RMS} , mantendo uma amplitude fixa no gerador de vibração de $2,0\text{V}_{\text{RMS}}$. A resposta dos sensores foram levantadas para as frequências de vibração de 50, 55 e 60Hz; 100, 110 e 120Hz; 150, 165 e 180Hz e 200, 220 e 240Hz.

No segundo ensaio, foi verificada a resposta dos sensores relativos à intensidade da vibração, assim a frequência foi mantida fixa, alterando-se a intensidade da vibração. Como o motor a ser utilizado no terceiro ensaio, apresentou uma rotação de 1711rpm (57Hz), para operação em plena carga, as frequências adotadas neste ensaio foram de 57Hz e 114Hz. Assim, a frequência do gerador senoidal foi fixada em 57Hz, variando-se a amplitude do sinal do gerador senoidal, aplicado ao amplificador, de 30mV_{RMS} a $180\text{mV}_{\text{RMS}}$. O ensaio foi repetido para a frequência de 114Hz.

Na terceiro ensaio, foi medida a vibração diretamente no motor. Os sensores de vibração foram fixados em um suporte preso diretamente ao motor.

Os sensores de vibração na fibra de $125\ \mu\text{m}$ - FBG e na fibra afinada - TFBG foram fixados ao suporte por dois grampos. Através do sistema ótico de interrogação utilizando o IMON, foram obtidos os desvios no comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda_B$) de cada sensor em função da intensidade e da frequência da vibração aplicada. O interrogador foi ajustado para efetuar medição à taxa de 600Hz, resultando uma amostra a cada 1,66 ms, armazenando 2500 amostras.

Neste estudo foram obtidas três tipos de respostas, para cada ensaio.

O primeiro tipo é a resposta temporal, que mostra visualmente a forma de onda da variação do comprimento de onda medida pelo sensor para cada frequência de vibração utilizada.

Para fins de comparação numérica entre os desempenhos de cada sensor, um segundo tipo de resposta foi utilizado. Foi calculado o valor eficaz (RMS) da forma de onda gerada, para cada sensor e para cada frequência de vibração aplicada.

O terceiro tipo de resposta obtida foi a resposta espectral, onde pode ser observado para cada frequência de vibração, o valor da amplitude de cada frequência que compõem a forma de onda da vibração total.

4.6.1 Resposta Temporal

O interrogador coleta 2500 amostras do comprimento de onda da luz refletida pela rede de Bragg, em nanômetros, com uma amostra a cada 1,66ms (taxa de amostragem de 600Hz). Estes dados coletados pelo interrogador são armazenados em um arquivo do tipo texto. A figura 17 mostra os dados do comprimento de onda de Bragg obtidos pelo interrogador, valor medido à cada amostra e a forma de onda obtida pela plotagem dos comprimentos de onda obtidos para as 2500 amostras.

Tempo (s)	Comprimento de Onda (nm)
0,000000	1542,4073
0,001666	1542,4073
0,003332	1542,4070
0,004998	1542,4065
0,006664	1542,4057
0,008330	1542,4040
0,009996	1542,4052
0,011662	1542,4056
0,013328	1542,4062
0,014994	1542,4070
0,016660	1542,4071
0,018326	1542,4074
0,019992	1542,4072
0,021658	1542,4064
...	...
...	...

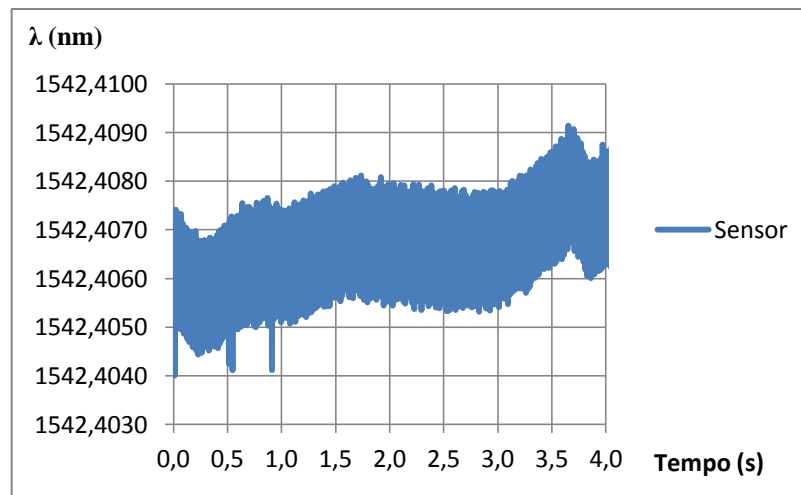


Figura 17 : Tabela de dados de comprimento de onda de Bragg, obtidos pelo interrogador, para cada amostra. Plotagem, no tempo, dos comprimentos de onda da tabela.

Fonte: Autor

Para este trabalho, interessa a variação do comprimento de onda, em picômetros. Assim, para se obter a variação do comprimento de onda, foi gerada nova tabela contendo o tempo da amostragem e o valor da subtração entre a amostra original, em nanômetros, e o valor da primeira amostra, da mesma tabela de dados. O resultado obtido foi a variação do comprimento de onda para cada amostra relativa a uma referência (primeira amostra). Após esta subtração, o resultado foi multiplicado por 1000, para se obter o resultado em picômetros. A figura 18 mostra a nova tabela e a plotagem dos dados da variação do comprimento de onda de Bragg.

Tempo (s)	Varição λ_B (pm)
0,000000	0,0
0,001666	0,0
0,003332	-0,3
0,004998	-0,8
0,006664	-1,6
0,008330	-3,3
0,009996	-2,1
0,011662	-1,7
0,013328	-1,0
0,014994	-0,2
0,016660	-0,1
0,018326	0,1
0,019992	-0,1
0,021658	-0,9
...	...
...	...

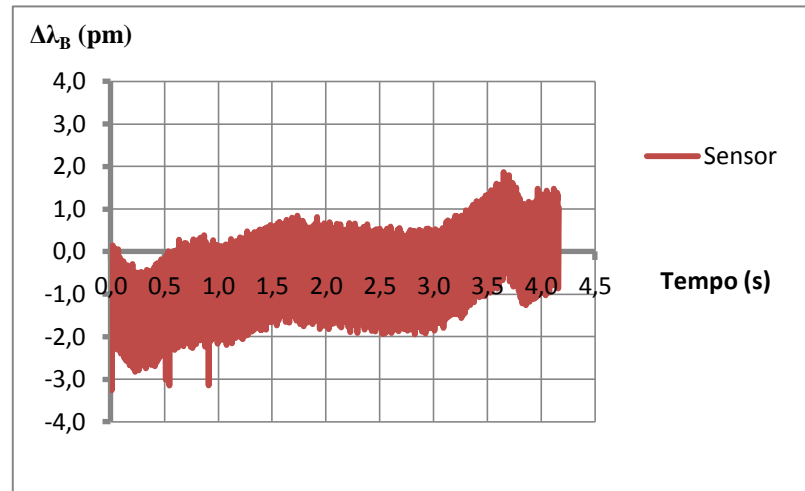


Figura 18 : Tabela de dados da variação do comprimento de onda de Bragg (picometro), obtidos pelo interrogador, para cada amostra. Plotagem, no tempo, da variação do comprimento de onda da tabela.

Fonte: Autor

Pode ser observado que a figura 18 é idêntica à curva da figura 17, porém com os valores em variação do comprimento de onda, em picômetros.

Para se obter a resposta temporal foi utilizado 29 amostras, número suficiente para que se tenha mais do que um ciclo da forma de onda mais longa, 50Hz, cujo ciclo se dá em 12 amostras. Então, da tabela da variação de comprimento de onda de 2500 amostras foram escolhidas uma sequência de 29 amostras. Porém, para se comparar as formas de onda resultantes para cada frequência de vibração e para cada sensor, se faz necessário que o valor médio da forma de onda formada pelas amostras seja o mais próximo possível de zero. Para se obter a mesma forma de onda, porém com valor médio igual a zero, foi criada uma nova tabela, com o número de amostras que compõem um ciclo para a frequência da vibração, subtraindo-se do valor da amostra da tabela anterior o valor médio calculado das amostras selecionadas.

Como as amostras são selecionadas em sequência sem levar em consideração o fator tempo, para se mostrar as respostas para as diversas frequências de vibração e para os diversos sensores, ao invés de se utilizar escala de tempo foi utilizado o número da amostra. A figura 19 mostra uma tabela de 10 amostras - um ciclo para a frequência de 60Hz. Foi calculado o valor médio das 10 amostras. Criou-se uma nova tabela, subtraindo-se de cada

amostra o valor médio calculado. Também é mostrada a forma de onda resultante da plotagem desta nova tabela.

Amostra	60Hz	60Hz_Média
1	0,39	0,09
2	1,64	1,33
3	2,37	2,07
4	2,32	2,02
5	1,50	1,20
6	0,22	-0,08
7	-1,02	-1,33
8	-1,77	-2,07
9	-1,73	-2,03
10	-0,91	-1,22

Valor Médio =	0,30
---------------	------

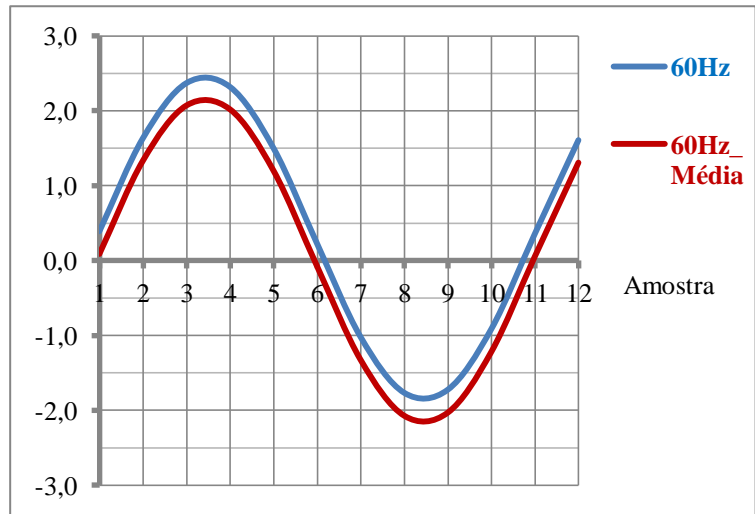


Figura 19 : Tabela de dados da variação do comprimento de onda de Bragg (picometro) e a nova tabela com valor médio igual a zero. Plotagem da variação do comprimento de onda da tabela para cada amostra.

Fonte: Autor

Observa-se que a senoide original poderia ter qualquer valor médio, assim para comparar as respostas é utilizada a forma de onda com valor médio igual a zero.

4.6.2 Cálculo do Valor Eficaz (RMS) da Forma de Onda

Para uma comparação numérica entre os resultados obtidos para a medição de vibração para cada sensor ensaiado, é feito o cálculo do valor eficaz (RMS) da forma de onda obtida pelas amostras coletadas. A equação Eq. 4.6 mostra a fórmula matemática para obtenção do valor eficaz desta forma de onda:

$$\lambda_{B(RMS)} = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{N} (\Delta\lambda_{Bn})^2}{N}} \quad \text{Eq. 4.6}$$

onde N é o número de amostras consideradas (para um ciclo da frequência de vibração), $\Delta\lambda_{Bn}$ é a variação do comprimento de onda da rede da amostra n (que varia de 1 a N) em relação ao valor médio do comprimento de onda das amostras consideradas.

A tabela 2 mostra um exemplo do procedimento de cálculo do valor eficaz da forma de onda obtida no ensaio. Dada a tabela com 10 amostras (um ciclo para 60Hz), faz-se o somatório do quadrado de cada uma destas amostras. Divide-se este somatório pelo número de amostras (10) e calcula-se a raiz quadrada desta divisão, obtendo-se o resultado do valor eficaz da forma de onda.

Tabela 2 : CÁLCULO DO VALOR EFICAZ (RMS), PARA A FORMA DE ONDA GERADA PELA VIBRAÇÃO EM 60HZ .

Amostra	$\Delta\lambda_{Bn}$ (µm)	$\Delta\lambda_{Bn}^2$
1	0,39	0,15
2	1,64	2,68
3	2,37	5,63
4	2,32	5,39
5	1,50	2,25
6	0,22	0,05
7	-1,02	1,04
8	-1,77	3,12
9	-1,73	2,98
10	-0,91	0,84

Somatório =	24,10
$\Sigma / N =$	2,41
$\Delta\lambda_B$ (RMS) =	1,55

Fonte: Autor

4.6.3 Resposta Espectral

Utilizando a ferramenta FFT do *software* OriginPro 8, foi possível obter a resposta espectral (de 0Hz a 300Hz, dada a limitação da taxa de aquisição de 600Hz) do sensor sob ensaio. Com os dados fornecidos pelo IMON, em nanometro, utilizando o *software* Excel (Microsoft) foi subtraído de cada amostra o valor da primeira amostra. Assim, obtém-se como resultado a variação da resposta no tempo. Este resultado foi multiplicado por 1000, para que o valor desta variação seja em picometros. Estes valores foram exportados para o *software* OriginPro 8. Aplicando-se a ferramenta FFT deste *software* foi obtida a resposta espectral do sensor em teste. Esta resposta espectral foi fornecida em forma de uma tabela que relaciona a frequência no espectro com o valor da amplitude da variação de comprimento de onda de Bragg para cada uma das frequências que compõem a resposta do sensor para uma determinada frequência de vibração.

A figura 20 mostra um exemplo da obtenção de uma resposta espectral para uma resposta simulada pelo cálculo do somatório de três componentes senoidais. A resposta final, simulada, é dada pela equação Eq. 4.7:

$$Soma = (1,5sen(2\pi 60) + 0,2sen(2\pi 30 + 30^\circ) + sen(2\pi 1)) \quad \text{Eq. 4.7}$$

ou seja, a resultante é o somatório de uma senóide de 60Hz, cuja amplitude é de valor 1,5pm, mais uma senóide de 30Hz, cuja amplitude é de valor 0,2pm (com 30° de defasagem) e mais uma senóide de 1Hz, cuja amplitude é de valor 1,0pm. A tabela da figura 20, mostra o somatório, amostra por amostra. Também é mostrada a plotagem das componentes senoidais e das 2500 amostras no tempo.

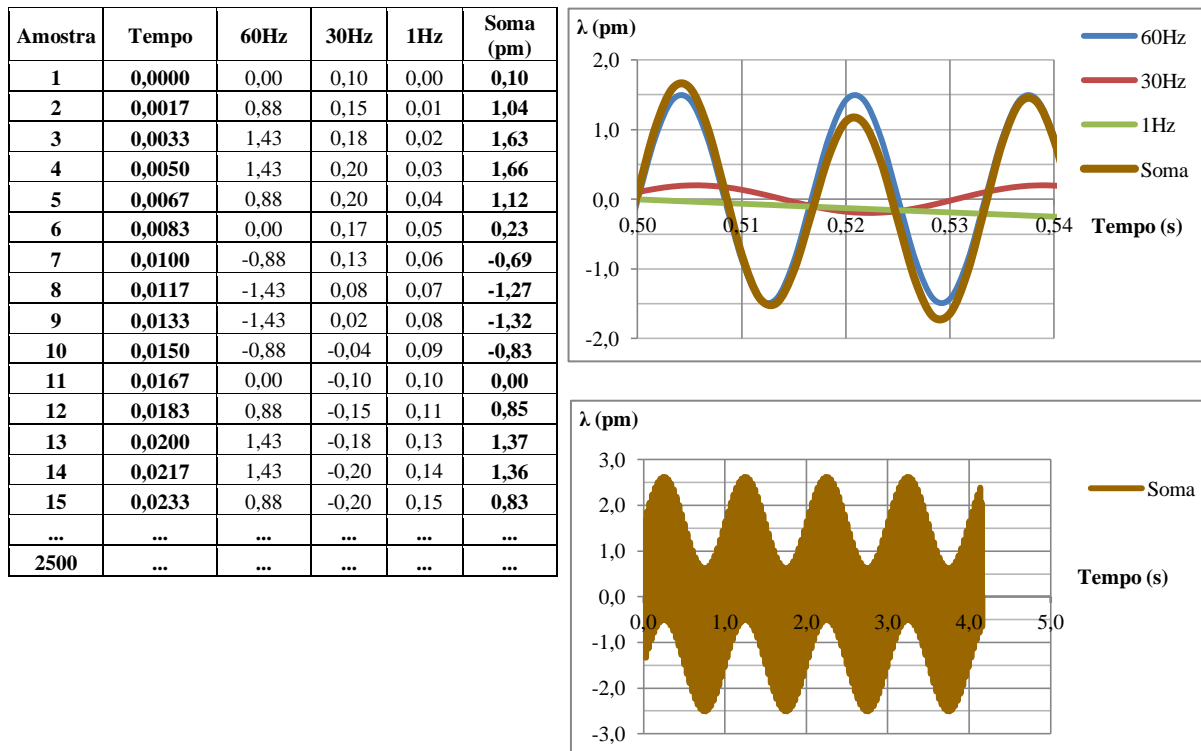


Figura 20: Tabela de dados das senóides simuladas calculadas, com valores para cada amostra e os valores da resposta resultante da soma amostra por amostra. Plotagem das componentes senoidais da resultante ‘Soma’ e para as 2500 amostras no tempo.

Fonte: Autor

A figura 21 mostra a tabela com o resultado obtido pela aplicação da função FFT para a tabela formada pelas 2500 amostras da resultante ‘Soma’. Esta tabela relaciona a frequência da componente e sua amplitude. Pelo critério de Nyquist, é necessário no mínimo

duas amostras em um ciclo para que seja possível calcular o valor da amplitude da componente senoidal. Como a amostragem é feita em 600Hz, a frequência máxima que se pode estabelecer o valor da amplitude é de 300Hz. A figura 21 mostra também a plotagem desta tabela, podendo-se visualmente perceber quais as frequências e suas amplitudes, das senóides que compõem a resposta final.

Frequência (Hz)	FFT (pm)
0,0	0,02
0,2	0,04
0,5	0,06
0,7	0,13
1,0	0,95
1,2	0,20
...	...
29,8	0,00
30,0	0,20
30,2	0,00
...	...
...	...
59,8	0,00
60,0	1,50
60,2	0,00
...	...
...	...
299,8	0,00
300,0	0,00

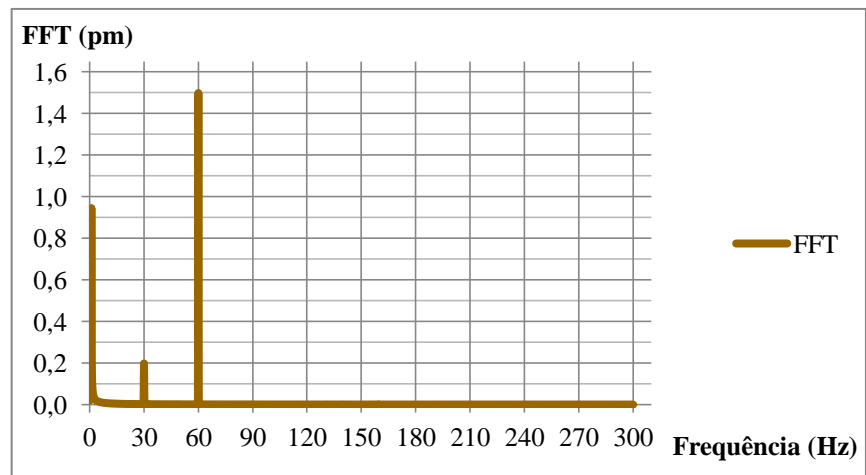


Figura 21 : Tabela resultante da aplicação da função FFT, na tabela de dados da resposta resultante da soma amostra por amostra. Plotagem da resposta espectral da resultante ‘Soma’ .

Fonte: Autor

Analisando a resposta espectral, conclui-se que a resultante ‘Soma’ é composta pelo somatório de uma senóide de 60Hz com amplitude de 1,5pm ; mais uma senóide de 30Hz com amplitude de 0,2pm e mais uma senóide de 1Hz com amplitude de aproximadamente 1,0pm (ocorre uma certa dispersão em torno da frequência de 1Hz, provavelmente pelo processo matemático da função FFT). Estas amplitudes são exatamente as amplitudes utilizadas na equação Eq. 4.7 para calcular a simulação da resultante ‘Soma’.

Pode-se concluir que a tabela gerada pela aplicação da função FFT do *software* OriginPro 8, nas 2500 amostras coletadas (em picômetros), fornece a frequência e o valor da sua amplitude para cada senóide que compõem o resultado final.

4.7 ENSAIO DO ACELERÔMETRO BIAIXIAL BASEADO EM REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA - FBG

Para obter uma referência para a variação de comprimento de onda dos sensores FBG e TFBG em relação à vibração, inicialmente foi utilizado um acelerômetro capacitivo comercial, modelo 2210-100, da Silicon Designs, que foi fixado à estrutura de ensaio.

Para fazer a amostragem dos dados de medição, o acelerômetro capacitivo foi conectado a um amplificador universal de 8 canais do sistema de aquisição de dados Quantum X da HBM, modelo MX840, que por sua vez foi conectado à um microcomputador com o *software* de aquisição de dados CATMAN AP v3.4, da Catman Easy.

Foi aplicado ao sistema de geração de vibração um sinal senoidal na entrada do amplificador com amplitude de $60mV_{RMS}$ a $180mV_{RMS}$, variando-se a frequência entre 50Hz e 240Hz. Foi observado que o acelerômetro capacitivo utilizado não possuía sensibilidade suficiente para a vibração gerada no ensaio.

Posteriormente foi utilizado um acelerômetro biaxial baseado em FBG, com uma sensibilidade melhor que acelerômetro capacitivo. Este acelerômetro não é comercial, foi construído na UTFPR, sendo anteriormente caracterizado e calibrado.

A figura 22 mostra o acelerômetro montado na estrutura de ensaios sobre o gerador de vibração, alto falante.

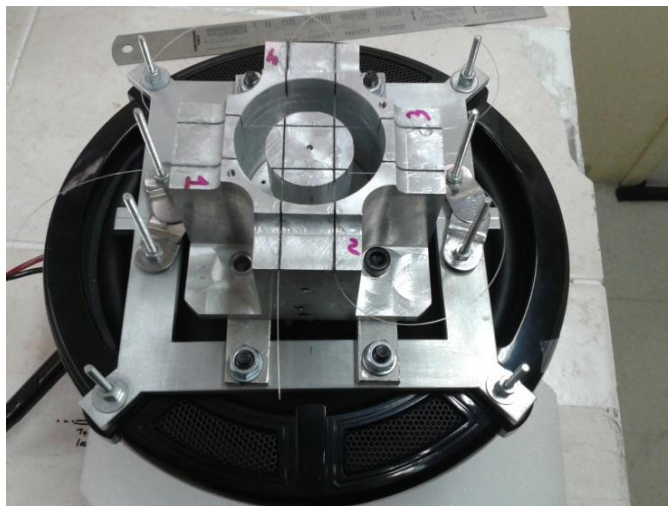


Figura 22 : Acelerômetro biaxial baseado em FBG, montado sobre a estrutura de ensaio sobre o gerador de vibração.

Fonte: Autor

A figura 23 mostra a resposta do acelerômetro, calibrado, em pm/g (picometro pela aceleração da gravidade) utilizado como referência para os sensores de vibração FBG e TFBG.

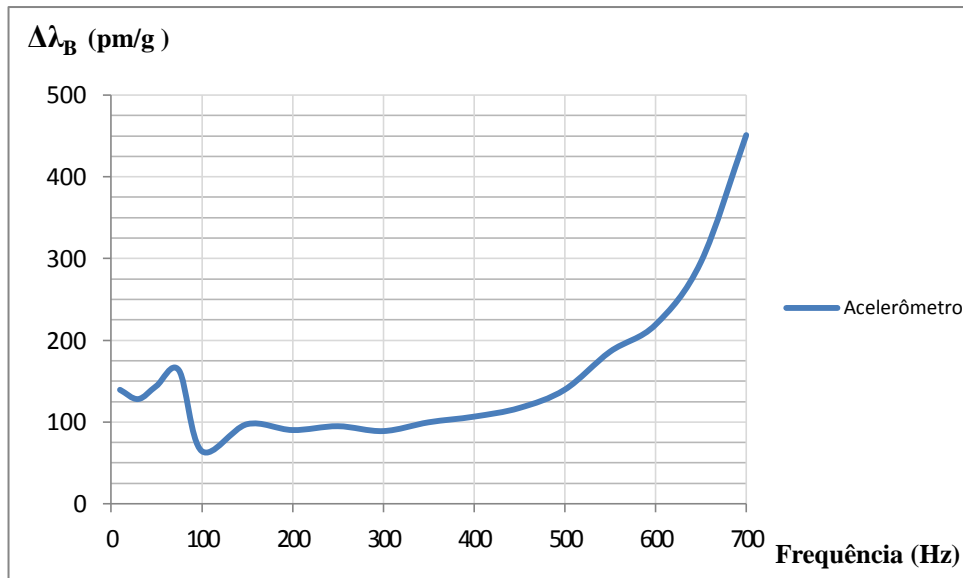


Figura 23 : Resposta em frequência do acelerômetro biaxial baseado em FBG.
Fonte: Rafael P. Linessio [35]

Para aquisição de dados foi utilizado um interrogador SM125, da Micron Optics, com uma taxa de aquisição de 1000Hz, ou seja uma amostragem feita a cada 1ms, conectado a um microcomputador e utilizando o *software* de aquisição de dados CATMAN AP v3.4, da Catman Easy.

O acelerômetro biaxial foi submetido aos mesmos ensaios que os sensores FBG e TFBGs, com o levantamento da resposta em frequência e intensidade da vibração. Os resultados destes ensaios são apresentados juntos com os resultados dos outros sensores ensaiados.

5 RESULTADOS

Nesse capítulo são descritos os resultados obtidos para a resposta dos sensores quanto à variação da frequência de vibração, para a resposta dos sensores quanto à variação da intensidade da vibração e os resultados da medição de vibração no motor de indução trifásico sujeito à variação de carga. Para cada tipo de ensaio são apresentados os resultados em forma de resposta temporal, comparação numérica do valor eficaz da forma de onda obtida pela variação do comprimento de onda gerada pela resposta à vibração e em forma de resposta espectral.

Os sensores de vibração baseados em redes de Bragg em fibra ótica normal (G-652) – FBG e afinada – TFBGs, bem como o acelerômetro biaxial, foram fixados à estrutura de medição, individualmente. Os sensores foram submetidos à vibração gerada pelo alto falante, controlada em intensidade e frequência.

Para os sensores FBG e TFBG, foi inserida a massa **M** à uma distância de 8,5cm do ponto de apoio da fibra. A distância de 8,5cm foi escolhida após ter sido feito teste em várias distâncias, observando-se a resposta em frequência, através da opção FFT online do *software* do I MON. A distância de 8,5cm foi a que apresentou uma melhor resposta, levando-se em consideração a amplitude da resposta e a baixa composição de harmônicos na resposta.

5.1 RESPOSTA DE SENSORES DE VIBRAÇÃO BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA (FBG E TFBGS) PARA A VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA VIBRAÇÃO

Através do gerador de funções, foi mantido um sinal senoidal na entrada do amplificador com amplitude fixa de $60mV_{RMS}$, gerando no alto falante uma amplitude fixa $2,0V_{RMS}$. A frequência da vibração gerada, foi sendo alterada na faixa de 50 a 240Hz, sendo aplicado inicialmente 50Hz e na sequência 55Hz, 60Hz, 100Hz, 110Hz, 120Hz, 150Hz, 165Hz, 180Hz, 200Hz, 220Hz e 240Hz.

5.1.1 Resposta Temporal

As figuras 24, 25, 26 e 27 mostram, como exemplo, a resposta temporal da variação do comprimento de onda para os sensores FBG, TFBG 80 μ m, TFBG 60 μ m e para o acelerômetro biaxial, respectivamente. Estas respostas temporais foram obtidas, conforme procedimento mostrado no capítulo 4.6.1, para as frequências de vibração de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz, com um sinal senoidal no alto falante de amplitude fixa de $2,0 V_{RMS}$. Os

sensores FBG e TFBG utilizaram a massa M, à uma distância de 8,5cm do ponto de apoio, com a fibra tensionada.

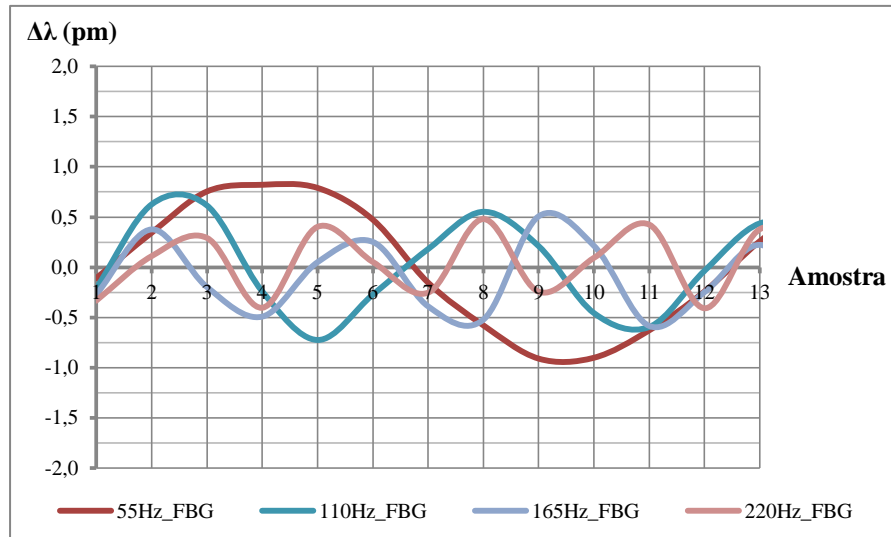


Figura 24 : Variação temporal do comprimento de onda de uma FBG, para as frequências de vibração de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz .

Fonte: Autor

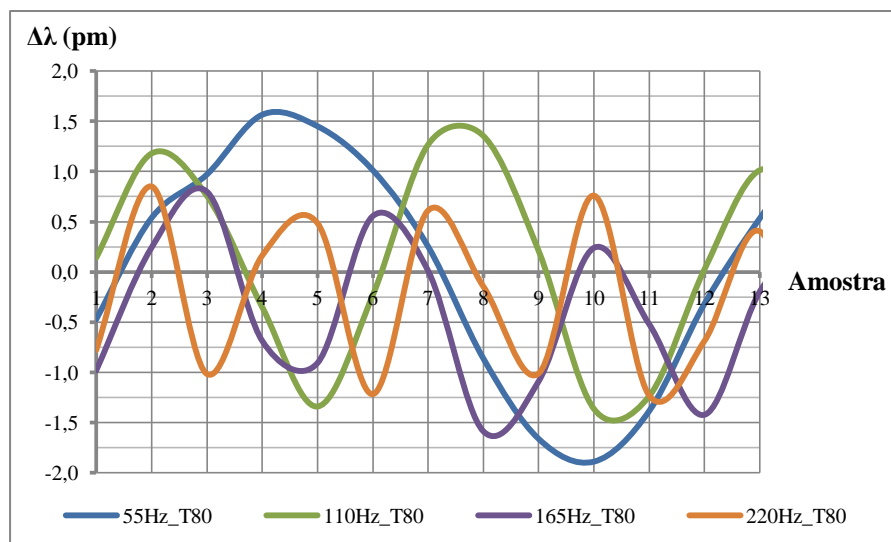


Figura 25 : Variação temporal do comprimento de onda de uma TFBG 80 μm , para as frequências de vibração de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz .

Fonte: Autor

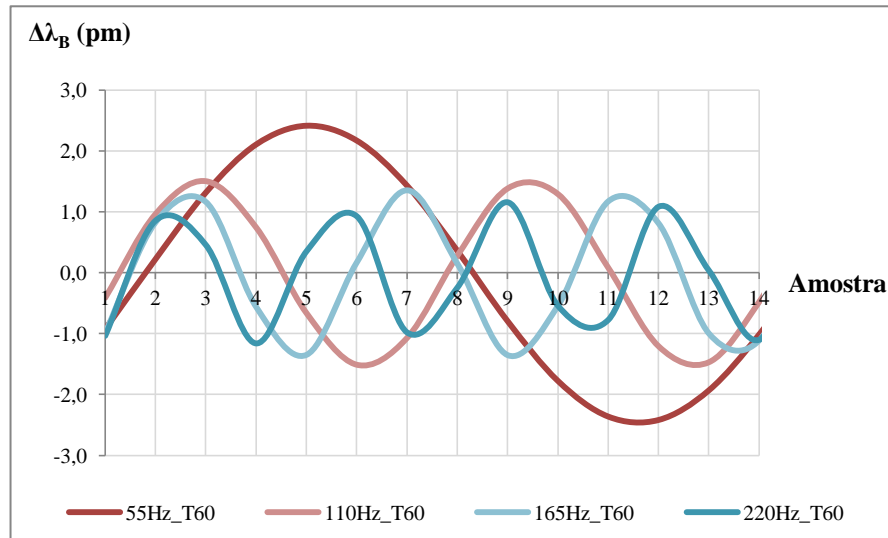


Figura 26 : Variação temporal do comprimento de onda de uma TFBG 60µm, para as frequências vibração de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz .
Fonte: Autor

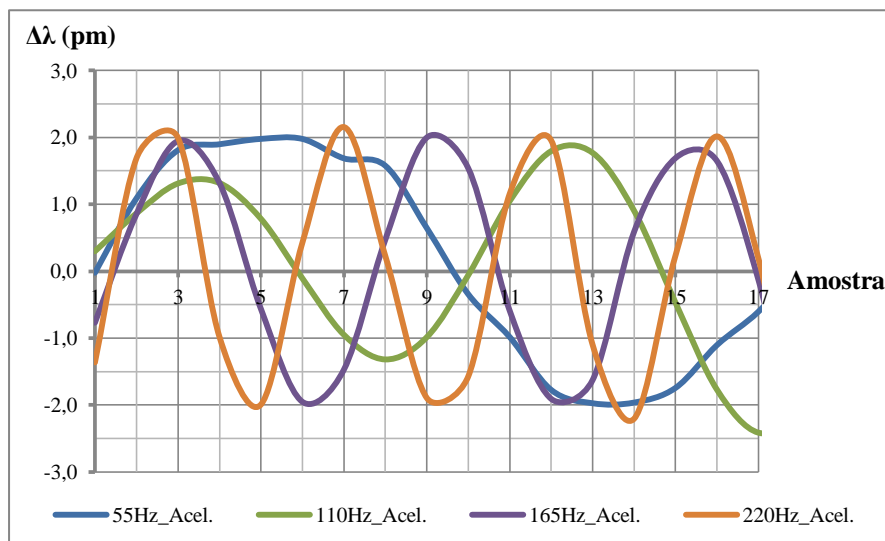


Figura 27 : Variação temporal do comprimento de onda para o acelerômetro biaxial, para as frequências vibração de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz .
Fonte: Autor

5.1.2 Valor Eficaz (RMS) da Resposta Temporal

A tabela 3 mostra a comparação entre os resultados obtidos, pela aplicação da equação Eq. 4.6 nos dados aquisitados nos ensaios de vibração dos sensores de vibração baseados na FBG e TFBGs e do acelerômetro baseado em FBG.

Seguindo o procedimento descrito no capítulo 4.6.2 , a partir dos dados coletados pelo interrogador, foi calculado o valor eficaz para a resposta para cada um dos sensores de vibração, para as frequências de vibração entre 50Hz e 240Hz, mantendo fixa a amplitude de vibração.

Utilizando o acelerômetro como referência, ao final da tabela pode-se observar a sensibilidade dada pela variação do comprimento de onda em relação à aceleração da gravidade.

Tabela 3 : COMPARAÇÃO ENTRE O VALOR DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA RMS, PARA OS SENSORES DE VIBRAÇÃO FBG E TFBG E O ACELERÔMETRO DE REFERÊNCIA, RELATIVO À VIBRAÇÃO DO GERADOR DE VIBRAÇÃO, PARA A FAIXA DE FREQUÊNCIA DE 50HZ A 240HZ.

Frequência (Hz)	Normal (FBG)	T60	T80	Acelerômetro (Referência)
50	0,40	1,58	1,00	1,56
55	0,59	1,68	1,29	1,43
60	0,75	1,84	1,44	1,90
100	0,41	1,17	0,95	1,04
110	0,38	1,06	0,87	0,97
120	0,45	1,14	0,89	0,70
150	0,33	0,88	0,67	1,71
165	0,36	0,99	0,68	1,37
180	0,39	0,92	0,70	1,83
200	0,36	0,89	0,63	1,36
220	0,27	0,82	0,71	1,65
240	0,43	1,14	0,87	1,23
Média	0,43	1,18	0,89	1,40
Sensibilidade (pm/g)	29,9	82,5	62,6	98,0

Fonte: Autor

Analisando a tabela concluí-se que os sensores de vibração TFBG tem uma sensibilidade melhor que o sensor FBG. Em relação à sensibilidade do sensor FBG, na média o sensor TFBG 80µm tem uma sensibilidade **2,1** vezes maior e o sensor TFBG 60µm tem uma sensibilidade **2,7** vezes maior.

O sensor TFBG 60 μ m apresentou uma sensibilidade (82,5pm/g) muito próxima à sensibilidade do acelerômetro biaxial (98,0pm/g), utilizando uma montagem mais simples.

A figura 28 mostra o gráfico referente aos dados da tabela 3, para melhor visualização.

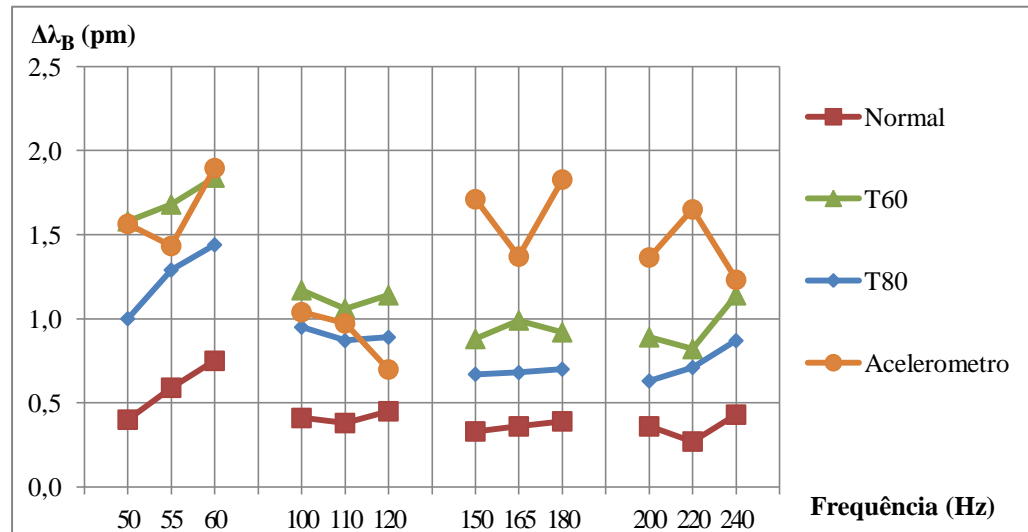


Figura 28 : Gráfico com a variação do comprimento de onda RMS, para os sensores de vibração FBG e TFBG e o acelerômetro de referência, relativo à vibração do gerador de vibração, para a faixa de frequência de 50Hz a 240Hz, com um sinal de entrada, de 60mV_{RMS}, no amplificador do gerador de vibração.

Analisando os resultados apresentados na figura 28, pode-se concluir que os sensores FBG e TFBGs mantêm a relação entre os seus resultados e que as variações das amplitudes podem ser devidas à intensidade de vibração da estrutura não ser linear, conforme a frequência, o que não invalida os ensaios, pois os sensores estão sob as mesmas condições de vibração.

5.1.3 Resposta Espectral

As figuras 29, 30, 31 e 32 mostram, como exemplo, a resposta espectral da variação do comprimento de onda para os sensores FBG, TFBG 80 μ m, TFBG 60 μ m e para o acelerômetro biaxial, respectivamente. Estas respostas temporais foram obtidas, conforme procedimento mostrado no capítulo 4.6.3, para as frequências de vibração de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz, com um sinal senoidal no alto falante de amplitude fixa de 2,0 V_{RMS}. Os sensores FBG e TFBG utilizaram a massa M, à uma distância de 8,5cm do ponto de apoio, com a fibra tensionada.

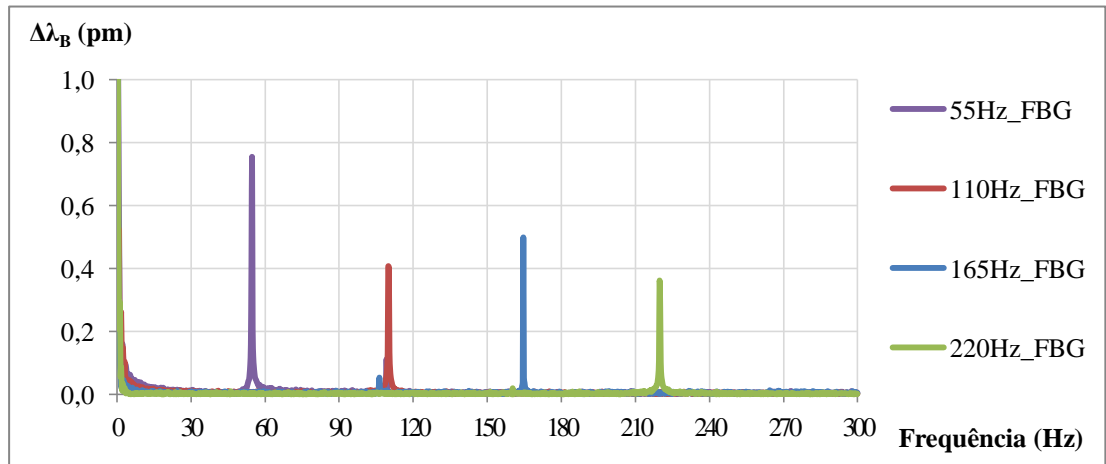


Figura 29 : Resposta espectral da variação do comprimento de onda para o sensor FBG, para vibração nas frequências de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz.

Fonte: Autor

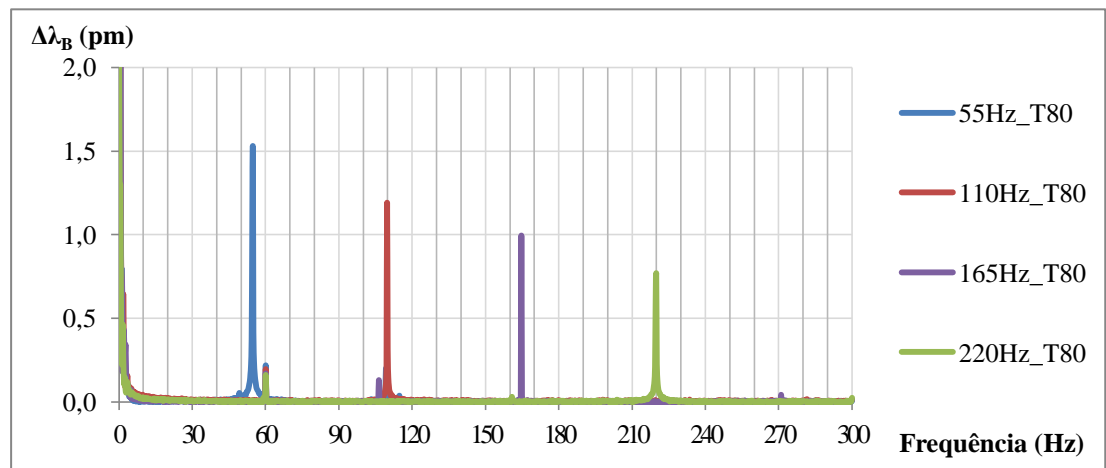


Figura 30 : Resposta espectral da variação do comprimento de onda para o sensor TFBG 80 μm , para vibração nas frequências de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz.

Fonte: Autor

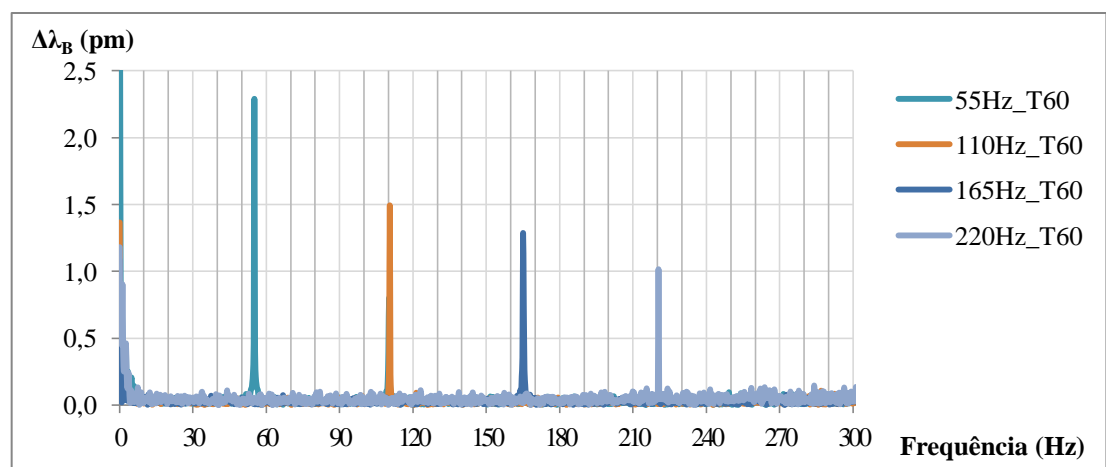


Figura 31 : Resposta espectral da variação do comprimento de onda da rede de Bragg da TFBG 60 μm , para vibração nas frequências de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz.

Fonte: Autor

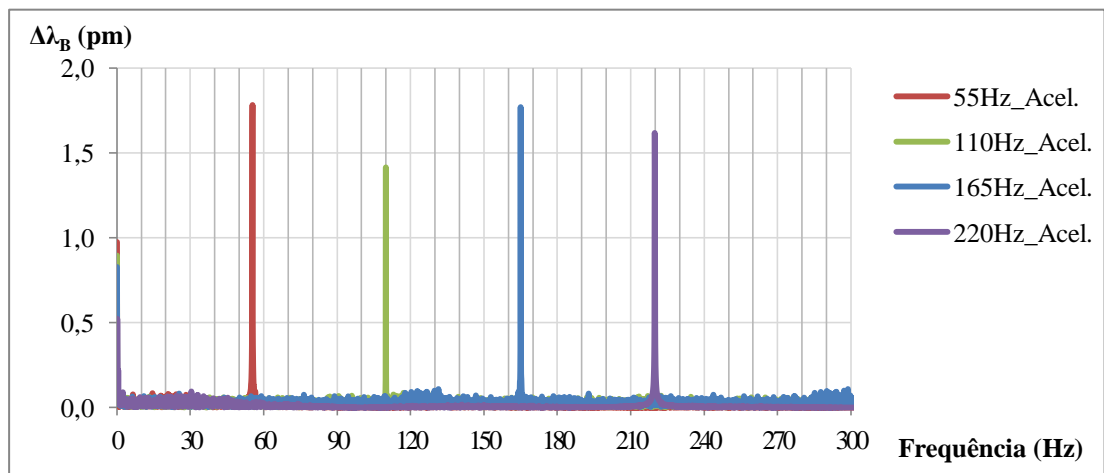


Figura 32 : Resposta espectral da variação do comprimento de onda de Bragg do acelerômetro de referência, para a vibração gerada nas frequências de 55Hz, 110Hz, 165Hz e 220Hz.

Fonte: Autor

A tabela 4 mostra a comparação entre os resultados obtidos, pela aplicação da função FFT do *software* OriginPro 8 nos dados adquiridos nos ensaios de vibração dos sensores de vibração baseados na FBG e TFBGs e do acelerômetro baseado em FBG. A tabela mostra o valor da amplitude da frequência da vibração aplicada no ensaio. Utilizando o acelerômetro como referência, ao final da tabela pode-se observar a sensibilidade dada pela amplitude da variação do comprimento de onda em relação à aceleração da gravidade.

Tabela 4 : COMPARAÇÃO ENTRE O VALOR DA AMPLITUDE DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA (FFT), PARA OS SENSORES DE VIBRAÇÃO FBG E TFBG E O ACELERÔMETRO DE REFERÊNCIA, RELATIVO À VIBRAÇÃO DO GERADOR DE VIBRAÇÃO, PARA A FAIXA DE FREQUÊNCIA DE 50HZ A 240HZ.

Frequência (Hz)	Normal (FBG)	T60	T80	Acelerômetro (Referência)
50	0,57	2,17	1,49	2,09
55	0,75	2,29	1,53	1,78
60	1,12	2,27	1,75	2,71
100	0,59	1,69	1,34	1,37
110	0,41	1,49	1,19	1,42
120	0,59	1,56	1,23	1,05
150	0,45	1,17	0,91	2,00
165	0,50	1,29	1,00	1,77
180	0,46	1,15	0,93	2,63
200	0,47	1,23	0,95	1,43
220	0,36	1,02	0,77	1,62
240	0,50	1,28	1,04	1,63
Média	0,56	1,55	1,18	1,79
Sensibilidade (pm/g)	30,8	84,8	64,4	98,0

Fonte: Autor

Da mesma forma que a tabela 3 (valores RMS), analisando a tabela 4 (valores FFT), concluí-se que os sensores de vibração TFBG tem uma sensibilidade melhor que o sensor FBG. Na média o sensor TFBG 80 μm tem uma sensibilidade **2,1** vezes maior e o sensor TFBG 60 μm tem uma sensibilidade **2,7** vezes maior.

O sensor TFBG 60 μm apresentou uma sensibilidade (**84,8pm/g**) muito próxima à sensibilidade do acelerômetro biaxial (**98,0pm/g**), utilizando uma montagem mais simples.

A figura 33 mostra o gráfico referente aos dados da tabela 4, para melhor visualização.

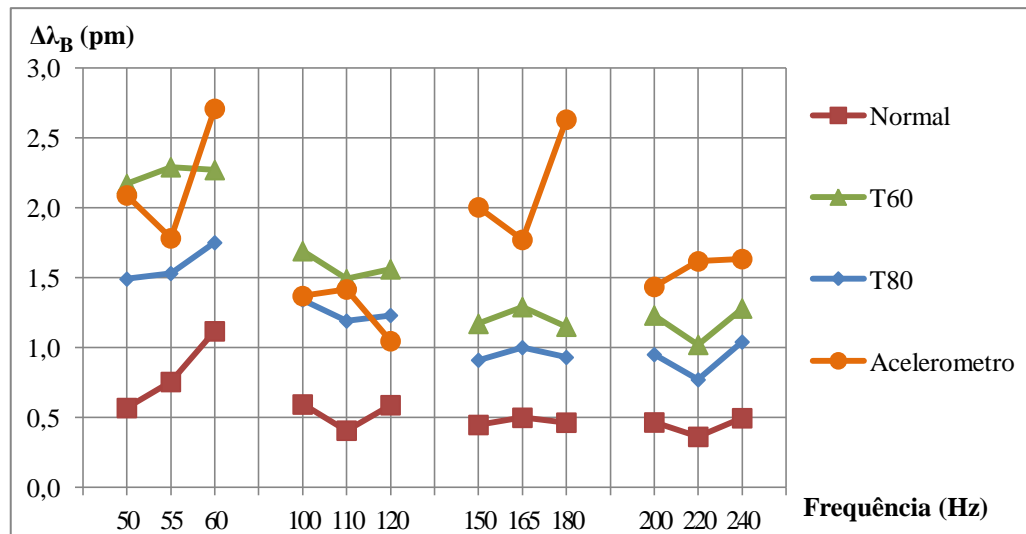


Figura 33 : Amplitude da variação do comprimento de onda (FFT), para os sensores de vibração FBG e TFBGs e o acelerômetro de referência, relativo à vibração do gerador de vibração, para a faixa de frequência de 50 a 240Hz, com um sinal de entrada, de 60 mV_{RMS}, no amplificador do gerador de vibração.

Fonte: Autor

Analisando os resultados apresentados na figura 33, pode-se concluir que os sensores FBG e TFBGs mantêm a relação entre os seus resultados e que as variações das amplitudes podem ser devidas à intensidade de vibração da estrutura não ser linear, conforme a frequência, o que não invalida os ensaios, pois os sensores estão sob as mesmas condições de vibração.

5.2 RESPOSTA DE SENSORES DE VIBRAÇÃO BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA (FBG E TFBGS) PARA A VARIAÇÃO DA INTENSIDADE DA VIBRAÇÃO

Conforme descrito no capítulo 4.6, foi efetuado o levantamento da resposta dos sensores para a variação da intensidade da vibração. Como os resultados da resposta temporal, valor eficaz e resposta espectral, são muito semelhantes aos já demonstrados no capítulo 5.1, é apresentada somente a tabela e seu gráfico da resposta em valor eficaz. Na tabela 5 observa-se

a comparação da variação do comprimento de onda RMS, a partir da forma de onda obtida pela amostragem feita, devido à vibração na frequência de 57Hz e 114Hz, para as FBG, TFBG 60 μ m e TFBG 80 μ m, variando-se a tensão do sinal aplicado ao amplificador do gerador de vibração, entre 30mV_{RMS} e 180mV_{RMS}.

Tabela 5 : COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA EM VALORES RMS ENTRE OS SENSORES BASEADOS EM FBG, TFBG 60 μ m E TFBG 80 μ m, PARA A FREQUÊNCIA DE 57HZ E 114HZ DEVIDO À VIBRAÇÃO, PELA VARIAÇÃO DO SINAL DE ENTRADA NO AMPLIFICADOR DO GERADOR DE VIBRAÇÃO.

Ve (mV)	57Hz_FBG	57Hz_T60	57Hz_T80	114Hz_FBG	114Hz_T60	114Hz_T80
30	0,24	0,64	0,50	0,17	0,40	0,34
60	0,57	1,28	0,99	0,37	0,91	0,75
90	0,87	1,69	1,20	0,51	1,24	1,13
120	0,96	1,96	1,48	0,58	1,68	1,36
150	1,06	2,12	1,62	0,61	2,06	1,79
180	1,20	2,38	1,78	0,73	2,31	2,06

Fonte: Autor

Na figura 34 é mostrado graficamente os resultados apresentados na tabela 5, para melhor visualização.

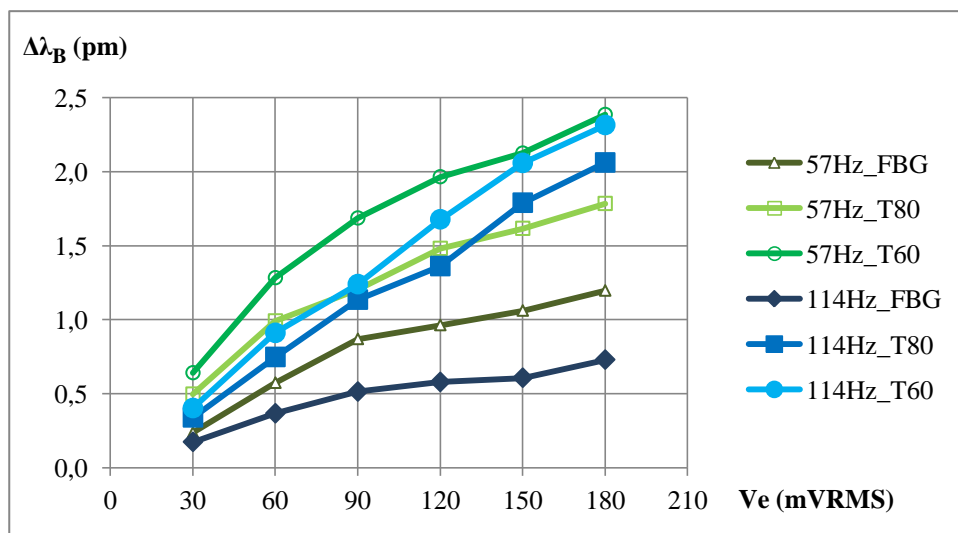


Figura 34 : Gráfico de comparação da variação do comprimento de onda em valores RMS entre os sensores baseados em FBG, TFBG 60 μ m e TFBG 80 μ m, para as frequências de vibração de 57Hz e 114Hz, pela variação do sinal de entrada no amplificador do gerador de vibração.

Fonte: Autor

Observando o gráfico, concluí-se que os sensores FBG e TFBGs mantêm linearidade na resposta à intensidade da vibração, mantendo a relação entre suas respostas.

5.3 RESPOSTA DE SENSORES DE VIBRAÇÃO BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA FBG E TFBGS, APLICADAS A MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Nesta etapa foi feita a medição de vibração em um motor de indução trifásico utilizando os sensores de vibração baseados em fibra ótica com redes de Bragg normal (FBG) e afinada (TFBG).

5.3.1 Estrutura para Medição da Vibração do Motor com Carga Variável

O motor utilizado para o ensaio é um motor trifásico assíncrono WEG com potência nominal de 1,0CV, 60Hz, 1730rpm, conectado à rede elétrica 220Vac (fase-fase) em ligação triângulo. Para possibilitar o controle de carga para o motor, foi mecanicamente acoplada ao eixo do motor um gerador CC. Controlando-se a potência dissipada pelo gerador CC, pode-se controlar a potência no eixo do motor. O gerador CC é uma máquina de corrente contínua da WEG modelo G908 , 2,6kW, 1800rpm.

A figura 35 mostra o motor acoplado a um gerador CC e um tacogerador (tacômetro utilizado para medição da rotação do gerador CC). O gerador CC é acoplado ao eixo do motor através de um acoplador mecânico, para eliminar o problema de alinhamento e tamanhos dos eixos do motor e do gerador CC. À armadura do gerador CC foi conectada uma carga resistiva de 800W/127V.

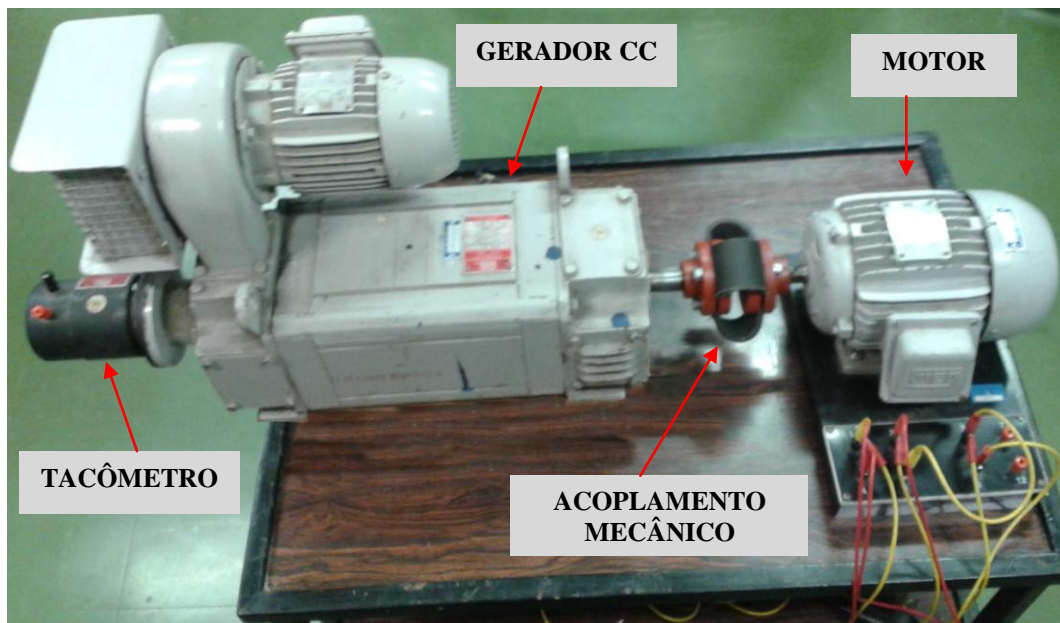


Figura 35 : Estrutura para o ensaio para medição de vibração utilizando os sensores baseados em FBG e TFBG. Motor trifásico de indução acoplado mecanicamente ao gerador CC. Tacômetro ligado ao eixo do gerador.

Fonte: Autor

A carga no eixo do motor é controlada a partir da variação da tensão aplicada à bobina de campo do gerador, desta forma controla-se a tensão na armadura, conseqüentemente é controlada a potência dissipada na carga resistiva.

Na figura 36 é mostrado o esquema elétrico para controle da potência dissipada na carga resistiva. Foi conectada uma fonte de tensão CC, modelo Minipa MPL-3303M, à entrada de controle de campo do gerador. Variando-se a tensão CC de campo, proporcionalmente ocorre a variação da tensão na armadura, conseqüentemente ocorre a variação da potência dissipada na carga resistiva, fornecida pelo gerador. Como é o motor que fornece a força mecânica para girar o eixo do gerador, alterando a potência fornecida pelo gerador CC, altera-se a potência no eixo do motor.

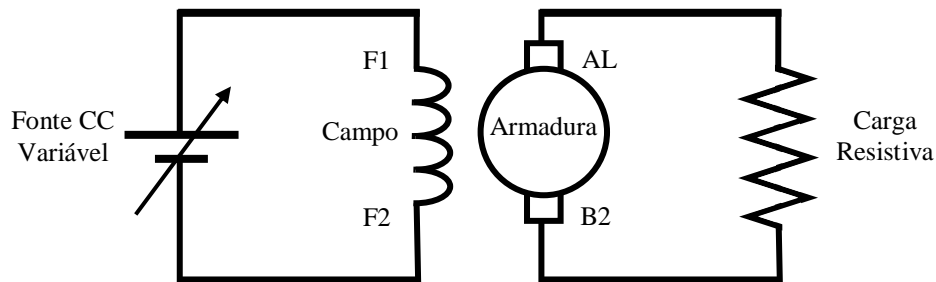


Figura 36 : Esquema de ligação elétrica do gerador CC acoplado ao eixo do motor sob ensaio, para produzir uma carga variável ao motor.

Fonte: Autor

Para fixar os sensores de vibração FBG e TFBG ao motor, foi confeccionado um suporte metálico, de forma que a fibra pudesse ser fixada por pressão e não por colagem para que o ensaio não fosse destrutivo.

A figura 37 mostra um esboço do suporte para acoplar o sensor de vibração ao motor sob ensaio. Como o local para fixação era estreito, somente um lado do suporte foi fixado ao motor, utilizando-se porca e parafuso. Como o comprimento do espaço livre para a fibra tinha somente 8,1cm, a massa inercial M foi colocada à uma distância $d=7,0\text{cm}$ do ponto de apoio da fibra no suporte.

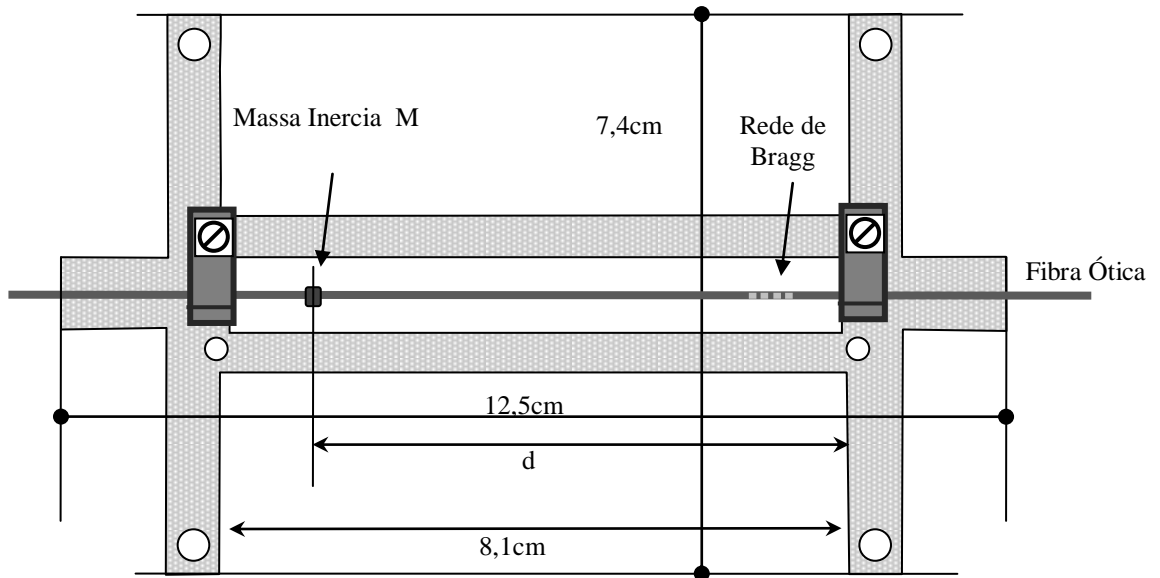


Figura 37 : Suporte para acoplamento o sensor de vibração ao motor sob ensaio.
Fonte: Autor

A foto da figura 38 mostra o local (área circulada) onde foi fixado o sensor de vibração na estrutura do motor trifásico.

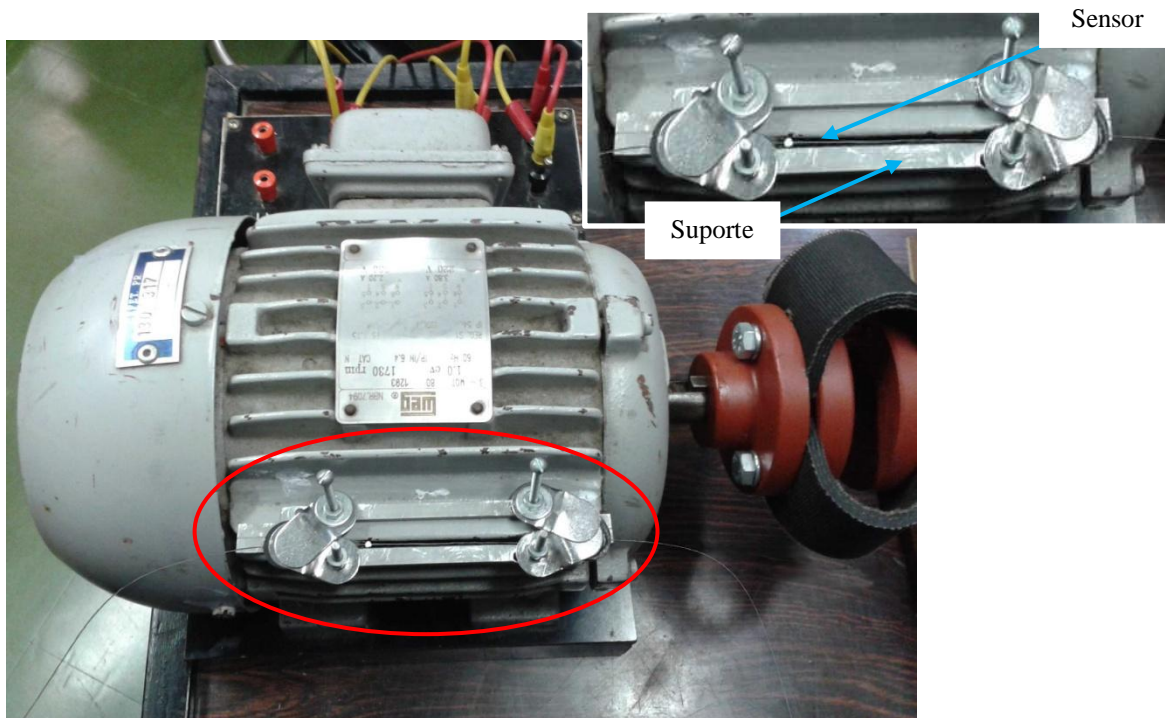


Figura 38 : Local da fixação (área circulada) do sensor de vibração ao motor sob ensaio.
Detalhe do suporte do sensor.
Fonte: Autor

5.3.2 Ensaio do Motor

Foram realizados os levantamentos das respostas dos sensores FBG e TFBG 60 μ m para medição da vibração no motor trifásico. O sensor TFBG 80 μ m sofreu quebra e não havia disponibilidade para substituição.

O motor foi ligado em duas condições, diretamente ao sistema trifásico 60Hz e através de um inversor de frequência, ajustando-se a frequência de acionamento em 30Hz, 40Hz, 50Hz e 60Hz. A carga no motor foi controlada pela tensão aplicada ao campo do gerador, assim os sensores foram ensaiados em três condições de carga: à vazio, com um terço da potência nominal (0,3CV) e na potência nominal do motor (1,0CV).

Para o ensaio de vibração com o motor ligado ao inversor de frequência, foi utilizado o inversor modelo CFW-02, WEG, ligado à uma rede trifásico 220Vca.

5.3.3 Resultado da Resposta dos Sensores FBG e TFBG 60 μ m para o Ensaio de Vibração do Motor

Os resultados mostrados a seguir fornecem a resposta da variação do comprimento de onda de Bragg, devido à vibração do motor sob ensaio, alimentado diretamente pela rede 60Hz e através do inversor de frequência, para os sensores FBG e TFBG 60 μ m.

A figura 39 mostra, como exemplo, as formas de onda obtidas pelos dados amostrados pelo interrogador IMON, com uma taxa de amostragem de 600Hz, para o sensor FBG, para a ligação direta do motor à rede, para as três condições de carga.

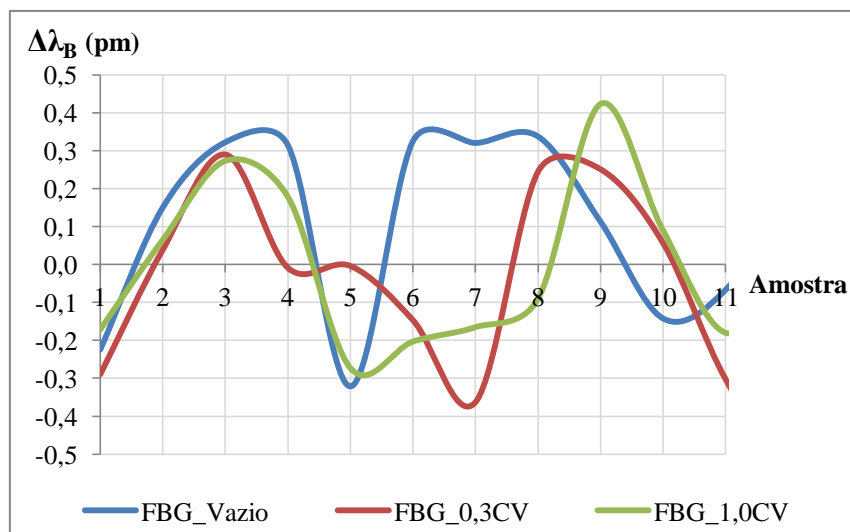


Figura 39 : Resposta temporal para o sensor de vibração FBG gerado pela vibração do motor sob ensaio, ligação direta à rede, para carga do motor: sem carga, 0,3 CV e 1,0CV. Taxa de amostragem de 600Hz.

Fonte: Autor

A figura 40 mostra, como exemplo, as formas de onda obtidas pelos dados amostrados pelo interrogador IMON, com uma taxa de amostragem de 720Hz, para o sensor TFBG 60 μm , para a ligação direta do motor à rede, para as três condições de carga.

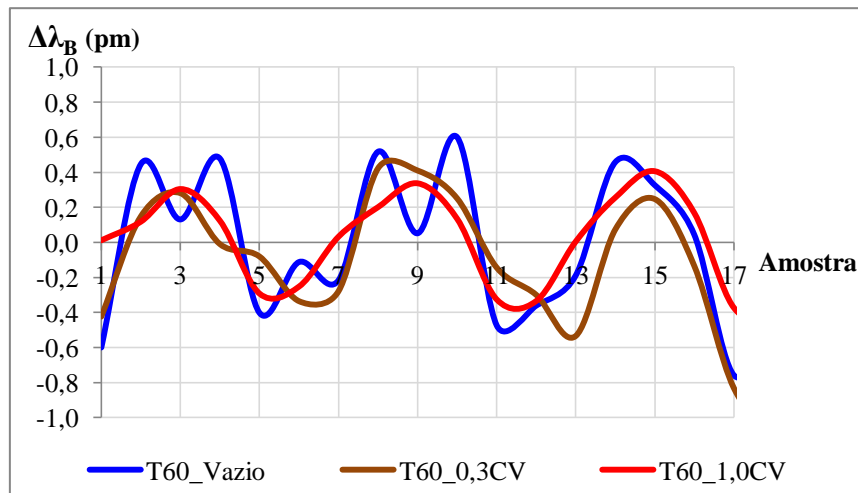


Figura 40 : Resposta temporal para o sensor de vibração TFBG 60 gerado pela vibração do motor sob ensaio, ligação direta na rede, para carga do motor: sem carga, 0,3CV e 1,0CV. Taxa de amostragem de 720Hz.

Fonte: Autor

Observou-se que ao calcular o valor eficaz da forma de onda resultante da vibração, a presença de muitas frequências indesejadas na composição da onda final comprometia o resultado, então, seria necessário fazer uma filtragem nos dados. Assim são apresentados os resultados, analisando somente a resposta espectral, que visualmente fornece uma análise das componentes da vibração medida pelos sensores e numericamente é possível comparar o desempenho dos sensores para as frequências desejadas na análise, neste caso as harmônicas da frequência elétrica.

Os dados amostrados pelo interrogador foram submetidos à função FFT do *software* OriginPro 8, obtendo-se a resposta espectral para a vibração provocada pelo motor sob ensaio.

A figura 41 mostra a resposta espectral da vibração provocada pelo motor sob ensaio no sensor FBG, para ligação direta do motor à rede de alimentação, para as condições de carga no eixo: vazio, com carga de 0,3CV e de 1,0CV.

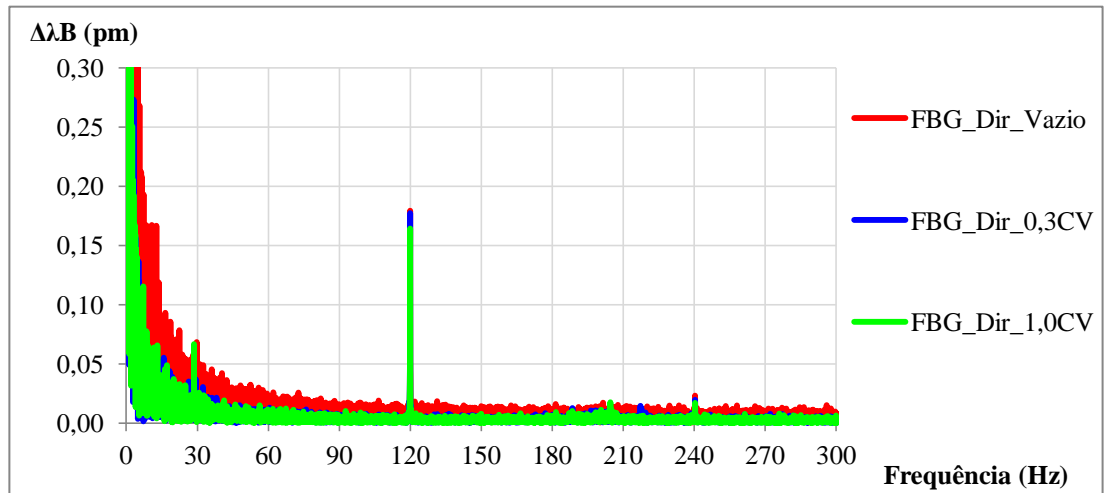


Figura 41 : Resposta espectral do sensor de vibração FBG quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor, com ligação direta de alimentação, sem carga, com carga de 0,3CV e de 1,0CV.

Fonte: Autor

Observa-se pela análise da resposta espectral que as frequências de vibração geradas são múltiplas da frequência da rede. Para desbalanceamento normalmente se considera que as frequências de vibração são dadas pela relação $2fs (1 \pm 2*s)$, onde fs é a frequência da rede e s é o escorregamento do motor, como não ocorre mudança na frequência de vibração, apesar de ter alteração na frequência de rotação do motor, pode-se concluir que a vibração encontrada se refere a outro tipo de vibração, mas este não é o escopo deste trabalho [36].

A figura 42 mostra a resposta espectral do sensor FBG para a vibração do motor, para ligação do motor através de um inversor de frequência, para a frequência de 60Hz, para as condições de carga no eixo: vazio, com carga de 0,3CV e de 1,0CV.

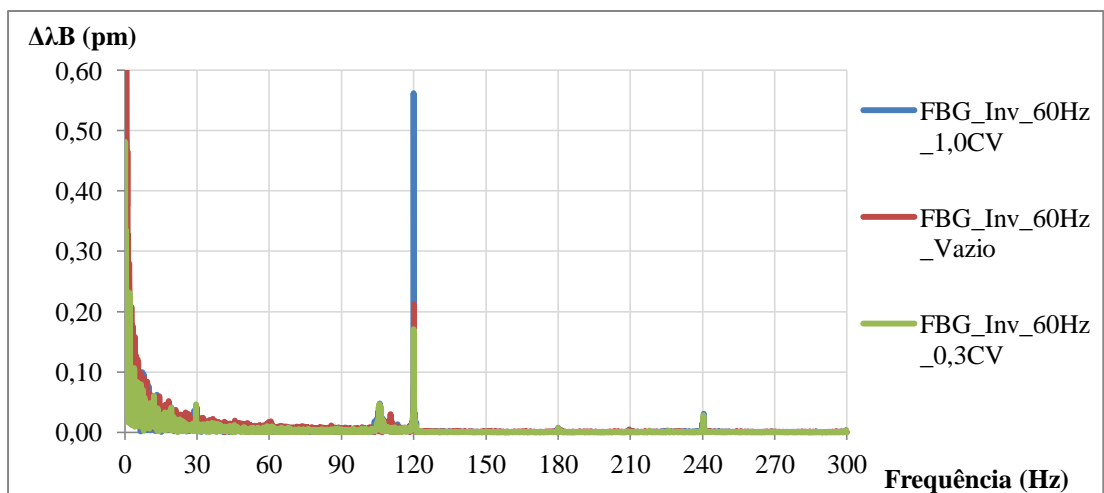


Figura 42 : Resposta espectral do sensor de vibração FBG quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor, com ligação através de um inversor em 60Hz, sem carga, com carga de 0,3CV e de 1,0CV.

Fonte: Autor

A figura 43 mostra a visão ampliada da resposta espectral da vibração provocada pelo motor sob ensaio no sensor FBG, mostradas na figura 42, mostrando especificamente a faixa de 120Hz.

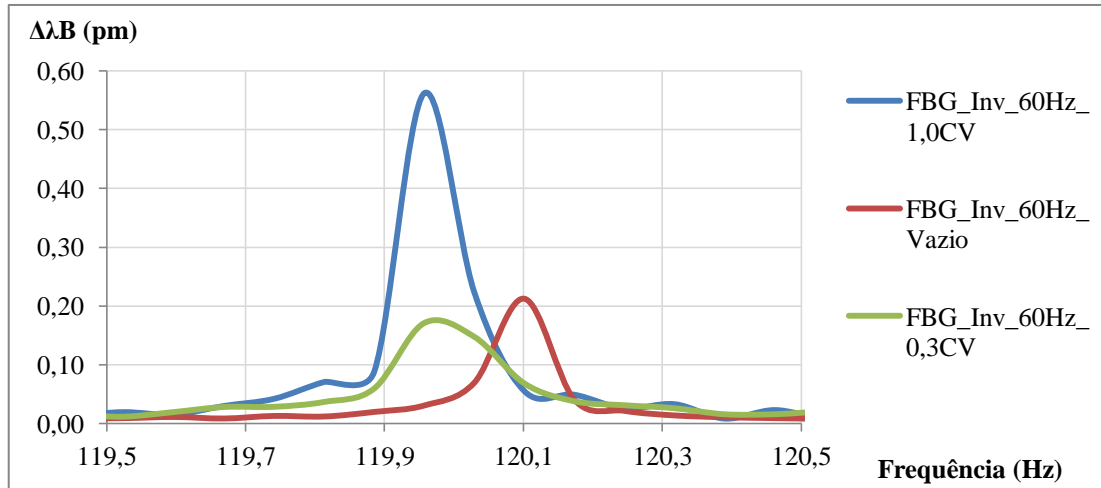


Figura 43 : Visão ampliada da resposta espectral do sensor de vibração FBG, especificamente para a região de 120Hz.

Fonte: Autor

A figura 44 mostra a resposta espectral da vibração provocada pelo motor sob ensaio no sensor FBG, para ligação do motor através de um inversor de frequência, na frequência de 30Hz, para as condições de carga no eixo: vazio e com carga de 0,3CV.

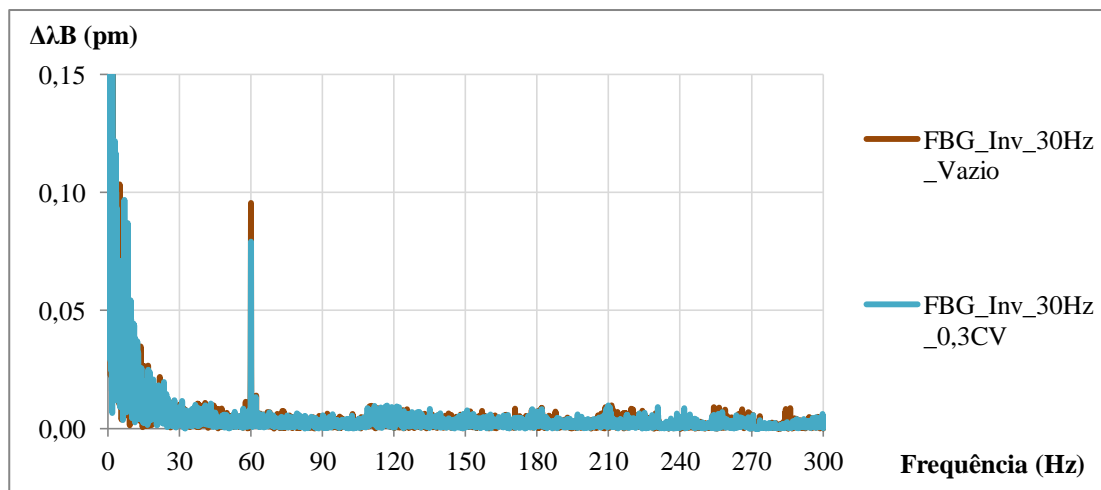


Figura 44 : Resposta espectral do sensor de vibração FBG quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor com ligação através de um inversor, na frequência de 30Hz, sem carga e para 0,3CV de carga.

Fonte: Autor

A figura 45 mostra a visão ampliada da resposta espectral da vibração provocada pelo motor sob ensaio no sensor FBG, mostradas na figura 44, mostrando especificamente a faixa de 60Hz.

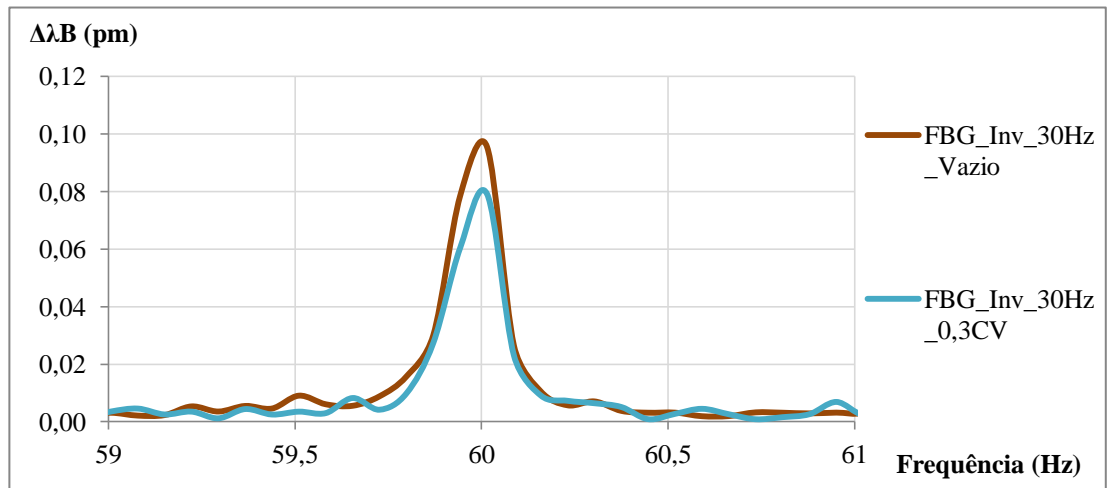


Figura 45 : Visão ampliada da resposta espectral do sensor de vibração FBG, especificamente para a região de 60Hz.

Fonte: Autor

A figura 46 mostra a resposta espectral da vibração provocada pelo motor sob ensaio no sensor TFBG 60, para ligação direta do motor à rede de alimentação em 60Hz, para as condições de carga no eixo: vazio, com carga de 0,3CV e de 1,0CV.

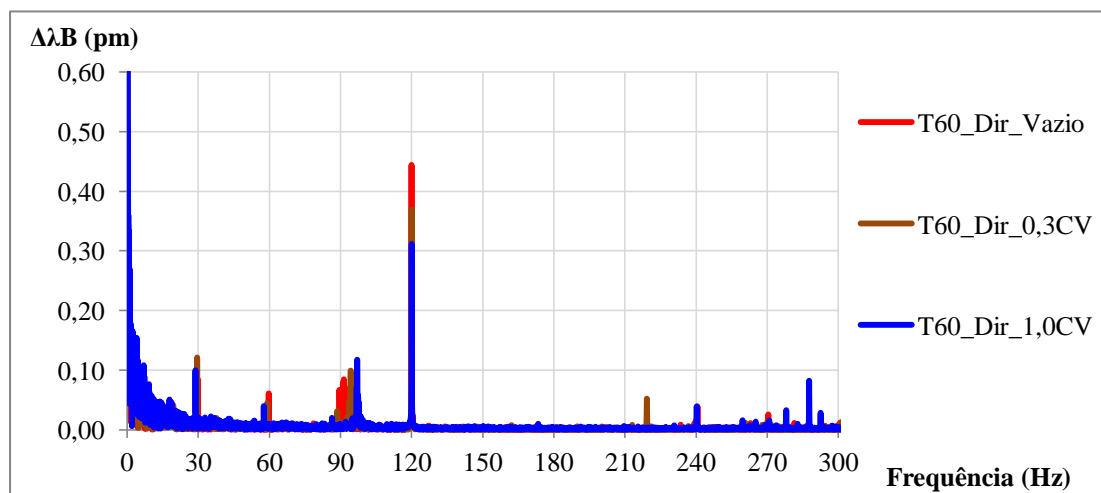


Figura 46 : Resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60 quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor com ligação direta de alimentação, em 60Hz, sem carga, 0,3CV e 1,0CV de carga.

Fonte: Autor

A figura 47 mostra uma visão ampliada da resposta espectral da vibração provocada pelo motor sob ensaio no sensor TFBG 60, mostradas na figura 46, mostrando especificamente a faixa de 120Hz.

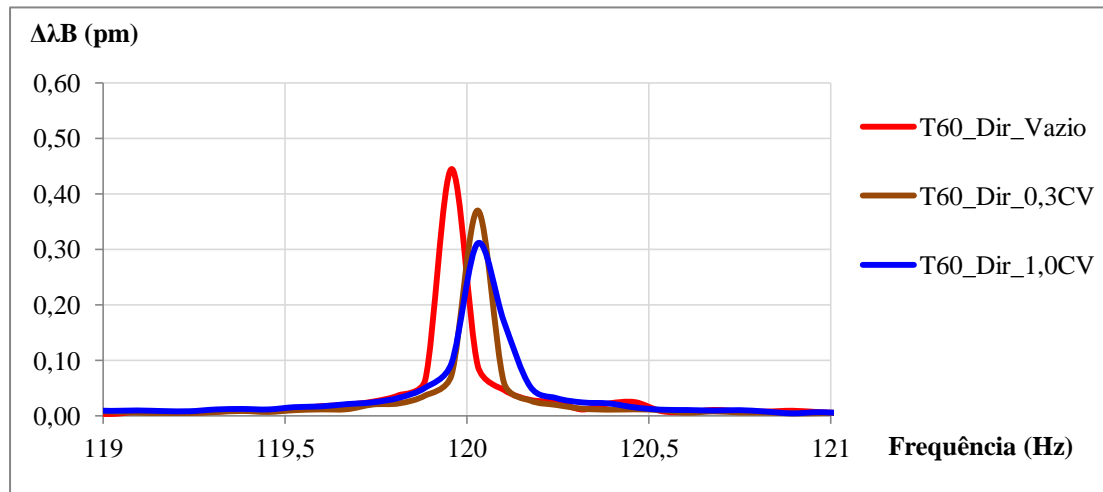


Figura 47 : Visão ampliada da resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60 especificamente para a região de 120Hz.

Fonte: Autor

A figura 48 mostra a resposta espectral da vibração provocada pelo motor sob ensaio no sensor TFBG 60 μm , para ligação do motor através de um inversor de frequência, para a frequência de 60Hz, para as condições de carga no eixo: vazio, com carga de 0,3CV e de 1,0CV.

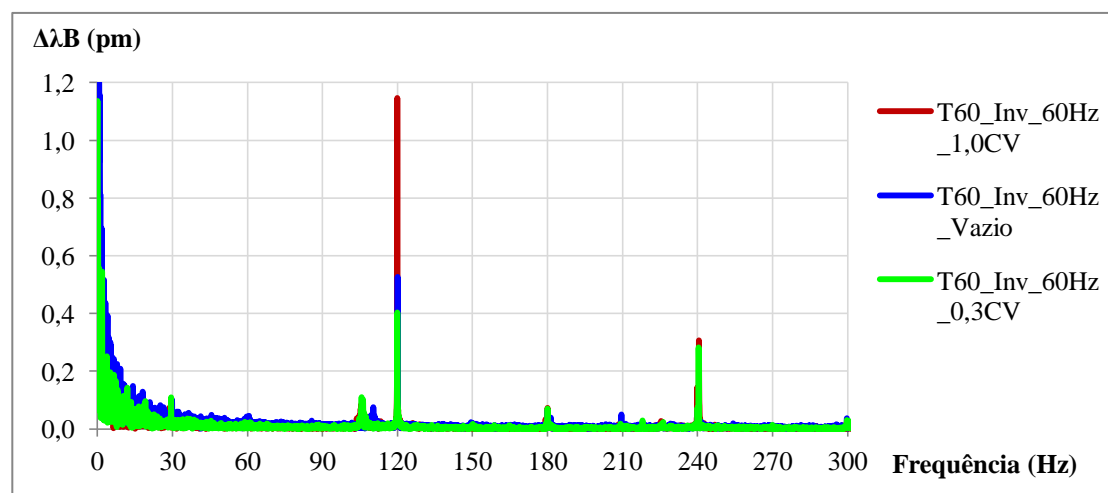


Figura 48 : Resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60 quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor com ligação através de um inversor, em 60Hz, sem carga, com 0,3CV e 1,0CV de carga.

Fonte: Autor

A figura 49 mostra a visão ampliada da resposta espectral da vibração provocada pelo motor sob ensaio no sensor TFBG 60 μm , mostradas na figura 49, mostrando especificamente a faixa de 120Hz.

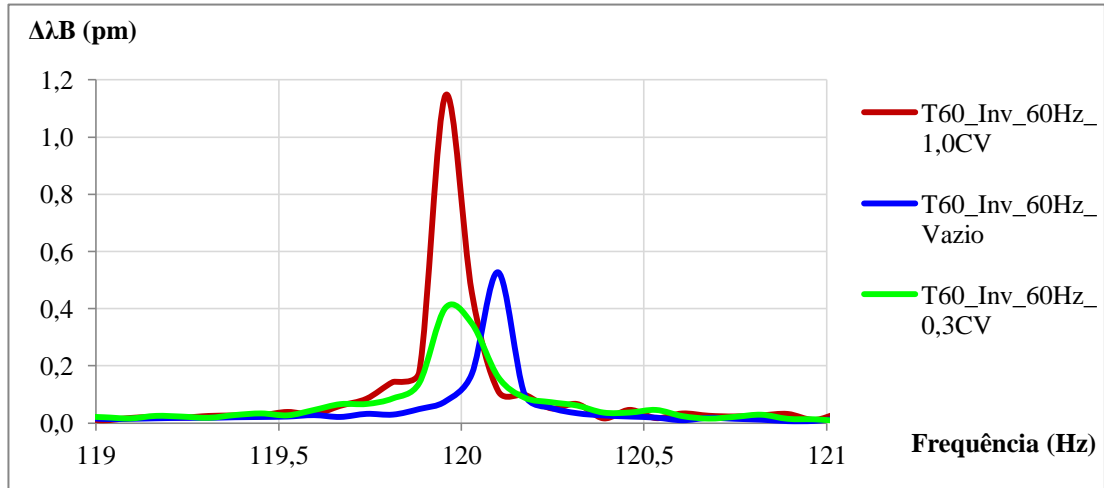


Figura 49 : Visão ampliada da resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60, especificamente para a região de 120Hz.

Fonte: Autor

A figura 50 mostra a resposta espectral da vibração provocada pelo motor sob ensaio no sensor TFBG 60, para ligação do motor através de um inversor de frequência, na frequência de 30Hz, para as condições de carga no eixo: vazio e com carga de 0,3CV.

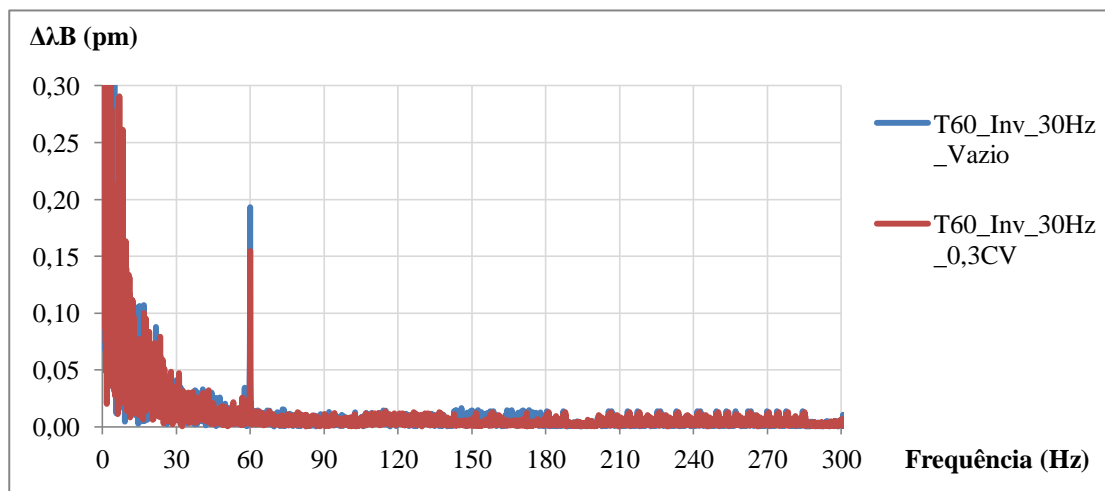


Figura 50 : Resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60 quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor com ligação através de um inversor, na frequência de 30Hz, sem carga e para 0,3CV de carga.

Fonte: Autor

A figura 51 mostra a visão ampliada da resposta espectral da vibração provocada pelo motor sob ensaio no sensor TFBG 60, mostradas na figura 50, mostrando especificamente a faixa de 60Hz.

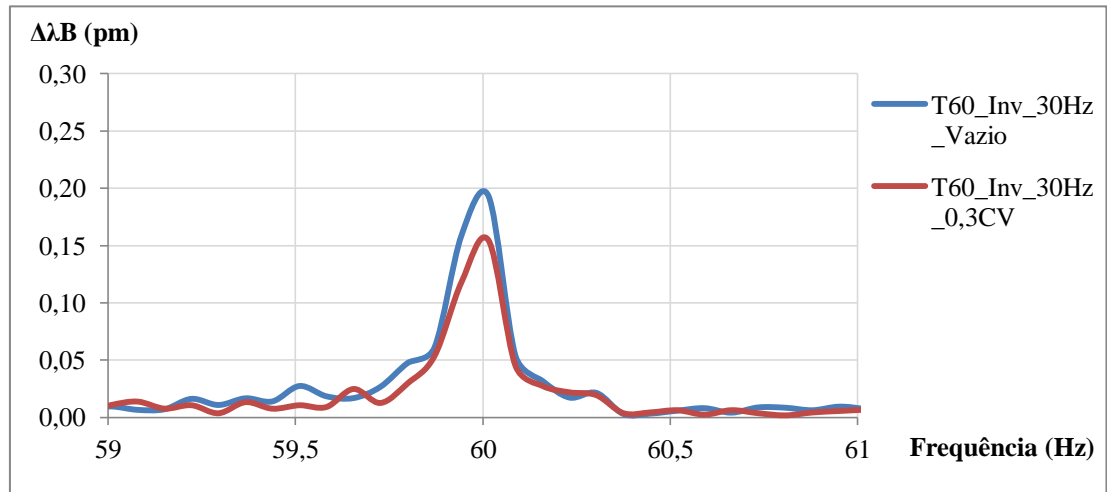


Figura 51 : Visão ampliada da resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60, especificamente para a região de 60Hz.

Fonte: Autor

A tabela 6 mostra o valor da amplitude das variações do comprimento de onda de Bragg (FFT), em picômetros, obtidas pela resposta espectral, através da aplicação da função FFT do *software* OriginPro 8, nos dados coletados pelo interrogador IMON, para os sensores FBG e TFBG 60, devido à vibração do motor, quando sujeito à alimentação direta e via inversor, para as cargas à vazio e com 0,3CV e 1,0CV de carga.

Tabela 6 : VALOR DA AMPLITUDE DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA FFT, OBTIDAS PARA OS SENSORES DE VIBRAÇÃO FBG E TFBG 60, GERADA PELA VIBRAÇÃO DO MOTOR SOB ENSAIO.

FFT (pm)	TFBG 60			FBG		
	Vazio	0,3CV	1,0CV	Vazio	0,3CV	1,0CV
direta - 60Hz	0,44	0,37	0,31	0,18	0,18	0,16
Inversor - 60Hz	0,53	0,40	1,15	0,21	0,17	0,56
Inversor - 50Hz	0,17	0,15	0,11	0,06	0,05	0,04
Inversor - 40Hz	0,24	0,17	-	0,10	0,07	-
Inversor - 30Hz	0,19	0,15	-	0,10	0,08	-

Fonte: Autor

A figura 52 mostra o gráfico da tabela 38, para melhor visualização.

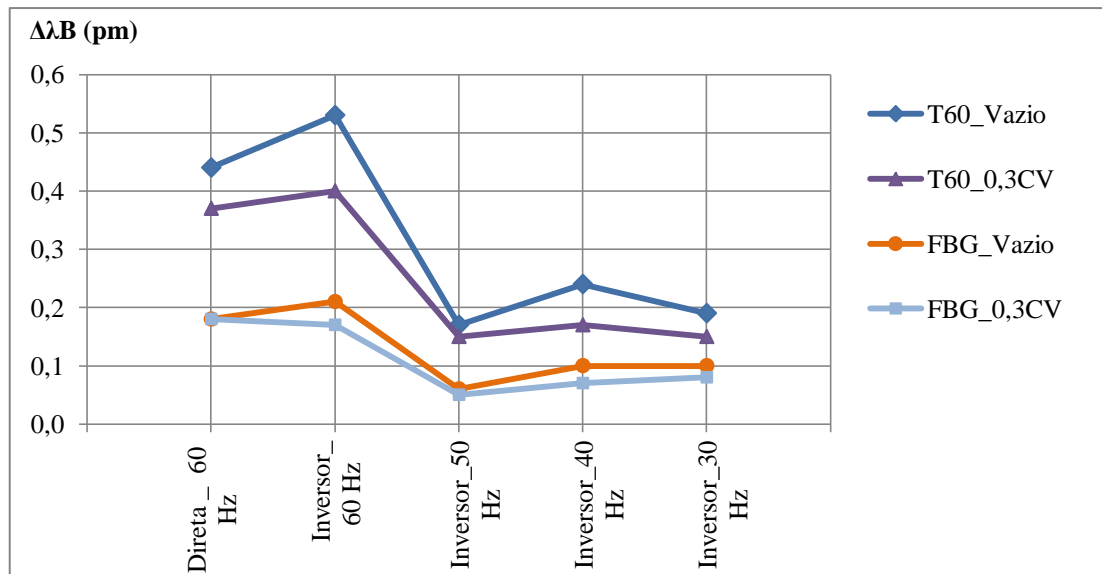


Figura 52 : Gráfico da tabela 6 – Comparação dos resultados do pico da variação de comprimento de onda de Bragg (FFT), em picômetros, para os sensores FBG e TFBG 60, devido à vibração do motor, quando sujeito à alimentação direta e via inversor, para as cargas à vazio e de 0,3CV.

Fonte: Autor

Analisando o gráfico da figura 52, observa-se que quando sujeitos às mesmas condições de vibração, o sensor baseado em TFBG 60 μ m apresenta uma sensibilidade de aproximadamente 2 vezes maior em relação à sensibilidade do sensor baseado em FBG.

5.3.4 Resultado da Resposta do Sensor TFBG 60 μ m para o Ensaio de Vibração do Motor sob Condição de Anomalia na Rede de Alimentação

Para verificar a resposta do sensor TFBG, sob condição de anomalia, no impedimento de gerar uma anomalia mecânica (desbalanceamento ou desalinhamento), foi introduzida uma anomalia elétrica.

Os resultados a seguir fornecem a resposta espectral da variação do comprimento de onda de Bragg, devido à vibração do motor sob ensaio, alimentado diretamente pela rede 60Hz, porém faltando uma das fases, para o sensor TFBG 60 μ m.

A figura 53 mostra a resposta espectral da vibração provocada pelo motor sob ensaio no sensor TFBG 60, para ligação direta do motor à rede de alimentação em 60Hz, porém sem a conexão de uma das fases, para as condições de carga no eixo: vazio e com carga de 0,3CV.

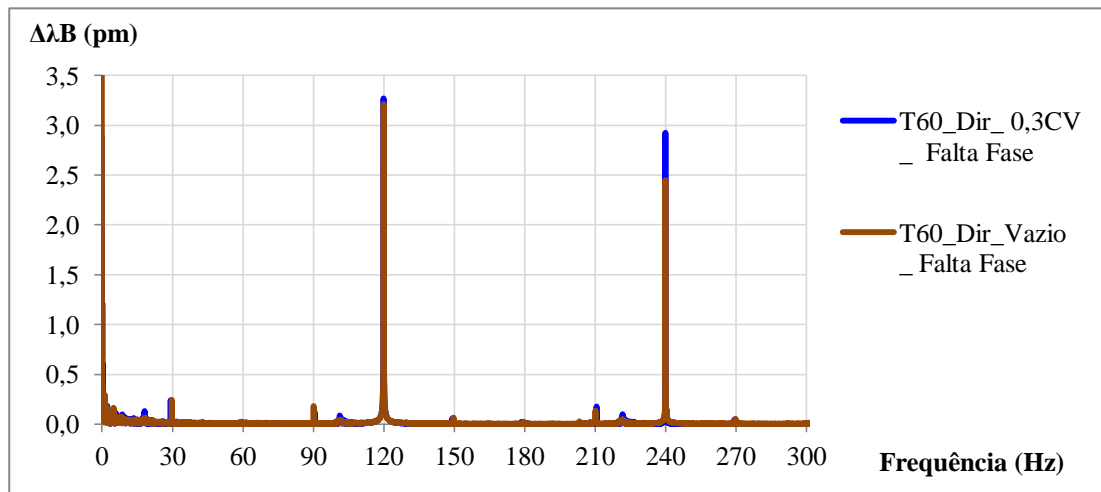


Figura 53 : Resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60 quando submetido à vibração do motor sob ensaio, para o motor com ligação direta de alimentação, em 60Hz, sem a conexão de uma das fases, para as condições sem carga e carga de 0,3CV.

Fonte: Autor

A figura 54 mostra a visão ampliada da resposta espectral da vibração provocada pelo motor sob ensaio no sensor TFBG 60, mostradas na figura 53, mostrando especificamente a faixa de 120Hz.

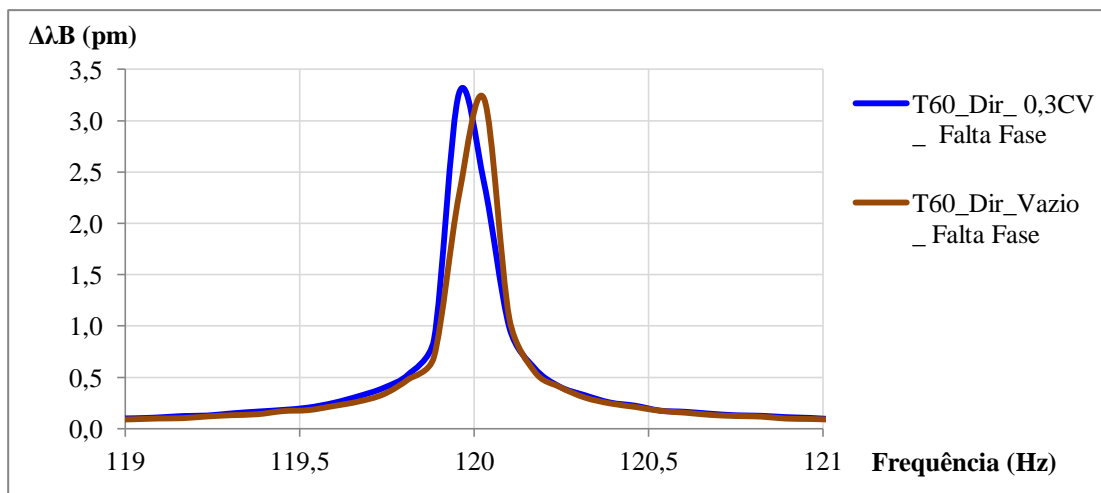


Figura 54 : Visão ampliada da resposta espectral do sensor de vibração TFBG 60μm especificamente para a região de 120Hz.

Fonte: Autor

Comparando a resposta obtida na figura 54, com a da figura 47, observa-se que a vibração em condições normais gerava uma variação de comprimento de onda na ordem de 0,4pm, para a condição com a anomalia este valor sobe para cerca de 3,2pm. Isto permite concluir que o sensor TFBG 60μm com uma montagem relativamente simples, pode ser utilizado para detecção de falhas, através da análise da vibração no motor.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema para caracterizar sensores de vibração baseados em rede de Bragg em fibra ótica, um utilizando fibra normal G-652 (FBG) e outros com fibra com afinamento (*taper*) da casca e núcleo, passando o diâmetro externo da casca de 125 μm para 80 μm e 60 μm .

As TFBGs apresentaram uma sensibilidade maior que a FBG. A relação média entre a sensibilidade da TFBGs e da FBG, dado pelo valor da amplitude da variação do comprimento de onda de Bragg na frequência da vibração (FFT) é de **2,7** para o sensor **TFBG 60 μm** e de **2,1** para o sensor **TFBG 80 μm** .

Os sensores FBG e TFBGs apresentaram resposta com uma boa linearidade para a variação de frequência e para a variação da intensidade da vibração, na faixa de frequência de 50Hz a 240Hz.

Em comparação com o acelerômetro de referência (sensibilidade de **98 pm/g**), os sensores apresentaram uma razoável sensibilidade à vibração, na faixa de frequência entre 50Hz e 240Hz, obtendo-se para sensor **FBG** (dado pela função FFT) uma sensibilidade média de **30,8pm/g**, para o sensor baseado na **TFBG 80 μm** uma sensibilidade média de **64,4pm/g** e para o sensor baseado na **TFBG 60 μm** uma sensibilidade média de **84,8pm/g**, neste caso, da mesma magnitude que o acelerômetro porém com uma montagem razoavelmente mais simples.

Na aplicação dos sensores monitorando a vibração no motor trifásico sob ensaio, foi observado que os sensores baseados em FBG e TFBG 60 μm , apresentaram sensibilidade para detectar a vibração do motor, tanto em regime normal como quando alguma anomalia foi implantada. Neste trabalho foi introduzida uma anomalia de ligação elétrica, ficando nítido, pelos resultados obtidos, o aparecimento da vibração em frequências harmônicas da frequência de alimentação, com níveis de variação do comprimento de onda de Bragg bem acentuados.

Para este trabalho, a variação de temperatura ambiente ($\sim 2^\circ\text{C}$) não interferiu significativamente nas medições. Isto se deve ao fato de que para se formar a resposta do sistema foi utilizado 1 ciclo da frequência de vibração, que para o pior caso, 50Hz, o tempo de análise é de 20ms. Este é um tempo muito curto para que a variação de temperatura, interfira nas medições.

Foi constatado que a presença de uma massa inercial, aplicada à fibra, melhora sua resposta, porém conforme a distância desta massa em relação ao ponto de apoio da fibra

podem ser obtidos diferentes resultados em amplitude e também em ressonância para determinadas frequências, o que por vezes inviabilizava a sua utilização.

A medição quando calculada em RMS sofre muita distorção quando existe a presença de muito ruído nas medições, provenientes da existências de harmônicos e vibrações de baixa frequência. Assim é necessário filtrar as medições, para se obter uma leitura de melhor qualidade.

As TFBGs requerem maiores cuidados com manuseios em relação as FBGs, por serem mecanicamente mais frágeis. O comprimento da região afinada nos *tapers* disponíveis (~ 7cm) era superior ao desejado (~ 3cm), resultando em um dispositivo longo. Além disso a quantidade de amostras de *tapers* foi limitada devido a problemas de produção na Unicamp.

Outros estudos poderão ser feitos para se determinar o tamanho ótimo da estrutura de aplicação, conforme a frequência que se deseja trabalhar, estabelecer a massa ideal para se utilizar na fibra, estabelecer o melhor tensionamento da fibra na estrutura e o melhor diâmetro da fibra (*taper*).

Outro estudo pode ser feito utilizando fibras comerciais com diâmetro de casca inferiores a 125 μm , as quais provavelmente apresentariam robustez superior aos *tapers*, além de dispensar a etapa de afinamento, resultando sensores de menores comprimentos.

Pode ser estudado também o encapsulamento do sensor, talvez dentro de um tubo, o qual permitisse a oscilação da fibra, facilitando o manuseio e aumentando as áreas de aplicações.

Se faz necessário um estudo para verificar a durabilidade do sensor quando sujeito à vibrações em regime contínuo e intermitente, para estabelecer a viabilidade para aplicação comercial.

REFERÊNCIAS

- [1] BENBOUZID, M.E.H.; KLIMAN, G.B. ; What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.18, no.2, pp. 238- 244, 2003.
- [2] FERRAZ, U.B.; Simulador de falhas mecânicas para bancada de análise de vibrações. Dissertação de Mestrado, UFMG; 2013.
- [3] VENERO, D. de M.; HIYODO, S. A.; Gestão de reparo de motores elétricos com foco em confiabilidade e otimização de custos. 23º Congresso Brasileiro de Manutenção, 2008.
- [4] TAVNER, P.J.; GAYDON, B.G.; WARD, D.M.; Monitoring generators and large motors. Electric Power Applications, IEE Proceedings B , vol.133, no.3, pp.169-180, 1986.
- [5] THORSEN, O.V.; DALVA, M. ; A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals and oil refineries. Petroleum and Chemical Industry Conference, 1994. Record of Conference Papers., Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated Industry Applications Society 41st Annual , pp.1-9, 12-14, 1994.
- [6] PATEL, T.H.; DARPE, A.K.; Experimental investigations on vibration response of misaligned rotors. Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 23, Issue 7, pp. 2236-2252, 2009.
- [7] JALAN, A. Kr.; MOHANTY, A.R.; Model based fault diagnosis of a rotor–bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition. Journal of Sound and Vibration, Volume 327, Issues 3–5, pp. 604-622, 2009.
- [8] XU, M.; MARANGONI, R.D.; Vibration analysis of a motor-flexible coupling- rotor system subject to misalignment and unbalance, Part I: Theoretical model and analysis. Journal of Sound and Vibration, Volume 176, Issue 5, pp. 681-691, 1994.
- [9] OBAID, R.R.; HABETLER, T.G.; TALLAM, R.M.; Detecting load unbalance and shaft misalignment using stator current in inverter-driven induction motors. Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International , vol.3, pp. 1454- 1458 vol.3, 2003.
- [10] OBAID, R.R.; HABETLER, T.G.; GRITTER, D.J.; A simplified technique for detecting mechanical faults using stator current in small induction motors. Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE , vol.1, pp.479-483 , 2000.
- [11] BALDWIN, C. ; et al.; Review of fiber optic accelerometers , S. SEM (Ed.), IMAC XXIII: A Conference & Exposition on Structural Dynamics, Paper No. 444, 2005.
- [12] LI, T.; TAN, Y.; LIU, Y.; QU, Y.; LIU, M.; ZHOU, Z.; A fiber bragg grating sensing based triaxial vibration sensor , Sensors Journal, 15, 24214-24229, doi:10.3390/s150924214 , 2015.
- [13] CANNING, J.; BANDYOPADHYAY, S.; STEVENSON, M.; BISWAS, P.; FENTON, J.; ASLUND, M., Regenerated gratings , Journal of European Optical society-Rapidly Publications 4, no. 09052, 2009.
- [14] LEE, B.; Review of the present status of optical fiber sensors , Opt. Fiber Technol. 2003, 9, 57–59, 2003.
- [15] LIU, Y.; ZHOU, Z.; ZHANG, E.; ZHANG, J.; TAN, Y.; LIU, M.; Measurement error of surface-mounted fiber Bragg grating temperature sensor , Rev. Sci. Instrum. 2014, 85, doi:10.1063/1.4885463, 2014.

- [16] SILVA, G. E. da ; Implementação e caracterização da resposta dinâmica de transdutores de deformação e temperatura a fibras ópticas baseados em redes de Bragg , Dissertação Mestrado, USP, 2011.
- [17] TODD, M.D.; JOHNSON, G.A.; ALTHOUSE, B.A; VOHRA, S.T ; Flexural beam-based fiber Bragg grating accelerometers , IEEE Photon. Technol. Lett. 1998, 10, 1605–1607, 1998.
- [18] KHAN, M. M. ; PANWAR, N. ; DHAWAN, R. ; Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self temperature compensation , Sens. Actuators A Phys., 205, 79–85, 2014.
- [19] AU, H. Y.; KHIJWANIA, S.K.; TAM, H.Y.; Fiber Bragg grating based accelerometer , 19th International Conference on Optical Fibre Sensors, International Society for Optics and Photonics, Perth, Australia, doi:10.1117/12.785992, 2008.
- [20] LIU, Q.; QIAO, X.; JIA, Z.; FU, H.; GAO, H.; YU, D. ; Large frequency range and high sensitivity fiber Bragg grating accelerometer based on double diaphragms , IEEE Sens. J. , 14, 1499–1504 , 2014.
- [21] HILL, K. O.; et al.; Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. Applied Physics Letters , v. 32, n. 10, p. 647-649, 1978.
- [22] KASHYAP, R; Fiber Bragg gratings. London: Academic Press, 1999.
- [23] MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H.; Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. Optics Letters, v. 14, n. 15, 1989.
- [24] HILL, K. O.; MELTZ, G.; Fiber Bragg grating technology: Fundamentals and overview. Journal of Lightwave Technology, v. 15, n. 8, p. 1263-1276, 1997.
- [25] OTHONOS, A.; KALLI, K.; Fiber Bragg gratings fundamentals and applications in telecommunications and sensing, Artech House, 1999.
- [26] ANTUNES, P.; VARUM, H.; ANDRÉ, P.; Uniaxial fiber Bragg grating accelerometer system with temperature and cross axis insensitivity , Measurement 44 , 55-59, 2011.
- [27] ERDOGAN, T. ; Fiber grating spectra . Journal of Lightwave Technology, v. 15, n. 8, p. 1277-1294, 1997.
- [28] SILVA, M. S. P.; Determinação da frequência natural de eixos utilizando o *software* Excel, TCC - Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, 2012.
- [29] NEVES Jr, P. T.; Análise temporal do espectro óptico em redes de Bragg em fibra , Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, área Telemática, UTFPR, Curitiba, 2008.
- [30] SILVA, R. E. da; Caracterização das propriedades acústicas de um modulador acusto-óptico de fibra de cristal fotônico , Dissertação de Mestrado em Ciências, área Telemática, UTFPR, Curitiba, 2011.
- [31] OLIVEIRA, R. A.; et al.; Vibration mode analysis of a silica horn-fiber Bragg grating device , Optics Communications, v. 283, n.7, p. 1296-1302, 2010.
- [32] QUINTELA, A. ; BARQUIN, M.I. ; QUINTELA, M.; ULLAN, A. ; LOPEZ-HIGUERA, J.M. ; Transductor de deformación y temperatura basado en redes de difracción y fibras estrechadas: diseño e implementación, OPTOEL, 2011.
- [33] PATERNO, A.S. ; Análise e implementação com aplicações na instrumentação de processos petroquímicos , Tese Doutorado, UTFPR, 2006.
- [34] BIRKS, T.; A generalized heat-brush approach for precise control of the waist profile in fiber tapers Chams Baker and Martin Rochette McGill University, Department of Electrical and Computer Engineering, Montréal (PQ), H3A 2A7, Canada; 1992.

- [35] LINESSIO, R. P.; Caracterização de um acelerômetro óptico biaxial para monitoramento de vibrações em máquinas elétricas , Dissertação de Mestrado, UTFPR, 2016.
- [36] COSTA, I. B. V.; SOUSA, K. M.; MACIEL, E. S.; ROCHA, J.E.; MARTELLI, C.; SILVA, J. C. C.; Broken rotor bars detection in induction motors using optical fiber Bragg grating strain sensors; LAWOFs, 2016.

APÊNDICE

Artigo Resultante Deste Trabalho Publicado em Congresso

PEREIRA, Joel G.; OLIVEIRA, Valmir; MOURA, Camila C.; PELLEGRINI, Paloma; CORDEIRO, Cristiano M. B. ; **Medição de Vibração Utilizando Rede de Bragg em Fibra Ótica Afinada**. Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors (LAWOFs - 2016), 2016, Porto Alegre, RS