



Interferómetros Modais em Fibra Óptica para Aplicações Sensoras

PROJECTO DE MESTRADO

Ivo Maciel Nascimento

MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES E REDES



UNIVERSIDADE da MADEIRA
A Nossa Universidade
www.uma.pt

Setembro | 2011

Os melhores RUMOS para os Cidadãos da Região



Interferómetros Modais em Fibra Óptica para Aplicações Sensoras

PROJECTO DE MESTRADO

Ivo Maciel Nascimento

MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES E REDES

ORIENTAÇÃO

José Manuel Rocha Teixeira Baptista

Dissertação realizada sob a supervisão do

Doutor José Manuel Rocha Teixeira Baptista

Professor Associado do Centro de Competências de Ciências Exactas e da Engenharia
da Universidade da Madeira

e co-orientação do

Doutor Pedro Alberto da Silva Jorge

Investigador Sénior do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto
Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos

“Ninguém poderá jamais aperfeiçoar-se, se não tiver o mundo como mestre. A experiência se adquire na prática.”

William Shakespeare (1564 - 1616)

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma possibilitaram a realização deste trabalho, em especial:

Aos meus pais, Eduardo Nascimento e Virgínia Nascimento, por todo o apoio que me têm dado ao longo da vida, em especial nos momentos mais difíceis.

À minha namorada, Cristina Gouveia pelo apoio e amizade.

Ao Doutor José Manuel Baptista por me ter dado a oportunidade de realizar este trabalho no INESC Porto, pela sua orientação e disponibilidade dispensada ao longo do trabalho.

Ao Doutor Pedro Jorge por me ter acolhido e orientado no INESC Porto.

Ao bom acolhimento e condições de trabalho disponibilizadas pelo INESC-Porto, em especial ao: Carlos de Jesus, Luísa Mendonça, João Ferreira, Joel Carvalho, Gaspar Pacheco, Ireneu Dias, Prof. Manuel Joaquim Marques, Prof. Paulo Marques, Prof. Sérgio Mendonça, Luís Coelho, Orlando Frazão e Paulo Caldas.

Ao CITMA por me ter concedido uma bolsa de estudo, permitindo dedicar-me a tempo inteiro ao mestrado.

Aos meus amigos e colegas: Filipe Santos, Ricardo Freitas, Leonardo Gonçalves, Ricardo Freitas, Adrian Ocneanu, Jenny Gouveia, Tony Pereira, Carla Santos, Alice Andrade e Maurício Rodrigues.

Por fim, e não menos importante, a todos os docentes Universidade da Madeira que compartilharam os seus conhecimentos científicos ao longo de todo este percurso.

Resumo

Os sensores em fibra óptica têm vindo a ganhar uma importância crescente na área dos sensores, devido à sua imunidade a interferências electromagnéticas, elevada sensibilidade, peso reduzido, baixas perdas e grande largura de banda. Estes sensores tornam-se importantes porque permitem a medição de um grande número de mensurandos, como por exemplo: estiramento, temperatura, índice de refração externo e torção.

Neste trabalho implementaram-se dois sensores intermodais em fibra óptica e efectuou-se a sua caracterização em termos de resposta à temperatura e a variações de índice de refração, utilizando um analisador de espectros ópticos (OSA).

Desenvolveu-se também um programa de simulação, em LabVIEW, que permite analisar diferentes tipos de interferómetros com cavidades ressonantes simples ou múltiplas. Foram avaliadas três configurações distintas: a primeira utilizando uma rede de *Bragg* (FBG) e a reflexão de *Fresnel* na extremidade da fibra; a segunda utilizando duas FBGs com características espectrais idênticas, e a terceira utilizando as duas FBGs idênticas combinadas com a reflexão de *Fresnel* na extremidade da fibra. O programa permite observar o espectro resultante dos interferómetros com cavidades de diferentes comprimentos e aplicar as técnicas de detecção de sinal pseudo-heteródina e três técnicas heteródinas. Simulando incrementos de estiramento, de temperatura ou de alteração do índice de refração externo aplicados aos interferómetros é ainda possível observar e prever o comportamento do espectro dos sensores e efectuar uma análise da fase e da amplitude dos diversos harmónicos.

Implementou-se um sistema que emprega um laser DFB (*Distributed FeedBack*) e que recorre à instrumentação virtual, em LabVIEW, para registar a resposta dos sensores interferométricos, empregando as técnicas de detecção de sinal utilizadas na simulação.

Por último, estudou-se interferómetros com cavidades formadas por CFBGs (*Chirped Fiber Bragg Gratings*) com intuito de explorar a sua sensibilidade em termos de temperatura e estiramento, e efectuar uma comparação com as cavidades formadas por FBGs normais.

Palavras chave

Interferometria; Instrumentação virtual; Sensores em fibra óptica; LabVIEW; Técnicas de detecção de sinal.

Abstract

Optical fiber sensors have been gaining a growing importance in the area of sensors, due to their immunity to electromagnetic interference, high sensitivity, low weight, low loss and high bandwidth. These sensors have become important because they allow the measurement of a large number of measurands, such as strain, temperature and external refractive index.

In this work two optical fiber intermodal interferometers were implemented to be used as sensors and their characterization was performed by changing temperature and refractive index and registering their spectral response with an optical spectrum analyzer (OSA).

We have developed a simulation program that allows LabVIEW to analyze different types of interferometers with simple or multiple resonant cavities. Three different fiber optic interferometric configurations were tested: the first, using a single fiber Bragg grating (FBG) and the Fresnel reflection at the end of the fiber; the second using two consecutive spectrally identical FBGs; and the third combining the two identical FBGs with the Fresnel reflection at the end of the fiber. The simulation program enables the visualization of the resulting spectrum of each interferometer considering different cavity lengths and simulating the acquisition performed with a laser, using the pseudo-heterodyne and heterodyne signal detection techniques. Simulating increments of strain, temperature and changes in external refractive index it is possible to observe and predict the behavior of the sensor spectral response and perform an analysis of the phase and amplitude of the different harmonics.

We have implemented a system that employs a DFB (Distributed FeedBack) laser and uses LabVIEW virtual instrumentation to record the interferometric sensors response, employing the techniques of signal detection used in the simulation.

Finally, we have studied interferometers with cavities formed by CFBGs (Chirped Fiber Bragg Grating) in order to explore its sensitivity in terms of temperature and strain, and do a comparison with cavities formed by normal FBGs.

Keywords

Interferometry; Virtual Instrumentation; Fiber optic sensors; LabVIEW; Signal detection schemes.

Lista de Acrónimos

AD - Acoplador Direccional

ADC - Conversor Analógico Digital

ARROW - *Antiresonance Reflecting Optical Waveguide*

ASE - *Amplified Spontaneous Emission*

CFBG - *Chirped Fiber Bragg Grating*

DAQ - *Data AcQuisition*

DFB - *Distributed Feed Back*

FBG - *Fiber Bragg Grating*

FFT - *Fast Fourier Transform*

FLM - *Fiber Loop Mirror*

FS - *Full Scale*

FSO - *Full Scale Output*

HC-PCF - *Hollow-Core PCF*

Hi-Bi PCF - *High Birefringence PCF*

IG-MOF - *Index-guiding MOF*

LPG - *Long-Period Grating*

MMF - *Multi-Mode Fiber*

MMI - *Multi-Mode-Interferometer*

MOF - *Microstructured Optical Fiber*

MZI - *Mach-Zehnder Interferometer*

NI - *National Instruments*

OP - *Optical Path*

OPD - *Optical Path Difference*

OSA - *Optical Spectrum Analyser*

PBG - *Photonic BandGap*

PBG-MOF - *Photonic BandGap MOF*

PC - *Personal Computer*

PCF - *Photonic Crystal Fiber*

PDL - *Polarization Dependent Loss*

PM - *Polarization Maintaining*

PM-PCF - *Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber*

PZT - *PieZoelectric Transducer*

RIU - *Refractive Index Unit*

SMF - *Single Mode Fiber*

T&M - *Teste e Medição*

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Motivação.....	1
1.2.	Objectivos	1
1.3.	Organização da dissertação	2
1.4.	Sensores.....	3
1.5.	Características dos sensores.....	3
1.6.	Sensores em fibra óptica	5
1.7.	Interferometria.....	6
1.8.	Interferómetros ópticos	7
1.8.1.	Interferómetro de Michelson.....	7
1.8.2.	Interferómetro de Mach-Zehnder.....	9
1.8.3.	Interferómetro de Sagnac.....	10
1.8.4.	Interferómetros Modais.....	11
2.	Sensores interferométricos.....	13
2.1.	Introdução	13
2.2.	Coerência de uma fonte.....	13
2.3.	Visibilidade.....	14
2.4.	Interferómetro de Fabry-Pérot.....	15
2.4.1.	Rede de <i>Bragg</i>	17
2.5.	Estado da arte de sensores baseados em interferómetros modais	18
2.5.1.	Polarização.....	19
2.5.2.	Redes de período longo ou secção cónica.....	21
2.5.3.	PCF	24
2.5.4.	PCF com LPG	31
2.5.5.	Interferómetros multimodais.....	32

2.5.6.	Resumo	35
2.6.	Esquema de detecção do sinal	36
2.6.1.	Detecção pseudo-heteródina	36
2.6.2.	Detecção heteródina	38
2.7.	Sistema de interrogação	42
2.8.	Instrumentação virtual.....	43
2.8.1.	Diagrama de blocos num instrumento virtual	43
2.8.2.	Instrumentação virtual e instrumentação tradicional	44
2.8.3.	LabVIEW	45
3.	Interferómetros modais.....	47
3.1.	Interferómetro modal com fibra SM 380.....	47
3.1.1.	Caracterização em função do índice de refração externo	48
3.1.2.	Caracterização em função da temperatura	50
3.2.	Interferómetro modal com fibra sem núcleo.....	52
3.2.1.	Caracterização em função do índice de refração externo	54
3.3.	Análise dos resultados.....	55
4.	Simulação de interferómetros de Fabry-Pérot.....	57
4.1.	Apresentação do programa.....	57
4.2.	Cavidade formada por duas FBGs.....	62
4.3.	Cavidade formada por uma FBG e um espelho.....	64
4.4.	Cavidade formada por duas FBGs e um espelho	66
4.4.1.	Sensor de índice de refração externo e de temperatura	68
4.4.1.	Sensor de estiramento e de temperatura	70
5.	Medição de estiramento e de temperatura com interferómetros de Fabry-Pérot ..	73
5.1.	Caracterização do Laser DFB.....	73
5.2.	Cavidade de Fabry Perot com FBGs	74

5.2.1.	Espectro obtido com o laser	75
5.2.2.	Interrogação da cavidade sensora	76
5.3.	Cavidades de Fabry-Pérot com FBGs Chirped	85
5.3.1.	Cabeça sensora 1	86
5.3.2.	Testes de estiramento	87
5.3.3.	Cabeça sensora 2	88
5.3.4.	Análise dos resultados	89
6.	Conclusões	91
6.1.	Trabalhos futuros	92
7.	Bibliografia	93
Anexos	97
A)	Programa de Simulação de cavidades	99
B)	Algoritmo de compensação de fase	105
C)	Programa de aquisição de espectros com controlador de corrente e tensão ITC-510 e fotodetector HP8153A	109
D)	Programa de aquisição de fase	111

Índice de figuras

Figura 1.1 - Histerese [5].....	4
Figura 1.2 - Banda Morta [5].....	5
Figura 1.3 - Classificação de sensores interferométricos [8] [7].....	6
Figura 1.4 - Interferómetro de Michelson	7
Figura 1.5 - Variação da intensidade em função da variação do percurso óptico [3]	8
Figura 1.6 - Interferómetro de Mach-Zehnder	9
Figura 1.7 - Interferómetro de Mach-Zehnder com modulador de fonte.....	9
Figura 1.8 - Interferómetro Sagnac	10
Figura 1.9 - Representação dos modos linearmente polarizados, numa fibra óptica [16]	11
Figura 2.1 - Padrão de interferência originado por um interferómetro de duas ondas, com um desfasamento entre elas	15
Figura 2.2 - (a) Cavidade de Fabry-Pérot; (b) Espectro em reflexão em função da reflectividade dos espelhos [3]	15
Figura 2.3 - Cavidade formada por (a) duas FBGs; (b) uma FBG e o fim da fibra	16
Figura 2.4 - Rede de Bragg e propagação dos sinais	17
Figura 2.5 - Esquema do sistema, utilizando um FLM com Hi-Bi PCF e fotografia da respectiva fibra PCF utilizada [22]	20
Figura 2.6 - (a) Padrão de interferência; (b) Deslocamento dos picos interferométricos do padrão de franjas em função do estiramento aplicado à secção Hi-Bi [22]	20
Figura 2.7 - (a) Sensor baseado em duas LPGs com secção cónica; (b) Padrão de franjas resultante de uma única LPG (<i>Single LPG</i>) e com duas LPGs sem região cónica (<i>LPG Pair</i>) e com região cónica (FTS-LPGP) [23].....	22
Figura 2.8 - Sensor modal fabricado em fibra SMF [24].....	23
Figura 2.9 - (a) Espectro do interferómetro fabricado e (b) Fase do interferómetro em função da pressão [24]	24
Figura 2.10 - Esquemático do sensor que utiliza uma fibra PCF entre duas SMF [11] ..	24

Figura 2.11 - Resposta espectral obtida com o sensor intermodal com $L_s=45$ mm [11].	25
Figura 2.12 - (a) Sensor modal com fibra ARROW; (b) Padrão de interferência originado pela fibra ARROW do tipo 1 e 2 [27]	26
Figura 2.13 - (a) Esquema do interferômetro modal, baseado em HC-PCF; (b) Padrão de franjas com fibra HC-PCF de 28 cm [29]	28
Figura 2.14 - Esquemático dos interferômetros baseado (a) na fusão com <i>offset</i> e (b) colapso parcial dos buracos [30]	29
Figura 2.15 - Confirmação experimental utilizando uma Hi-Bi PCF para medição de torção e respectiva foto da fibra [31]	30
Figura 2.16 - (a) Resposta espectral do interferômetro e b) FFT com polarização a 0° ($LP_{01(x)}$ e $LP_{11(x)}$), 90° ($LP_{01(y)}$ e $LP_{11(y)}$) e 45° ($LP_{01(xy)}$ e $LP_{11(xy)}$) [31]	30
Figura 2.17 - (a) Resposta à torção da cabeça sensora e (b) diferença entre as duas amplitudes (A_2-A_1) [31]	31
Figura 2.18 - Interferômetro (a) IG-PCF e (b) PBG-PCF [26]	31
Figura 2.19 - (a) Esquemático da montagem experimental; (b) Espectro de transmissão do sensor MMI [21]	32
Figura 2.20 - (a) Sensor fabricado com fibra sem núcleo; (b) Variação da ressonância com o comprimento da fibra sem núcleo [32]	33
Figura 2.21 - Variação da ressonância com o índice de refração externo [32]	34
Figura 2.22 - Esquema da técnica de detecção de sinal pseudo-heteródina	37
Figura 2.23 - (a) Sinal de modulação obtido contaminado com <i>flyback</i> ; (b) Desvio de fase devido ao efeito de <i>flyback</i> [34]	38
Figura 2.24 - Esquema da técnica de detecção de sinal heteródina	38
Figura 2.25 - Diagrama de blocos do esquema heteródino sintético 1	39
Figura 2.26 - Diagrama de blocos do esquema heteródino sintético 2	40
Figura 2.27 - Diagrama de blocos do esquema heteródino sintético 3	41
Figura 2.28 - Sistema de interrogação de sensores em reflexão [39]	42

Figura 2.29 - Sistema de interrogação simultânea de dois sensores em reflexão [39] [40]	43
Figura 2.30 - Esquema de um sistema que emprega instrumentação virtual [42].....	44
Figura 3.1 - (a) Cabeça sensora com utilização de uma fibra SM 380; (b) Fusão entre uma fibra SMF-28 e SM 380.....	47
Figura 3.2 - Espectro da cabeça sensora de 20 mm mergulhada em água	48
Figura 3.3 - (a) Esquema da montagem utilizada para efectuar os testes de variação do índice de refracção; (b) Foto da câmara de Teflon.....	49
Figura 3.4 - (a) Espectro em transmissão do sensor para três valores de índice de refracção externo distintos; (b) Pontos experimentais obtidos em duas experiências independentes, para a cabeça sensora de 20 mm.....	50
Figura 3.5 - Câmara utilizada nos testes de temperatura.....	50
Figura 3.6 - Espectro em transmissão do sensor para três valores de temperatura; (b) Variação da ressonância com a temperatura, com pontos experimentais obtidos em duas experiências independentes para a cabeça sensora de 20 mm.....	51
Figura 3.7 - Cabeça sensora com utilização de uma fibra SM 380 e com uma FBG para compensação de temperatura	51
Figura 3.8 - Cabeça sensora com fibra sem núcleo	52
Figura 3.9 - Espectros de sensores modais com segmentos de fibra sem núcleo de 30 mm a 2 mm.....	53
Figura 3.10 - Espectro da cabeça sensora mergulhada em água, para a cabeça sensora de 10 mm.....	54
Figura 3.11 - (a) Espectro em transmissão do sensor para três valores de índice de refracção e (b) variação da ressonância com o índice de refracção, para a cabeça sensora de 10 mm.....	54
Figura 4.1 - Interferómetro formado por duas FBGs e o fim da fibra.....	57
Figura 4.2 - Cabeça sensora em fibra óptica com representação dos três interferómetros predominantes: (a), (b) e (c)	58
Figura 4.3 - Interface do programa de simulação de varrimento com o laser	59

Figura 4.4 - Espectro resultante para os três tipos de interferómetros de Fabry-Pérot, formados por (a) duas FBGs, (b) uma FBG e um espelho de ~4% (c) dois FBGs e um espelho	61
Figura 4.5 - Diagrama de blocos do <i>Software</i> de simulação	61
Figura 4.6 - Variação de fase com modulação em dente de serra sem efeito de <i>flyback</i> , no comprimento de onda central da FBG	63
Figura 4.7 - Sinais adquiridos através de varrimento no comprimento de onda correspondente a metade da largura de banda da FBG com: Modulação em dente de serra e uma cavidade formada por (a) duas FBGs e (b) entre uma FBG e um espelho; Modulação sinusoidal e uma cavidade formada por (c) duas FBGs e (d) entre uma FBG e um espelho	66
Figura 4.8 - Espectro de um sensor composto por cavidades de 2,5 cm, 16 cm e 18,5 cm	67
Figura 4.9 - (a) Variação de fase do harmónico 1 em função da temperatura; (b) Variação de amplitude do harmónico 6 em função da temperatura; (c) Variação de fase do harmónico 1 em função do índice de refracção externo; (d) Variação de amplitude do harmónico 6 em função do índice de refracção externo;	69
Figura 4.10 - Variação de fase do harmónico: (a) 1 em função do estiramento; (b) 6 em função do estiramento; (c) 1 em função da temperatura; (b) 6 em função da temperatura	71
Figura 5.1 - Montagem utilizada para efectuar a caracterização do laser DFB Toptica 1905 LMI.....	73
Figura 5.2 - Curva de calibração do laser Toptica com (a) I constante e (b) R constante	74
Figura 5.3 - Cabeça sensora em fibra óptica com uma cavidade entre duas FBGs.....	74
Figura 5.4 - Simulação de padrão de interferência originado por uma cavidade de 6 cm	75
Figura 5.5 - Espectro obtido experimentalmente com o laser para uma cavidade de ~ 6 cm.....	75
Figura 5.6 - PZT	76

Figura 5.7 - Pontos de colagem da fibra no PZT, quando foi aplicado estiramento a uma FBG e a uma cavidade de ~6 cm	77
Figura 5.8 - Sistema desenvolvido para interrogação de interferómetros de Fabry-Pérot	78
Figura 5.9 - Diagrama de blocos do <i>Software</i> desenvolvido	79
Figura 5.10 - Sinal resultante da modulação em dente de serra: (a) para uma frequência de modulação de 125 Hz de uma franja da cavidade, com uma amplitude de modulação de 1,3 V; (b) para uma frequência de modulação de 1 kHz de uma franja da cavidade, com uma amplitude de modulação de 1,9 V	80
Figura 5.11 - Variação de fase entre cada incremento/decremento com: (a) 1,3V e $f=125$ Hz; (b) 1,9V e $f=1$ kHz	81
Figura 5.12 - Mudança de fase obtida com o esquema de detecção pseudo-heteródino	81
Figura 5.13 - Sinal resultante da modulação sinusoidal de 1 kHz de uma franja da cavidade, com uma amplitude de modulação de 1,75 V	82
Figura 5.14 - Variação de fase entre cada incremento/decremento com esquema de detecção heteródino (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) Mudança de fase obtida com o esquema de detecção heteródino 1, 2 e 3	83
Figura 5.15 - Cabeça sensora em fibra óptica com uma cavidade entre duas CFBGs com (a) a mesma direcção; (b) direcção oposta.....	85
Figura 5.16 - Esquema utilizado para efectuar os testes de estiramento.....	86
Figura 5.17 - Espectro da cavidade com CFBGs com a mesma direcção	86
Figura 5.18 - Variação do comprimento de onda dos picos em função do estiramento para a cavidade 1	87
Figura 5.19 - Variação do comprimento de onda dos picos em função da temperatura para a cavidade 1	87
Figura 5.20 - Espectro da cavidade com CFBGs com direcções opostas.....	88
Figura 5.21 - Variação do comprimento de onda dos picos em função do estiramento para a cavidade 2	89

Figura 5.22 - Variação do comprimento de onda dos picos em função da temperatura para a cavidade 2 89

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Comparação de sensibilidade de estiramento e temperatura para duas fibras altamente birrefringentes	21
Tabela 2.2 - Sensibilidade e resolução obtidas com as fibras ARROW do tipo 1 e 2	27
Tabela 2.3 - Resumo das sensibilidades dos interferómetros apresentados no estado da arte	35
Tabela 3.1 - Comparação da sensibilidade ao índice de refração e à temperatura entre diversos sensores.....	55
Tabela 4.1 - Variação da fase para alterações de estiramento de $1,33 \mu\epsilon$ com os esquemas de detecção pseudo-heteródino e heteródino 1, 2 e 3, para uma cavidade formada por duas FBGs	63
Tabela 4.2 - Variação da fase para alterações de estiramento de $1,33 \mu\epsilon$ com os esquemas de detecção pseudo-heteródino e heteródino 1, 2 e 3 para uma cavidade formada por uma FBG e um espelho com reflectividade de 4%.....	65
Tabela 4.3 - Medidas teóricas dos interferómetros	67
Tabela 5.1 - Calibração do PZT	77
Tabela 5.2 - Valores obtidos com o esquema pseudo-heteródino e com frequências de modulação de 1 kHz e 125 Hz.....	82
Tabela 5.3 - Valores obtidos com os esquemas heteródino 1, 2 e 3, com frequência de modulação de 1 kHz.....	83
Tabela 5.4 - Comparação entre os esquemas de detecção pseudo-heteródinos e heteródinos para uma cavidade de ~ 6 cm.....	84

1. Introdução

1.1. Motivação

Actualmente, uma grande quantidade de informação é gerada, processada, armazenada, apresentada e transmitida. Apesar da aquisição e processamento de informação ser uma necessidade desde o início dos tempos, a sociedade moderna e futura, terá cada vez mais a necessidade de detectar e processar muitos tipos de variáveis, de forma a obter mais informação e desenvolver sistemas de automação nas áreas da biomedicina, aeronáutica, robótica, entre outras [1].

Relativamente aos sensores em fibra óptica, estes surgiram em paralelo com a indústria das comunicações por fibra óptica. Com a diminuição de custo desta tecnologia, as suas vantagens enquanto elemento sensor têm ganho relevo, tais como: baixo peso, pequena dimensão, resistência a interferências electromagnéticas, elevada sensibilidade e o facto de serem passivos, tem-lhes granjeado um grande interesse na academia e na indústria. Devido à baixa atenuação da fibra óptica, é também possível a operação remota, onde o elemento sensor pode estar a uma distância relativamente elevada em relação ao resto do sistema optoelectrónico. Além do mais, é possível efectuar a multiplexagem de inúmeros sensores na mesma fibra óptica, o que permite o desenvolvimento de aplicações de redes de sensores. Entre outros parâmetros, os sensores em fibra óptica permitem a medição de deslocamento, rotação, temperatura, vibração, humidade, índice de refração e até parâmetros químicos e biológicos [2] [3] [4].

1.2. Objectivos

O objectivo desta tese de mestrado consistiu no desenvolvimento de sensores interferométricos modais para a medição de índice de refração e temperatura, bem como de um sistema de interrogação baseado na modulação espectral da fonte óptica. Para esse propósito, implementaram-se experimentalmente sensores com base em fibras SM 380 e sem núcleo.

Projectaram-se ainda modelos teóricos como ferramentas auxiliares para o desenho e optimização de sensores interferométricos em fibra óptica, baseados em cavidades de Fabry-Pérot. Efectuou-se também o desenvolvimento de um sistema de interrogação

espectral de baixo custo, empregando instrumentação virtual, sem necessidade de utilização de analisador de espectro óptico ou interferómetros de leitura. Por fim, estes sensores foram caracterizados de modo experimental.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em seis capítulos. O capítulo actual aborda os conceitos introdutórios referindo os objectivos do trabalho, o funcionamento dos sensores, incluindo as suas características, o conceito de interferometria e como este pode ser empregue nos sensores em fibra óptica, e para finalizar, uma descrição dos interferómetros existentes.

O segundo capítulo descreve os conceitos empregues nos sensores interferométricos, um estado da arte sobre um tipo particular de interferómetros em fibra, os interferómetros modais, os esquemas de detecção de sinal tipicamente utilizados e a importância da instrumentação virtual.

O terceiro capítulo apresenta a implementação de dois interferómetros modais, e a caracterização da sua resposta a variações do índice de refração externo e do estiramento, recorrendo a um OSA.

O quarto capítulo aborda a criação de um *software* de simulação em LabVIEW, que permite estudar diferentes tipos de interferómetros e que foi utilizado para avaliar três tipos de cavidades interferométricas e as respectivas técnicas de detecção de sinal, utilizando os esquemas de detecção pseudo-heteródino e heteródino, por modulação directa de um laser utilizado como fonte óptica.

O quinto capítulo apresenta os resultados relativos a medições de estiramento numa cavidade, utilizando um laser DFB (*Distributed FeedBack*) e empregando as técnicas utilizadas na simulação para a recuperação da informação de fase do mensurando.

Por fim, no sexto capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido e fazem-se algumas sugestões para trabalhos futuros. Também, ao longo do documento são realizadas referências a anexos, que têm como objectivo complementar o trabalho descrito.

1.4. Sensores

Um sensor é composto por um ou mais transdutores que são responsáveis pela conversão de um tipo de energia em outro tipo. Por exemplo, um sensor eléctrico é um dispositivo que recebe um estímulo e responde com um sinal eléctrico. Por outro lado, um estímulo ou mensurando é a quantidade, propriedade ou condição que é recebida e convertida num sinal eléctrico. Como exemplos de estímulos têm-se: luz, temperatura, pressão, vibração, movimento, velocidade, etc.

De acordo com a literatura, existem diferentes critérios que podem ser utilizados para classificar os sensores eléctricos ou ópticos [5]:

- **Passivos ou activos** - Um sensor passivo não necessita de uma fonte de alimentação e gera directamente um sinal eléctrico ou óptico em resposta a um estímulo. No entanto, os sensores activos necessitam de alimentação externa, tipicamente designado por sinal de excitação, que é modificado pelo sensor para produzir um sinal de saída.
- **Absolutos e relativos** - Um sensor absoluto detecta um estímulo em referência a uma escala física que é independente das condições de medida, ao passo que um sensor relativo produz um sinal que relaciona-se com uma determinada base não nula, por exemplo, a pressão atmosférica no caso de um sensor de pressão.
- **De acordo com as suas características** - Especificações do sensor: estabilidade, precisão, tempo de resposta, etc.; material utilizado na sua construção: condutor, semiconductor, etc.; tipo de detecção: biológico, químico, temperatura, mecânico, etc.; fenómeno de conversão: termoeléctrico, fotoeléctrico, etc.; área de aplicação: engenharia civil, energia, militar, etc.; e estímulo: corrente, tensão, velocidade, posição, etc.

1.5. Características dos sensores

As características mais comuns que são utilizadas para caracterizar um sensor são [5] [6]:

- **Gama Dinâmica (*Span* ou *Full-scale*)** - Corresponde à gama de valores do estímulo que pode ser convertida pelo sensor. É definido pelo maior valor de entrada que pode ser aplicado ao sensor sem ultrapassar uma determinada imprecisão.

- **Escala Máxima de Saída (*Full-scale Output*)** - É dada pela diferença entre os valores de saída, para o mínimo e máximo valor de entrada.
- **Exactidão** - Define o máximo desvio do valor de saída do sensor, em relação ao valor real.
- **Precisão** - Mede o grau de reprodutibilidade da medida.
- **Sensibilidade** - É a inclinação da curva de calibração, quer seja constante ou não ao longo da gama de medição. Para um sensor cuja saída y se relaciona com a entrada x pela equação $y = f(x)$, a sensibilidade S no ponto x_a é dado por:

$$S(x_a) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_a} \quad (1.1)$$

- **Histerese** - É o desvio do sinal de saída do sensor para uma determinada entrada, quando esta é incrementada ou decrementada, como apresentado na Figura 1.1. Um sensor apresenta histerese quando para um mesmo valor de excitação se obtêm diferentes valores medidos, nas medições ascendentes e descendentes.

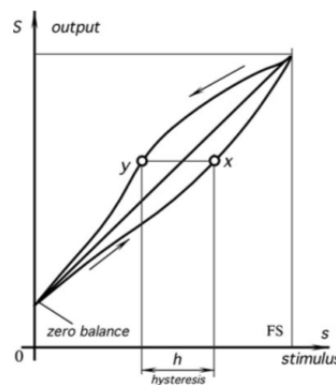


Figura 1.1 - Histerese [5]

- **Offset** - É o desvio do sinal de saída do valor zero, quando a entrada é nula.
- **Linearidade** - É quanto a relação entre a entrada e a saída se aproxima de uma recta ideal.
- **Saturação** - Define o limite de operação do sensor e é definido como o máximo valor de saída do sensor.
- **Banda Morta** - Corresponde à região da gama dinâmica na qual a saída do sensor se mantém num determinado valor, tipicamente no valor zero, como apresentado na Figura 1.2.

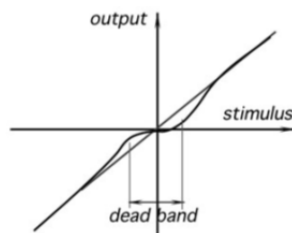


Figura 1.2 - Banda Morta [5]

- **Resolução** - Define o menor incremento de entrada que resulta numa variação no sinal de saída.

1.6. Sensores em fibra óptica

Os sensores em fibra óptica podem ser empregues em sistemas de navegação, indústria, engenharia electrotécnica, engenharia civil, química, geologia e área militar. As principais vantagens da utilização destes sensores são a sua segurança, devido a não ser necessário a presença de elementos electrónicos, a elevada imunidade a interferências electromagnéticas, a enorme sensibilidade a um grande número de mensurandos, a elevada gama dinâmica, a versatilidade geométrica e a multiplexagem de um elevado número de sensores [7].

Os sensores em fibra óptica podem ser classificados como baseados em intensidade ou em modulação de fase. Este último, também conhecido por sensor interferométrico é o mais preciso porque possui maior sensibilidade e possui a vantagem da medida não ser influenciada por flutuações de potência por parte da fonte óptica. O princípio de operação consiste na medição do mensurando através da modulação de fase introduzida no feixe óptico no elemento sensor.

Na Figura 1.3 apresenta-se um esquema de classificação de sensores interferométricos, onde se efectua a distinção entre sensores intrínsecos e os extrínsecos. Um sensor interferométrico é basicamente um interferómetro todo em fibra, na qual a acção do mensurando actua directamente sobre a fibra, alterando uma ou mais propriedades ópticas do feixe guiado. No caso dos sensores interferométricos, a acção do mensurando resulta numa modulação em fase no feixe de luz. Por outro lado, num sensor extrínseco, o feixe óptico sai da fibra óptica, passa por um elemento transdutor externo e tipicamente é acoplado de novo à fibra óptica. Neste tipo de sensor, a fibra óptica apenas é usada como canal óptico de transporte da radiação até ao local de monitorização. Em algumas aplicações, o elemento sensor externo emprega tecnologia electrónica e a radiação

transportada pela fibra terá que ser convertida em energia eléctrica para posterior codificação da informação do mensurando. Este tipo de configuração é usualmente referenciada na bibliografia como sensor híbrido [8] [9].

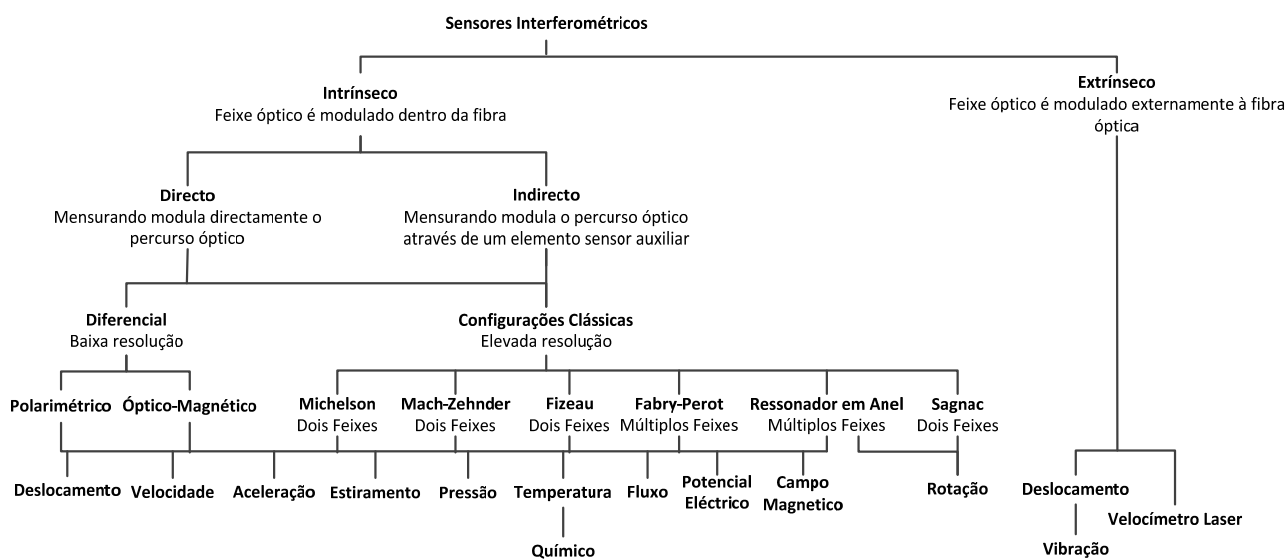


Figura 1.3 - Classificação de sensores interferométricos [8] [7]

1.7. Interferometria

Quando duas ou mais ondas de luz, provenientes da mesma fonte se sobrepõem, a intensidade resultante num determinado ponto depende não só da amplitude de cada um dos campos eléctricos mas também da sua fase relativa. Este fenómeno é designado por interferência. Desenvolvimentos nesta área, nomeadamente na interferometria óptica têm sido amplamente empregues na medição precisa de grande número de mensurandos [10].

No caso mais simples, quando duas ondas se sobrepõem, a amplitude complexa em qualquer ponto no padrão de interferência é dada pela soma das amplitudes complexas das duas ondas [10]:

$$A = A_1 + A_2 \quad (1.2)$$

onde $A_1 = a_1 \exp(-i\phi_1)$ e $A_2 = a_2 \exp(-i\phi_2)$. A intensidade resultante é dada por:

$$\begin{aligned} I &= |A|^2 = (A_1 + A_2)(A_1^* + A_2^*) \\ &= |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1 A_2^* + A_1^* A_2 \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \end{aligned} \quad (1.3)$$

onde I_1 e I_2 são as intensidades das duas ondas e $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ é diferença de fase entre ambas. Tipicamente esta fase relativa depende da diferença dos percursos ópticos e do comprimento de onda da radiação, sendo que pequenas alterações nestes parâmetros podem resultar em grandes variações do sinal de saída interferométrico, uma vez, que se trata de uma onda de luz de elevada frequência. Quando o mensurando actua sobre um destes parâmetros obtemos assim um mecanismo sensor extremamente sensível.

1.8. Interferómetros ópticos

Durante os últimos 100 anos, os interferómetros ópticos têm sido desenvolvidos com diversas configurações. Os interferómetros podem ser agrupados/caracterizados nas seguintes categorias [8] [11]:

- Dois feixes: *Michelson* e *Mach-Zehnder*.
- Múltiplos feixes: *Fabry Perot* ou Ressonador em Anel.
- Configuração Diferencial: Birrefringente e Polarimétrico.
- Caminho recíproco: Sagnac.
- Múltiplos Modos: Interferómetros modais em fibra óptica.

1.8.1. Interferómetro de Michelson

O interferómetro de *Michelson* em fibra óptica apresentado na Figura 1.4 é o interferómetro mais simples de dois feixes. A luz proveniente da fonte óptica é dividida em potência num acoplador direccionado (AD) para produzir o feixe de referência e o de sinal [8]. As fases introduzidas pela propagação em cada um dos braços do interferómetro são dadas por $\phi_r = 2kx_r$ e $\phi_s = 2kx_s$ para o feixe de referência e de sinal, respectivamente, onde $k = 2\pi/\lambda$ e, x_r e x_s são as distâncias percorridas pelos feixes desde o AD até ao espelho de referência (M_r) e de sinal (M_s), respectivamente.

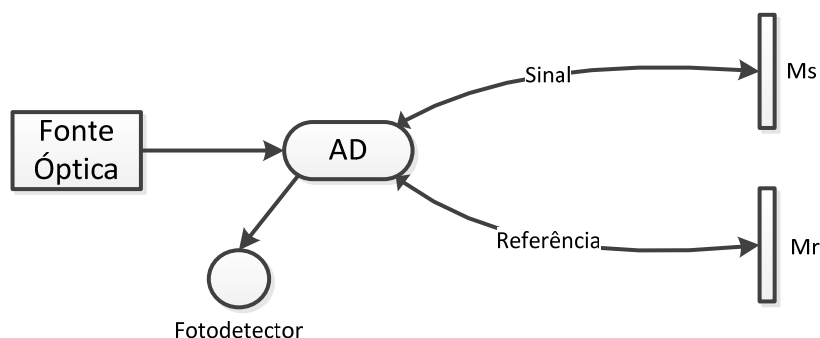


Figura 1.4 - Interferómetro de Michelson

Após os feixes atravessarem os braços do interferómetro, serão reflectidos pelos espelhos, combinados no AD e o sinal resultante da sobreposição dos feixes (sinal de interferência) será lido pelo fotodetector.

Quando o interferómetro é utilizado como um sensor, a fase relativa dos dois feixes depende essencialmente da diferença de percursos ópticos e pode ser expressa por $\Delta\phi = \phi_r - \phi_s = \phi_{const} + \phi_{ind}$, onde ϕ_{const} é a fase constante entre os dois braços e ϕ_{ind} a fase induzida no feixe do sinal pelo mensurando. Nestas condições a potência óptica à entrada do fotodetector será proporcional à diferença de fase entre os dois braços:

$$I_{out} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \quad (1.4)$$

Nesta expressão I_1 e I_2 são as potências ópticas dos feixes de referência e de sinal, respectivamente e dependem das constantes de acoplamento do AD, das perdas e no caso do interferómetro de Michelson, das reflectividades dos espelhos [10] [9].

Caso seja introduzida uma variação sinusoidal no percurso óptico do braço de sinal, haverá uma variação de fase ϕ_{ind} , e I_{out} irá variar sinusoidalmente, como se pode observar na Figura 1.5.

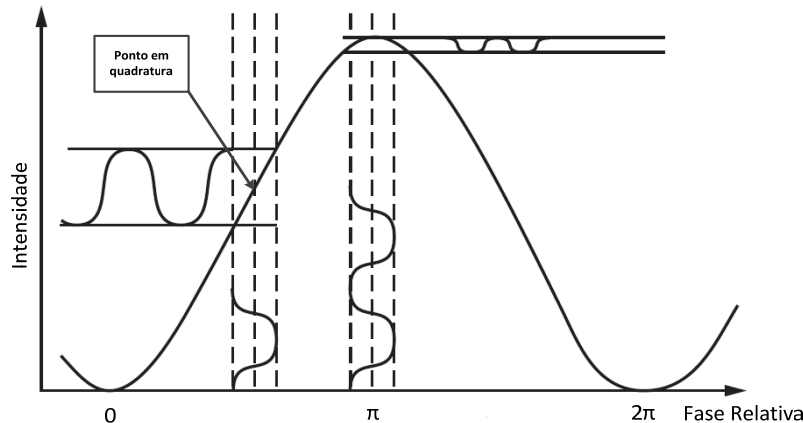


Figura 1.5 - Variação da intensidade em função da variação do percurso óptico [3]

Pela figura constata-se que para uma maior sensibilidade, a diferença de fase fixa entre os braços, ϕ_{const} , deverá ser ajustada para o ponto em quadratura, pois nesse ponto uma pequena variação do percurso óptico no braço sensor traduz-se numa maior variação de intensidade. Pela figura, observa-se que a sensibilidade em termos de potência óptica de saída é nula para variações de fase óptica em torno de $m\pi$ (m inteiro), e que variações de fase maiores que π não podem ser distinguidas sem ambiguidade, devido à periodicidade da função de resposta do interferómetro.

1.8.2. Interferómetro de Mach-Zehnder

Na Figura 1.6 apresenta-se o esquema de um interferómetro Mach-Zehnder convencional, onde os dois espelhos existentes no interferómetro de Michelson são substituídos por um segundo AD. Este esquema requer um AD adicional, mas detém três grandes vantagens: redução do *feedback* de luz para a fonte; duas saídas em oposição de fase (que podem ser úteis em algumas técnicas de processamento de sinal); e maior robustez contra interferências ambientais, uma vez que não utiliza espelhos, sendo que estes são susceptíveis a desalinhamentos e deterioram-se com o tempo [8] [9] [12].

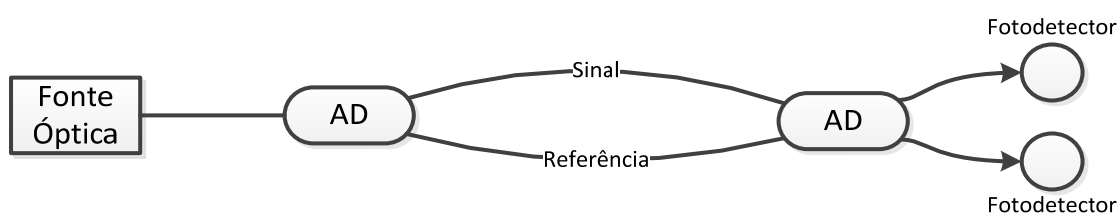


Figura 1.6 - Interferómetro de Mach-Zehnder

Na Figura 1.7 apresenta-se uma melhoria da técnica de leitura utilizada, onde é introduzido um modulador que efectua uma modulação em frequência (f) da fonte óptica. Se o interferómetro for configurado para que o braço de referência e o de sinal difiram de (L_1-L_2) , então a diferença de fase entre os dois feixes de luz será $2\pi f(L_1-L_2)n/c$, onde n é o índice de refração da fibra e c a velocidade da luz no vácuo. Uma modulação sinusoidal da fonte óptica a uma taxa ω , implica que a diferença de fase relativa entre os dois braços seja também modulada e à entrada do fotodetector obtêm-se harmónicos pares e ímpares. Os sinais provenientes das portadoras nos harmónicos ω e 2ω encontram-se em quadratura, e para retirar a fase basta apenas empregar um desmodulador electrónico de quadratura [3].

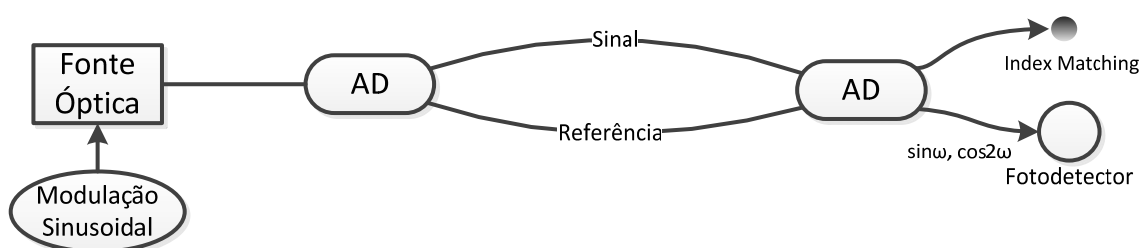


Figura 1.7 - Interferómetro de Mach-Zehnder com modulador de fonte

1.8.3. Interferómetro de Sagnac

Este interferómetro também pode ser considerado de dois feixes e é principalmente utilizado na medição de rotação, devido à sua simplicidade de fabrico e pouca sensibilidade ao ruído ambiental. Uma das suas principais aplicações comerciais é no fabrico de giroscópios para aviões [3]. Na Figura 1.8 apresenta-se a configuração de um interferómetro Sagnac. O feixe de luz proveniente da fonte óptica é dividido pelo AD, originando dois feixes que percorrem o mesmo percurso, mas em sentidos contrários voltando a combinar-se de novo no AD. Ao contrário dos interferómetros anteriores, o interferómetro está sempre balanceado, isto é, a diferença de percursos ópticos é sempre igual a zero. Nestas condições ambos os feixes estão sujeitos à acção do mensurando e de todas as perturbações ambientais. Devido à total sobreposição do percurso dos dois feixes, todas as perturbações recíprocas, que afectam os dois feixes da mesma forma, são automaticamente anuladas. Por outro lado, um mensurando não recíproco, isto é, que produza um efeito diferente para cada um dos feixes contra-propagantes, pode ser medido com grande sensibilidade. Tal é o caso de movimentos de rotação em torno de um eixo perpendicular ao plano do anel interferométrico. Quando existe uma rotação em torno do eixo perpendicular ao anel, é originada uma diferença de fase entre os dois feixes, que poderá ser lida pelo fotodetector [9]. Por outras palavras, quando o anel roda no sentido dos ponteiros do relógio, o feixe horário percorre um percurso óptico superior ao feixe anti-horário [3].

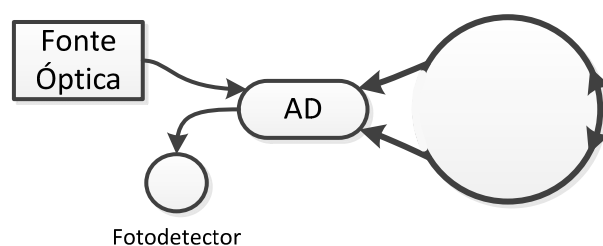


Figura 1.8 - Interferómetro Sagnac

Uma variação deste interferómetro consiste na utilização de um segmento de fibra que mantém a polarização (PM - *Polarization Maintaining*) no anel, e tem como objectivo introduzir uma diferença de percurso óptico, causando interferência entre os dois feixes propagantes no anel. Um dos feixes é transmitido na fibra PM segundo o eixo de maior velocidade e o outro é conduzido segundo o eixo de menor velocidade. As fibras convencionais PM (Panda e *bow-tie*) possuem elevada sensibilidade térmica devido a utilizarem dopantes do tipo boro. De forma a evitar esta dependência são tipicamente

utilizadas fibras PM-PCF (PM - *Photonic-Crystal Fiber*). Este tipo de fibras podem apresentar baixa perda por curvatura, diâmetro pequeno, pouca dependência com a temperatura e elevada birrefringência [13].

1.8.4. Interferómetros Modais

Os sensores interferométricos modais são mais compactos devido a poderem ser construídos numa secção de fibra óptica curta e numa única fibra, ao contrário dos interferométricos convencionais de Mach-Zehnder e Michelson. Apesar de um interferómetro modal poder ser fabricado de diversas formas, como se verá na secção 2.4, o seu funcionamento básico consiste em explorar a diferença de fase entre o modo do núcleo e os modos de bainha, LP_{01} e LP_{0m} [14] [15]. A Figura 1.9 representa os modos linearmente polarizados numa fibra óptica. Os modos $LP_{n,m}$ são designados por dois parâmetros: número de modos radiais m (número de “picos” de intensidade na direcção radial) e o número de modo de azimute n ($2n$ é o numero de “picos” na direcção do azimute) [16].

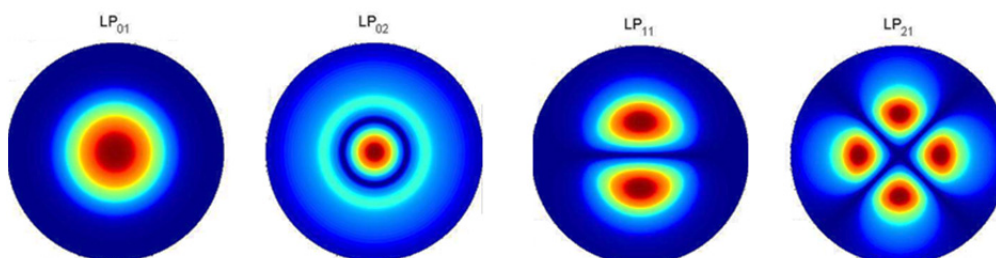


Figura 1.9 - Representação dos modos linearmente polarizados, numa fibra óptica [16]

2. Sensores interferométricos

Após uma introdução sobre os sensores em geral, abordado o conceito dos sensores e da interferometria, neste capítulo introduzem-se os conceitos empregues nos sensores interferométricos, um estado de arte sobre interferómetros modais, os esquemas de detecção de sinal tipicamente utilizados e a importância da instrumentação virtual na aquisição da informação do mensurando.

2.1. Introdução

Estes sensores empregam fibras monomodo na sua construção, e a informação do mensurando é obtida através das variações de fase entre a onda que atravessa a região onde actua o mensurando e a onda de referência, que se encontra isolada do mensurando. Como requisito, as ondas têm de ser provenientes da mesma fonte óptica [9] e o comprimento de coerência da fonte (l_c) terá que ser superior à diferença de percurso óptico (OPD) entre as duas ondas [17]:

$$l_c > OPD \quad (2.1)$$

O percurso óptico (OP - *Optical Path*) percorrido por uma onda depende do meio em que esta se propaga, ou seja, do seu índice de refração (n) e da distância geométrica percorrida (L):

$$OP = n.L \quad (2.2)$$

Portanto, a diferença de percurso óptico entre as duas ondas está directamente relacionada com a diferença entre as distâncias percorridas e dos índices de refração, originando uma diferença de fase ($\Delta\phi$) entre as ondas dada por [10]:

$$OPD = \Delta n.\Delta L = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi \quad (2.3)$$

2.2. Coerência de uma fonte

A coerência de uma fonte é uma medida da correlação entre fases, medidas em diferentes pontos de uma onda. A coerência temporal corresponde à estabilidade de fase da onda ao longo do tempo, na direcção de propagação do feixe. Por outro lado, a

coerência espacial consiste na estabilidade de fase da onda em diferentes pontos, mas ao longo da direcção transversal à direcção de propagação [18].

O comprimento de coerência relaciona-se com o tempo de coerência (T_c) através da expressão (2.4), onde c é a velocidade da luz no meio [8].

$$l_c = v.T_c \quad (2.4)$$

Em geral, o comprimento de coerência pode ser expresso pela equação (2.5), onde λ é o comprimento de onda central e $\Delta\lambda$ a sua largura de banda espectral [19].

$$l_c \approx \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (2.5)$$

2.3. Visibilidade

Assumindo que duas ondas de luz com intensidades I_1 e I_2 se propagam na mesma direcção, que estão igualmente polarizadas e que possuem a mesma frequência, a visibilidade das franjas interferométricas é dada por:

$$V = \frac{I_{\text{máx}} - I_{\text{mín}}}{I_{\text{máx}} + I_{\text{mín}}}; \quad 0 \leq V \leq 1 \quad (2.6)$$

Na expressão anterior, $I_{\text{máx}}$ e $I_{\text{mín}}$ correspondem ao valor máximo e mínimo de intensidade no padrão de interferência, respectivamente, e estão relacionados com a intensidade de cada uma das ondas por [10]:

$$I_{\text{máx}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2.7)$$

$$I_{\text{mín}} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2.8)$$

Na Figura 2.1 apresenta-se um padrão de interferência resultante de um interferómetro de duas ondas, em que existe uma diferença de percurso óptico entre elas. A visibilidade pode ser calculada pela expressão (2.6), onde $I_{\text{máx}}=1$ e $I_{\text{mín}}=0$, obtendo-se assim a visibilidade igual a um.

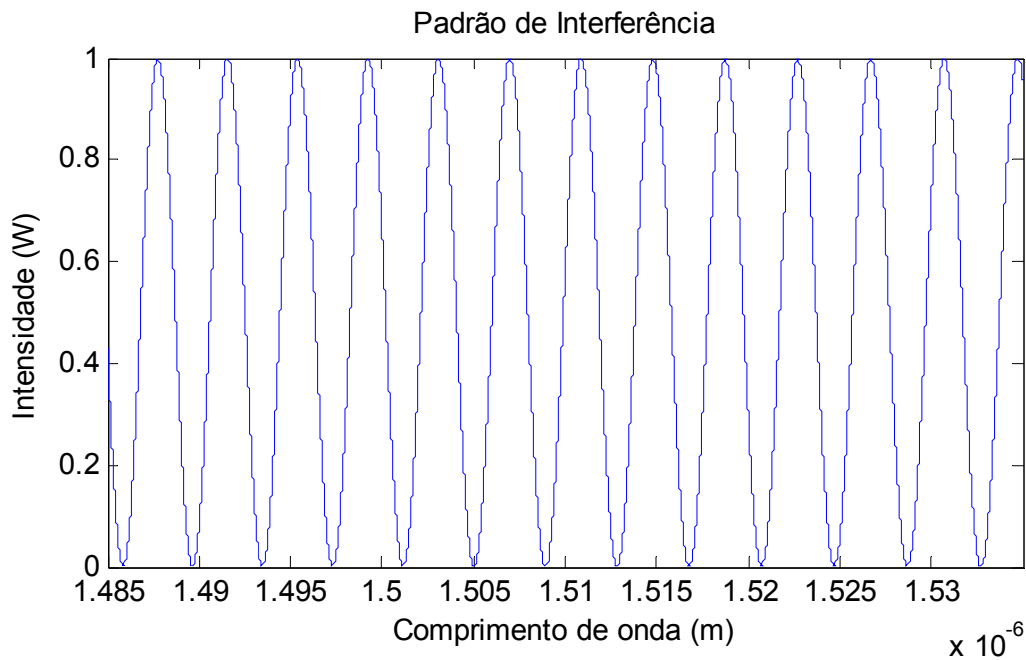


Figura 2.1 - Padrão de interferência originado por um interferómetro de duas ondas, com um desfasamento entre elas

2.4. Interferómetro de Fabry-Pérot

Um interferómetro de *Fabry-Pérot* é composto por dois espelhos com reflectividades R_1 e R_2 , separados por uma cavidade de comprimento L , como exemplificado na Figura 2.2 (a). A interferência ocorre entre a onda que é reflectida pelo primeiro espelho e a que percorre a cavidade e é transmitida pelo primeiro espelho. No caso de espelhos de baixa reflectividade, a interferência é originada essencialmente por essas duas ondas, mas à medida que a reflectividade aumenta, obtém-se interferência de várias ondas, como exemplificado na Figura 2.2 (b).

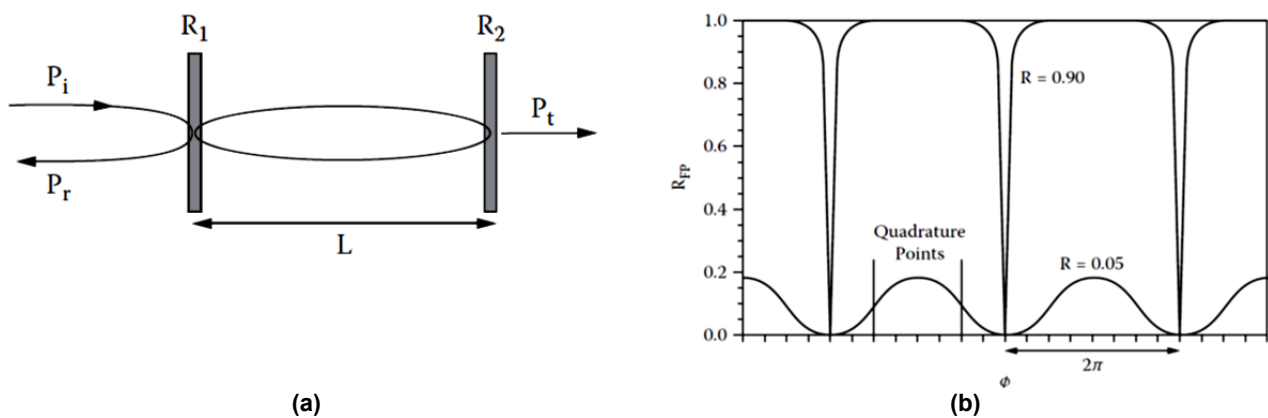


Figura 2.2 - (a) Cavidade de Fabry-Pérot; (b) Espectro em reflexão em função da reflectividade dos espelhos [3]

No caso mais simples, a diferença de fase acumulada entre as duas ondas é dado por [3]:

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (2.9)$$

em que n é o índice de refração da cavidade e λ o comprimento de onda central da fonte.

Derivando a equação (2.9) em ordem ao comprimento de onda obtém-se:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta\lambda} = -\frac{4\pi nL}{\lambda^2} \quad (2.10)$$

O período das franjas originadas pela cavidade é obtido igualando $\Delta\phi$ a -2π :

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL} \quad (2.11)$$

Este tipo de interferómetro pode ser fabricado em fibra, sendo os dois espelhos substituídos por redes de *Bragg* (FBGs), Figura 2.3 (a), ou substituindo o primeiro espelho por uma FBG e o segundo por um corte transversal na fibra, cuja reflectividade é dada pela reflexão de *Fresnel* do núcleo da fibra com o meio exterior, como apresentado na Figura 2.3 (b).

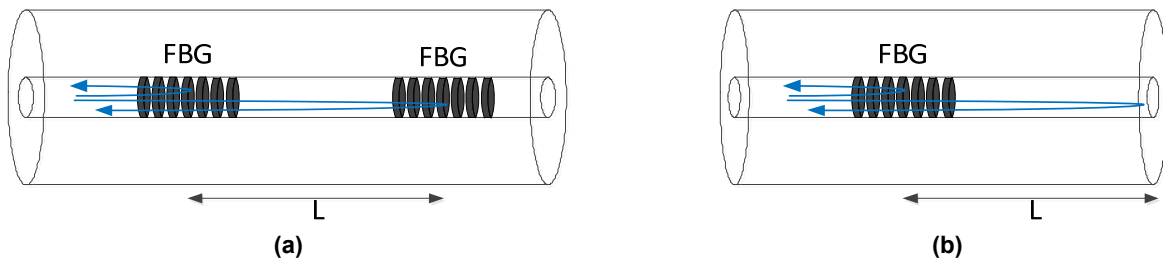


Figura 2.3 - Cavidade formada por (a) duas FBGs; (b) uma FBG e o fim da fibra

A reflectividade do segundo espelho do interferómetro da Figura 2.3 (b) é dada por [16]:

$$R_{fresnel} = \left(\frac{n_{fibra} - n_{ar}}{n_{fibra} + n_{ar}} \right)^2 \quad (2.12)$$

sendo tipicamente igual a 3,5%, tendo em conta que o índice de refração do núcleo da fibra é de 1,458 e o do ar igual a 1.

2.4.1. Rede de Bragg

Uma FBG (Figura 2.4) consiste num conjunto de estruturas periódicas que são escritas directamente no núcleo da fibra, usando radiação ultravioleta, alterando o seu índice de refacção.

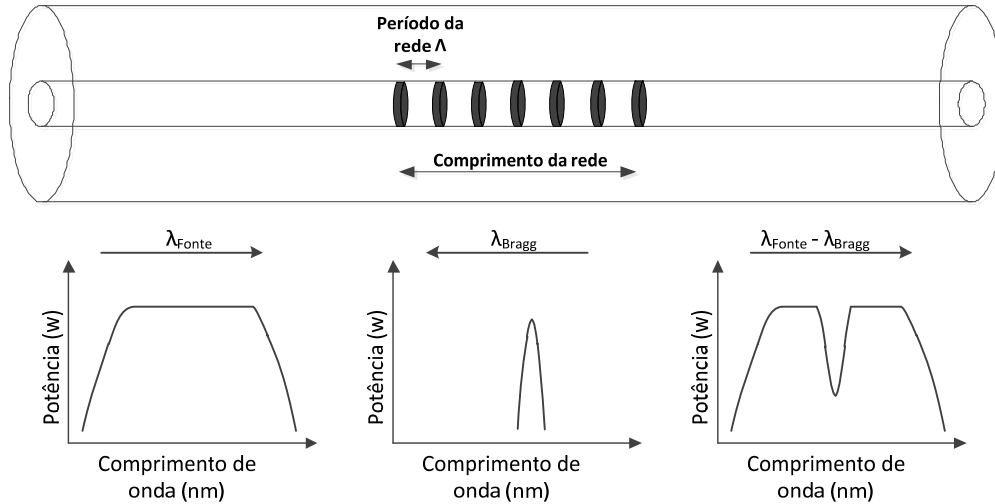


Figura 2.4 - Rede de Bragg e propagação dos sinais

Quando a FBG é iluminada por uma fonte de banda larga, parte da luz incidente com comprimento de onda igual a λ_B é reflectida, onde

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.13)$$

Na equação (2.13), n_{eff} corresponde ao índice efectivo do núcleo da fibra e Λ o período de modulação do índice de refacção.

Quando é aplicada tensão mecânica ou ocorrem variações de temperatura na região da FBG, n_{eff} e Λ variam, logo o comprimento de onda de Bragg será diferente [20]. No artigo da referência [21] apresentam-se as sensibilidades típicas de uma FBG para estiramento e temperatura, sendo estas indicadas em seguida:

$$\frac{\partial \lambda_{Bragg}}{\partial \epsilon} \approx 1 \text{ pm} / \mu \epsilon \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \lambda_{Bragg}}{\partial T} \approx 11 \text{ pm} / ^\circ \text{C}$$

2.5. Estado da arte de sensores baseados em interferómetros modais

Os sensores que têm como base a interferência entre modos do núcleo-bainha possuem sensibilidade ao estiramento, à temperatura, à pressão, tal como os sensores convencionais em fibras SMF (*Single Mode Fiber*) ou PCF e também exibem sensibilidade à curvatura, torção e a variações do índice de refração externo [11].

Os sensores baseados em interferómetros modais podem ser classificados em cinco grupos distintos, de acordo com o tipo de modos (entre modos de propagação ou modos de polarização), ou de acordo com o dispositivo empregue: LPG (*Long Period Grating*), PCF (*Photonic Crystal Fiber*) ou MMI (*Multi-Mode-Interferometer*):

- **Polarização** - Estes sensores são tipicamente constituídos por um interferómetro de Sagnac, graças à utilização de uma secção de fibra altamente birrefringente, tipicamente uma PM-PCF ou Hi-Bi-PCF (*High-Birefringence PCF*) [13] [22].
- **Redes de período longo ou secção cónica**- Neste caso os sensores são normalmente constituídos por uma única fibra monomodo, na qual são introduzidas duas LPGs (*Long-Period Grating*). A primeira tem como objectivo propagar parte da luz do modo do núcleo para a bainha e a segunda recombina os modos no núcleo, criando um padrão de interferência [23]. Em alternativa, pode ser utilizada apenas uma LPG, com uma configuração Michelson, obtendo-se maior sensibilidade, sendo que os modos da bainha reflectidos, ao passarem pela mesma LPG, recombina-se no núcleo. Outra solução, de mais simples fabricação passa por substituir a LPG por uma secção cónica [24].
- **PCF** - O fabrico deste tipo de interferómetros pode ser realizado das seguintes formas [11].
 - Colapso de uma secção da MOF (*Microstructured Optical Fiber*), formando uma região cónica que serve de guia de onda vidro-ar-vidro, suportando interferência de modos de ordem mais elevada.
 - Fusão de uma secção sensora MOF entre outras duas fibras MOF, ou através do colapso dos buracos da MOF em duas posições distintas. Na região de fusão, os buracos colapsam dando origem à propagação de modos de ordem mais elevada ao longo da região sensora (secção contida entre as regiões de colapso/fusão).
 - Utilização de uma fibra PCF entre outras duas PCFs, efectuado um *offset* de fusão entre as fibras *lead-in/lead-out* e a fibra sensora. A fibra *lead-in* corresponde à fibra

antes da secção sensora e a *lead-out* após. Dependendo do *offset*, diferentes modos podem ser excitados.

- Por fim, uma solução mais eficaz e de menor custo, consiste em utilizar uma fibra sensora PCF e duas SMF como fibras *lead-in* e *lead-out*.
- **PCF com LPG** - É um sensor que utiliza uma fibra PCF com duas LPGs. As LPGs podem ser fabricadas por perturbações periódicas no índice de refração ou na geometria na direcção longitudinal da fibra MOF, através de um laser de CO₂ [25] [26].
- **Interferómetros multimodais (MMI - *Multi-Mode-Interferometer*)** - São fabricados com a utilização de uma secção de fibra multimodo interligada a duas fibras SMF através de fusão [21].

Nas secções seguintes são descritos alguns exemplos de configurações relevantes em cada uma das categorias descritas.

2.5.1. Polarização

Neste ponto são apresentados dois interferómetros baseados em Polarização, que empregam um interferómetro de Sagnac.

Interferómetro Sagnac com fibra Hi-Bi PCF para medição de estiramento

Em 2007 foi apresentado o artigo da referência [22], que aborda um sensor óptico baseado numa fibra altamente birrefringente PCF (Hi-Bi PCF), com 380 mm de comprimento, numa configuração de espelho em anel (FLM – *Fiber Loop Mirror*), como exemplificado na Figura 2.5.

O Hi-Bi PCF FLM é formado por um acoplador óptico de 3 dB, um controlador de polarização, para controlar a orientação da polarização, e uma secção de fibra Hi-Bi PCF que tem como objectivo quebrar a simetria do anel, permitindo que cada uma das componentes de polarização percorresse caminhos diferentes, acumulando uma fase relativa. Essa fibra era composta por buracos com diâmetros de 4,5 µm e 2,2 µm, tendo 4,4 µm de espaçamento entre buracos (*pitch*), 40 µm de diâmetro da região composta pelos buracos e um diâmetro externo de 125 µm.

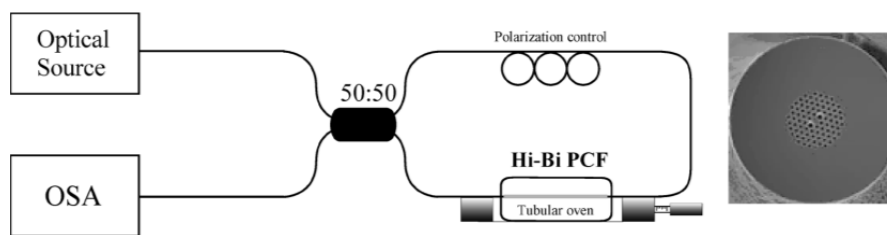
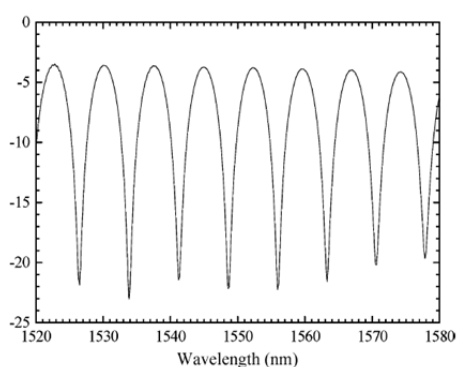
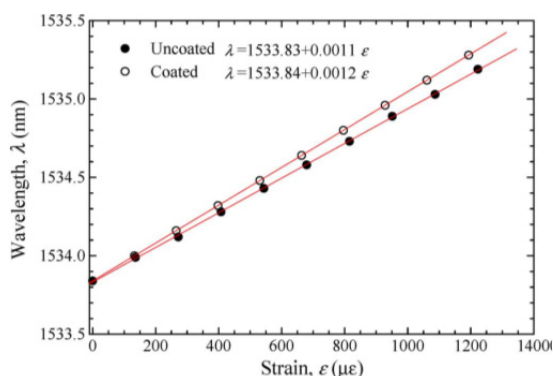


Figura 2.5 - Esquema do sistema, utilizando um FLM com Hi-Bi PCF e fotografia da respectiva fibra PCF utilizada [22]

O acoplador de 3 dB divide a luz de entrada em dois feixes contra-propagantes que atravessam o anel. Graças à colocação do controlador de polarização, cada uma das componentes de polarização de cada um dos feixes propaga-se com diferentes velocidades na secção de fibra Hi-Bi PCF. As componentes de polarização de cada um dos feixes interferem quando se voltam a recombinar no acoplador, originando o padrão de interferência observado na Figura 2.6 (a).



(a)



(b)

Figura 2.6 - (a) Padrão de interferência; (b) Deslocamento dos picos interferométricos do padrão de franjas em função do estiramento aplicado à secção Hi-Bi [22]

Na Figura 2.6 (b) apresenta-se um gráfico da variação do mínimo de interferência em 1533,8 nm em função do estiramento aplicado à cabeça sensora. As sensibilidades obtidas foram de $1,11 \text{ pm}/\mu\epsilon$ e $1,21 \text{ pm}/\mu\epsilon$ para a Hi-Bi PCF sem e com revestimento, respectivamente.

No caso da fibra com revestimento de polímero de acrilato (*acrylate polymer*) a sensibilidade foi maior porque quando esse material é sujeito a estiramento, o interior da fibra é comprimido, resultando numa pequena variação do diâmetro dos dois buracos maiores, aumentando a variação de birrefringência da fibra.

Relativamente a variações de temperatura, este sensor demonstrou ser praticamente insensível porque a fibra PCF é constituída por sílica pura, logo pouco sensível a variações de temperatura.

Na Tabela 2.1 apresenta-se um quadro de comparação de sensibilidades ao estiramento e à temperatura quando utilizadas duas fibras altamente birrefringentes distintas, onde se observa que a fibra Hi-Bi PCF possui menor sensibilidade a ambos os parâmetros quando comparada com a fibra PANDA.

Tabela 2.1 - Comparação de sensibilidade de estiramento e temperatura para duas fibras altamente birrefringentes

Tipo de Fibra	Sensibilidade a estiramento (pm/ $\mu\epsilon$)	Sensibilidade a temperatura (pm/K)
Hi-Bi PCF	1,21	$-0,3 \times 10^{-3}$
PANDA	41,2	-1,9

Interferómetro de Sagnac com fibra PM-PCF para medição de pressão

Em 2008 foi publicado o artigo da referência [13], que apresenta um interferómetro PM-PCF Sagnac para a medição de pressão, com uma secção de fibra PM-PCF, dentro de uma câmara selada e ligada a um compressor de ar.

Com este esquema foi obtido sensibilidade de $0,346 \text{ nm/bar}$ para uma fibra PM-PCF com comprimento de 40 cm. Em termos de resposta à temperatura foi obtida uma sensibilidade de $-2,2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, um valor maior do que os obtidos com a fibra PANDA Hi-Bi e Hi-Bi PCF utilizadas no artigo [22].

2.5.2. Redes de período longo ou secção cónica

Neste ponto são citados interferómetros modais que fazem uso de redes de período longo e de uma secção cónica.

Sensor de índice de refração com duas LPGs e uma região cónica

Em 2005 foi publicado o artigo da referência [23], onde efectua a caracterização de um sensor com configuração MZI (*Mach-Zehnder Interferometer*), criada por um par de LPGs. Esse esquema é apresentado na Figura 2.7, e é designado por *Fiber-Taper Seeded LGP Pair* (FTS-LPGP) com $L=50,96 \text{ mm}$, extremamente sensível a variações do índice de refração externo, devido à utilização de uma secção cónica que tem como objectivo melhorar a sensibilidade do sensor.

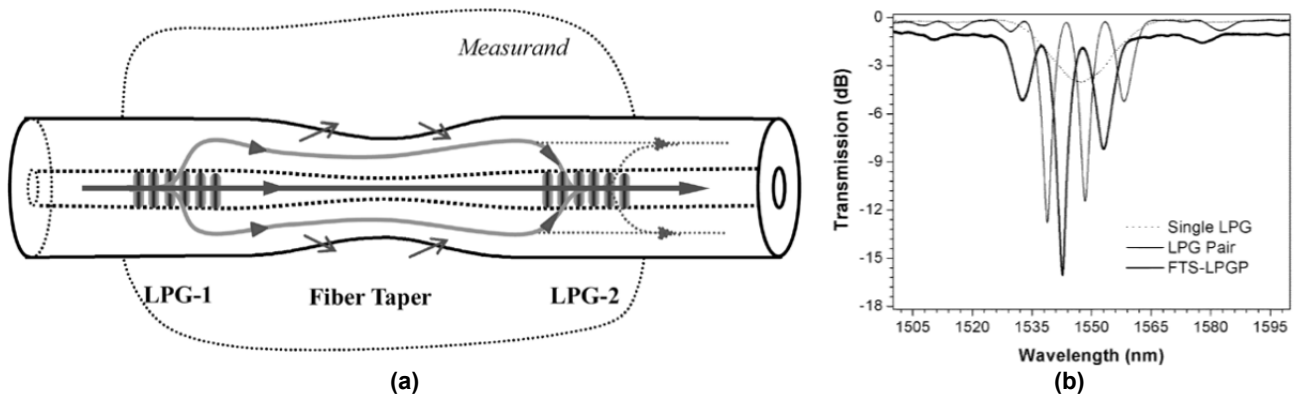


Figura 2.7 - (a) Sensor baseado em duas LPGs com secção cónica; (b) Padrão de franjas resultante de uma única LPG (*Single LPG*) e com duas LPGs sem região cónica (*LPG Pair*) e com região cónica (*FTS-LPGP*) [23]

A luz dos comprimentos de onda ressonantes da LPG é directamente acoplada do modo do núcleo para os de bainha, o que introduz alguns picos de atenuação que dependem da diferença do índice de refração do modo guiado e dos modos de bainha. Assim, a primeira LPG acopla parte da luz para os modos de bainha e a segunda é responsável por reacoplar os modos de bainha novamente para o núcleo da fibra, criando um padrão de franjas de interferência, que depende da fase relativa entre os modos, tal como é representado na Figura 2.7 (b).

Os resultados mostraram uma sensibilidade de $176 \text{ nm}/\text{RIU}$ (RIU - *Refractive Index Unit*) com a variação do índice de refração externo entre 1,33 e 1,36, sendo cinco vezes superior à obtida com o sensor sem região cónica.

Sensor de fluxo com secção cónica

Em 2007 foi publicado o artigo da referência [24] onde é apresentado um interferómetro modal com região cónica, construído numa fibra SMF-28, para a medição de fluxo.

Na Figura 2.8 é apresentada a geometria da cabeça sensora com a secção cónica fabricada numa fibra SMF-28, na qual o diâmetro da fibra passou de 125 para 80 μm . A secção cónica possuía um comprimento de 500 μm e uma atenuação de 3 dB. A reflexão de *Fresnel* de $\sim 4\%$ no fim da fibra é estabelecida devido à mudança de índice de refração núcleo-ar e o comprimento do interferómetro é de $L=100 \text{ mm}$.

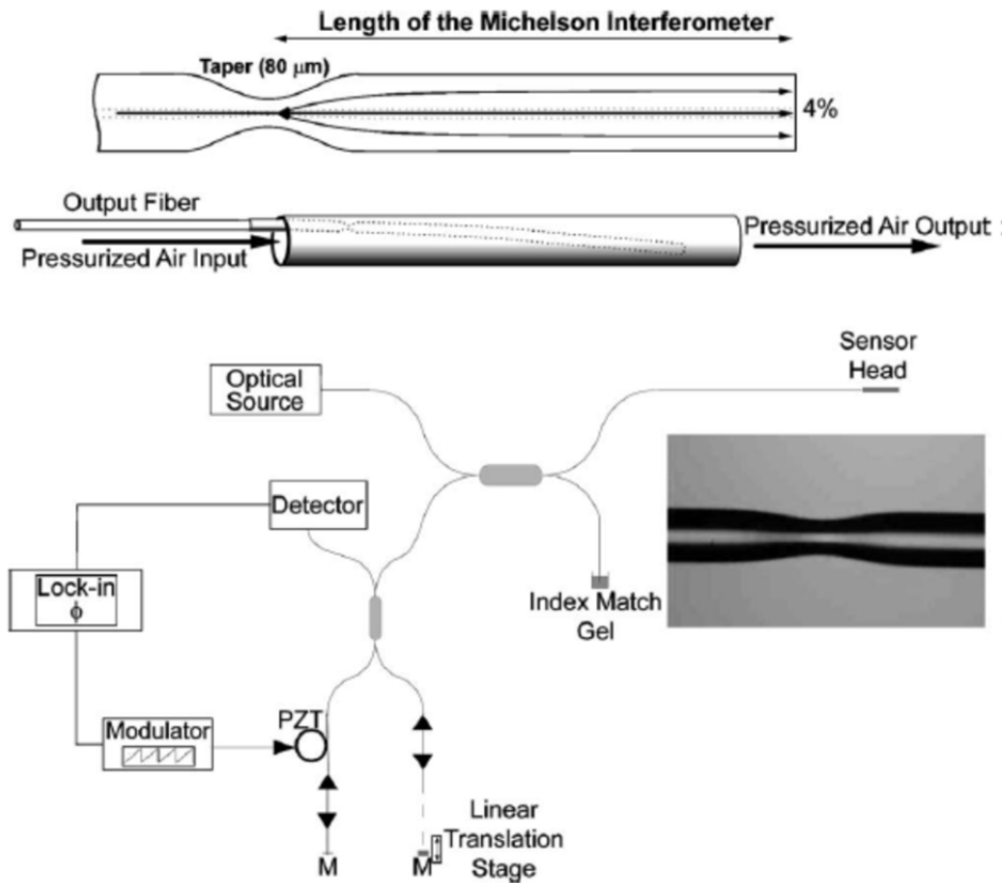


Figura 2.8 - Sensor modal fabricado em fibra SMF [24]

A fracção de luz que é acoplada para a bainha depende do comprimento e da profundidade da região cónica e define a visibilidade do padrão de franjas. A luz que se propaga na bainha, devido a encontrar um índice de refacção menor que o do núcleo, viaja com maior velocidade, resultando numa diferença de percurso óptico.

Como é apresentado na Figura 2.8, a luz reflectida é injectada num interferómetro de leitura de Michelson, em que num dos braços existe um percurso aéreo que é utilizado para corresponder ao percurso OPD (*Optical Path Difference*) do interferómetro sensor. No outro braço é utilizado um PZT que efectua modulação de fase em dente de serra, obtendo-se no detector uma portadora sinusoidal, cuja fase se relaciona com o OPD do sensor e que varia de acordo com o mensurando.

Na Figura 2.9 (a) é apresentado o espectro do sinal reflectido que chega à entrada do interferómetro receptor. Pelo padrão de franjas observa-se que em alguns dos picos possuem alguma interferência, indicando a presença de interferência de múltiplos modos na cabeça sensora, embora o efeito predominante seja devido à interferência dos modos LP_{01} e LP_{02} .

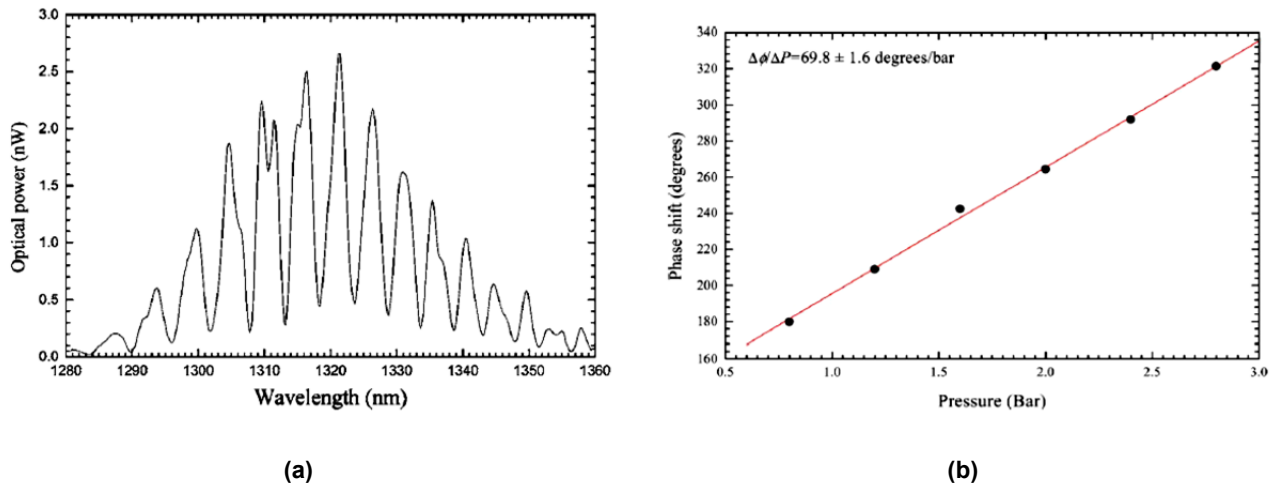


Figura 2.9 - (a) Espectro do interferómetro fabricado e (b) Fase do interferómetro em função da pressão [24]

Foi observado que a fase lida é extremamente sensível à curvatura na região cónica. Quando o fluxo aumenta, a curvatura na região cónica diminui, logo haverá uma variação na diferença de fase em função da pressão do fluxo aplicado e para testes de pressão de fluxo de ar entre os 0,5-3,0 bar obtiveram-se os resultados da Figura 2.9 (b). A sensibilidade obtida foi de *69,8 graus/bar*, com um erro máximo de 3%.

2.5.3. PCF

Neste ponto são apresentados interferómetros modais fabricados com fibras PCF.

Sensor de estiramento, pressão e índice de refração com uma secção de fibra PCF

Em 2009 foi apresentado o artigo da referência [11] onde aborda o fabrico de um interferómetro modal utilizando uma fibra PCF sem revestimento, com o qual foram efectuados testes de sensibilidade a estiramento, pressão, temperatura e variações do índice de refração externo. O sensor interferométrico desenvolvido neste artigo consistiu na fusão de um segmento de fibra PCF entre duas fibras SMF, como representado na Figura 2.10.

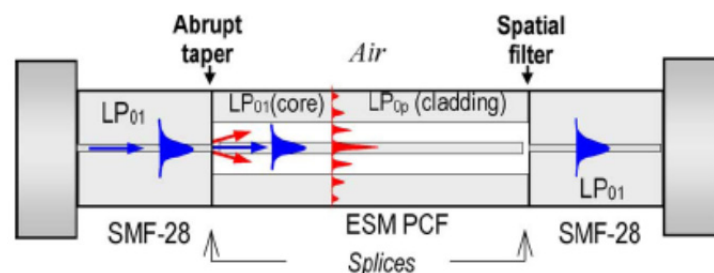


Figura 2.10 - Esquemático do sensor que utiliza uma fibra PCF entre duas SMF [11]

As fibras utilizadas têm um diâmetro do modo fundamental LP_{01} de $w_{SMF}=9,2 \mu m$ e $w_{PCF}=6,4 \mu m$. Como resultado verifica-se uma transição abrupta na junção SMF-PCF, originado um modo no núcleo e outros na bainha (LP_{0p}) da fibra PCF. Estes modos de bainha também serão influenciados pelo colapso dos buracos da PCF na região de fusão. Idealmente pretende-se que apenas exista um modo de bainha, mas na prática haverá mais do que um, embora o predominante seja o de ordem mais baixa (LP_{02}). Na segunda fusão (PCF-SMF) existe novamente outra transição abrupta dando-se o reacoplamento dos modos de bainha ao modo fundamental da SMF. Na Figura 2.11 apresenta-se a resposta espectral desse interferómetro com um comprimento de $L_s=45 mm$, quando iluminado com uma fonte de espectro largo amplificada por ASE.

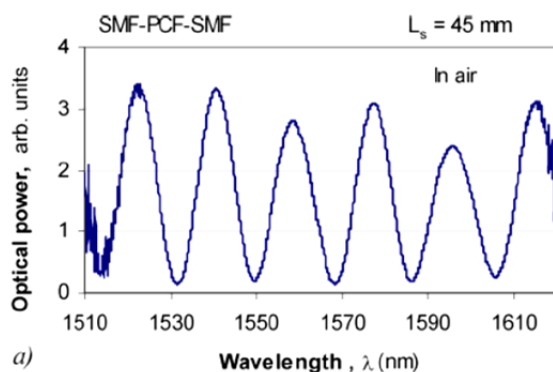


Figura 2.11 - Resposta espectral obtida com o sensor intermodal com $L_s=45 mm$ [11]

Observa-se que a sinusóide obtida não tem amplitude constante, possuindo pequenas flutuações devido à existência de mais do que um modo de bainha e às perdas dependentes da polarização (PDL - *Polarization Dependent Loss*) de 10 dB. Este último facto resulta dos buracos da PCF se tornarem ligeiramente elípticos na região onde foi efectuada a fusão da fibra PCF com as SMFs, originando birrefringência parasítica.

Utilizando uma fibra PCF de comprimento $L_s=33,5 mm$, foi obtida uma sensibilidade linear de $d\lambda/d\mu\epsilon=-2,037 pm/\mu\epsilon$ e $d\lambda/dP=16,9 nm/bar$, para estiramento e pressão, respectivamente. Também foram realizados testes de sensibilidade à temperatura nos quais foi verificado que $d\lambda/dT < 3 pm/K$. Para variações do índice de refração externo à fibra, obtiveram-se sensibilidades de $99,37 nm/RIU$ e $700 nm/RIU$, para variações nos intervalos de índice 1,33-1,38 e 1,38-1,46, respectivamente.

Devido ao facto do confinamento da luz e da atenuação do modo mais alto dependerem do índice de refração do meio externo, irá existir uma variação de visibilidade, sendo que

esta decresce significativamente quando o índice de refração externo se aproxima do da bainha.

Sensor de estiramento e temperatura com fibra ARROW

Em 2009 foi apresentado o artigo da referência [27], que aborda um sensor interferométrico modal baseado em dois tipos diferentes de fibras ARROW (*Antiresonance Reflecting Optical Waveguide*), para a medição de estiramento e temperatura. Este tipo de fibras é um caso particular das PCFs, em que a bainha é composta por materiais de elevado índice de refração, quando comparado com o material utilizado no núcleo. O mecanismo de guiagem da luz nas fibras ARROW baseia-se no confinamento da luz no núcleo de baixo índice através do fenómeno de PBG (*Photonic BandGap*) [26]. Na interface SMF-ARROW têm-se uma transição abrupta do diâmetro do modo fundamental, originando modos de bainha que depois serão reacoplados na interface ARROW-PCF, produzindo interferência modal.

As duas fibras ARROW utilizadas possuem um comprimento de 10 mm e os cilindros ocos são preenchidos com vidro de borosilicato e germanato, formando cilindros sólidos. As fibras possuem uma distância entre cilindros de $\approx 6 \mu\text{m}$ e a única diferença entre ambas é o diâmetro das varas de fabrico [28], 2 e 3 μm para o tipo 1 e 2, respectivamente. Nestas fibras o índice de refração é de 1,46 para o núcleo e 1,71 para as varas.

A Figura 2.12 (a) apresenta o sensor modal fabricado com um segmento de fibra ARROW e na Figura 2.12 (b), a representação do padrão de interferência espectral originado pelos dois sensores.

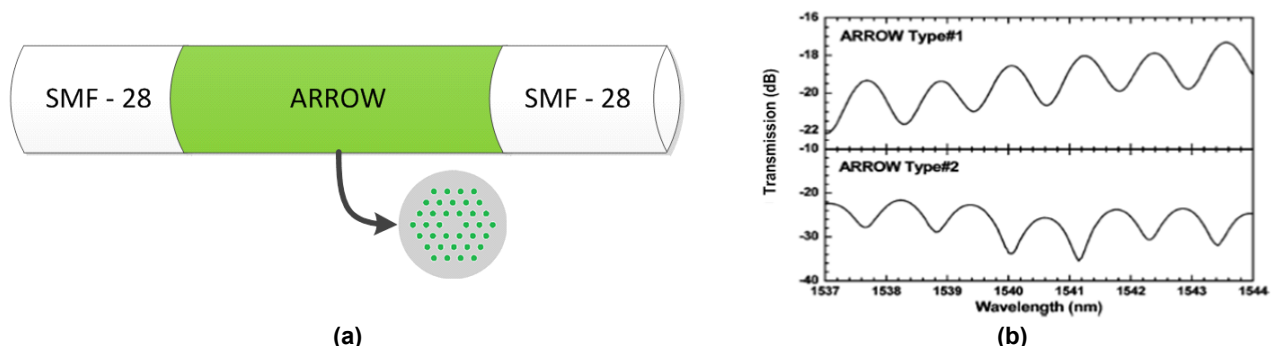


Figura 2.12 - (a) Sensor modal com fibra ARROW; (b) Padrão de interferência originado pela fibra ARROW do tipo 1 e 2 [27]

Na Tabela 2.2 apresentam-se as sensibilidades e as resoluções que foram obtidas com as duas fibras, na mediação de estiramento e temperatura com a utilização de um interferómetro de leitura de Michelson, na qual foi aplicada a técnica de endereçamento pseudo-heterodina para obtenção da variação de fase provocada pelo mensurando.

Tabela 2.2 - Sensibilidade e resolução obtidas com as fibras ARROW do tipo 1 e 2

Fibra ARROW	Sensibilidade a estiramento (graus/ $\mu\epsilon$)	Sensibilidade a temperatura (graus/ $^{\circ}\text{C}$)	Resolução a estiramento ($\pm\mu\epsilon$)	Resolução a temperatura ($\pm^{\circ}\text{C}$)
Tipo 1	-0,32	-12,46	1,8	0,13
Tipo 2	-0,54	-16,20	1,1	0,07

Os resultados demonstram maior sensibilidade para a fibra ARROW 2, sendo esta a que possuía o maior diâmetro de vara. Este facto comprova que a quantidade de material que preenche o núcleo da fibra é importante e influencia a sensibilidade.

Sensor de estiramento e temperatura baseado em fibra HC-PCF

Em 2009 foi publicado o artigo da referência [29], que aborda um sensor interferométrico baseado numa fibra PCF com núcleo oco (HC-PCF *Hollow-Core* PCF) de 28 cm de comprimento, fundida entre duas fibras SMF. As fibras HC-PCF são constituídas por cilindros ocios espaçados periodicamente numa matriz de sílica e utilizam o conceito de PBG para propagar a luz dentro do núcleo oco. Quando a luz que viaja na fibra SMF é injectada na HC-PCF, é excitado o modo fundamental e modos de bainha, que após a propagação na fibra HC-PCF, se recombina, originando interferência modal.

Na Figura 2.13 (a) encontra-se o esquema do interferómetro desenvolvido, no qual é utilizada uma fonte com comprimento de onda de operação em torno dos 1550 nm, com uma largura de banda de 60 nm e uma potência de 1,8 mW.

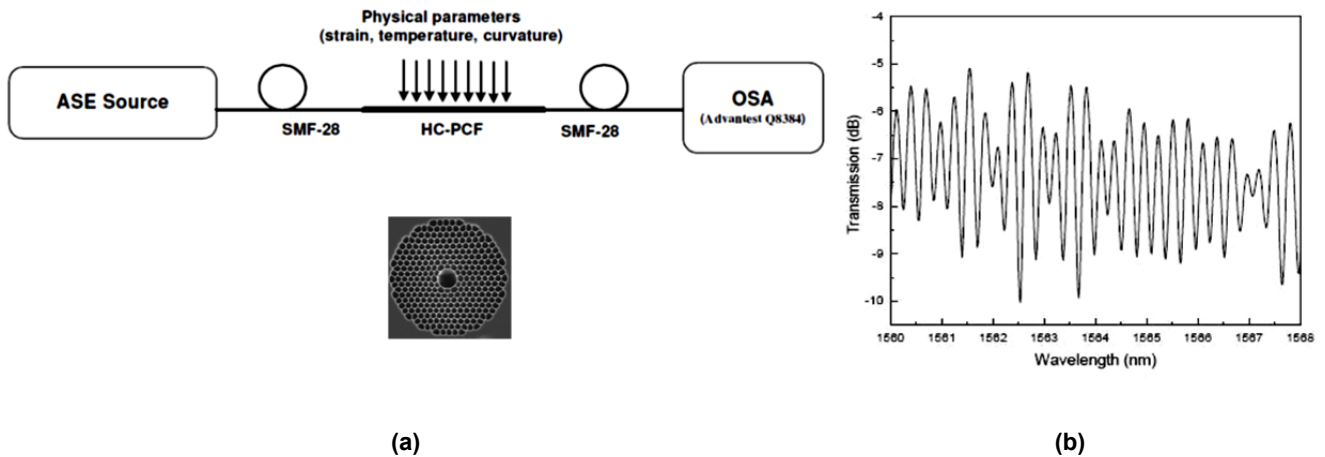


Figura 2.13 - (a) Esquema do interferómetro modal, baseado em HC-PCF; (b) Padrão de franjas com fibra HC-PCF de 28 cm [29]

Para este esquema foram desenvolvidas quatro cabeças sensoras, com comprimentos de 5,1 cm, 11,6 cm, 21,4 cm e 58,8 cm, sendo que se observou uma visibilidade muito baixa (36%) para o maior comprimento, devido à elevada atenuação dos modos de bainha. Na medição de estiramento, temperatura e curvatura foi utilizada uma fibra HC-PCF de 28 cm com visibilidade de 55%, tendo sido obtidas sensibilidades de $-0,96 \text{ pm}/\mu\epsilon$ e $-7,1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ para estiramento e temperatura, respectivamente.

Para as medições de fase em função da temperatura e estiramento foi aplicada a técnica de interferometria de luz branca e detecção pseudo-heteródina, com um interferómetro de leitura de Michelson, como é exemplificado na Figura 2.8. As sensibilidades obtidas foram de $0,76 \text{ graus}/\mu\epsilon$ e $8,1 \text{ graus}/^\circ\text{C}$, com resoluções de $\pm 1,4 \mu\epsilon$ e $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, para estiramento e temperatura, respectivamente.

Interferómetros apenas com fibra PCF

Em 2007 foi publicado o artigo da referência [30] onde foi proposto dois métodos de fabrico para a implementação de interferómetros intermodais utilizando apenas fibra PCF: Fusão com *offset* de dois segmentos de fibra PCF e no colapso parcial dos buracos de ar da PCF, como exemplificado na Figura 2.14.

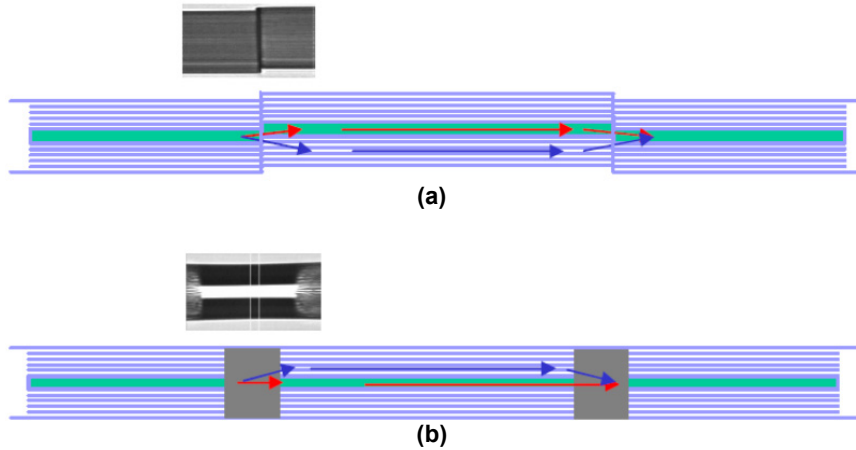


Figura 2.14 - Esquemático dos interferómetros baseado (a) na fusão com *offset* e (b) colapso parcial dos buracos [30]

No método da Figura 2.14 (a) os parâmetros mais importantes que afectam o desempenho do interferómetro são: o comprimento, o *offset* e as condições de descarga eléctrica durante a fusão. Nesse sensor, o *offset* utilizado foi de 3 μm , com uma perda de 2 dB. Este valor pode ser reduzido através da diminuição do *offset*, mas em contrapartida a visibilidade das franjas será menor. Por outro lado, a utilização da fusão com *offset* enfraquece a fibra, o que limita a sua utilização como sensor de estiramento. De forma a resolver estes problemas, o segundo método é preferível.

Na medição de estiramento foi utilizado o interferómetro baseado no colapso dos buracos, com um comprimento de 12 cm, o que apresenta uma sensibilidade de $-2,2 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

Sensor de torção baseado nos modos de propagação e de polarização numa secção de fibra Hi-Bi PCF

Em 2009 foi publicado o artigo da referência [31], que apresenta um sensor em fibra óptica para a mediação de torção, empregando dois modos linearmente polarizados numa fibra altamente birrefringente PCF (Hi-Bi PCF). Na Figura 2.15 apresenta-se a configuração do sensor desenvolvido. A luz era proveniente de uma fonte de banda larga, com emissão nos 1550 nm, linearmente polarizada e injectada na Hi-Bi PCF.



Figura 2.15 - Confirmação experimental utilizando uma Hi-Bi PCF para medição de torção e respectiva foto da fibra [31]

Esta configuração permitiu a criação de dois interferómetros, um obtido pela interferência entre os modos $LP_{01(x)}$ e $LP_{11(x)}$ e o outro entre $LP_{01(y)}$ e $LP_{11(y)}$. Quando a luz linearmente polarizada (LP) é injectada a 45° numa fibra Hi-Bi PCF, ambas as polarizações (x e y) são excitadas, gerando-se interferência multifeixe. Para tal, foi utilizado um controlador de polarização. Devido à existência de interferência entre polarizações distintas, este interferómetro pode também ser incluído no grupo dos interferómetros de polarização.

Na Figura 2.16 (a) e (b) apresenta-se respectivamente o padrão de franjas que foi obtido e a transformada de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*), para o sensor sem torção quando é injectada luz a 0° , 90° e 45° na Hi-Bi PCF.

Na Figura 2.16 (b) os dois picos observados com amplitudes A_1 e A_2 , correspondem a cada um dos interferómetros e observa-se que as amplitudes variam de acordo com a polarização de entrada.

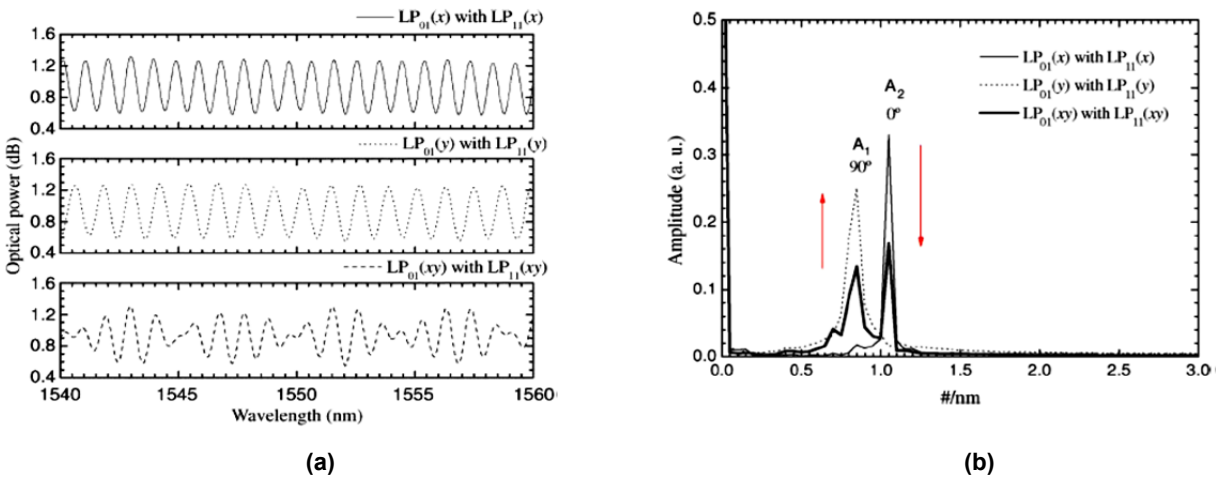


Figura 2.16 - (a) Resposta espectral do interferómetro e b) FFT com polarização a 0° ($LP_{01(x)}$ e $LP_{11(x)}$), 90° ($LP_{01(y)}$ e $LP_{11(y)}$) e 45° ($LP_{01(xy)}$ e $LP_{11(xy)}$) [31]

Aplicando torção à cabeça sensora, observou-se que as amplitudes variavam tal como representado na Figura 2.17 (a). Na Figura 2.17 (b) apresenta-se a diferença entre as amplitudes de acordo com o ângulo de torção.

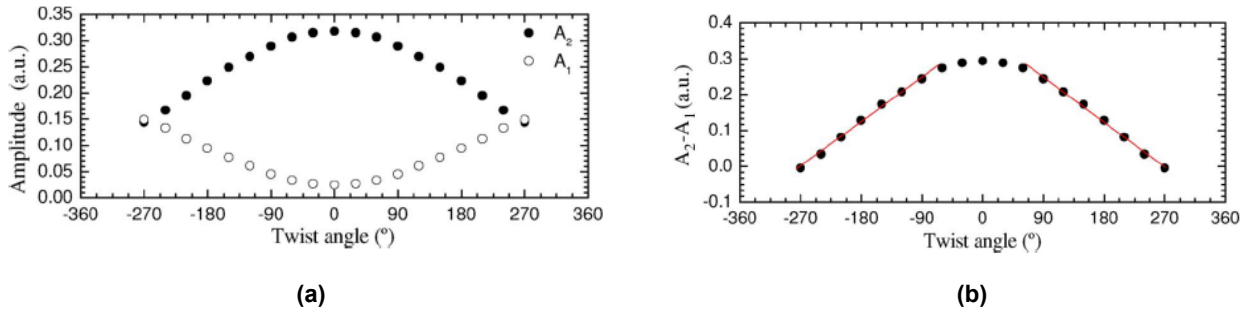


Figura 2.17 - (a) Resposta à torção da cabeça sensora e (b) diferença entre as duas amplitudes (A_2-A_1) [31]

De acordo com as características do OSA utilizado estimou-se uma resolução à torção de $\sim 2,7^\circ$. Relativamente às variações de temperatura foi observado que a diferença de amplitude A_2-A_1 se manteve praticamente constante no intervalo entre 10°C e 70°C .

2.5.4. PCF com LPG

O artigo da referência [26] foi publicado em 2009 e aborda a fabricação de interferómetros modais baseados em LPGs e PCFs de *Index-guiding* PCF (IG - PCF) e *Photonic BandGap* PCF (PBG - PCF) com 19 cm de comprimento.

A utilização de um laser CO_2 permite a fabricação de duas LPGs praticamente idênticas numa IG-PCF, formando um MZI, como exemplificado na Figura 2.18 (a). Relativamente aos interferómetros convencionais em fibra SMF, este possui maior sensibilidade a estiramento ($-2,6 \text{ pm}/\mu\epsilon$) e menor sensibilidade à temperatura ($8,018 \text{ pm}/^\circ\text{C}$). A baixa sensibilidade à temperatura deve-se à constituição material da fibra PCF.



Figura 2.18 - Interferómetro (a) IG-PCF e (b) PBG-PCF [26]

No caso do PBG-PCF MZI, apresentado na Figura 2.18 (b), é praticamente impossível empregar LPGs como *splitter* e *combiner* do feixe de luz, porque as LPGs neste tipo de fibra possuem uma largura de banda limitada a poucos nanómetros. Para tal, são utilizados cones adiabáticos para efectuar o acoplamento dos modos, fabricados através de fusões na fibra. Na região de fusão, o buraco situado na bainha, mais próximo do núcleo é totalmente colapsado e o do centro é alargado para o dobro do seu tamanho original. As

sensibilidades deste interferómetro foram de $-0,64 \text{ pm}/\mu\epsilon$ e $94,164 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. Devido aos modos co-propagantes estarem confinados no núcleo e na região da bainha mais próxima do núcleo, o PBG-MOF MZI é imune a perturbações do índice de refração externo.

2.5.5. Interferómetros multimodais

Neste ponto são abordados dois interferómetros multimodais, fabricados com fibra multimodo e fibra sem núcleo.

Sensor de estiramento com fibra multimodo

Em 2007 foi publicado o artigo da referência [21] onde é abordado a construção de um interferómetro intermodal com um segmento de fibra multimodo de índice em degrau (Figura 2.19), para medição de estiramento. Este sensor tem como vantagens: maior sensibilidade que uma rede de *Bragg* (1,92 vezes mais), uma estrutura simples, fácil fabricação e de baixo custo.

O sensor MMI fabricado utiliza uma fibra multimodo MMF (*Multi-Mode Fiber*) com $L=50 \text{ mm}$, diâmetro do núcleo de $105 \mu\text{m}$ e bainha de $125 \mu\text{m}$, conectado a duas fibras SMF, como é mostrado na Figura 2.19 (a). Na Figura 2.19 (b) é apresentado o espectro de transmissão do sensor MMI descrito, no qual se observa um pico de atenuação em $1547,074 \text{ nm}$

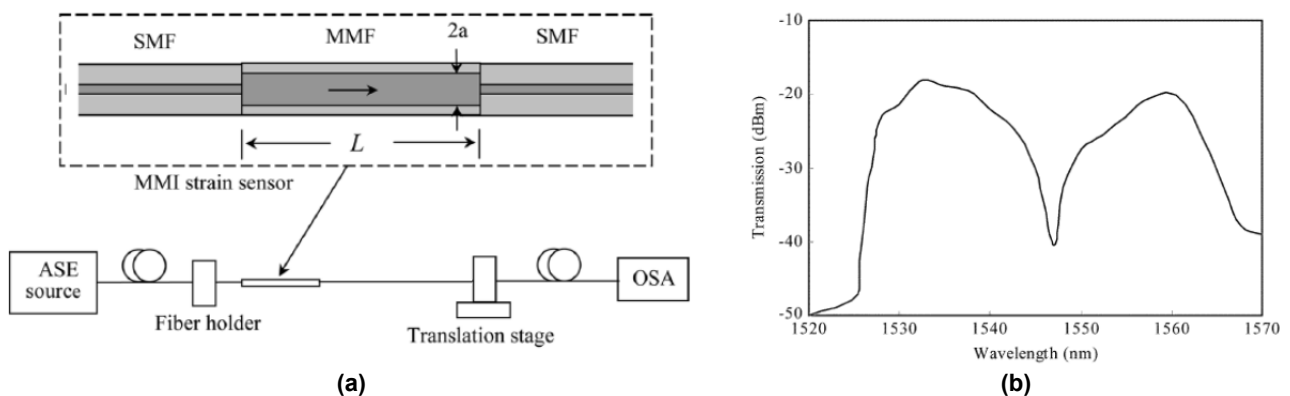


Figura 2.19 - (a) Esquemático da montagem experimental; (b) Espectro de transmissão do sensor MMI [21]

Na medição de estiramento foi monitorizado o desvio em comprimento de onda da ressonância produzida pelo sensor MMI, tendo sido obtida uma sensibilidade de $-1,92 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ao estiramento.

Sensor de índice de refração com fibra sem núcleo

O artigo da referência [32] aborda a construção de um sensor modal com um segmento de fibra sem núcleo entre duas fibras multimodo, Figura 2.20 (a), com elevada sensibilidade ao índice de refração e pouca sensibilidade à temperatura. A utilização de fibra multimodo tem como objectivo melhorar a eficiência de acoplamento. Pela Figura 2.20 (b) é possível observar que o comprimento de onda ressonante aumenta com a diminuição do comprimento da fibra sem núcleo, para comprimentos entre 3 e 5 cm.

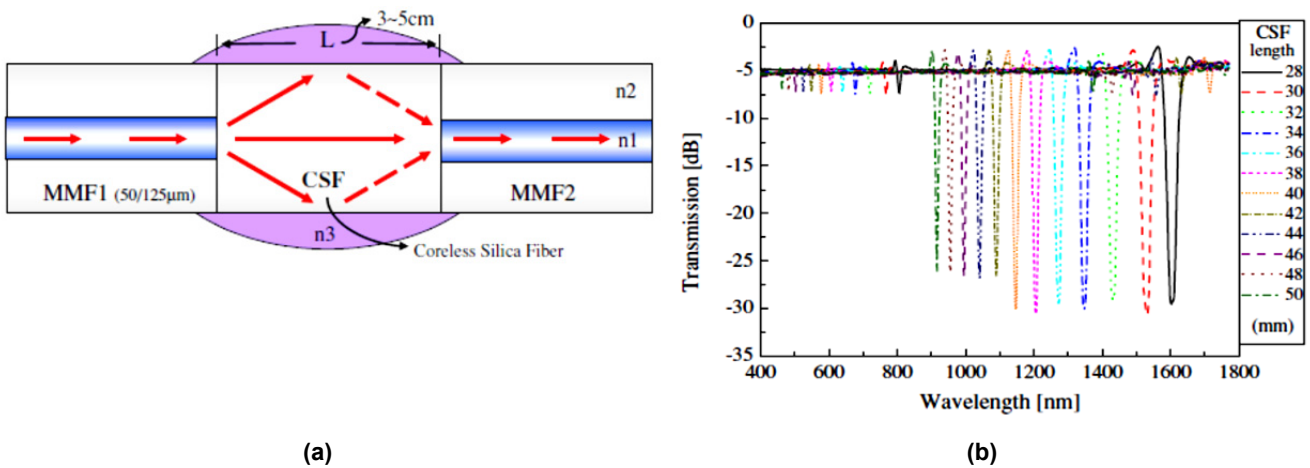


Figura 2.20 - (a) Sensor fabricado com fibra sem núcleo; (b) Variação da ressonância com o comprimento da fibra sem núcleo [32]

A Figura 2.21 (a) e (b) mostra a variação da ressonância com a mudança do índice de refração externo desde 1,3 a 1,44, tendo sido registada uma sensibilidade média de $228,57 \text{ nm}/\text{RIU}$, para uma fibra sem núcleo com 35 mm de comprimento. Em termos de temperatura, foi obtido uma sensibilidade de $9,6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ para os testes efectuados entre 25°C e 300°C , um valor desprezável quando comparado com a sensibilidade ao índice de refração.

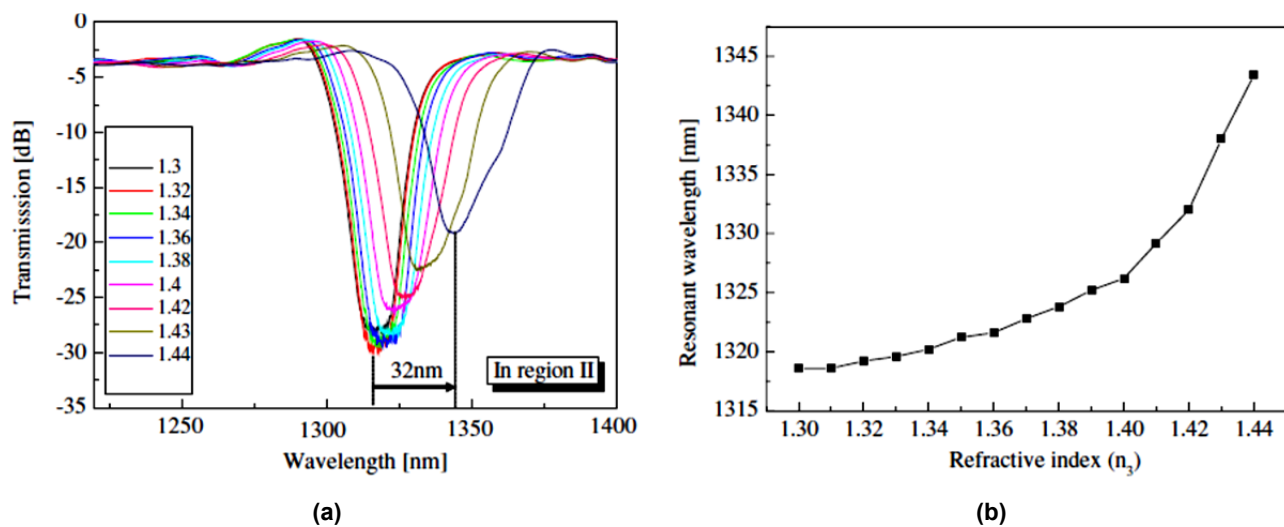


Figura 2.21 - Variação da ressonância com o índice de refração externo [32]

2.5.6. Resumo

Na Tabela 2.3 apresentam-se as sensibilidades ao índice de refração, à temperatura, ao estiramento e à pressão para os diferentes interferómetros apresentados nesta secção. Observa-se que o primeiro interferómetro apresentado no grupo PCF apresenta a maior sensibilidade ao índice de refração e à pressão. Em termos de sensibilidade à temperatura e ao estiramento, o melhor resultado é o do sensor com segmento de fibra Panda na configuração do interferómetro Sagnac, apresentado no grupo dos sensores baseados em polarização.

Tabela 2.3 - Resumo das sensibilidades dos interferómetros apresentados no estado da arte

Sensor	Comprimento (mm)	Sensibilidade ao índice de refração (nm/RIU)	Sensibilidade à Temperatura (nm/°C)	Sensibilidade à Pressão (nm/bar)	Sensibilidade à Estiramento (pm/με)
Polarização (1) HiBi PCF [22]	380	0	-0,0003	S/Informação	1,21
Polarização (1) Panda [22]	380	0	-1,9	S/Informação	41,2
Polarização (2) [13]	584	0	S/Informação	0,346	S/Informação
LPG (1) [23]	50,96	176 (1,33-1,36)	S/Informação	S/Informação	S/Informação
LPG (2) [24]	100	S/Informação	S/Informação	S/Informação	S/Informação
PCF (1) [11]	33,5	99,37 (1,33-1,38) e 700 (1,38-1,46)	0,003	16,9	-2,037
PCF (2) [27]	10	0	S/Informação	S/Informação	S/Informação
PCF (3) [29]	280	S/Informação	-0,0071	S/Informação	-0,96
PCF (4) [30]	12	0	S/Informação	S/Informação	-2,20
PCF+LPG (IG MOF) [26]	190	S/Informação	0,008056	S/Informação	-2,60
PCF+LPG (PBG MOF) [26]	190	0	0,094164	S/Informação	-0,64
MMI (1) [21]	50	0,0096	S/Informação	S/Informação	1,92
MMI (2) [32]	350	228,57 (1,3-1,44)	0,0096	S/Informação	S/Informação

Dos interferómetros apresentados, o primeiro do grupo PCF, demonstra ser o melhor, caso se pretenda um sensor de índice de refração, estiramento ou de pressão com pouca sensibilidade à temperatura. No caso de um sensor de temperatura, é preferível a

utilização de um sensor baseado num segmento de fibra PANDA, devido à sua maior sensibilidade.

2.6. Esquema de detecção do sinal

Os esquemas de detecção do sinal têm como fundamento a transformação da informação de fase óptica do interferómetro num sinal eléctrico adequado para posterior processamento ou interpretação, através de circuitos analógicos ou digitais [8] ou mais recentemente recorrendo à instrumentação virtual.

Os esquemas de detecção podem ser classificados em [8]:

- **Activos** - Qualquer esquema que necessite de realimentação da parte do sensor ou da fonte laser, ou que utilize um elemento óptico activo.
- **Passivos** - Um esquema sem qualquer realimentação ou que não necessite de um elemento óptico activo.

Nesta dissertação apenas serão abordados e implementados os esquemas de detecção passivos, devido à simplicidade de implementação.

2.6.1. Detecção pseudo-heteródina

A detecção pseudo-heteródina gera uma saída heteródina, baseando-se no facto de que o movimento do padrão de franjas à saída de um interferómetro não balanceado pode ser criado, através da variação da frequência da fonte laser em rampa, isto é, com uma modulação da corrente em dente serra. Num interferómetro com uma diferença de percurso L , uma mudança $d\nu$ na frequência de emissão da fonte, resulta numa variação de fase $d\phi$, na fase do padrão de interferência:

$$d\phi = \frac{2\pi L n}{c} d\nu = \frac{2\pi L n}{c} \cdot K_d(\omega) di \quad (2.15)$$

Com uma taxa de variação de:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2\pi L n}{c} \cdot K_d(\omega) \left(\frac{di}{dt} \right) \quad (2.16)$$

onde di/dt é o declive da rampa de corrente e $K_d(\omega)$ é um factor de conversão entre a corrente e a frequência de emissão do laser. O sinal detectado possui um espectro composto por componentes, múltiplas da frequência de modulação, sendo que a

distribuição de potência entre harmónicos depende da excursão de fase durante um período da rampa. É possível concentrar a maior parte da potência no harmónico de ordem m , ajustando o declive da rampa de forma a adquirir m franjas, durante cada período T , ou seja, $(d\phi/dt) \cdot T = 2m\pi$. Nesta situação, o sinal lido no fotodetector é dado por [8] [33]:

$$S = A + B \cos(\omega_m t + \phi_d) \quad (2.17)$$

Na Figura 2.22 apresenta-se o esquema da aplicação da técnica de detecção de sinal pseudo-heteródina, quando adquirido uma franja da resposta espectral do sensor.

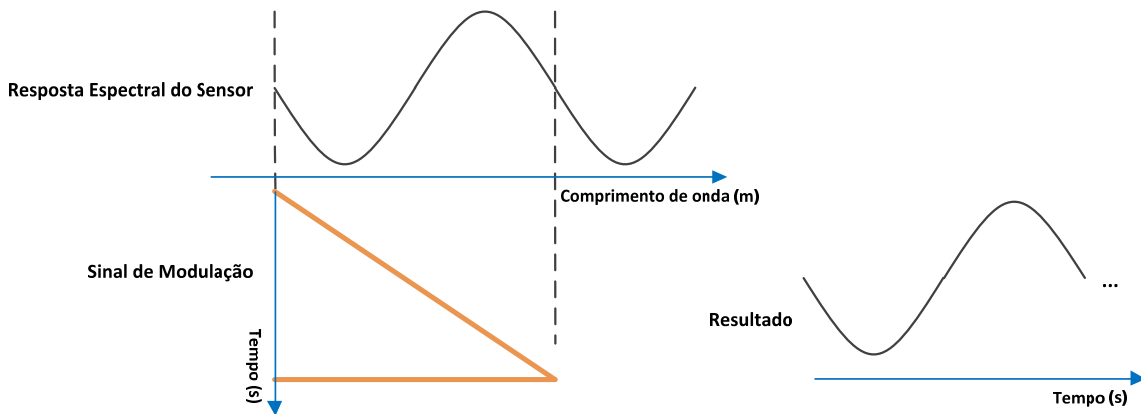


Figura 2.22 - Esquema da técnica de detecção de sinal pseudo-heteródina

Como vantagem, esta técnica é simples de implementar e é fácil retirar a fase da portadora. Em contrapartida, devido à existência do *flyback* finito, isto é, um tempo de caimento de amplitude da onda em dente de serra finito, a fase recuperada será $\phi_d + \phi_r$, onde ϕ_r é o erro de fase devido ao *flyback*.

O artigo da referência [34] efectua uma análise do efeito do *flyback* na fase do sinal recuperado. Na Figura 2.23 (a) apresenta-se o sinal recuperado, distorcido pelo efeito do *flyback* (u) e na Figura 2.23 (b) a fase obtida para diferentes valores de u , onde u é uma variável compreendida entre 0 e 1, relacionada com o tempo de caimento da amplitude da onda dente de serra. Pela Figura 2.23 (b) observa-se que o erro aumenta de acordo com o aumento do *flyback*, ou seja, com a diminuição do parâmetro u .

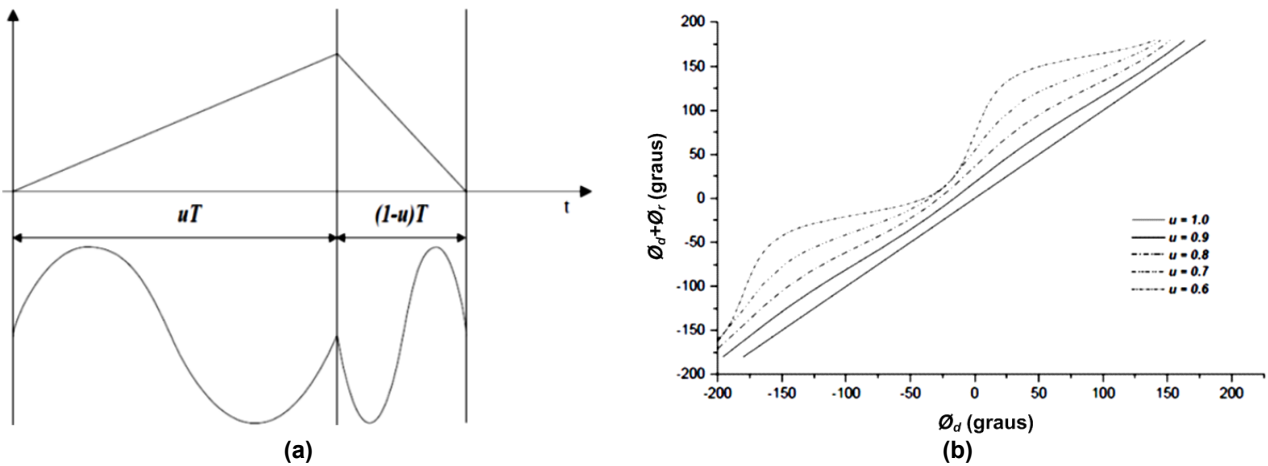


Figura 2.23 - (a) Sinal de modulação obtido contaminado com *flyback*; (b) Desvio de fase devido ao efeito de *flyback* [34]

2.6.2. Detecção heteródina

A técnica heteródina consiste em efectuar uma modulação sinusoidal da corrente do laser, originando o sinal da equação (2.18), após filtragem da componente DC do sinal medido no fotodetector:

$$S = A \cos(\phi_m \sin \omega_m t + \phi_d + \phi_r) \quad (2.18)$$

Nesta equação, $\phi_m \sin \omega_m t$ está directamente relacionada com a modulação de corrente aplicada ao laser, ϕ_m relaciona-se com a amplitude de modulação A_m , ϕ_d é a variação de fase relacionada com a diferença de percurso óptico entre as duas ondas e ϕ_r é o ruído de fase.

Na Figura 2.24 apresenta-se o esquema da aplicação da técnica de detecção de sinal heteródina, quando adquirido uma franja da resposta espectral do sensor.

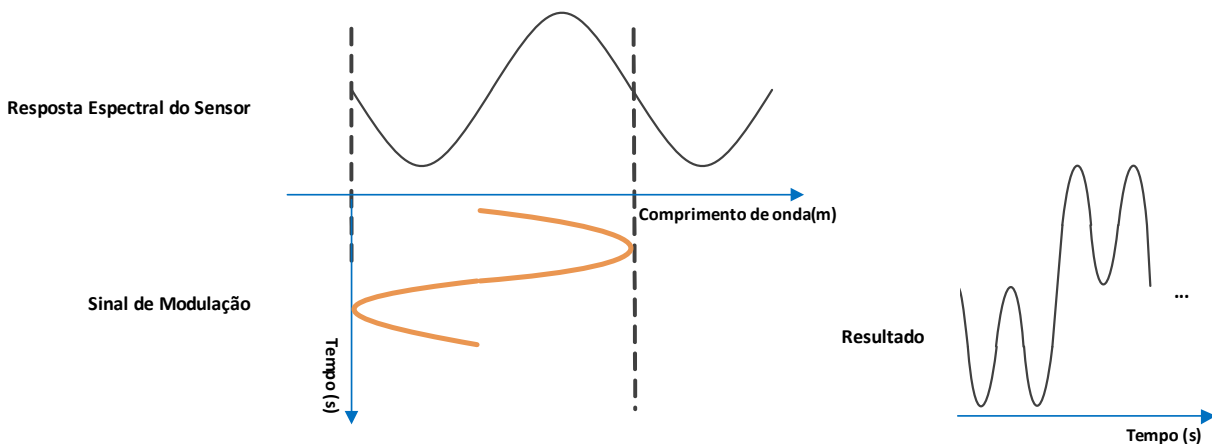


Figura 2.24 - Esquema da técnica de detecção de sinal heteródina

O sinal da equação (2.18) pode ser expresso em termos de funções de *Bessel*, tal que:

$$S = A \begin{cases} \cos(\phi_d + \phi_r) \left[J_0(\phi_m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(A_m) \cos(2n\omega_m t) \right] \\ -\sin(\phi_d + \phi_r) \left[2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\phi_m) \sin((2n+1)\omega_m t) \right] \end{cases} \quad (2.19)$$

Para recuperar a fase $\phi_d + \phi_r$, é necessário recorrer a esquemas de desmodulação complexos de forma a obter uma portadora sinusoidal, cuja fase contenha a informação do mensurando [8].

Esquema heteródino sintético 1

O diagrama de blocos da Figura 2.25 apresenta uma técnica para a recuperação da portadora, apresentada no artigo da referência [33].

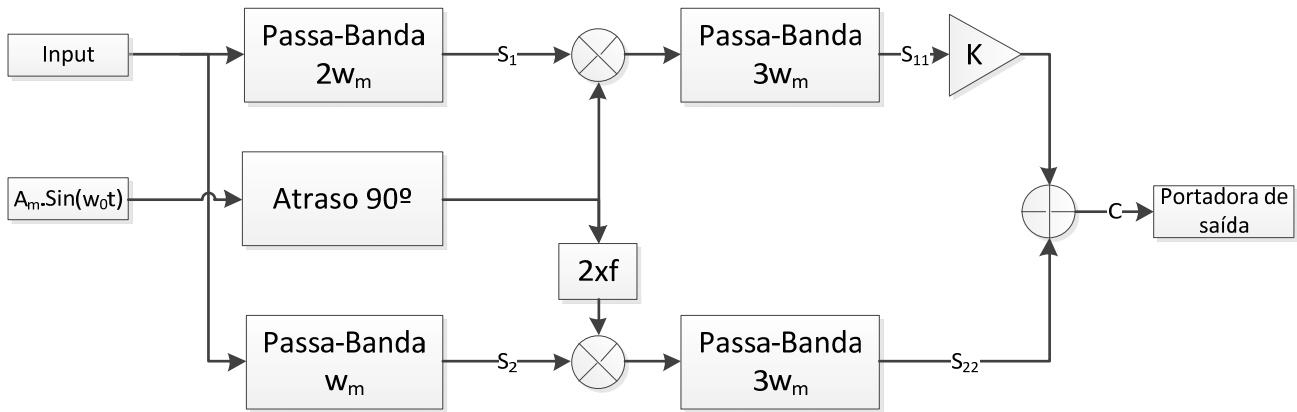


Figura 2.25 - Diagrama de blocos do esquema heteródino sintético 1

Após filtragem passa-banda do sinal de entrada, no segundo e primeiro harmónico, obtém-se:

$$\begin{aligned} S_1 &= A \cos(\phi_d + \phi_r) J_2(\phi_m) \cos 2\omega_m t \\ S_2 &= -A \sin(\phi_d + \phi_r) J_1(\phi_m) \sin \omega_m t \end{aligned} \quad (2.20)$$

A partir destas duas expressões pretende-se gerar uma portadora de amplitude constante, para tal, as componentes ω_m e $2\omega_m$ são convertidas para uma frequência $3\omega_m$ e filtradas

$$\begin{aligned} S_{11} &= A_m A J_2(\phi_m) \cos 3\omega_m t \cos(\phi_d + \phi_r) \\ S_{22} &= -A_m A J_1(\phi_m) \sin 3\omega_m t \sin(\phi_d + \phi_r) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Pela relação trigonométrica apresentada em (2.22):

$$A \cos \alpha \cos \beta + A \sin \alpha \sin \beta = A \cos(\alpha - \beta) \quad (2.22)$$

e efectuando a soma de KS_{11} e S_{22} , com $k=J_2(\varnothing_m)/J_1(\varnothing_m)$, obtém-se

$$C = A_m A J_1(\phi_m) \cos(3\omega_m t - \phi_d - \phi_r) \quad (2.23)$$

Pela equação (2.23) observa-se que a informação de fase é incluída numa portadora cuja frequência é três vezes a frequência do sinal de modulação.

Esquema heteródino sintético 2

Na Figura 2.26 encontra-se um outro esquema de geração de portadora, mais simples que o anterior, apresentado em [35].

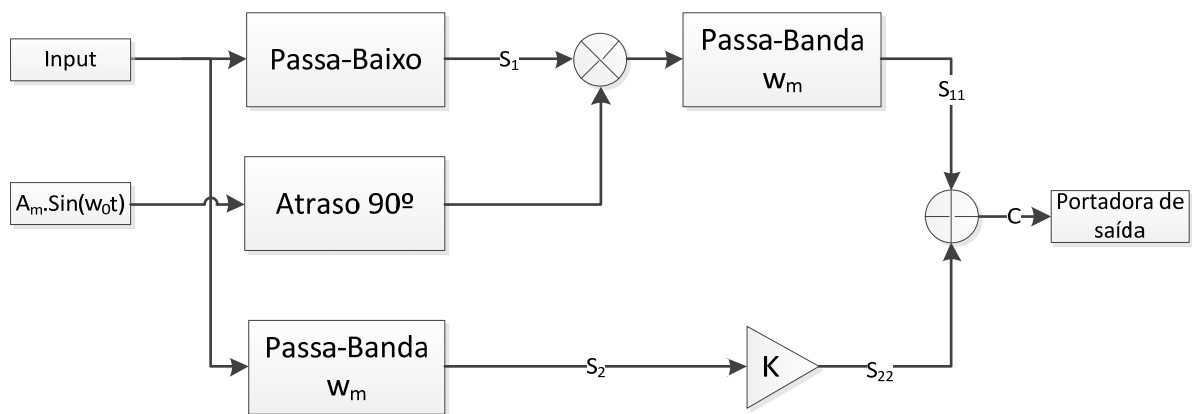


Figura 2.26 - Diagrama de blocos do esquema heteródino sintético 2

Definido o filtro passa-baixo com uma frequência de corte inferior a ω_m e o filtro passa-banda centrado em ω_m obtém-se:

$$S_1 = A J_0(A_m) \cos(\phi_d + \phi_r) \quad (2.24)$$

$$S_2 = -2A J_1(A_m) \sin(\phi_d + \phi_r) \sin \omega_m t$$

e

$$S_{11} = A_m A J_0(\phi_m) \cos(\phi_d + \phi_r) \cos \omega_m t \quad (2.25)$$

$$S_{22} = -2K A J_1(\phi_m) \sin(\phi_d + \phi_r) \sin \omega_m t$$

Com $K=A_m J_0(\varnothing_m)/2J_1(\varnothing_m)$ e somando os dois sinais anteriores, chega-se a:

$$C = A_m A J_0(\phi_m) \cos(\omega_m t + \phi_d + \phi_r) \quad (2.26)$$

Ao contrário do esquema apresentado anteriormente, a informação de fase é incluída numa portadora cuja frequência é igual à de modulação.

Esquema heteródino sintético 3

A Figura 2.27 apresenta outro diagrama de blocos de um esquema de geração de portadora, apresentado no artigo da referência [36].

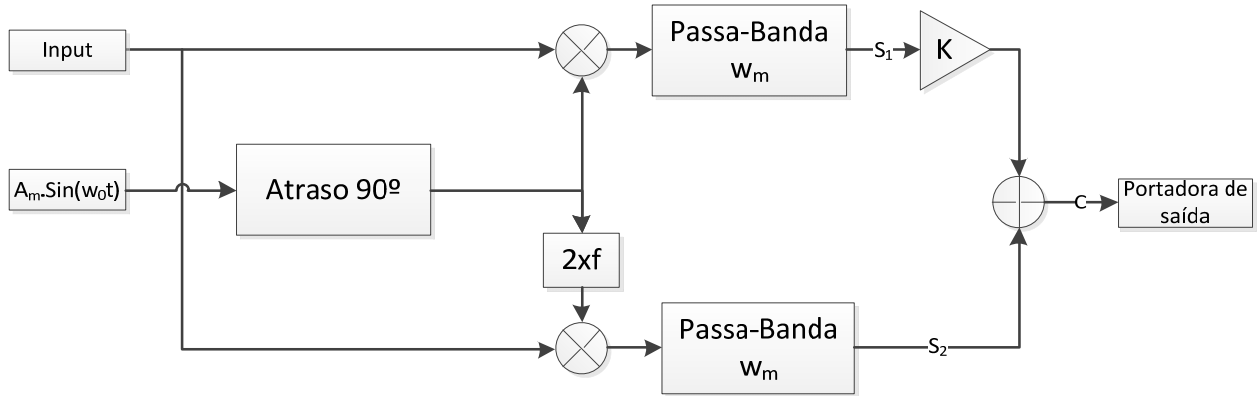


Figura 2.27 - Diagrama de blocos do esquema heteródino sintético 3

Para um sinal à entrada do diagrama de blocos da Figura 2.27 dado por:

$$S = A \cos(\phi_m \cos \omega_m t + \phi_d + \phi_r) \quad (2.27)$$

e tendo em conta a relação trigonométrica $\cos \alpha \cos \beta = 0,5[\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$, a equação anterior pode ser expressa decomposta em funções de Bessel:

$$S \approx A \left\{ \begin{array}{l} -J_1(A_m) \sin(\phi_d + \phi_r) - J_2(A_m) \cos(\omega_m t) \cos(\phi_d + \phi_r) \\ + (J_3(A_m) - J_1(A_m)) \cos(2\omega_m t) \sin(\phi_d + \phi_r) + \dots \end{array} \right\} \quad (2.28)$$

Após a passagem pelos filtros passa-banda obtém-se:

$$\begin{aligned} S_1 &\approx -A_m A J_2(A_m) \cos \omega_m t \cos(\phi_d + \phi_r) \\ S_2 &\approx A_m A (J_3(A_m) - J_1(A_m)) \sin \omega_m t \sin(\phi_d + \phi_r) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Com $K = (J_3(\emptyset_m) - J_1(\emptyset_m)) / J_2(\emptyset_m)$, chega-se a

$$C \approx A_m A (J_3(A_m) - J_1(A_m)) \cos(\omega_m t - \phi_d - \phi_r) \quad (2.30)$$

Tal como no caso anterior, a informação de fase encontra-se numa portadora com frequência igual à frequência de modulação.

2.7. Sistema de interrogação

Para a interrogação de cabeças sensoras em fibra óptica sem a utilização de interferómetros de leitura é necessário utilizar uma fonte muito coerente, nomeadamente um laser DFB porque este tipo de laser possui uma risca espectral, com uma largura de banda inferior a 0,1 pm [37] [38].

O ajustamento do comprimento de onda de emissão de um laser pode ser realizado através de uma variação da corrente ou da temperatura. Caso se pretenda efectuar uma modulação do laser, é preferível efectuar uma modulação de corrente, em vez de uma modulação da temperatura, pois a primeira permite modulações muito mais rápidas. Tipicamente, o controlador de temperatura fixa o comprimento de onda central, e através da corrente é possível aumentar ou diminuir o comprimento de onda, assim como a potência de emissão.

Relativamente aos sensores cuja resposta espectral é vista em reflexão, como é o caso das redes de *Bragg* e dos interferómetros formados por cavidades entre redes de *Bragg*, é possível utilizar um sistema de interrogação como o apresentado na Figura 2.28 [39]. Neste caso, o laser é ajustado em temperatura, para que o seu comprimento de onda se situe na gama de comprimentos de onda reflectidos pelo sensor, e posteriormente é efectuada uma modulação do comprimento de onda através da modulação da corrente.

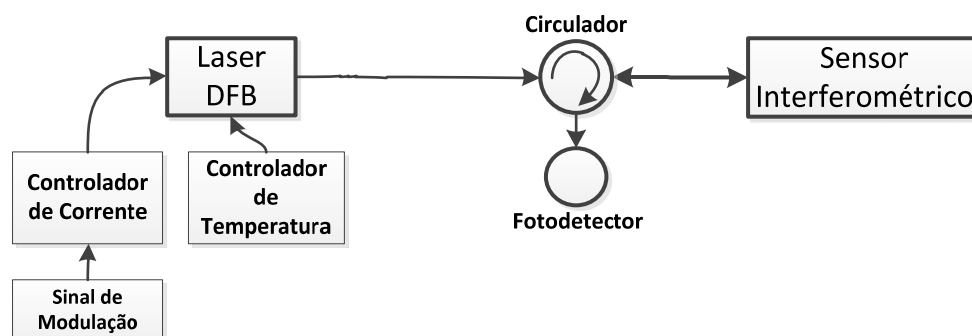


Figura 2.28 - Sistema de interrogação de sensores em reflexão [39]

Os sensores em fibra óptica, e em particular os interferómetros, são extremamente sensíveis a variações do meio externo e por vezes pode ser necessário recorrer a uma implementação de um sistema diferencial, tal como o apresentado na Figura 2.29, para eliminar possíveis variações induzidas por flutuações de temperatura e vibrações ao longo do tempo. Para tal, são utilizados dois sensores idênticos, sendo um deles exposto ao

mensurando e o outro o mais próximo possível do primeiro, mas isolado do mensurando [40].

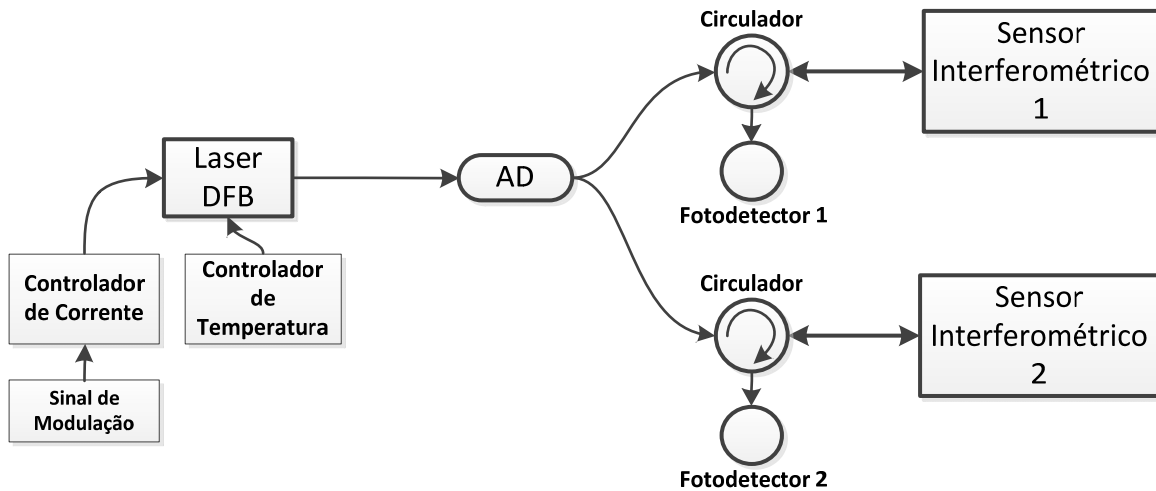


Figura 2.29 - Sistema de interrogação simultânea de dois sensores em reflexão [39] [40]

2.8. Instrumentação virtual

A evolução do PC (*Personal Computer*) nos últimos 20 anos permitiu uma revolução na instrumentação, medição e automação. Como resultado, surgiu a instrumentação virtual, que oferece vários benefícios, nomeadamente um aumento da produtividade, precisão e desempenho.

Um instrumento virtual consiste num computador ou numa estação de trabalho com um *software* e *hardware*, como por exemplo placas *plug-in* e *drivers*, que em conjunto desempenham as funções de um instrumento tradicional. Os instrumentos virtuais representam uma transformação dos sistemas de instrumentação tradicionais, que são focados em *hardware*, para sistemas centrados em *software* que aproveitam o poder computacional, as capacidades de exibição gráfica e as funcionalidades de conectividade dos PCs [41].

2.8.1. Diagrama de blocos num instrumento virtual

Na Figura 2.30 apresenta-se um diagrama de blocos com todos os componentes necessários num sistema de controlo que emprega instrumentação virtual. O primeiro componente é o sensor que produz um sinal eléctrico em função do mensurando. Se o parâmetro a ser medido não é eléctrico, é necessário incorporar um transdutor. Como exemplo, temos os sensores em fibra óptica nos quais o sinal é recebido sobre a forma de

luz e que necessitam de um transdutor, um fotodetector, que efectua a conversão do sinal do domínio óptico para o eléctrico. Posteriormente, é necessário um circuito de condicionamento, de forma a elevar o sinal a um nível que possa ser analisado. Para esse fim, podem ser utilizados amplificadores, linearizadores, filtros e rectificadores. Em seguida é necessário empregar um ADC (Conversor Analógico Digital) para permitir que os dados sejam convertidos para o domínio digital, para posterior processamento.

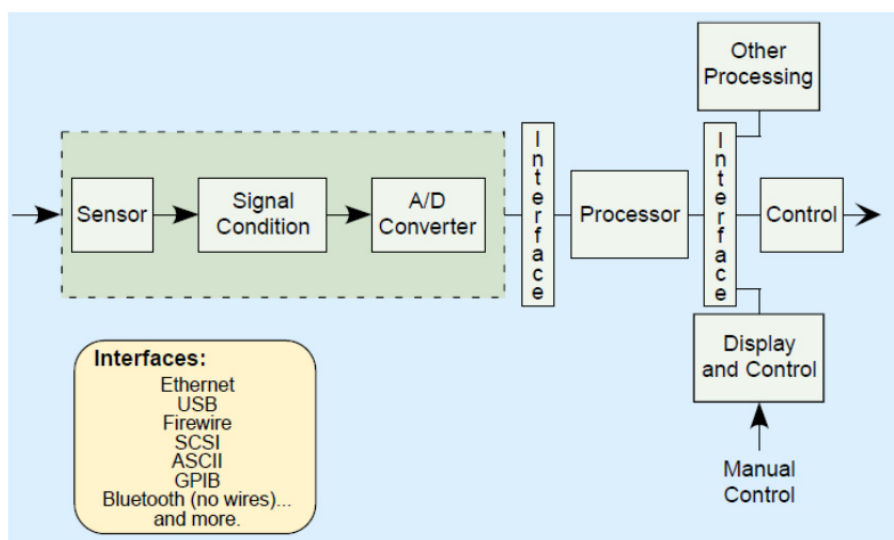


Figura 2.30 - Esquema de um sistema que emprega instrumentação virtual [42]

Uma vez que os dados estejam em formato digital, podem ser armazenados, processados, comparados ou manipulados. Todas estas operações de processamento podem ser efectuadas nos actuais computadores, e na maior parte dos casos a sua velocidade é mais do que suficiente para satisfazer os requisitos. Como interfaces entre o instrumento e o computador têm-se: RS 232, GPIB, USB, Ethernet, entre outros [42].

2.8.2. Instrumentação virtual e instrumentação tradicional

Os instrumentos tradicionais, como os osciloscópios e geradores de sinais, são caros e apenas desempenham uma ou mais tarefas definidas pelo fabricante. Portanto, uma vez adquirido um equipamento destes não é possível a sua expansão ou personalização. Por outro lado os instrumentos virtuais, uma vez que são baseados em PCs e *software* permitem: uma grande flexibilidade de configuração do instrumento, adaptação do mesmo de acordo com as necessidades, grandes capacidades de armazenamento, manipulações complexas, apresentação gráfica de fácil compreensão, portabilidade, grande variedade de *hardware* para aquisição de dados, menores custos e o desenvolvimento de aplicações

distribuídas, em que as tarefas computacionais são distribuídas por vários computadores [41].

2.8.3. LabVIEW

O LabVIEW é uma ferramenta poderosa que pode ser utilizada no desenvolvimento de aplicações de instrumentação virtual. Esta ferramenta utiliza uma linguagem de programação gráfica desenvolvida pela NI (*National Instruments*), cuja natureza gráfica torna-a ideal para teste e mediação (T&M), automação, controlo de instrumentos, aquisição de dados e aplicações para análise de dados. Isto resulta em aumentos significativos de produtividade relativamente às linguagens de programação convencionais [43].

Com esta ferramenta é possível operar o programa de instrumentação, controlar *hardware*, analisar os dados adquiridos e exibir resultados.

As principais vantagens deste *software* são [41]:

- **Conectividade e controlo de instrumentos** - Inclui um grande número de bibliotecas para integração com instrumentos tradicionais, dispositivos de aquisição de dados, GPIB/IEEE 488, RS-232, entre outros.
- **Ambiente aberto** - Compatibilidade de um grande número de padrões comerciais e outras ferramentas, como por exemplo o MATLAB, *Visual Studio* e C++. Refira-se que muitos fabricantes de *hardware* e *software* disponibilizam bibliotecas e *drivers* de instrumentação para o LabVIEW.
- **Redução de custo** - Possibilidade de utilizar um computador convencional com LabVIEW para inúmeras aplicações e propósitos.
- **Múltiplas Plataformas** - Compatibilidade com Windows, Mac e Linux.

O LabVIEW relativamente às linguagens de programação convencionais permite maiores ganhos de produtividade porque [44]:

- **É de fácil aprendizagem** - Possibilita um conjunto de ferramentas de interface e operação que encapsula funcionalidades previamente implementadas. O ambiente de desenvolvimento baseia-se praticamente na selecção de blocos de funções.
- **É de fácil utilização** - Facilidade de implementação de funções e criação de multitarefas com execução paralela.

- **Funcionalidade completa** - Com este *software* o utilizador pode facilmente satisfazer os requisitos de qualquer aplicação de instrumentação.
- **Modularidade** - Um projecto de grandes dimensões pode facilmente ser dividido em sub-blocos de modo a facilitar a compreensão e manipulação de programas mais complexos.

Os programas gráficos desenvolvidos em LabVIEW são designados por instrumentos virtuais (VIs), executados com base no conceito de programação de fluxo de dados, ou seja, a execução de um bloco ou componente gráfico só é executado após os dados estarem disponíveis em todas as suas entradas. Este tipo de programação permite que o programa execute múltiplas operações em paralelo porque a sua execução apenas é determinada pelo fluxo de dados e não por linhas de código sequenciais [45].

3. Interferómetros modais

Após a apresentação do estado da arte dos interferómetros modais, neste capítulo pretende-se descrever os dois interferómetros modais desenvolvidos, caracterizando a sua resposta em função do índice de refração externo e da temperatura, através da utilização do OSA, fazendo uma comparação com os interferómetros apresentados no estado da arte. De acordo com a divisão efectuada no estado da arte, os interferómetros modais desenvolvidos enquadram-se no grupo dos MMI.

3.1. Interferómetro modal com fibra SM 380

Fabricou-se um interferómetro modal com um segmento de fibra SM 380 entre duas fibras SMF-28 [46]. A fibra SM 380 possui um diâmetro do núcleo e da bainha de 5 μm e 65 μm , respectivamente, com um comprimento de onda de corte de $\lambda_c=380 \text{ nm}$. Devido a esta fibra possuir um diâmetro do núcleo inferior à fibra SMF-28, transmite grande parte da luz para a bainha, que por sua vez entra em contacto com o meio exterior. No segmento composto por essa fibra ocorrem algumas perdas de luz para o exterior e apenas existirá recombinação dos modos de bainha para o do núcleo, na interface entre a fibra SM 380 e a SMF-28. Explorando esta propriedade, desenvolveu-se um sensor sensível a variações do índice de refração.

A Figura 3.1 (a) apresenta a cabeça sensora fabricada com um segmento de fibra de SM 380 de 20 mm e na Figura 3.1 (b) o aspecto fusão entre as fibras SMF-28 e SM 380.

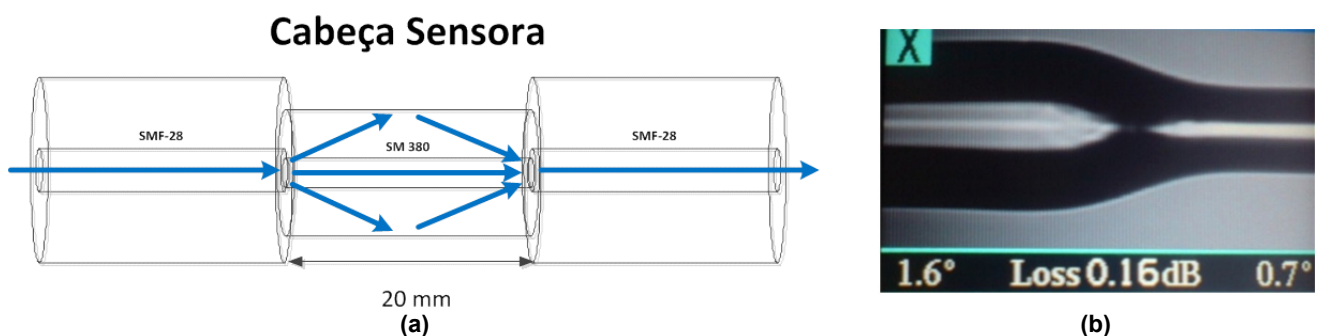


Figura 3.1 - (a) Cabeça sensora com utilização de uma fibra SM 380; (b) Fusão entre uma fibra SMF-28 e SM 380

O comprimento de 20 mm para a região sensora foi escolhido tendo em conta um compromisso entre a sensibilidade, o tamanho do sensor e o comprimento de onda da ressonância. Com o aumento do segmento sensor, obtém-se maior sensibilidade. De

acordo com o comprimento e o resultado das fusões entre a fibra SM 380 e SMF-28, o espectro do sensor é alterado, acoplando diferentes modos de bainha, e originado diferentes ressonâncias.

A Figura 3.2 apresenta o espectro normalizado da cabeça sensora desenvolvida, quando mergulhada em água a uma temperatura de 26,9 °C. Observa-se uma ressonância de 4 dB em 1543,4 nm, com uma largura espectral a -3 dB de 7,8 nm. O espectro foi obtido com o OSA ANDO AQ-6315B, com resolução de 0,2 nm, e uma janela de visualização de 100 nm. A normalização foi obtida através da divisão do espectro em transmissão do sensor pelo espectro da fonte óptica. A fonte óptica utilizada possuía uma largura de banda de 100 nm, centrada em 1580 nm.

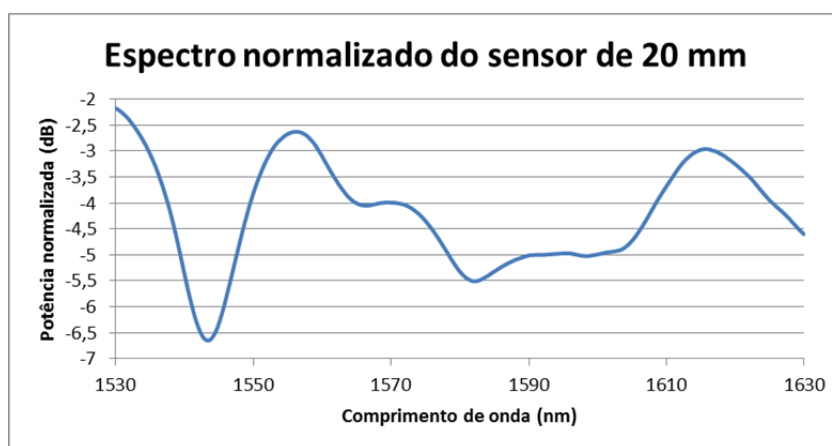


Figura 3.2 - Espectro da cabeça sensora de 20 mm mergulhada em água

3.1.1. Caracterização em função do índice de refração externo

Para a caracterização em função do índice de refração externo do sensor, era possível utilizar soluções de água e sal, água com glicerol e água com etilenoglicol. A mistura de água com glicóis gera uma reacção exotérmica, que provoca variações de temperatura, sendo que nos testes efectuados, verificou-se que os glicóis criavam depósito na superfície do sensor, não sendo possível retirá-los por completo, alterando assim a sensibilidade do sensor após cada medida. Para evitar estes problemas, recorreu-se a soluções salinas que mantêm uma temperatura constante, apesar de a gama de variação possível ser reduzida em comparação com as outras alternativas.

Na Figura 3.3 (a) encontra-se representada a montagem utilizada para efectuar os testes de variação do índice de refração e na Figura 3.3 (b) é visível a câmara de Teflon com dois capilares, um em cada extremidade para permitir a passagem da fibra sensora,

que fica em contacto com o líquido. Entre cada solução de água e sal foram efectuadas duas limpezas com água destilada, para remover pequenas partículas de sal que podiam eventualmente depositar-se no sensor ou nas paredes da câmara.

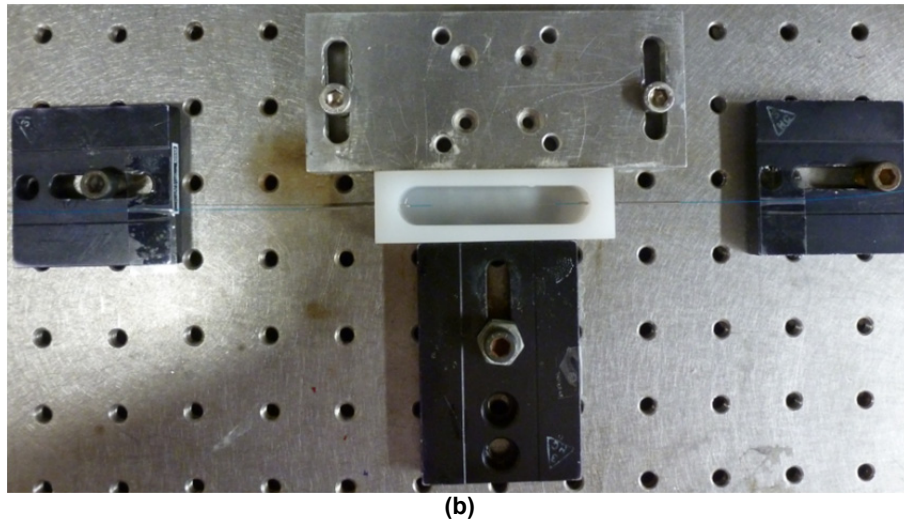
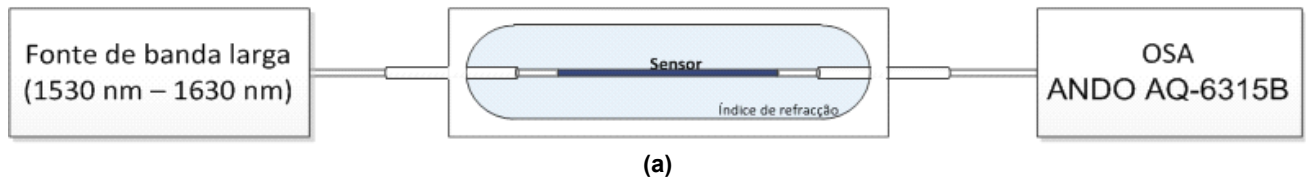


Figura 3.3 - (a) Esquema da montagem utilizada para efectuar os testes de variação do índice de refração; (b) Foto da câmara de Teflon

A Figura 3.4 (a) apresenta a variação do espectro da Figura 3.2, para três valores de índice de refração externos distintos, com uma temperatura constante de 26,9 °C, onde se observa um deslocamento para comprimentos de onda superiores do espectro com o aumento do índice de refração externo. Na Figura 3.4 (b) mostram-se os resultados obtidos em duas experiências independentes realizadas com o sensor, nas quais se obteve uma sensibilidade média de $282,64 \text{ nm/RIU}$, para índices de refração entre 1,335 e 1,349. A medição do índice de refração de cada líquido foi realizada com recurso a um refractómetro que possui um erro de 0,00025 RIU.

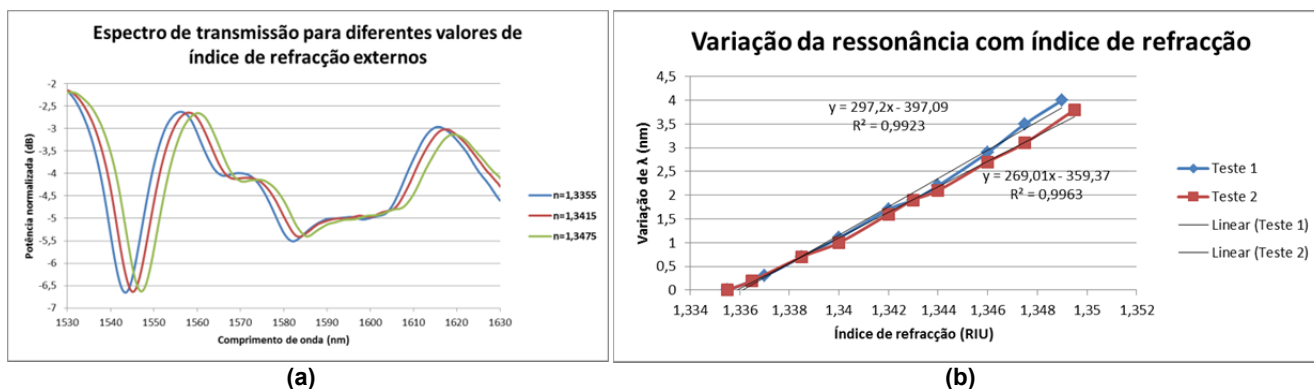


Figura 3.4 - (a) Espectro em transmissão do sensor para três valores de índice de refração externo distintos; (b) Pontos experimentais obtidos em duas experiências independentes, para a cabeça sensora de 20 mm

3.1.2. Caracterização em função da temperatura

Para o mesmo sensor, efectuaram-se testes de variação da temperatura com a câmara da Figura 3.5, na qual se colocou água quente ($n=1,335$) e à medida que esta arrefecia foi-se registando a correspondente variação da ressonância. Esta câmara foi escolhida pelo facto de ser possível introduzir uma maior quantidade de água e por possuir uma tampa, permitindo variações de temperatura muito mais lentas do que a câmara utilizada nos testes de variação do índice de refração.

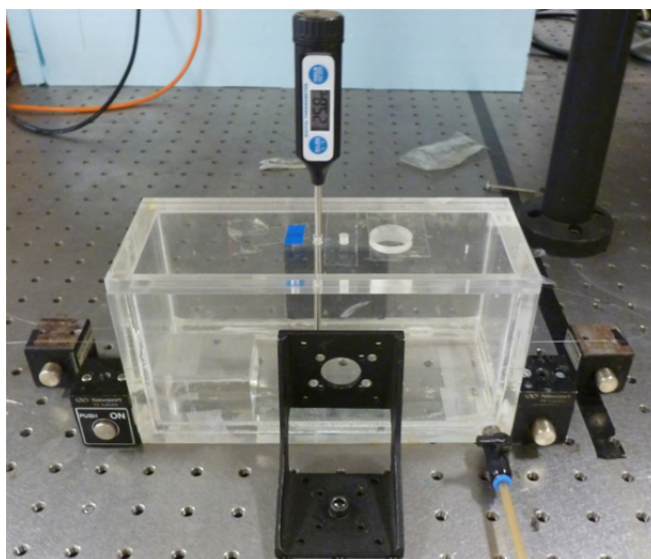


Figura 3.5 - Câmara utilizada nos testes de temperatura

Na Figura 3.6 (a) apresenta-se o espectro do sensor obtido para água a três diferentes temperaturas. Nos testes de temperatura, efectuados entre $57,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $33\text{ }^{\circ}\text{C}$, obteve-se uma sensibilidade média de $120\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, como é demonstrado na Figura 3.6 (b).

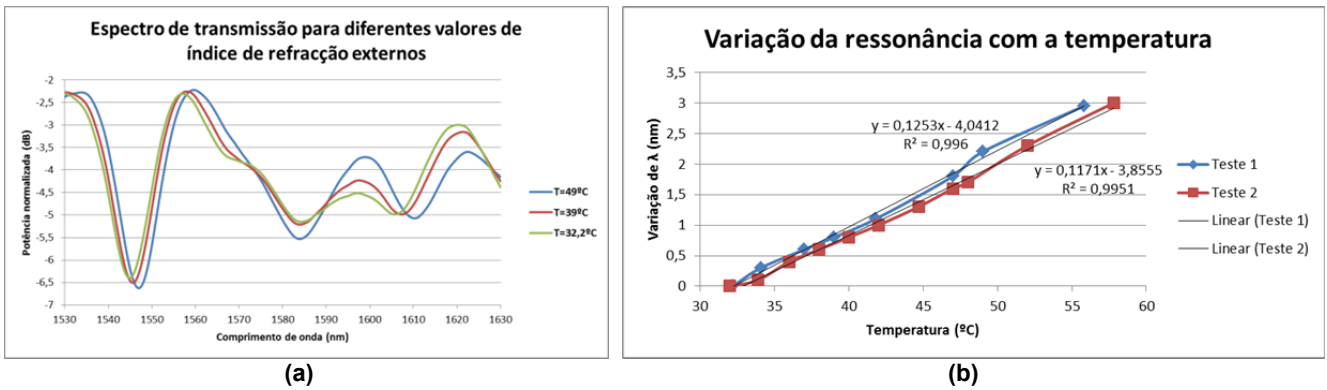


Figura 3.6 - Espectro em transmissão do sensor para três valores de temperatura; (b) Variação da ressonância com a temperatura, com pontos experimentais obtidos em duas experiências independentes para a cabeça sensora de 20 mm

Segundo a referência [47], o índice de refração na água varia 2×10^{-5} RIU/°C, o que equivale a uma mudança de índice de refração de 0,0005 RIU, ou seja, a um deslocamento de 140 pm entre 57,8 °C e 33 °C. Portanto, a sensibilidade real será $120-5,65 = 114,45$ pm/°C.

Medição simultânea de índice de refração e temperatura

No caso de um sensor de índice de refração pretende-se que este seja insensível a variações de temperatura ou que estas variações possam ser compensadas. Uma forma de efectuar a compensação é apresentada no artigo da referência [21] e consiste na utilização de uma FBG para se obter o valor da temperatura. Neste caso, o sensor apresentado na Figura 3.1 (a) ficaria com a configuração da Figura 3.7. Observando a resposta espectral do sensor em transmissão, a posição da FBG não é importante, mas esta deverá estar próxima do sensor modal, e o seu comprimento de onda de Bragg necessitará de ser diferente do comprimento de onda da ressonância multimodal.

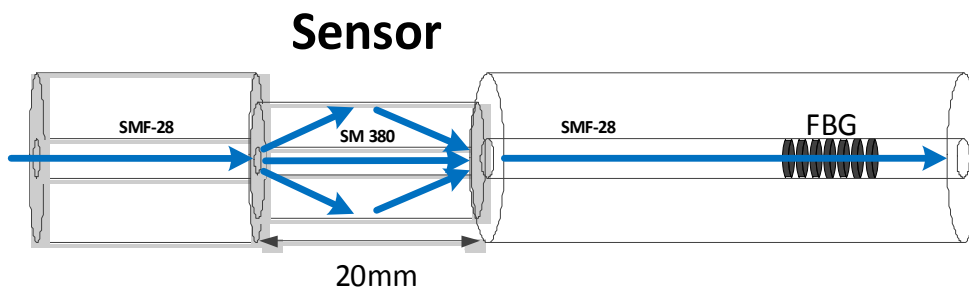


Figura 3.7 - Cabeça sensora com utilização de uma fibra SM 380 e com uma FBG para compensação de temperatura

Para a medição multi-parâmetro o seguinte esquema de equações permite obter as variações de índice de refração (Δn) e de temperatura (ΔT):

$$\begin{pmatrix} \lambda_{FBG} \\ \lambda_{sensor} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{\lambda_{FBG}, \Delta n} & K_{\lambda_{FBG}, \Delta T} \\ K_{\lambda_{sensor}, \Delta n} & K_{\lambda_{sensor}, \Delta T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

onde $K_{\lambda_{FBG}, \Delta i}$ representa a sensibilidade em comprimento de onda da FBG em relação à variação do índice de refração ou temperatura e $K_{\lambda_{sensor}, \Delta i}$ a sensibilidade em comprimento de onda da ressonância do sensor, em relação à variação do índice de refração ou da temperatura.

Substituindo as sensibilidades obtidas anteriormente na equação (3.1) e tendo em conta que a sensibilidade da rede de Bragg à temperatura é de $11 \text{ pm}/\mu\epsilon$ [21], obtém-se:

$$\begin{pmatrix} \lambda_{FBG} \\ \lambda_{sensor} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0,011 \\ 282 & 0,114 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

3.2. Interferómetro modal com fibra sem núcleo

Foi também testado um sensor idêntico ao anterior mas com uma secção de fibra sem núcleo com um diâmetro de $133 \mu\text{m}$, entre duas fibras SMF-28, como apresentado na Figura 3.8. A fibra sem núcleo é constituída por sílica pura e quando a luz que viaja na fibra SMF-28 encontra esta fibra, dispersa-se e entra em contacto com o meio exterior. Uma parte da luz é perdida para o meio exterior, sendo que a interferência resulta dos múltiplos modos de bainha que são reacoplados para a fibra SMF-28.

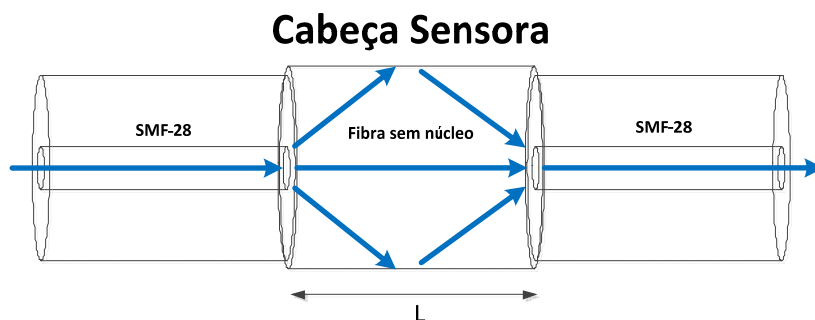


Figura 3.8 - Cabeça sensora com fibra sem núcleo

Desenvolveram-se várias cabeças sensores, tendo estas diferentes comprimentos, desde os 30 mm a 2 mm ($\pm 0,5$ mm). Foram obtidos os espectros apresentados na Figura 3.9, com o sensor dentro de água, cujo índice de refração é de 1,335. O valor de $\pm 0,5$ mm é definido pelo erro da régua, utilizada para marcar o tamanho das cabeças sensoras.

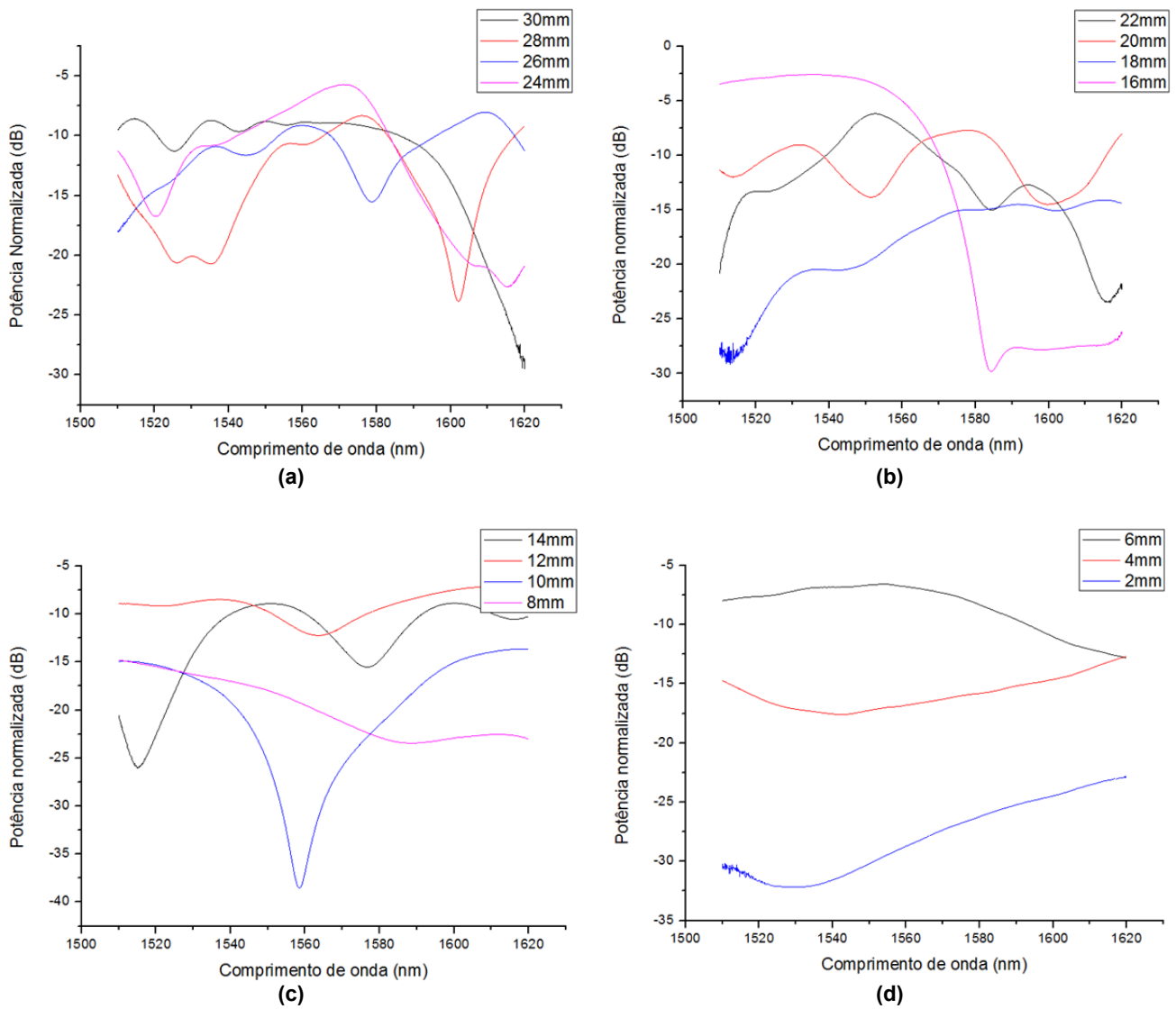


Figura 3.9 - Espectros de sensores modais com segmentos de fibra sem núcleo de 30 mm a 2 mm

Observando-se os espectros da Figura 3.9, verifica-se que o sensor com a secção de fibra sem núcleo de 10 mm aparenta ser o melhor, porque exibe a maior ressonância, com 23 dB de profundidade.

Desenvolveu-se uma nova cabeça sensora com um comprimento de $10 \pm 0,05$ mm e obteve-se o espectro da Figura 3.10, com o sensor mergulhado em água a uma temperatura de $27,6$ °C. A ressonância possui uma largura de banda de 50 nm, centrada nos 1592,17 nm e possui uma atenuação de 18,5 dB.

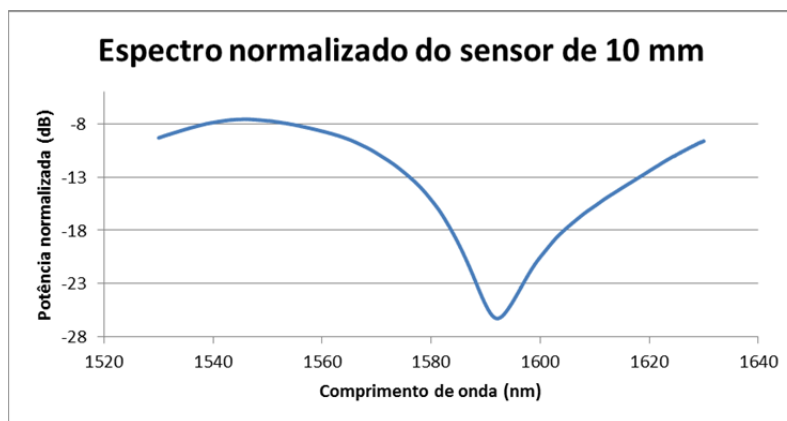


Figura 3.10 - Espectro da cabeça sensora mergulhada em água, para a cabeça sensora de 10 mm

3.2.1. Caracterização em função do índice de refração externo

Na Figura 3.11 (a) apresenta-se o deslocamento do espectro do sensor para três valores distintos de índice de refração. Novamente, através da utilização de soluções salinas efectuaram-se dois testes independentes, à variação do índice de refração, nos quais se obteve uma sensibilidade média de $129,8 \text{ nm/RIU}$, como se observa na Figura 3.11 (b). Nestes testes utilizou-se o OSA ANDO AQ-6315B mas com uma resolução de 0,05 nm e com uma janela de visualização de 25 nm, uma vez que este sensor apresenta desvios de comprimento de onda menores que o anterior.

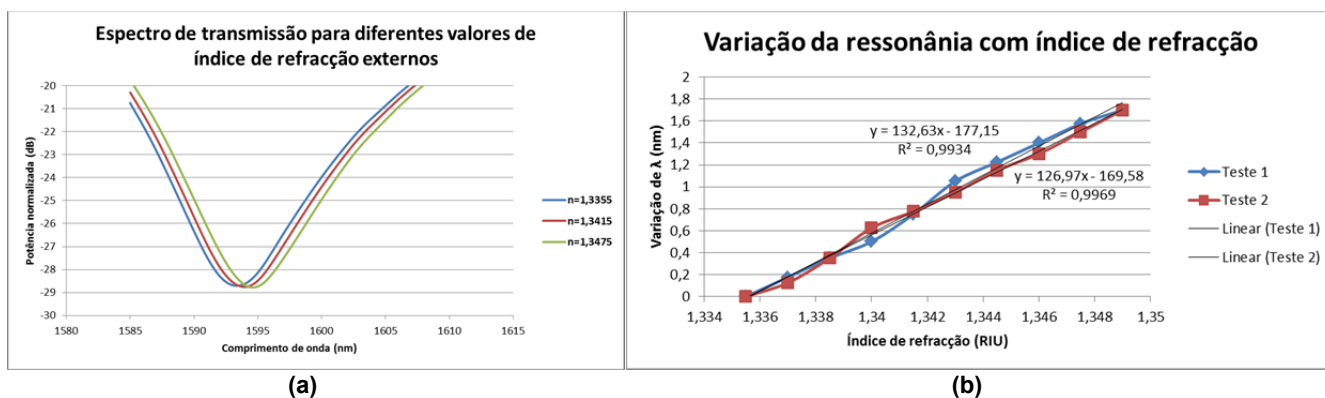


Figura 3.11 - (a) Espectro em transmissão do sensor para três valores de índice de refração e (b) variação da ressonância com o índice de refração, para a cabeça sensora de 10 mm

Relativamente à temperatura, este sensor não demonstrou desvios do comprimento de onda da ressonância, desde os 30 °C aos 60 °C.

3.3. Análise dos resultados

A Tabela 3.1 apresenta uma comparação entre os dois interferómetros modais desenvolvidos e alguns dos interferómetros apresentados no estado da arte que apresentam sensibilidade ao índice de refração e à temperatura.

Tabela 3.1 - Comparação da sensibilidade ao índice de refração e à temperatura entre diversos sensores

Sensor		Sensibilidade ao índice de refração (nm/RIU)	Sensibilidade à temperatura (nm/°C)
Implementados neste trabalho	SM 380	282 (1,335-1,349)	0,1140
	Sem Núcleo	129,8 (1,335-1,349)	0
Já Publicados	LPG (1)	176 (1,33-1,36)	S/Informação
	PCF (1)	99,37 (1,33-1,38) e 700 (1,38-1,46)	0,0030
	PCF (3)	S/Informação	-0,0071
	PCF+LPG (IG MOF)	S/Informação	0,0081
	PCF+LPG (PBG MOF)	0	0,0942
	MMI (2)	228,57 (1,3-1,44)	S/Informação

Pela tabela observa-se que o interferómetro SM 380 desenvolvido apresenta maior sensibilidade ao índice de refração e à temperatura, que os sensores modais apresentados na secção 1.3. No entanto, este interferómetro é de difícil reprodutibilidade, pois devido à utilização de um segmento de fibra de menor diâmetro em relação à SMF-28, o espectro resultante é muito dependente da qualidade do corte e das fusões efectuadas.

Relativamente ao interferómetro com fibra sem núcleo, apesar de este ser menos sensível ao índice de refração, apresenta uma grande vantagem, ou seja, é insensível à temperatura. Esta propriedade advém do facto da fibra sem núcleo ser constituída por sílica pura, ou seja, não possui dopagem de germânio como as fibras SMF *standard*.

Para estes sensores não foi possível empregar instrumentação virtual para controlar uma fonte óptica laser, porque apenas estavam disponíveis lasers DFBs cuja variação de comprimento de onda era de apenas ~600 pm, com comprimentos de onda de emissão de 1530 nm e 1571 nm. Por outro lado, e uma vez que o padrão de interferência observado não possui um padrão de franjas periódico, não era possível empregar as técnicas de detecção de sinal anteriormente apresentadas. Para implementar instrumentação virtual neste tipo de sensor, seria necessário um laser com uma excursão em comprimento de onda dos 1530 aos 1630 nm, sendo inicialmente necessária a detecção da posição da ressonância, após o que seria possível retirar a informação do mensurando.

4. Simulação de interferómetros de Fabry-Pérot

A instrumentação disponível no laboratório (laser DFB) permitia varrimentos espectrais numa banda muito estreita (~600 pm). Para uma grande parte dos interferómetros modais estudados seria necessário utilizar dispositivos muito longos (centenas de cm) para obter variações espectrais tão finas. Assim, neste trabalho optou-se por recorrer a redes de *Bragg* para se obter interferómetros com periodicidades espectrais sub nanométricas de forma bem controlada e assim estudar variados esquemas de interrogação que, com as devidas alterações na instrumentação (usando outro tipo de laser por exemplo) poderão ser usados nos interferómetros modais estudados. Após a descrição dos interferómetros Fabry-Pérot em fibra óptica e das técnicas de detecção de sinal no capítulo anterior, neste capítulo irá ser descrito o programa de simulação desenvolvido que permitiu o estudo de três tipos de sensores distintos, apresentando o espectro e as variações de fase esperadas quando eram aplicadas as várias técnicas de detecção de sinal.

4.1. Apresentação do programa

Desenvolveu-se um código em *Mathscript*¹ que calcula o espectro de três tipos de interferómetros de Fabry-Pérot com FBGs e espelhos de baixa reflectividade (4%), dois deles já foram apresentados na Figura 2.3 e outro é formado por duas FBGs e o fim da fibra, como ilustrado na Figura 4.1. As FBGs terão que possuir os mesmos comprimentos de onda de *Bragg*, para que exista interferência entre as ondas.

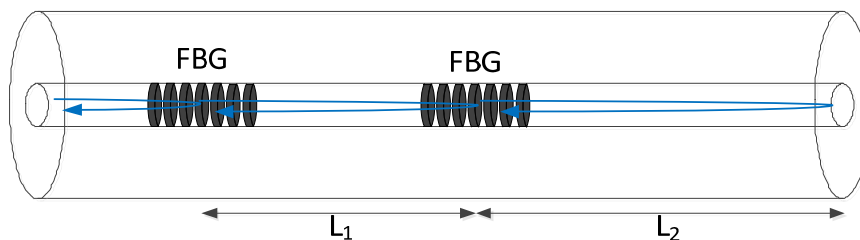


Figura 4.1 - Interferómetro formado por duas FBGs e o fim da fibra

Este último interferómetro possui a particularidade de ser constituído por três interferómetros principais, como demonstrado na Figura 4.2.

¹ Ver anexo A1

Neste caso a visibilidade dos segundo e terceiro interferómetros serão influenciadas pelo valor do índice de refração externo, sendo o padrão de interferência dado pela multiplicação dos três interferómetros.

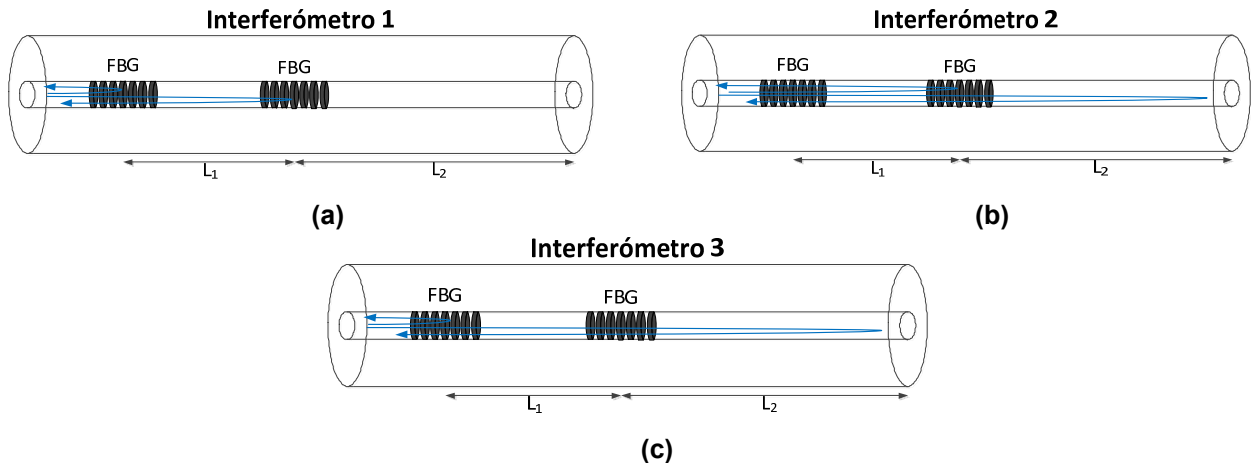


Figura 4.2 - Cabeça sensora em fibra óptica com representação dos três interferómetros predominantes: (a), (b) e (c)

Com base no código de geração de espectros desenvolvido em *Mathscript*², reutilizou-se o código já desenvolvido em LabVIEW, através da introdução de um bloco de *Mathscript*, e implementou-se o programa apresentado na Figura 4.3³, onde o gráfico *Cavity Spectrum* apresenta o espectro do interferómetro seleccionado em *Select Cavity*.

Para cada sensor, as entradas I_1 e I_2 definem os comprimentos dos interferómetros 1, 2 e 3, sendo o terceiro formado pelo conjunto da primeira e segunda cavidade. Na simulação considerou-se que a FBG é descrita por uma função gaussiana cuja largura de banda é definida pela entrada *FBG BW*, em picómetros e em que *FBG Center Wavelength* define o comprimento de onda central das FBGs.

Outra particularidade deste programa consiste na implementação dos esquemas de detecção de sinal pseudo-heteródino e heteródinos anteriormente apresentados, utilizado para interrogar um laser. Este laser pode ser modulado em corrente, por uma onda quadrada, triangular, sinusoidal ou dente de serra (com ou sem efeito de *flyback*), e para simplificar a análise, a sua potência é considerada constante apesar da variação da corrente. A largura de banda máxima de modulação é limitada pelo *Span* de 1 nm, e corresponde à gama de comprimentos de onda apresentada em *Cavity Spectrum*, podendo este valor ser alterado.

² Ver anexo A2

³ Ver anexos A3, A4, A5 e A6

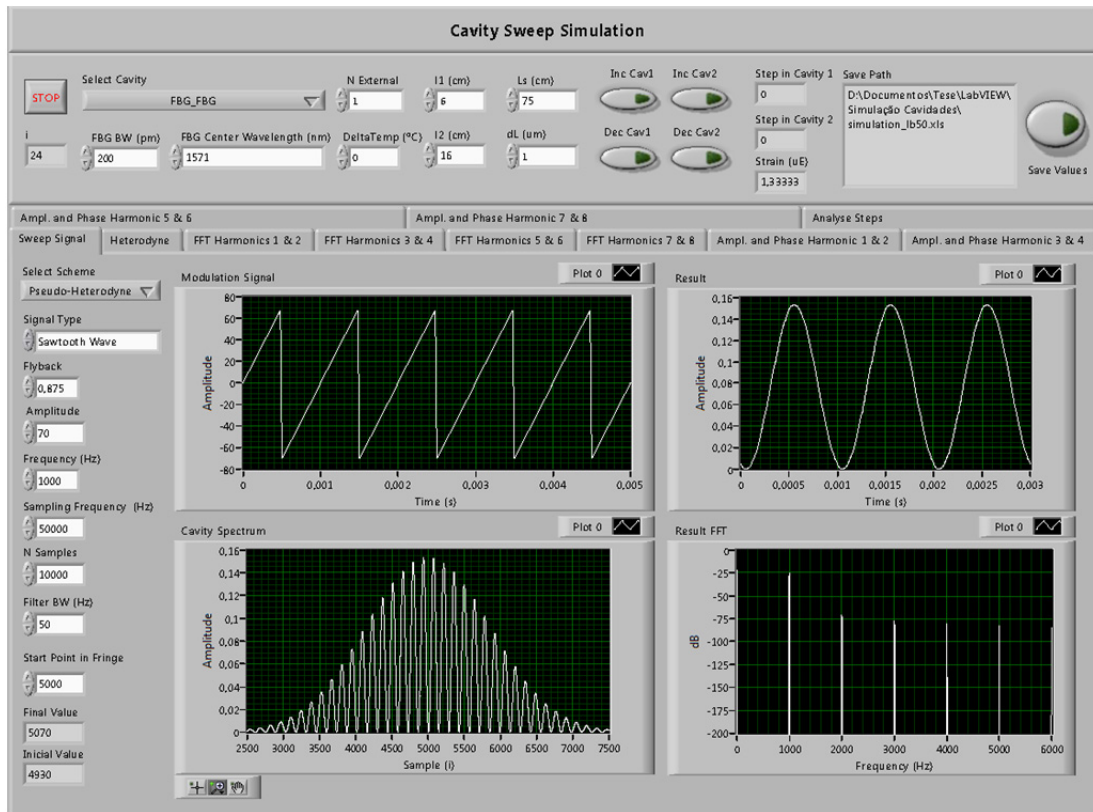


Figura 4.3 - Interface do programa de simulação de varrimento com o laser

A amplitude do sinal de modulação (*Modulation Signal*) define a amplitude de varrimento em comprimento de onda do laser e a entrada “*Start Point in Fringe*”, o comprimento de onda central do laser. A amplitude de varrimento é definida em termos de número de amostras, uma vez que o espectro do sensor é apresentado em função da posição da amostra no vector, como se observa no gráfico *Cavity Spectrum* da Figura 4.3. A amostra da posição i está relacionada com o comprimento de onda pela seguinte expressão:

$$\lambda_i = i \cdot \lambda_s + \lambda_{central} - \frac{Span}{2} \quad (4.1)$$

onde $\lambda_s = 10^{-4} \text{ nm}$ é a amostragem de comprimento de onda definida no programa, $\lambda_{central}$ o comprimento de onda central da FBG em nm e $Span = 1 \text{ nm}$.

Os botões *Inc Cav1/2* e *Dec Cav1/2* permitem aplicar incrementos/decrementos de estiramento (*Strain*, $\mu\epsilon$) às cavidades 1 e 2. O valor desses estiramentos depende da distância entre pontos de colagem (L_s) do sensor e do deslocamento aplicado (dL) a essa secção. Segundo o artigo da referência [48], o estiramento depende essencialmente da variação de comprimento da fibra. Portanto, a fase apenas será alterada devido à variação do comprimento da cavidade (ΔL_{cav}), de acordo com a expressão:

$$\Delta L_{cav} = \frac{dL}{L_s} \cdot L \quad (4.2)$$

onde, dL representa o deslocamento aplicado à secção L_s , para uma cavidade de comprimento L .

Em termos de variação de temperatura, segundo o artigo da referência [49], a alteração da mudança de temperatura provoca essencialmente uma variação do índice de refração, dada por $1,24 \times 10^{-5} RIU/^\circ C$. No programa desenvolvido, as variações de temperatura são introduzidas através da entrada *DeltaTemp* e aplicam-se apenas às cavidades.

De acordo com o sinal de modulação é necessário seleccionar o esquema de processamento adequado em “*Select Scheme*”, isto é, para uma modulação em dente serra, o processamento pseudo-heteródino e para a modulação sinusoidal, o heteródino 1, 2 ou 3. A aba “*Heterodyne*” permite definir os parâmetros dos filtros *Butterworth* e os ganhos dos esquemas heteródinos.

As abas “*FFT Harmonics*” e “*Ampl. & Phase Harmonics*” mostram os harmónicos e a variação de fase ao longo da simulação, respectivamente. O parâmetro “*Filter BW*” define a largura de banda dos filtros *Butterworth* utilizados na filtragem dos harmónicos. No fim da simulação é possível guardar as variações de fase e as amplitudes dos harmónicos, através do botão *Save Values*.

A Figura 4.4 apresenta os espectros resultantes de um interferómetro de Fabry-Pérot (a) formado por duas FBGs de largura de banda 200 pm, espaçadas de 6 cm, (b) com uma FBG e um espelho originado pelo final da fibra, com cavidade de 6 cm e por fim (c) com uma cavidade de 2,5 cm entre dois FBGs e outra de 16 cm entre uma FBG e o final da fibra.

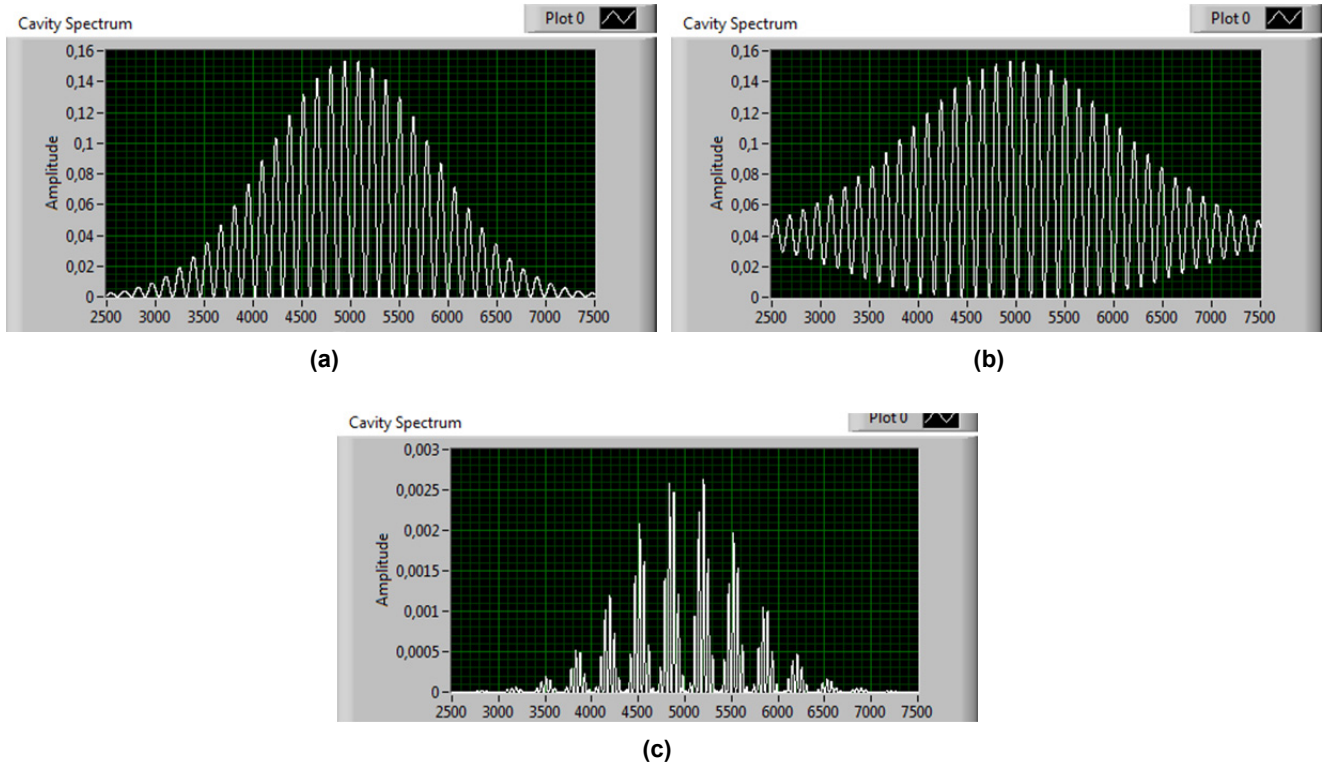


Figura 4.4 - Espectro resultante para os três tipos de interferómetros de Fabry-Pérot, formados por (a) duas FBGs, (b) uma FBG e um espelho de ~4% (c) dois FBGs e um espelho

Uma vez obtido o espectro do sensor em questão, com os esquemas de detecção de sinal é possível gerar uma portadora cuja informação de fase contém a informação do mensurando. Na Figura 4.5 apresenta-se o diagrama de blocos do processamento efectuado pelo *software* de simulação desenvolvido em LabVIEW.

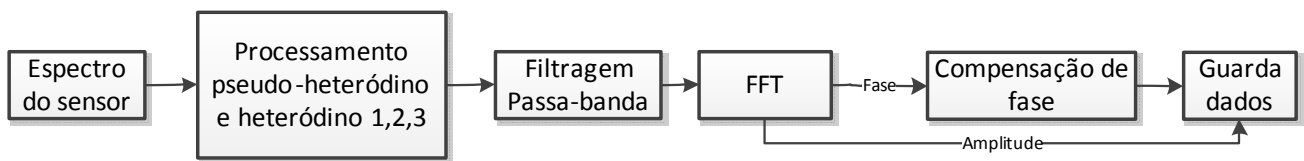


Figura 4.5 - Diagrama de blocos do *Software* de simulação

O bloco de processamento pseudo-heteródino e heteródino implementa os esquemas de detecção de sinal anteriormente apresentados, sendo os blocos seguintes responsáveis por retirar a fase da portadora. Para esse fim, poderia ser utilizado o *Lock-in Amplifier* virtual da *NI*, mas devido a não ser possível um controlo completo do instrumento, na sua versão gratuita, optou-se por efectuar a filtragem da portadora e aplicar a transformada de Fourier para retirar a fase e a amplitude da portadora [40].

Com base no valor de fase obtido é utilizado um algoritmo de compensação de fase⁴, para eliminar descontinuidades de fase maiores do que 180 graus e menores do que -180 graus [40]. O referido algoritmo não permite que as variações de fase consecutivas sejam superiores ou iguais a 180 graus.

4.2. Cavidade formada por duas FBGs

Esta subsecção apresenta a simulação do estiramento de uma cavidade de 6 cm formada por duas FBGs, aplicando sete incrementos positivos e negativos de $1,3333 \mu\epsilon$ e empregando todas as técnicas de detecção de sinal (pseudo-heteródina e heteródinas). Nos testes efectuados, o *software* desenvolvido considera sempre que as FBGs não são afectadas pelo estiramento.

Pela equação (4.2) retira-se que o deslocamento aplicado à cavidade é em cada passo de $\Delta L_{cav}=1,3333*0,06=0,08 \mu m$. Substituindo este valor na equação (2.10), com $n=1,458$ e $\lambda=1571 nm$, obtém-se uma variação de fase de -53,45 graus, o que representa uma sensibilidade de $40,09 \text{ graus}/\mu\epsilon$.

Na simulação considerou-se que a FBG possuía uma largura de banda de 200 pm e um comprimento de onda central nos 1571 nm. Foi definido um efeito de *flyback* de 0,875, por ter sido o valor mínimo medido, com o laser DFB utilizado no sistema real, para uma frequência de modulação mínima de 125 Hz. Nesta simulação definiu-se uma amplitude de modulação de pico de 70 amostras, o que pela equação (4.1) equivale a uma modulação em comprimento de onda de 14 pm, uma frequência do sinal de modulação de 1 kHz, uma frequência de amostragem de 50 kHz e um vector de 1000 amostras, para o sinal de modulação e o sinal resultante dos esquemas heteródinos. Nos esquemas heteródinos utilizou-se uma largura de banda de 50 Hz para os filtros passa-banda, 125 Hz para o filtro passa-baixo do esquema heteródino 2 e ganhos $G_1=0,63$, $G_2=4,47$ e $G_3=0,08$, para o heteródino 1, 2 e 3, respectivamente.

Para uma modulação em dente de serra sem efeito de *flyback*, aplicando o esquema de detecção de sinal pseudo-heteródino e sete incrementos e decrementos de $1,33 \mu\epsilon$, verificou-se a variação de fase apresentada na Figura 4.6.

⁴ Ver anexo B

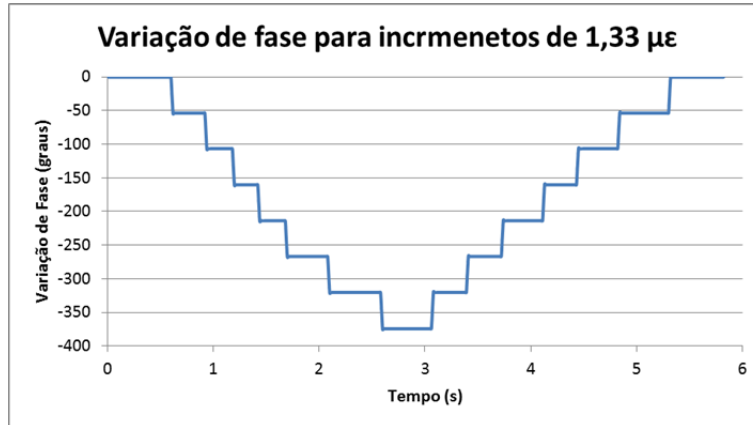


Figura 4.6 - Varição de fase com modulação em dente de serra sem efeito de *flyback*, no comprimento de onda central da FBG

Na Tabela 4.1 encontram-se os valores da variação de fase obtida para os vários esquemas de detecção de sinal, para cada incremento e decréscimo de 1,33 $\mu\epsilon$, quando efectuado um varrimento no comprimento de onda central da FBG (Topo) e no comprimento de onda correspondente a metade da largura de banda da FBG (Meia LB).

Tabela 4.1 - Variação da fase para alterações de estiramento de 1,33 $\mu\epsilon$ com os esquemas de detecção pseudo-heteródino e heteródino 1, 2 e 3, para uma cavidade formada por duas FBGs

Estiramento ($\mu\epsilon$)	Pseudo-heteródino				Heteródino 1		Heteródino 2		Heteródino 3	
	flyback 1		flyback 0,875		Topo (5000)	Meia LB (3750)	Topo (5000)	Meia LB (3750)	Topo (5000)	Meia LB (3750)
	Topo (5000)	Meia LB (3750)	Topo (5000)	Meia LB (3750)						
	$ \Delta\phi $ (graus)	$ \Delta\phi $ (graus)	$ \Delta\phi $ (graus)	$ \Delta\phi $ (graus)	$ \Delta\phi $ (graus)	$ \Delta\phi $ (graus)	$ \Delta\phi $ (graus)	$ \Delta\phi $ (graus)	$ \Delta\phi $ (graus)	$ \Delta\phi $ (graus)
0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,33	53,44	53,32	53,41	59,44	54,02	45,49	49,58	49,42	53,50	4,22
2,67	53,12	58,43	46,05	59,44	55,26	69,35	54,95	64,94	53,13	10,11
4,00	53,65	56,03	57,39	49,88	51,81	63,65	56,52	63,97	53,58	33,20
5,33	53,57	53,87	58,67	59,21	52,47	50,35	50,04	54,51	53,58	75,49
6,67	53,09	52,94	46,44	56,61	55,56	53,64	52,19	50,33	53,13	9,15
8,00	53,53	49,59	52,01	42,73	53,17	47,81	57,69	45,15	53,50	129,49
9,33	53,86	49,32	61,85	46,68	51,65	40,53	52,24	43,68	53,88	2,01
8,00	53,86	49,32	61,85	46,68	51,65	40,53	57,69	43,68	53,88	2,01
6,67	53,53	49,59	52,01	42,73	53,17	47,81	52,19	45,15	53,50	129,49
5,33	53,09	52,94	46,44	56,61	55,56	53,64	52,19	50,33	53,13	9,15
4,00	53,57	53,87	58,67	59,21	52,47	50,35	56,52	54,51	53,58	75,49
2,67	53,65	56,03	57,39	49,88	51,81	63,65	54,95	63,97	53,58	33,20
1,33	53,12	58,43	46,05	59,44	55,26	69,35	54,95	64,94	53,13	10,11
0,00	53,44	53,32	53,41	59,44	54,02	45,49	49,58	49,42	53,50	4,22
Média (graus)	53,47	53,36	53,69	53,43	53,42	52,98	53,66	53,14	53,47	37,67
σ (graus)	0,27	3,13	5,80	6,66	1,52	9,82	2,89	8,17	0,25	46,15

Analisando os resultados obtidos observa-se que para o mesmo esquema de detecção de sinal, o desvio padrão da fase depende muito da posição em que o laser efectua o varrimento. A metade da largura de banda, devido a ser a zona de maior declive da envolvente da FBG, verifica-se um aumento do erro de medição de fase, principalmente com o esquema heteródino 3.

Considerando que o laser efectua a modulação no valor central do comprimento de onda da FBG, observa-se que o esquema heteródino 3 possui melhor desempenho, seguido do pseudo-heteródino sem *flyback*, heteródino 1 e 2. Caso exista deslocamento do comprimento de onda de *Bragg*, isto é, a aquisição deixe de ser efectuada no comprimento de onda central da FBG, é preferível a utilização do esquema pseudo-heteródino, para o qual, mesmo com um *flyback* de 0,875, o desvio padrão da variação de fase, que se relaciona com o erro de fase obtido, é inferior aos restantes esquemas.

O esquema pseudo-heteródino além de ser o mais robusto em termos de deslocamento da envolvente da FBG, possui a vantagem de necessitar de muito menos processamento para recuperar a fase do sinal, isto porque o sinal resultante já é uma portadora sinusoidal. Apesar do efeito de *flyback* ser elevado, pela análise do desvio padrão, verifica-se que é possível obter a fase do mensurando com um erro de $\pm 5,80$ graus, desde que a modulação do laser seja efectuada no comprimento de onda central da FBG. Em termos de estiramento, este erro representa $\pm 144,68$ nε, para uma sensibilidade de $53,47/1,33 = \sim 40,2$ graus/με.

Através da análise do deslocamento da FBG observa-se que o desvio padrão da variação de fase é menor, quando é efectuada a modulação do laser no comprimento de onda central da FBG (topo). Portanto, numa situação real, e devido às variações de temperatura durante o dia, para um sistema de interrogação baseado na modulação do laser, seria necessário a utilização de FBGs atérmicas [50], isto é, FBGs cujo comprimento de onda não se altere com as mudanças de temperatura.

4.3. Cavity formada por uma FBG e um espelho

Com os parâmetros definidos anteriormente, mas para uma cavity formada por uma FBG e um espelho, efectuou-se uma análise análoga e obtiveram-se os resultados da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Variação da fase para alterações de estiramento de 1,33 μe com os esquemas de detecção pseudo-heteródino e heteródino 1, 2 e 3 para uma cavidade formada por uma FBG e um espelho com reflectividade de 4%

Estiramento (μe)	Pseudo-heteródino				Heteródino 1		Heteródino 2		Heteródino 3	
	flyback 1		flyback 0,875		Topo (5000)	Meia LB (3750)	Topo (5000)	Meia LB (3750)	Topo (5000)	Meia LB (3750)
	Topo (5000)	Meia LB (3750)	Topo (5000)	Meia LB (3750)						
	$ \Delta\theta $ (graus)	$ \Delta\theta $ (graus)	$ \Delta\theta $ (graus)	$ \Delta\theta $ (graus)	$ \Delta\theta $ (graus)	$ \Delta\theta $ (graus)	$ \Delta\theta $ (graus)	$ \Delta\theta $ (graus)	$ \Delta\theta $ (graus)	$ \Delta\theta $ (graus)
0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,33	53,42	53,76	53,39	61,11	53,99	50,11	49,55	53,18	53,48	22,93
2,67	53,13	55,08	46,06	54,76	55,28	59,90	54,96	55,16	53,29	21,63
4,00	53,67	53,72	57,41	47,07	51,84	56,49	56,55	56,74	53,52	53,53
5,33	53,60	53,56	58,69	58,20	52,50	50,38	50,07	54,82	53,52	70,96
6,67	53,10	53,79	46,45	58,01	55,58	54,38	52,21	51,44	53,28	32,17
8,00	53,51	52,13	51,99	45,26	53,14	53,55	57,66	50,66	53,48	90,44
9,33	53,82	51,99	61,81	50,67	51,60	47,82	52,19	51,99	53,68	76,28
8,00	53,82	51,99	61,81	50,67	51,60	47,82	52,19	51,99	53,68	76,28
6,67	53,51	52,13	51,99	45,26	53,14	53,55	57,66	50,66	53,48	90,44
5,33	53,10	53,79	46,45	58,01	55,58	54,38	52,21	51,44	53,28	32,17
4,00	53,60	53,56	58,69	58,20	52,50	50,38	50,07	54,82	53,52	70,96
2,67	53,67	53,72	57,41	47,07	51,84	56,49	56,55	56,74	53,52	53,53
1,33	53,13	55,08	46,06	54,76	55,28	59,90	54,96	55,16	53,29	21,63
0,00	53,42	53,76	53,39	61,11	53,99	50,11	49,55	53,18	53,48	22,93
Média (graus)	53,47	53,43	53,68	53,58	53,42	53,23	53,31	53,43	53,46	52,56
σ	0,26	1,03	5,80	5,80	1,53	3,99	3,02	2,14	0,13	26,57

Comparando os valores do desvio padrão obtidos na Tabela 4.2 com os da Tabela 4.1, observa-se que com este tipo de cavidade, os resultados são novamente melhores quando o laser efectua a aquisição do sinal no comprimento de onda central da FBG. Para uma modulação do laser no comprimento de onda central, referente a metade da largura de banda da FBG, esta cavidade apresenta melhores resultados. Esta melhoria advém de uma menor modulação de amplitude das franjas da Figura 4.4 (b) em relação às da Figura 4.4 (a).

Na Figura 4.7 apresentam-se os sinais recuperados através da modulação do laser no comprimento de onda correspondente a metade da largura de banda da FBG, para uma cavidade de 6 cm formada entre duas FBGs, (a) e (c), e entre uma FBG e um espelho, (b) e (d). Pela análise da Figura 4.7 (b) e Figura 4.7 (d) constata-se que o erro provocado nos sinais é menor do que nos da Figura 4.7 (a) e Figura 4.7 (c), logo o erro no processo de aquisição de fase é menor.

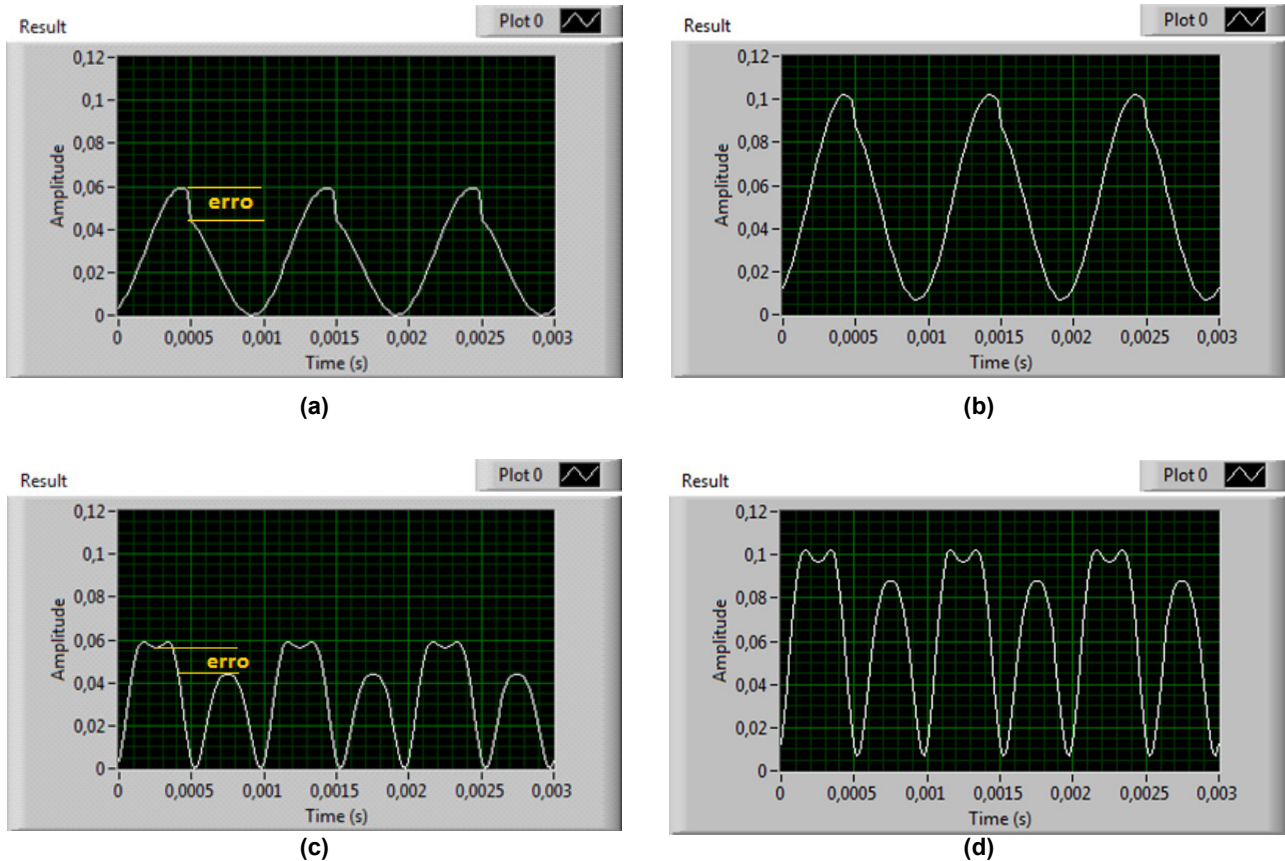


Figura 4.7 - Sinais adquiridos através de varrimento no comprimento de onda correspondente a metade da largura de banda da FBG com: Modulação em dente de serra e uma cavidade formada por (a) duas FBGs e (b) entre uma FBG e um espelho; Modulação sinusoidal e uma cavidade formada por (c) duas FBGs e (d) entre uma FBG e um espelho

4.4. Cavidade formada por duas FBGs e um espelho

Com um interferómetro formado por duas FBGs e um espelho pretendeu-se analisar o desempenho de um sensor para a medição simultânea do índice de refração e da temperatura e também para a medição de estiramento e de temperatura. Os interferómetros foram projectados de modo a que a cavidade menor (L_1) tivesse pelo menos seis períodos dentro da largura de banda da rede de Bragg (para minimizar a modulação de amplitude provocada pela FBG, em dois períodos consecutivos) e que a segunda cavidade (L_2) também tivesse pelo menos seis períodos, dentro de um período da primeira cavidade. Na definição dos tamanhos das cavidades, teve-se também em conta que a terceira cavidade tivesse um período bastante próximo da segunda, de forma a tornar o espectro mais simples, e de modo que o tamanho do sensor não fosse demasiado

grande. Na Tabela 4.3 encontram-se os períodos das cavidades, obtidos pela expressão (2.16) com $n=1,458$ e $\lambda=1571 \text{ nm}$.

Tabela 4.3 - Medidas teóricas dos interferómetros

Comprimento da cavidade			Períodos da cavidade		
L1 (cm)	L2 (cm)	L3 (cm)	$\Delta\lambda_1$ (pm)	$\Delta\lambda_2$ (pm)	$\Delta\lambda_3$ (pm)
2,5	16	18,5	33,86	5,29	4,58

A Figura 4.8 apresenta o espectro resultante para um sensor com as dimensões definidas na Tabela 4.3, sendo possível observar-se que o espectro resultante é definido principalmente pela primeira e segunda cavidades.

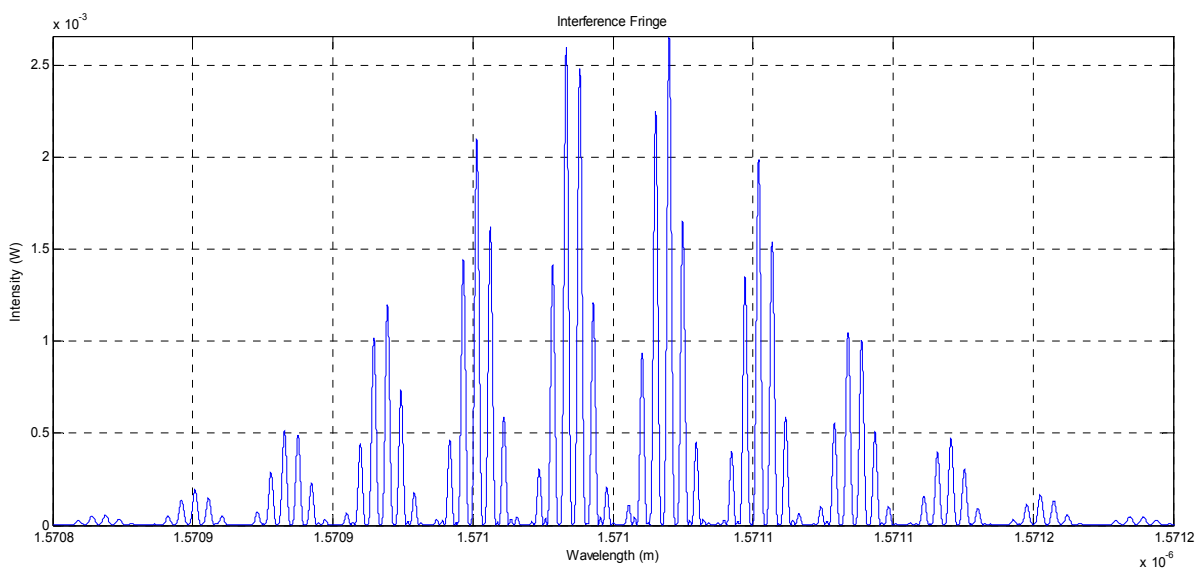


Figura 4.8 - Espectro de um sensor composto por cavidades de 2,5 cm, 16 cm e 18,5 cm

Para este tipo de interferómetro, utilizou-se o esquema de detecção pseudo-heteródino, onde foi aplicado um sinal de modulação em dente de serra com uma frequência de modulação f_m e sem efeito de *flyback*, de forma a simplificar a análise dos harmónicos e evitar os erros de fase provocados pelo *flyback*. Para uma modulação de um período de uma franja da primeira cavidade, à saída no fotodetector é obtido:

$$S \approx A + A_1 \sin(\omega_m t + \phi_d) \cdot A_6 \sin(6,4\omega_m t + \phi_d) \cdot A_7 \sin(7,4\omega_m t + \phi_d) \quad (4.3)$$

onde o sexto harmónico corresponde ao padrão de franjas originado pela cavidade de 16 cm e o sétimo harmónico corresponde à cavidade de 18,5 cm.

4.4.1. Sensor de índice de refração externo e de temperatura

Com uma configuração sensora deste tipo, as mudanças de índice de refração são dadas por variações da visibilidade da segunda e terceira cavidades (devido à mudança de reflectividade do “espelho” existente no fim da fibra), ou seja, para uma modulação em dente serra sem *flyback*, de uma franja da primeira cavidade, obtém-se uma mudança de amplitude correspondente ao sexto e sétimo harmónico. Relativamente às variações de temperatura, estas afectam a fase do primeiro e segundo harmónico.

Os testes consistiram em realizar o varrimento de uma franja correspondente à primeira cavidade com uma modulação em dente de serra sem *flyback* e analisando o primeiro e o sexto harmónicos. O sexto harmónico foi escolhido, em vez do sétimo, por ser o que possuía maior visibilidade.

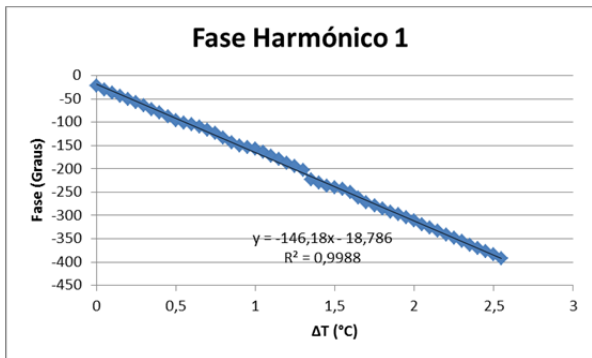
Nesta simulação definiu-se uma frequência de modulação de 125 Hz e amplitude de modulação de 164 amostras para um sinal em dente de serra, com *flyback* nulo ($u=1$), frequência de amostragem de 50 kHz, 10000 amostras e largura de banda dos filtros *Butterworth* de 50 Hz. O comprimento de onda central de varrimento do laser foi definido como sendo o comprimento de onda central de uma franja, correspondente à primeira cavidade (amostra 4841).

Simulando uma mudança do índice de refração do meio externo, observou-se que a amplitude do primeiro harmónico varia significativamente, facto que pode ser explicado pela equação (4.3), pois quando é efectuada a filtragem do primeiro harmónico a amplitude lida é $A_1.A_6.A_7$ e não apenas A_1 . Relativamente às variações de temperatura observou-se que as amplitudes e fases do primeiro e sexto harmónico alteravam-se também. Portanto, para a medição multi-parâmetro é necessário analisar a influência de cada mensurando separadamente e verificar se é possível a construção do seguinte sistema de equações:

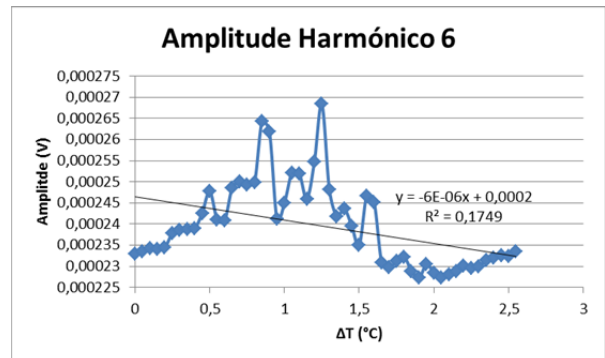
$$\begin{pmatrix} F_1 \\ A_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{F_1, \Delta n} & K_{F_1, \Delta T} \\ K_{A_6, \Delta n} & K_{A_6, \Delta T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

onde F_1 é a fase do primeiro harmónico, A_6 a amplitude do sexto harmónico, $K_{F_1, \Delta n}$ representa a sensibilidade da fase do primeiro harmónico, a variações de índice de refração ou temperatura, $K_{A_6, \Delta n}$ é a sensibilidade da amplitude do sexto harmónico ao índice de refração ou temperatura, Δn é a variação do índice de refração e ΔT é a variação da temperatura.

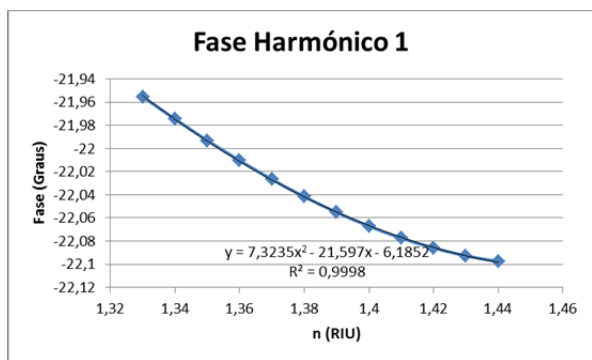
A Figura 4.9 (a) e a Figura 4.9 (b) apresentam as variações de fase do primeiro harmónico e de amplitude do sexto harmónico para variações de temperatura em passos de 0,05 °C, respectivamente. O índice de refração externo era de 1,33. Na Figura 4.9 (c) e na Figura 4.9 (d) encontram-se as mudanças de fase do primeiro harmónico e as de amplitude do sexto harmónico, em função do índice de refração, respectivamente, com a temperatura inicial a 0°C.



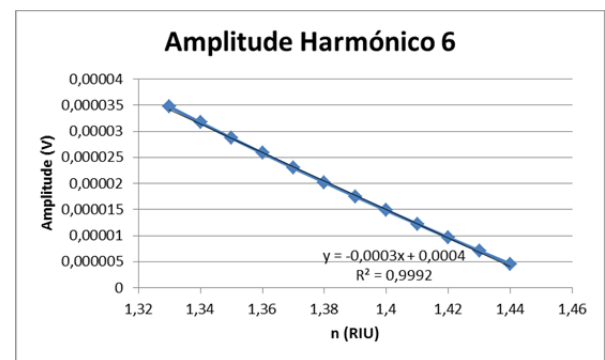
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.9 - (a) Variação de fase do harmónico 1 em função da temperatura; (b) Variação de amplitude do harmónico 6 em função da temperatura; (c) Variação de fase do harmónico 1 em função do índice de refração externo; (d) Variação de amplitude do harmónico 6 em função do índice de refração externo;

Os resultados apresentados na Figura 4.9 mostram que não é possível obter uma expressão para as variações de amplitude do sexto harmónico em função da temperatura. Comparando as variações de amplitude da Figura 4.9 (b) com a (d) constata-se que devido à temperatura, ocorrem flutuações de amplitude significativas, não sendo possível desprezar o efeito da temperatura na amplitude do sexto harmónico. Por exemplo, para $n=1,33$, pela Figura 4.9 (d), tem-se uma amplitude de 0,000034 V, mas se forem tidos em conta as variações de temperatura, a amplitude pode variar $\pm 0,000003$ V, o que pela Figura 4.9 (b) equivale a um erro de $\Delta n = \pm 0,01$ RIU, um valor bastante significativo.

A utilização da amplitude do harmónico para se obter o valor do índice de refração externo não é muito fiável, porque podem existir flutuações de potência óptica, provocando variações na amplitude do harmónico. Uma solução para os problemas de flutuações de potência poderia ser o cálculo de uma razão entre a amplitude do sexto e um outro harmónico, mas tal não é possível, porque observou-se que as restantes amplitudes também variavam significativamente em função do índice de refração externo.

Assim, pode-se concluir que este tipo interferómetro não susceptível para mediação simultânea de índice de refração externo e de temperatura.

4.4.1. Sensor de estiramento e de temperatura

Neste ponto pretendeu-se analisar o comportamento do sensor, na medição simultânea de estiramento e de temperatura, sendo a primeira cavidade responsável pela mediação de temperatura e a segunda pela medição de estiramento. Para tal, pretendeu-se construir a matriz:

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{F_1, \Delta \varepsilon} & K_{F_1, \Delta T} \\ K_{F_6, \Delta \varepsilon} & K_{F_6, \Delta T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

onde F_1 e F_6 são as fases do primeiro e sexto harmónico, respectivamente, $K_{F_i, \Delta i}$ representa a sensibilidade das fases a variações de estiramento ou temperatura, $\Delta \varepsilon$ é a variação do estiramento aplicado e ΔT é a mudança da temperatura.

Na Figura 4.10 apresentam-se as variações de fase obtidas para os harmónicos número 1 e 6, em função do estiramento e da temperatura.

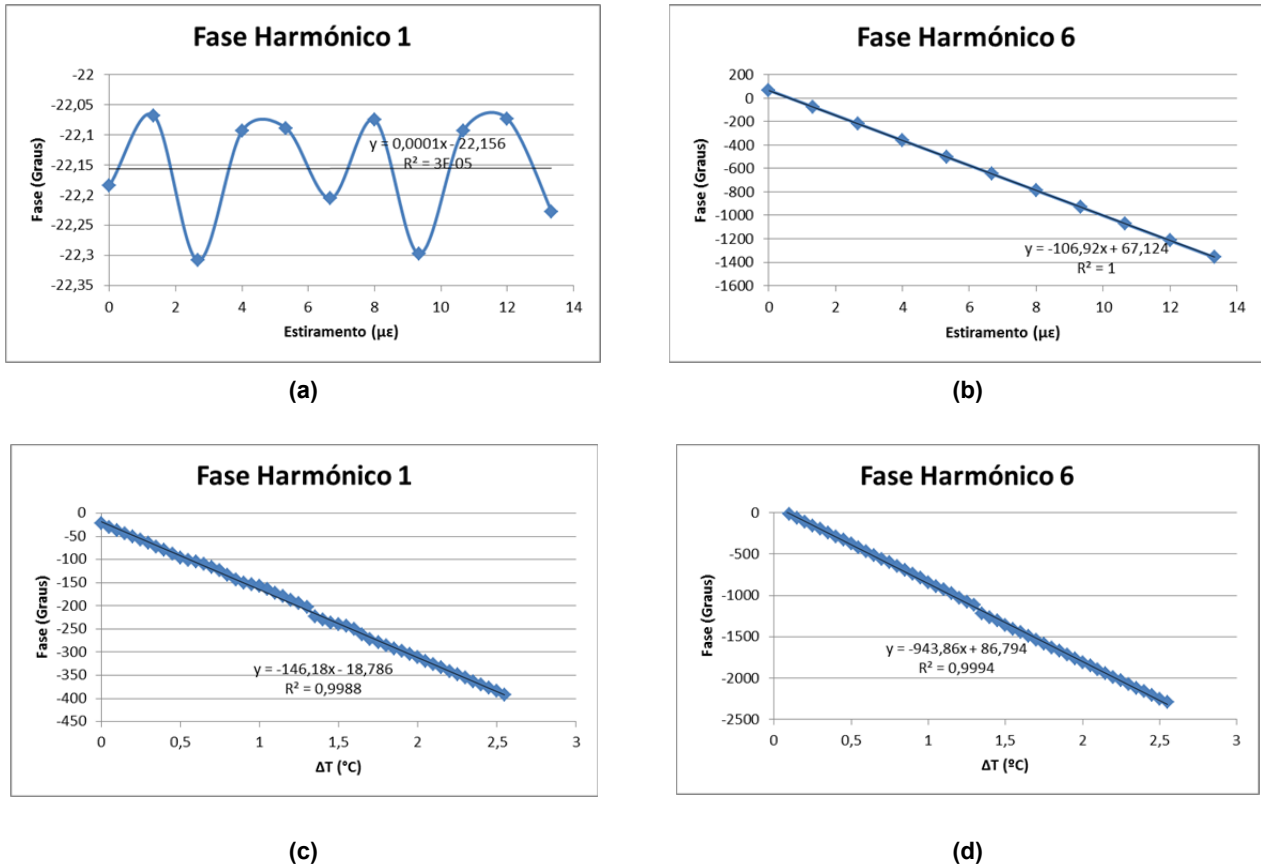


Figura 4.10 - Variação de fase do harmónico: (a) 1 em função do estiramento; (b) 6 em função do estiramento; (c) 1 em função da temperatura; (d) 6 em função da temperatura

Quando foi aplicado estiramento à segunda cavidade observou-se que a fase do primeiro harmónico varia no máximo $\pm 0,15$ graus ($\pm 0,001$ °C), um valor que se considerou que poderia ser desprezado quando comparado com a sensibilidade desta cavidade à temperatura ($-146,18$ graus/°C). Para os restantes gráficos observou-se uma boa linearidade nos resultados, o que permite escrever a matriz (4.6):

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -146,18 \\ -106,92 & -943,86 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

A matriz composta por duas equações e duas incógnitas, permite obter a variação de temperatura e do estiramento através dos valores de fase dos harmónicos numero 1 e 6.

Numa situação real e de forma a validar esta simulação seria necessário adquirir um laser cujo efeito de *flyback* fosse praticamente nulo e que possuísse uma resolução espectral de pelo menos 0,5 pm (10 vezes inferior ao período da segunda cavidade), sendo também necessária a utilização de FBGs atérmicas, para evitar que grandes

variações de temperatura deslocassem a FBG para fora da janela de varrimento do laser. Uma outra solução, em vez de se utilizar FBGs atérmicas, seria empregar um tipo de laser cuja gama de varrimento em comprimento de onda fosse na ordem das dezenas de nanómetros.

5. Medição de estiramento e de temperatura com interferómetros de Fabry-Pérot

Após ter-se estudado o comportamento teórico das cavidades com o mensurando, neste capítulo pretendeu-se validar as simulações efectuadas anteriormente, aplicando experimentalmente estiramento e medindo a correspondente variação de fase, com os esquemas pseudo-heteródinos e heteródinos. Por fim, será analisado o comportamento em estiramento e temperatura de cavidades formadas por FBGs *Chirped*. Com este tipo de FBGs obtém-se uma maior largura de banda espectral, uma vez que o seu período varia ao longo da FBG [51].

5.1. Caracterização do Laser DFB

No sistema de interrogação utilizou-se um laser DFB Toptica 1905 LMI com comprimento de onda de emissão de 1571 ± 1 nm e potência máxima de 40 mW. Para efectuar a sua caracterização em termos de comprimento de onda utilizou-se o esquema apresentado na Figura 5.1, utilizando o OSA Advantest Q8384 com 10 pm de resolução.

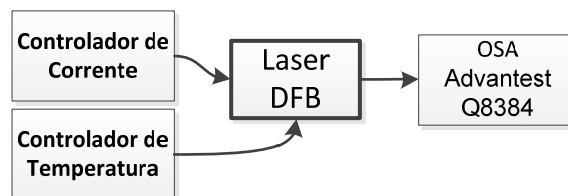


Figura 5.1 - Montagem utilizada para efectuar a caracterização do laser DFB Toptica 1905 LMI

Na Figura 5.2 apresentam-se os resultados da caracterização do laser em comprimento de onda de acordo com o termístor R_{th} (a) e de acordo com a corrente (b). Na primeira calibração foi definida uma corrente constante de 25 mA, e variou-se o valor da resistência registando-se o comprimento de onda central. O valor da resistência do termístor (R_{th}) define a temperatura do laser, sendo 10 k Ω o equivalente a 25°C. Na segunda calibração foi definida uma resistência de 9,3 k Ω e variou-se a corrente dos 25 até aos 240 mA, sendo esta a gama de corrente de funcionamento especificada pelo fabricante.

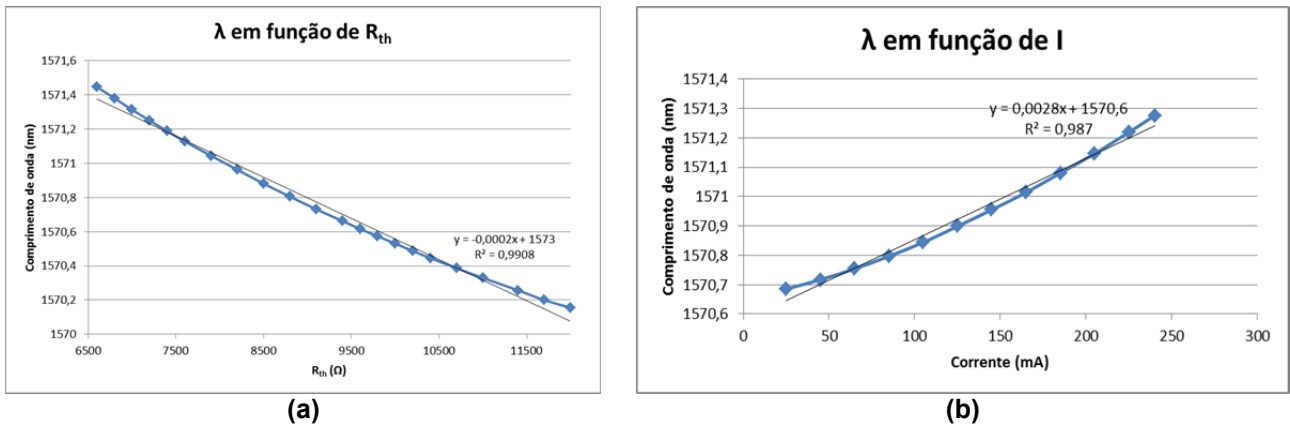


Figura 5.2 - Curva de calibração do laser Toptica com (a) I constante e (b) R constante

Com a Figura 5.2 (a) observa-se que para uma corrente constante, o comprimento de onda de emissão decresce com o aumento do valor da resistência do termistor. Na Figura 5.2 (b) o comprimento de onda aumenta quase linearmente com o aumento da corrente. Para a interrogação de cavidades com FBGs cujas larguras são aproximadamente 200 pm, pode-se afirmar que a variação de comprimento de onda é aproximadamente linear.

5.2. Cavidade de Fabry Perot com FBGs

Na Figura 5.3 apresenta-se um interferómetro com uma cavidade de comprimento L de 6 cm, entre duas FBGs de 3 mm, com uma largura de banda de 200 pm e reflexão de aproximadamente 4% a $\lambda=1571\text{ nm}$.

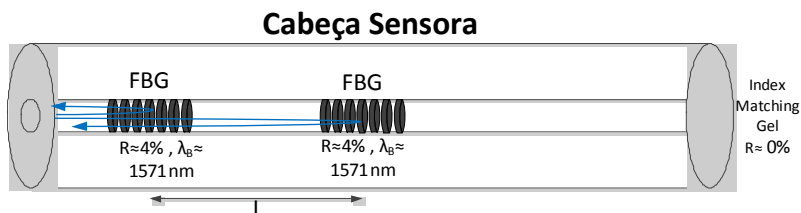


Figura 5.3 - Cabeça sensora em fibra óptica com uma cavidade entre duas FBGs

Na Figura 5.4 apresenta-se a simulação do espectro da cavidade da Figura 5.3, normalizado em relação à potência da fonte, sendo que as franjas possuem um período de 14,11 pm.

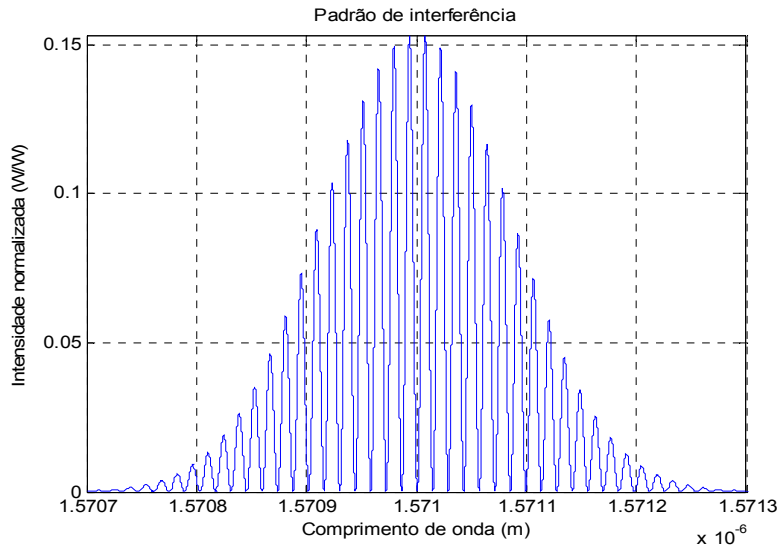


Figura 5.4 - Simulação de padrão de interferência originado por uma cavidade de 6 cm

5.2.1. Espectro obtido com o laser

O espectro da cavidade foi obtido utilizando um controlador de corrente e temperatura Thorlabs ITC 510 e um Fotodetector HP8153A, controlados via GPIB por *Software* em LabVIEW⁵, que permite definir o valor de R_{th} , o valor inicial, final e o incremento de corrente. Posteriormente, através das rectas de calibração em temperatura e corrente da Figura 5.2 foi possível relacionar o valor de corrente com o comprimento de onda.

A Figura 5.5 apresenta o espectro obtido para a cavidade com aproximadamente 6 cm, normalizado em relação à potência de emissão do laser, observando-se alguma diferença entre a Figura 5.4, devido ao facto das FBGs não serem exactamente iguais e também por estas não poderem ser perfeitamente simuladas através de uma função gaussiana.

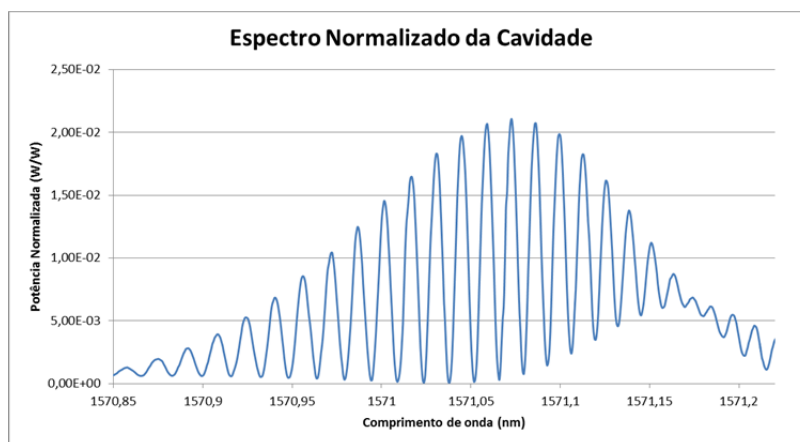


Figura 5.5 - Espectro obtido experimentalmente com o laser para uma cavidade de ~ 6 cm

⁵ Ver anexo C

5.2.2. Interrogação da cavidade sensora

Neste ponto pretende-se validar o sistema de interrogação simulado no capítulo anterior, aplicando as técnicas de detecção pseudo-heteródina e heteródina, com varrimento de uma franja. O valor da resistência R_{th} do controlador de temperatura foi definido de forma a posicionar o laser na franja de maior visibilidade, tendo o controlador de corrente sido ajustado para um valor inicial de 100 mA.

Verificou-se que para efectuar o varrimento de apenas uma franja seria necessário realizar uma modulação de corrente com um sinal em dente de serra, com uma amplitude de 90 mV. Devido ao sinal ter uma amplitude muito baixa, ao ser gerado com uma DAQ (*Data Acquisition*) NI USB 6211, é notória a quantização do mesmo, pelo que optou-se por gerar um sinal de maior amplitude e utilizar um atenuador de 12 dB.

5.2.2.1. Aplicação de estiramento

Quando uma rede de *Bragg* é sujeita a estiramento ou a mudanças de temperatura, o comprimento de onda reflectido pela mesma é alterado. Portanto, para evitar que a visibilidade das franjas se alterasse devido ao deslocamento da FBG, aplicou-se estiramento à secção da fibra correspondente à parte interna da cavidade, sem afectar os espelhos (os FBGs).

Devido à baixa resolução das carruagens disponíveis, o incremento mínimo de deslocamento originava variações de fase do padrão de franjas superiores a 360 graus e por esse motivo o valor de fase era lido erradamente, porque o algoritmo de compensação de fase não permitia efectuar a compensação de saltos superiores a 180 graus. Para validar o sistema de interrogação, optou-se então por aplicar estiramento com o PZT (*PieZoelectric Transducer*) *Physik Instrumente Serial Number 80487* (Figura 5.6) de elevada resolução.



Figura 5.6 - PZT

Quando é aplicada uma tensão a um PZT este aquece ligeiramente e demora algum tempo a estabilizar a sua temperatura. Para este PZT o tempo de estabilização era de aproximadamente 2 minutos.

Devido à falta de dados fornecido pelo fabricante optou-se por efectuar a calibração do mesmo com uma FBG e com o OSA Advantest Q8384, com resolução de 10 pm. Sabendo-se que uma FBG desloca-se $1 \text{ pm}/\mu\epsilon$ [52], para valores de tensão aplicados ao PZT de -8 V até aos -4 V, e com base na variação do comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda_B$), obtiveram-se as variações de estiramento aplicadas pelo PZT, e que são apresentadas na coluna $\epsilon \text{ PZT}$, da Tabela 5.1. O comprimento de onda de Bragg, foi obtido através do valor do comprimento de onda correspondente ao valor máximo de potência, após aplicar um algoritmo que efectua a média da potência óptica em 10 pontos consecutivos (o que permite melhorar o ruído de potência existente, no espectro obtido).

A calibração do PZT com a FBG foi efectuada com pontos de colagem no PZT separados 30 mm e os testes de estiramento da cavidade que são apresentados em seguida, foram com pontos de colagem separados de 45 mm, como demonstra a Figura 5.7.

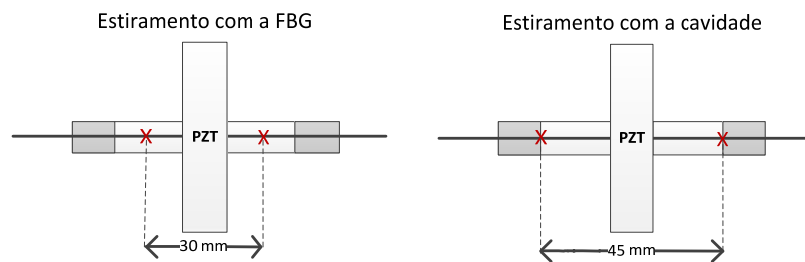


Figura 5.7 - Pontos de colagem da fibra no PZT, quando foi aplicado estiramento a uma FBG e a uma cavidade de ~6 cm

Portanto, para os mesmos valores de tensão aplicados ao PZT, o estiramento aplicado à cavidade será menor, o que corresponde a um factor de 30/45 em relação ao estiramento da FBG. Também, a variação em comprimento de onda das franjas da cavidade ($\Delta\lambda \text{ Cav}$) será 30/45 vezes menor que $\Delta\lambda_B$.

Tabela 5.1 - Calibração do PZT

Tensão (V)	λ_B (nm)	$\Delta\lambda_B \text{ PZT}$ (pm)	$\epsilon \text{ PZT}$ ($\mu\epsilon$)	$ \Delta\lambda \text{ Cav}$ (pm)	$\epsilon \text{ Cav}$ ($\mu\epsilon$)
-8	1570,78	0,00	0,00	0,00	0,00
-4	1570,79	10,50	10,50	7,00	4,67

Com base nos valores da tabela anterior e assumindo que o PZT tem um comportamento linear na gama de tensões entre -8 V e -4 V, obtém-se uma sensibilidade de $1,17 \mu\epsilon/V$, para uma cavidade de ~ 6 cm.

5.2.2.2. Sistema desenvolvido

A Figura 5.8 apresenta o sistema desenvolvido, empregando instrumentação virtual, para a interrogação de interferómetros de Fabry-Pérot. Trata-se de uma montagem diferencial que utiliza um interferómetro de referência para efectuar a compensação de flutuações por parte do meio ambiente.

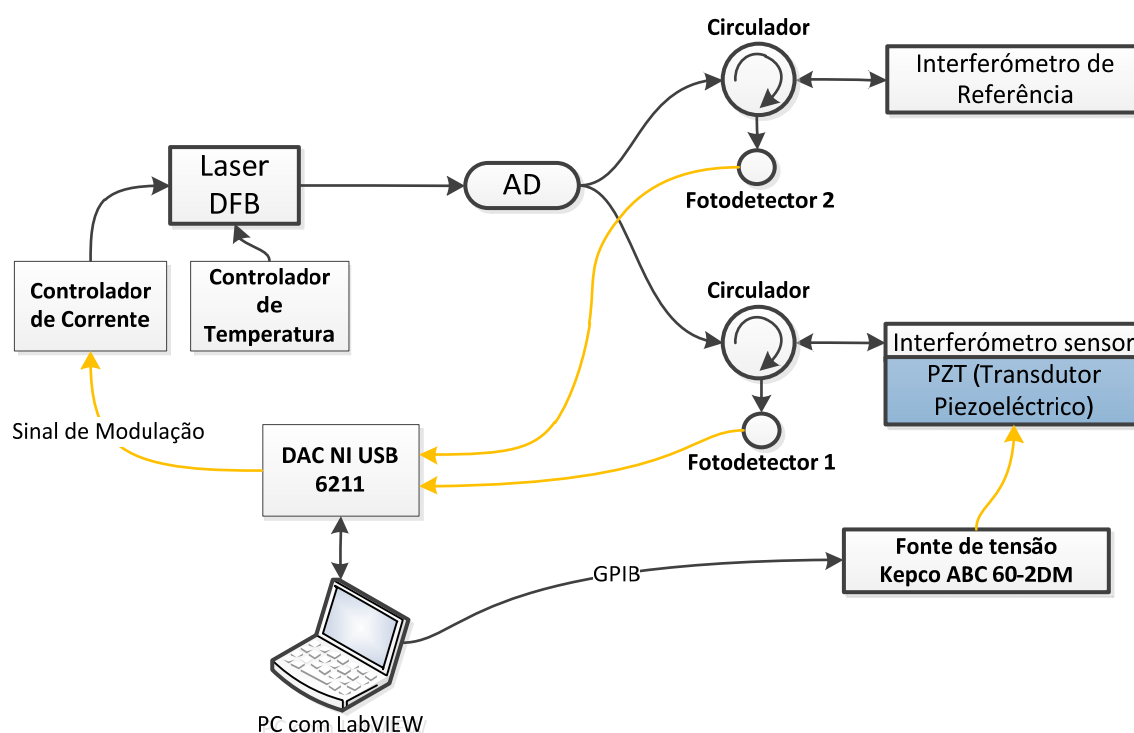


Figura 5.8 - Sistema desenvolvido para interrogação de interferómetros de Fabry-Pérot

O sistema de instrumentação virtual é constituído por um computador que possui um “instrumento virtual” desenvolvido em LabVIEW⁶, que controla uma placa de aquisição de dados NI-USB-6211 e uma fonte de tensão da Kepco, controlada via GPIB, que é utilizada para definir os valores de tensão aplicados ao PZT. A placa de aquisição de dados é responsável por gerar o sinal de modulação a aplicar no controlador de corrente e pela leitura dos sinais obtidos nos fotodetectores, correspondentes ao sinal do interferómetro sensor e ao de referência.

⁶ Ver anexo D

Este sistema detém a vantagem de ser bastante compacto, e de ser de mais baixo custo, face aos sistemas convencionais que utilizam um OSA, para efectuar a leitura do mensurando. Relativamente aos sistemas que empregam interferómetros de leitura, como o apresentado na tese da referência [40], é sempre necessário que o interferómetro de leitura esteja bem isolado do meio exterior e é também obrigatória a utilização de um sensor de medida e de um outro de referência, para eliminar oscilações provenientes do interferómetro de leitura. Por sua vez, o sistema desenvolvido, como não utiliza um interferómetro de leitura, torna-se mais compacto e não necessita de um sensor de referência para funcionar correctamente. Refira-se que a utilização de um sensor de referência neste tipo de sistema, serve apenas para eliminar sensibilidades cruzadas entre vários mensurandos.

Por fim, a portabilidade do sistema desenvolvido é também uma grande vantagem, face a sistemas que empregam um OSA, pois este necessita de ser transportado cuidadosamente, é bastante volumoso e pesado. Relativamente aos sistemas que empregam um interferómetro de leitura, tipicamente estes possuem um percurso aéreo entre uma lente de GRIN e um espelho [53], ou entre duas lentes de GRIN [40], que é usado para alterar o percurso óptico do interferómetro de leitura, e que por sua vez é de difícil alinhamento e pode ser facilmente desalinhado.

5.2.2.3. Software de aquisição

Para efectuar a leitura do sinal obtido nos fotodetectores (fibra sensora e de referência), desenvolveu-se um “instrumento virtual” em LabVIEW que aplica os esquemas de detecção pseudo-heteródino e heteródinos. A Figura 4.5 apresenta um diagrama de blocos do *software* desenvolvido.

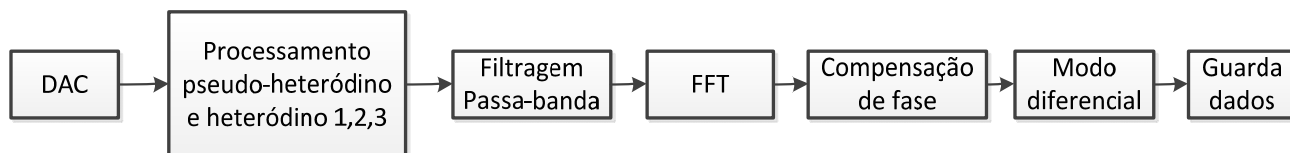


Figura 5.9 - Diagrama de blocos do *Software* desenvolvido

A placa de aquisição de dados utilizada é uma DAQ NI USB 6211 de 16 bits, com uma tensão máxima de saída e entrada entre -10 e 10 V, o que corresponde a uma resolução de 305 μ V, com uma frequência máxima de amostragem de 250 kbps, a dividir pelos canais analógicos de entrada. Este componente é ainda responsável por gerar o sinal de modulação a aplicar no controlador de corrente do laser.

O segundo bloco é responsável por seleccionar o sinal de modulação, aplicar as técnicas de processamento pseudo-heteródina ou heteródinas e definir as frequências de corte inferior e superior dos filtros *Butterworth* de segunda ordem, que efectuam a filtragem da portadora sinusoidal, que contém a informação de fase. Em seguida, o bloco que efectua a transformada de Fourier do sinal, adquire a fase e envia-a ao bloco que efectua a compensação de fase. O bloco de modo diferencial apenas efectua a diferença de fase entre a fase do sinal mensurando e do de referência, quando este modo está activo. Por fim, é mostrada a variação de fase ao longo do tempo e os dados são guardados num ficheiro de Excel para futura análise, caso necessário.

5.2.2.4. Esquema pseudo-heteródino

Uma vez que o laser possui um elevado efeito de *flyback* verificou-se que a frequência de modulação teria de ser o mais baixa possível, mas para que não coincidissem com os três primeiros harmónicos da rede eléctrica (50 Hz), definiu-se o sinal de modulação com uma frequência mínima de 125 Hz. Na Figura 5.10 apresentam-se os sinais recuperados, resultantes da modulação em dente de serra de uma franja da cavidade, para frequências de modulação de (a) 125 Hz e (b) 1 kHz, nas quais é perceptível a existência do *flyback*. Através da expressão 2 do artigo [34] calculou-se um *flyback* de $u=0,875$ para uma frequência de modulação de 125 Hz. Na Figura 5.10 (b) é notório um maior efeito de *flyback* devido ao aumento da frequência de modulação.

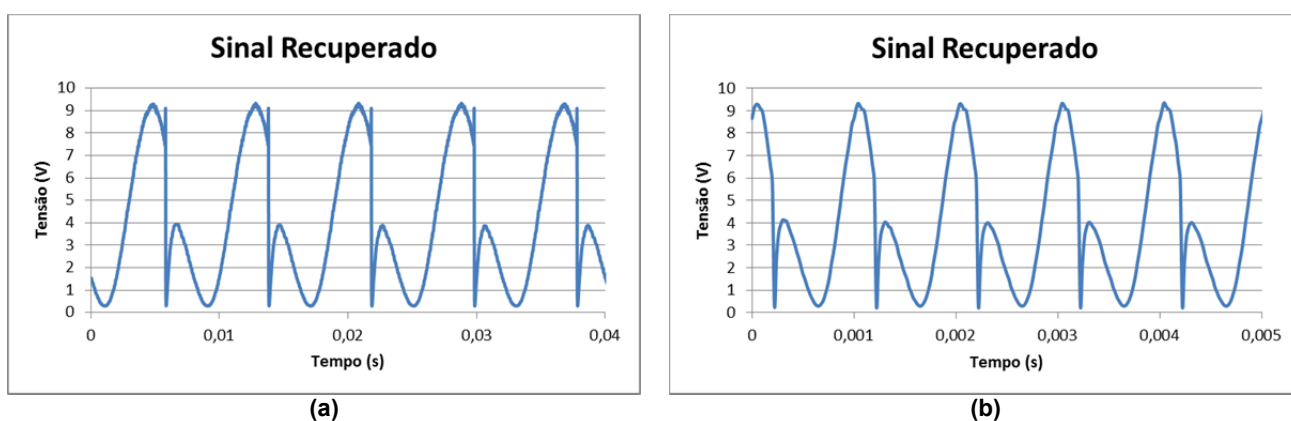


Figura 5.10 - Sinal resultante da modulação em dente de serra: (a) para uma frequência de modulação de 125 Hz de uma franja da cavidade, com uma amplitude de modulação de 1,3 V; (b) para uma frequência de modulação de 1 kHz de uma franja da cavidade, com uma amplitude de modulação de 1,9 V

Com uma modulação de 125 Hz e com a aplicação de incrementos e decrementos de -1V no PZT, com duração de 30 s, e 120 s de tempo de espera após cada incremento/decremento de tensão, obtiveram-se os resultados da Figura 5.11. Para cada

incremento de tensão aplicado no PZT é provocado um incremento de $1,17\ \mu\text{e}$ de estiramento.

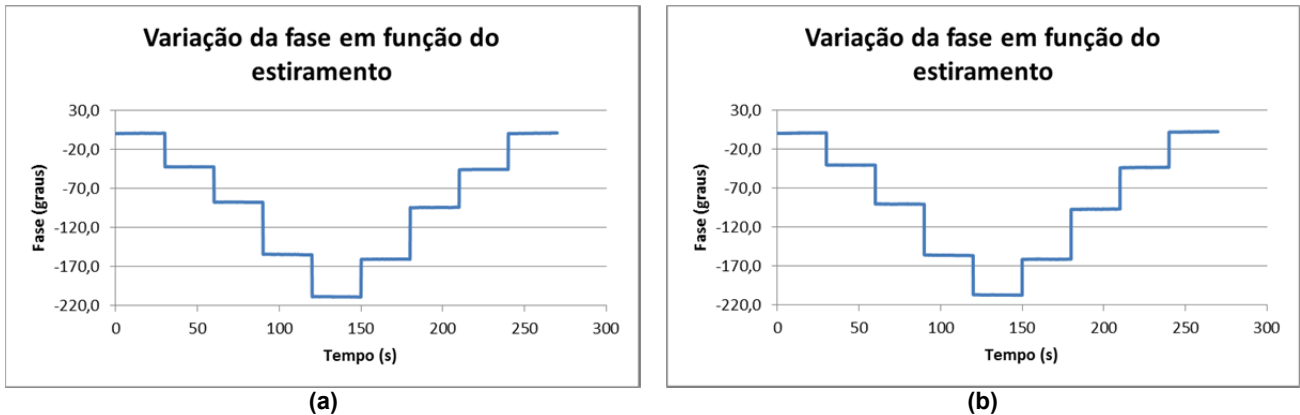


Figura 5.11 - Variação de fase entre cada incremento/decremento com: (a) 1,3V e $f=125\ \text{Hz}$; (b) 1,9V e $f=1\ \text{kHz}$

A Figura 5.12 apresenta a variação da fase registada para quatro incrementos de estiramento aplicados à cavidade, sendo possível observar-se que a mudança de fase não é exactamente linear em função do estiramento. Idealmente o resultado deveria ser linear e não o é devido ao efeito de *flyback* e devido à envolvente da FBG. Os resultados foram obtidos para uma configuração não diferencial, porque se verificou que a fase obtida se mantinha estável durante os testes efectuados num ambiente controlado em temperatura.

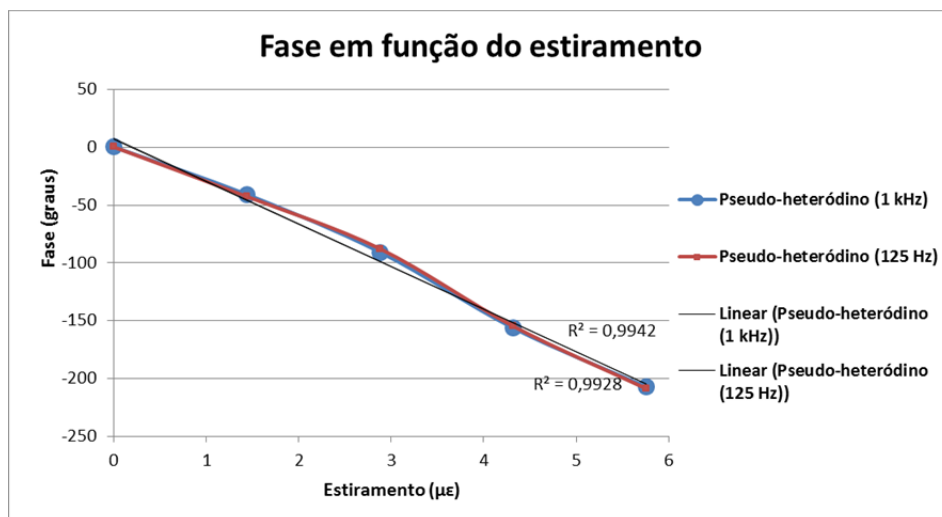


Figura 5.12 - Mudança de fase obtida com o esquema de detecção pseudo-heteródino

Na Tabela 5.2 apresentam-se os valores de diferença de fase e o desvio padrão dos valores de diferença de fase, obtidos para cada valor de tensão aplicado ao PZT. A coluna $\Delta\emptyset$ representa o módulo da variação de fase, e observa-se que para o mesmo valor de estiramento, o valor da diferença de fase não é exactamente igual, possivelmente devido ao PZT apresentar alguma histerese.

Interferómetros modais em fibra óptica para aplicações sensoras

Tabela 5.2 - Valores obtidos com o esquema pseudo-heteródino e com frequências de modulação de 1 kHz e 125 Hz

Tensão (V)	Estiramento ($\mu\epsilon$)	A = 1,9V e f = 1 kHz			A = 1,3V e f = 125 Hz		
		Fase (graus)	σ (graus)	$\Delta\emptyset$ (graus)	Fase (graus)	σ (graus)	$\Delta\emptyset$ (graus)
-8	0	0,412	0,055		0,204	0,100	
-7	1,44	-40,644	0,044	41,056	-41,925	0,056	42,129
-6	2,88	-90,636	0,037	49,993	-87,288	0,100	45,364
-5	4,32	-156,264	0,062	65,628	-154,503	0,212	67,215
-4	5,76	-207,146	0,056	50,882	-208,956	0,144	54,453
-5	4,32	-161,351	0,043	45,795	-161,983	0,051	46,973
-6	2,88	-97,179	0,071	64,172	-96,292	0,093	65,691
-7	1,44	-43,718	0,067	53,461	-48,310	0,100	47,982
-8	0	1,862	0,045	45,580	-2,483	0,177	45,828
Média (graus)			0,053	52,071		0,115	51,954
σ (graus)				8,789			9,606

Observa-se que para uma frequência de modulação de 1 kHz a média do desvio padrão é a menor, porque o sistema funciona numa zona de menor ruído. Com uma frequência de 125 Hz, apesar do efeito de *flyback* ser menor, observa-se que o desvio padrão da variação de fase ($\Delta\emptyset$) possui um valor ligeiramente superior. Portanto, de forma a implementar-se um sistema com maior imunidade ao ruído é preferível utilizar-se uma frequência de modulação de 1 kHz.

5.2.2.5. Esquemas heteródinos

A Figura 5.13 mostra o sinal lido no fotodetector, quando foi efectuada uma modulação sinusoidal para o varrimento de uma franja da cavidade de Fabry-Pérot.

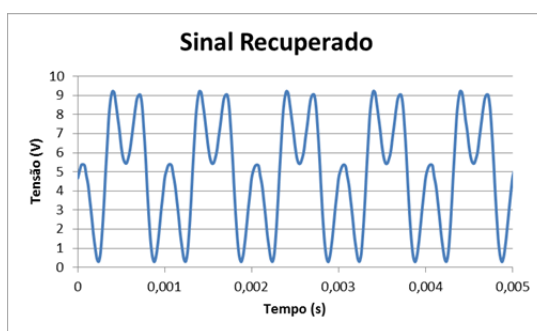


Figura 5.13 - Sinal resultante da modulação sinusoidal de 1 kHz de uma franja da cavidade, com uma amplitude de modulação de 1,75 V

Na Figura 5.14 e na Tabela 5.3 apresentam-se os resultados obtidos para os esquemas heteródinos 1, 2 e 3.

Medição de estiramento e de temperatura com interferómetros de Fabry-Perot

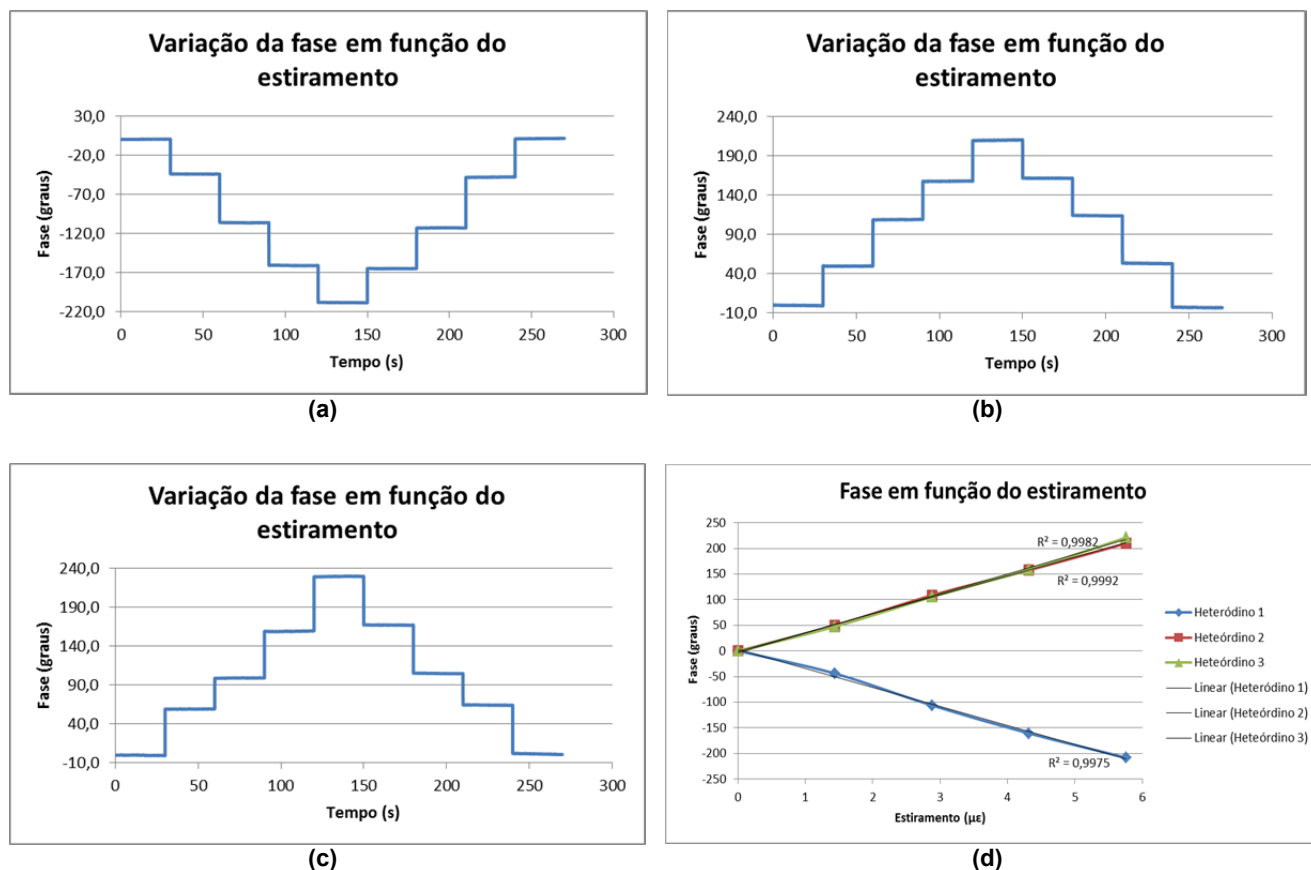


Figura 5.14 - Variação de fase entre cada incremento/decremento com esquema de detecção heteródino (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) Mudança de fase obtida com o esquema de detecção heteródino 1, 2 e 3

Tabela 5.3 - Valores obtidos com os esquemas heteródino 1, 2 e 3, com frequência de modulação de 1 kHz

Tensão (V)	Estiramento ($\mu\epsilon$)	Heteródino 1			Heteródino 2			Heteródino 3		
		Fase (graus)	σ (graus)	$\Delta\emptyset$ (graus)	Fase (graus)	σ (graus)	$\Delta\emptyset$ (graus)	Fase (graus)	σ (graus)	$\Delta\emptyset$ (graus)
-8,00	0	0,20	0,04		-0,44	0,11		-0,32	0,08	
-7,00	1,44	-44,16	0,04	44,36	49,51	0,12	49,95	47,45	0,18	47,78
-6,00	2,88	-106,32	0,06	62,15	108,67	0,10	59,16	105,43	0,10	57,98
-5,00	4,32	-160,93	0,06	54,61	157,50	0,11	48,83	158,81	0,08	53,38
-4,00	5,76	-208,23	0,05	47,30	209,61	0,12	52,12	221,12	0,10	62,31
-5,00	4,32	-164,91	0,05	43,32	161,34	0,11	48,27	166,88	0,16	54,24
-6,00	2,88	-112,94	0,04	51,97	113,67	0,14	47,67	104,70	0,08	62,18
-7,00	1,44	-48,18	0,06	64,76	52,98	0,10	60,69	54,29	0,14	50,41
-8,00	0	1,05	0,05	49,23	-3,06	0,11	56,04	2,83	0,10	51,46
Média (graus)			0,05	52,21		0,11	52,84		0,11	54,97
σ (graus)				7,89			5,13			5,38

Pela Tabela 5.3 observa-se que o esquema heteródino 1 possui a menor média de desvio padrão (σ), mas em contra partida o esquema heteródino 2 apresenta um menor

desvio padrão em termos de variação de fase, o que indica ser o esquema com melhor desempenho em termos de aquisição da variação da fase.

5.2.2.6. Comparação entre os esquemas pseudo-heteródino e heteródino

Para o cálculo da sensibilidade do interferómetro ao estiramento utilizaram-se os resultados obtidos para o esquema heteródino 2, por ser o que possuía um menor desvio padrão em termos de variação da fase. Com base na Tabela 5.1 e na Tabela 5.3, para uma variação de -8 V a -4 V, tem-se um estiramento total de $\approx 4,67 \mu\epsilon$ e uma variação de fase de ≈ 210 graus, resultando numa sensibilidade de $44,97 \text{ graus}/\mu\epsilon$. Para os vários esquemas heteródinos calculou-se a resolução como sendo o dobro da média do desvio padrão a dividir pela sensibilidade, obtendo-se a Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Comparação entre os esquemas de detecção pseudo-heteródinos e heteródinos para uma cavidade de ~ 6 cm.

Esquema de detecção de sinal	Modulação		σ (graus)	σ da $\Delta\theta$ (graus)	Sensibilidade (graus/ $\mu\epsilon$)	Resolução (nε)
	Frequência (Hz)	Amplitude (V)				
Pseudo-heteródino	1000	1,9	0,053	8,79	44,97	2,375
	125	1,3	0,144	9,39		6,421
Heteródino 1	1000	1,75	0,050	7,89		2,240
Heteródino 2			0,114	5,13		5,072
Heteródino 3			0,114	5,38		5,050

Pela Tabela 5.4 observa-se que o esquema de detecção heteródino 1 possui o melhor valor de resolução e que os esquemas de detecção de sinal que utilizam uma frequência de modulação de 1 kHz possuem melhores valores de resolução, uma vez que funcionam numa zona de menor ruído.

Relativamente aos esquemas heteródinos, como esperado, os resultados demonstram que o desvio padrão da variação da fase é menor que no esquema pseudo-heteródino, devido à não existência de *flyback*, o que pode ser observado pelos menores valores do desvio padrão da variação de fase.

Os resultados obtidos demonstram que este tipo de sistema compacto que não necessita de um OSA, nem de interferómetros de leitura, nem de um sensor de referência, pode ser utilizado para a interrogação de interferómetros de Fabry-Pérot, sendo preferível empregar os esquemas heteródinos para evitar o erro de fase provocado pelo *flyback*.

O sistema desenvolvido apresenta uma gama dinâmica e uma escala máxima de saída ilimitada, devido à utilização do algoritmo de compensação de fase. A resposta do sistema não possui nenhuma banda morta e em termos de exactidão, o sistema apresenta erros de fase que são inerentes do sensor, originados pela modulação de amplitude da FBG, sendo pior com o esquema de detecção de sinal pseudo-heteródino, como se estudou no capítulo 4.

5.3. Cavidades de Fabry-Pérot com FBGs Chirped

Desenvolveram-se duas cavidades sensoras, apresentadas na Figura 5.15 (a) e (b), com 2,2 cm de comprimento. Ao contrário das FBGs normais, as redes *Chirped* não tem um período constante, apresentando uma variação do mesmo ao longo do seu comprimento. Devido a esta modulação do seu período, as redes *chirped* apresentam como vantagem, uma maior largura de banda, relativamente às FBGs normais. Nas cavidades que empregam este tipo de FBGs, o sentido da FBG é importante, isto porque apenas existe interferência entre zonas para os quais o comprimento de onda de ressonância é idêntico. Esquemáticamente isto corresponderia a só existir interferência entre radiação reflectida por riscas da mesma cor. Com este tipo de cavidades pretendeu-se explorar a sua sensibilidade ao estiramento e à temperatura e verificar se a sensibilidade era ou não dependente da franja a monitorizar.

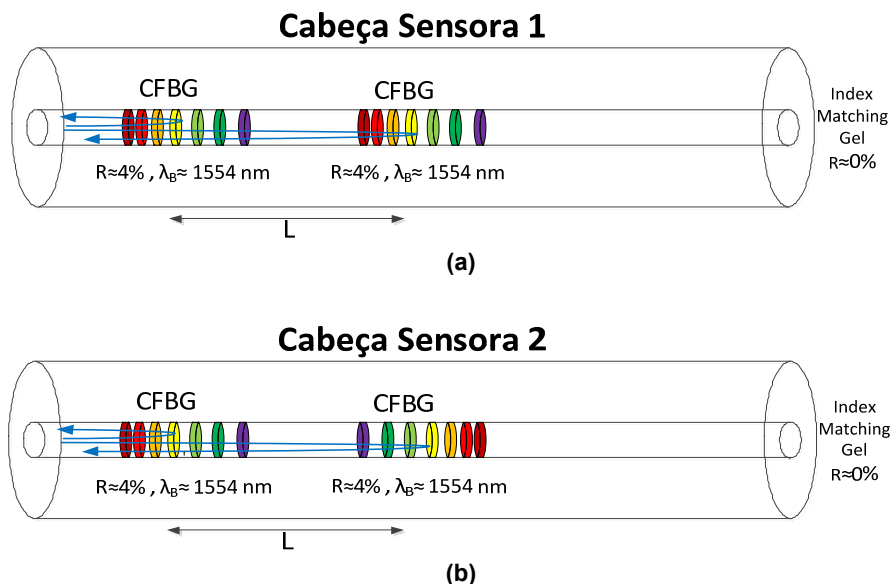


Figura 5.15 - Cabeça sensora em fibra óptica com uma cavidade entre duas CFBGs com (a) a mesma direcção; (b) direcção oposta

Para cada uma das cavidades efectuou-se a caracterização em estiramento e temperatura. Na Figura 5.16 apresenta-se o esquema utilizado para efectuar testes de estiramento às cavidades, composto por uma carruagem com precisão de 20 μm e um suporte, estando estes separados de 0,64 m. À zona da fibra que era colada à carruagem e ao suporte foi retirado o revestimento, para evitar que esta deslizasse dentro do revestimento. Este esquema permitia uma resolução de $20/0,64 = 31,25 \mu\epsilon$. Nos testes de temperatura utilizou-se a câmara da Figura 3.5.

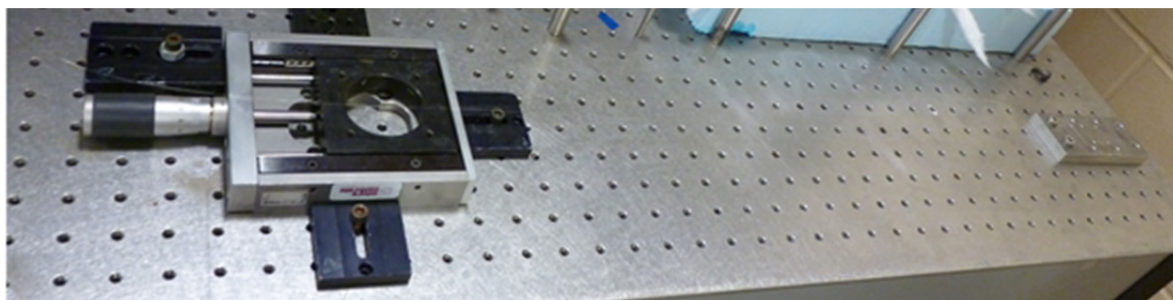


Figura 5.16 - Esquema utilizado para efectuar os testes de estiramento

5.3.1. Cabeça sensora 1

A Figura 5.17 apresenta o espectro resultante da cabeça sensora 1, no qual se observa um padrão de franjas com período uniforme. O espectro foi obtido com o OSA *Advantest Q8384* que possuía uma resolução de 10 pm. Os cinco picos assinalados na Figura 5.17 foram os escolhidos para a análise dos desvios de comprimento de onda em função do estiramento e temperatura.

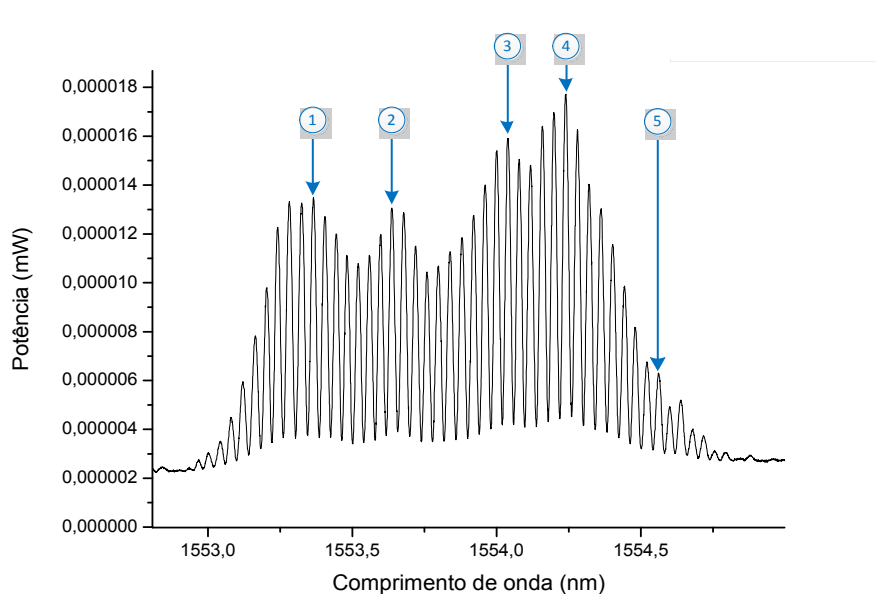


Figura 5.17 - Espectro da cavidade com CFBGs com a mesma direcção

5.3.2. Testes de estiramento

A Figura 5.18 apresenta a variação em comprimento de onda dos picos assinalados na Figura 5.17, e as rectas de ajuste, a partir dos quais se observa uma sensibilidade de $1,8 \text{ pm}/\mu\epsilon$ com um factor de correlação (R^2) quase unitário. O artigo da referência [54] efectua a análise de estiramento para uma cavidade de 5 mm formada por duas FBGs convencionais e apresenta uma sensibilidade menor, $1,19 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

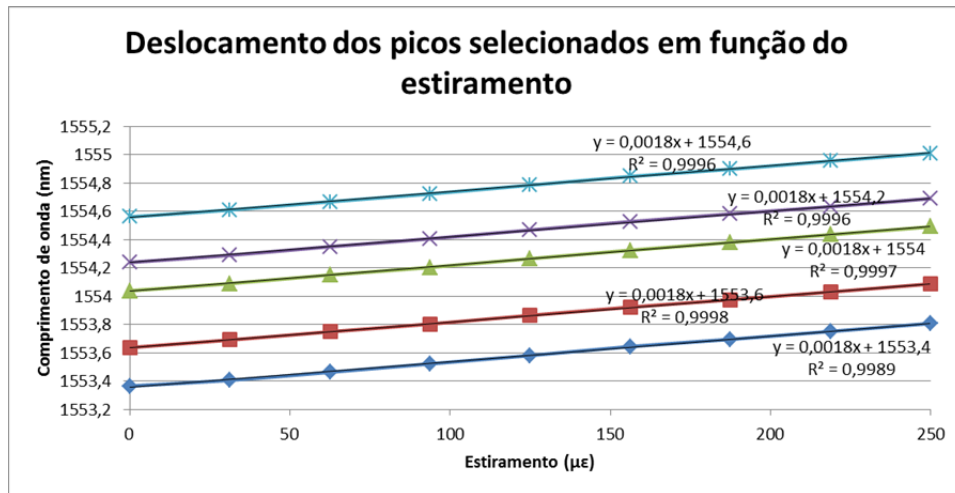


Figura 5.18 - Variação do comprimento de onda dos picos em função do estiramento para a cavidade 1

5.3.2.1. Testes de temperatura

Na Figura 5.19 apresenta-se a variação do comprimento de onda dos cinco picos em função da temperatura, na qual se observa também uma boa linearidade com sensibilidades na ordem dos $12,2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. O artigo da referência [54] apresenta uma menor sensibilidade, $14,25 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, para uma cavidade de 5 mm formada por duas FBGs normais.

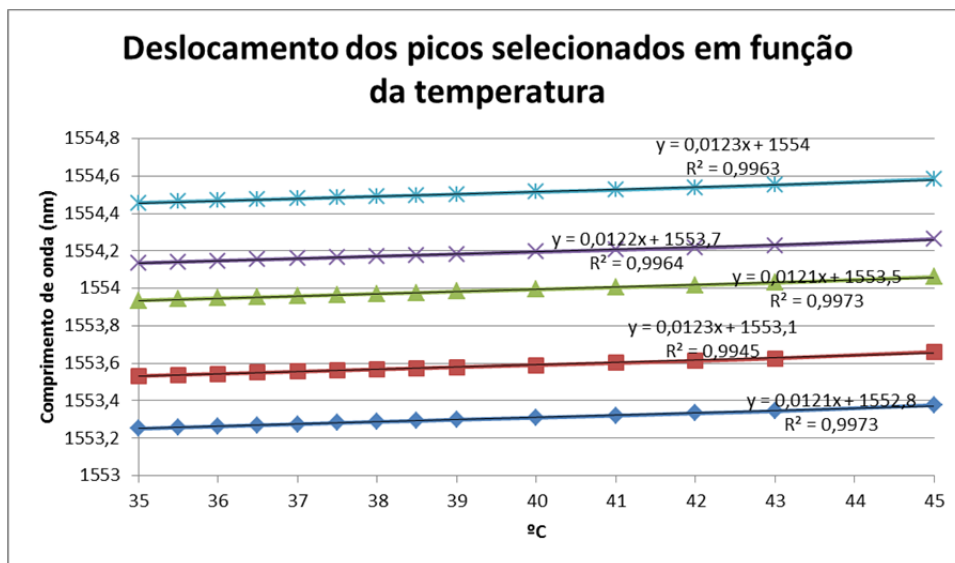


Figura 5.19 - Variação do comprimento de onda dos picos em função da temperatura para a cavidade 1

5.3.3. Cabeça sensora 2

Na Figura 5.20 encontra-se o espectro obtido para a cabeça sensora 2, no qual se observam franjas com período não uniforme. Este facto deve-se à cavidade utilizar CFBGs com direcções opostas, ou seja existem várias cavidades com diferentes comprimentos.

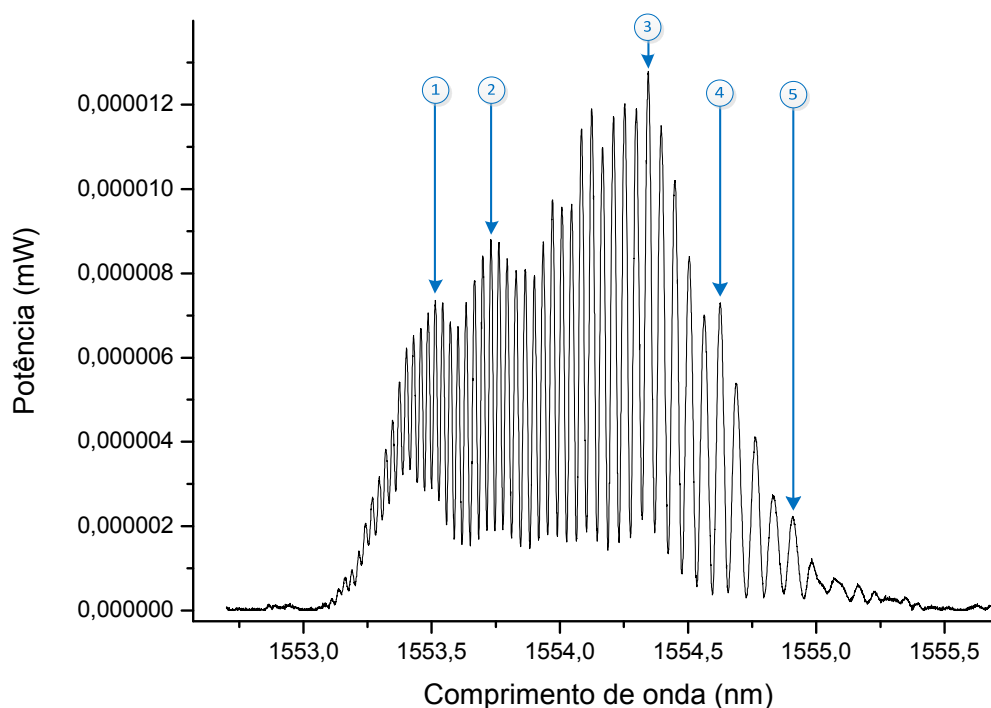


Figura 5.20 - Espectro da cavidade com CFBGs com direcções opostas

5.3.3.1. Testes de estiramento

Os deslocamentos dos cinco picos assinalados na Figura 5.20 em função do estiramento encontram-se representadas na Figura 5.21, na qual se observa sensibilidade dos picos de $1,8 \text{ pm}/\mu\epsilon$, tal como para a cabeça sensora 1.

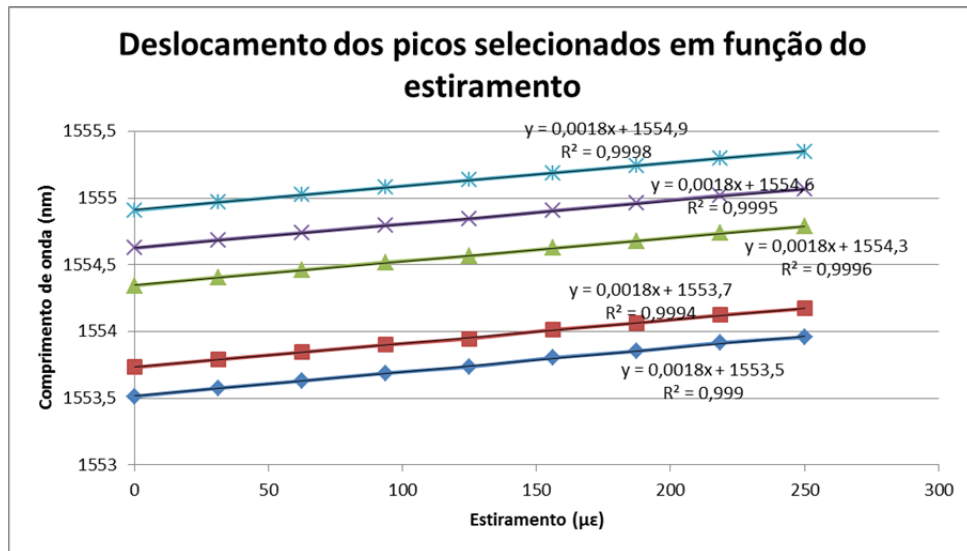


Figura 5.21 - Variação do comprimento de onda dos picos em função do estiramento para a cavidade 2

5.3.3.2. Testes de temperatura

A Figura 5.22 apresenta os deslocamentos dos picos em função da temperatura, sendo que se observa que os picos possuem sensibilidades praticamente idênticas, de $12,8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. Em relação à cabeça sensora 1, as sensibilidades são quase idênticas.

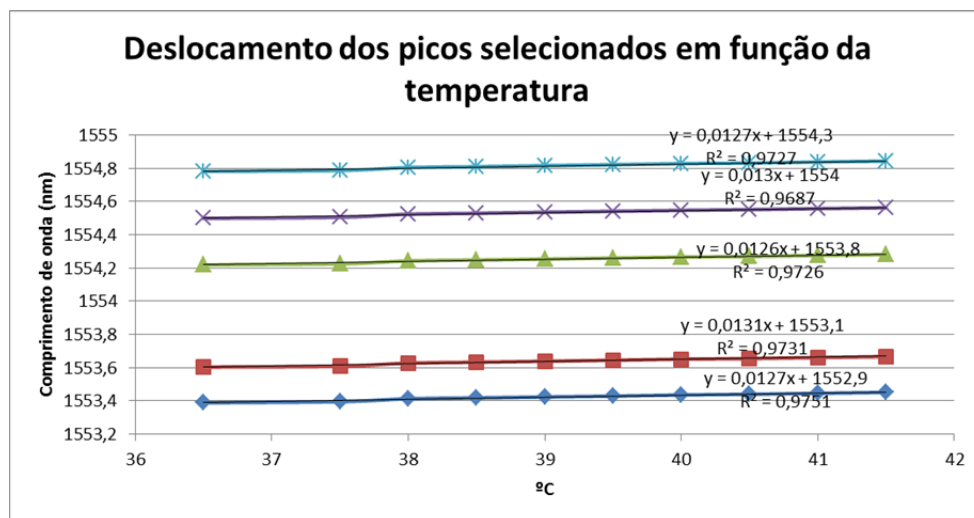


Figura 5.22 - Variação do comprimento de onda dos picos em função da temperatura para a cavidade 2

5.3.4. Análise dos resultados

A partir dos resultados obtidos com as cabeças sensoras 1 e 2 pode-se afirmar que este tipo de cavidade tem um comportamento semelhante às de uma cavidade formada por FBGs normais, ou seja, a sensibilidade não depende da franja a monitorizar. Uma vantagem da utilização deste tipo de FBGs é a sua superior largura espectral, o que

Interferómetros modais em fibra óptica para aplicações sensoras

permite utilizar o sistema de leitura de fase com um laser, para uma maior gama de variações de temperatura, sem a utilização de CFBGs atérmicas.

6. Conclusões

Nesta dissertação desenvolveram-se dois interferómetros modais que foram caracterizados relativamente à sensibilidade das suas características espectrais em função do índice de refração externo e da temperatura. Observou-se que o sensor fabricado com uma secção de fibra SM 380 demonstrou uma sensibilidade superior à dos interferómetros modais apresentados no estado da arte, tendo sido obtido um valor de $282,64 \text{ nm/RIU}$. Apesar do interferómetro com fibra sem núcleo demonstrar menor sensibilidade ao índice de refração exterior, este demonstrou ser insensível a variações de temperatura, o que é uma grande vantagem num sensor de índice de refração.

Por outro lado, o programa de simulação de cavidades em fibra óptica desenvolvido neste trabalho demonstrou ser extremamente útil na determinação do espectro, e uma vez que permite aplicar as habituais técnicas de detecção de sinal, permite também a análise da fase e amplitude dos harmónicos do sinal recuperado, de acordo com as variações de estiramento, temperatura ou índice de refração.

De forma a validar o programa de simulação desenvolvido procedeu-se à medição do estiramento de uma cavidade formada por duas FBGs, tirando partido da instrumentação virtual com o LabVIEW, tendo-se verificado ser esta uma boa escolha pelo facto de permitir uma interface bastante simples com os equipamentos e ser de fácil desenvolvimento. O sistema de aquisição com instrumentação virtual demonstrou uma sensibilidade de $36,33 \text{ graus}/\mu\epsilon$ e resolução mínima de $1,296 \text{ n}\epsilon$, para detecção pseudo-heteródina.

O sistema desenvolvido, face ao sistema convencional que emprega um OSA ou um interferómetro de leitura, apresenta a vantagem de ser mais compacto e mais portátil. Relativamente ao interferómetro de leitura, o sistema desenvolvido não é susceptível a desalinhamentos, não necessita obrigatoriamente de um sensor de referência para funcionar nem o sistema de leitura necessita de estar isolado do meio exterior.

Por fim, com as cavidades com FBGs *Chirped* observou-se que o seu comportamento em função do estiramento e da temperatura é semelhante ao das cavidades com FBGs, mas com a vantagem de possuírem uma largura de banda superior.

6.1. Trabalhos futuros

Os testes de estiramento efectuados com o sistema real foram realizados para uma situação de ambiente controlado, isto é, com variações de temperatura desprezáveis, de forma a garantir que a aquisição do sinal laser era efectuada no comprimento de onda central da FBG. Numa situação real, devido ao deslocamento das FBG com a temperatura, é necessário garantir que a visibilidade das franjas nunca é nula. Portanto, para o sistema de interrogação apresentado, com um laser DFB, seria necessária a utilização de FBGs atérmicas.

Outra possível solução, passa pela utilização de um laser cuja variação de comprimento de onda seja na ordem das dezenas de nanómetros, para que mesmo com o deslocamento da FBG seja possível a mediação do mensurando. Outra vantagem de um laser deste tipo seria a possibilidade de interrogação de interferómetros modais, uma vez que estes possuem franjas ou ressonâncias com períodos na ordem das dezenas de nanómetros, e que não podem ser interrogados com um laser DFB convencional.

7. Bibliografia

- [1] J. Higuera, "*Handbook of optical fibre sensing technology*", Wiley, 2002.
- [2] A. Morshed, "*Senior projects in optical fiber sensing*", IEEE, Workshop of Teaching Photonics, 1999.
- [3] S. Yin, B. Ruffin e S. Yu, "*Fiber Optic Sensors*", CRC Press, 2008.
- [4] D. Wang e Y. Wang, "*Fully Distributed Fiber-Optic Biological Sensing*", IEEE Photonics Technology Letters, 2010, Vol. 22.
- [5] J. Fraden, "*Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*", Springer, 2010.
- [6] N. Oki e S. Mantovani, "Universidade Estadual Paulista - UNESP Campus de Ilha Solteira, *Sensores e Transdutores*", [Online] Universidade Estadual Paulista, [Citação: 05 do 01 de 2011.] http://www.dee.feis.unesp.br/graduacao/disciplinas/ele1186/aula1_introd.pdf.
- [7] A. Kersey e A. Dandridge, "*Applications of Fiber-optic Sensors*", IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology, 1990, Vol. 13.
- [8] "*Single Mode Optical Fibre Sensor Technology - Lecture Notes*", Kent University, Sira Lda., 1985.
- [9] A. Ribeiro, "*Esquemas de Multiplexagem de Sensores de Fibra Óptica*", Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 1996.
- [10] P. Hariharan, "*Basics of Interferometry*", Academic Press, 2006.
- [11] W. Bock e T. Eftimov, "*An Inline Core-Cladding Intermodal Interferometer Using a Photonic Crystal Fiber*", Journal of Lightwave Technology, 2009, Vol. 27.
- [12] J. Shamir, "*Optical systems and processes*", SPIE, 1999.
- [13] Y. Fu, Y. Tam e L. Shao, "*Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer*", OSA, 2008, Vol. 47.
- [14] J. Villatoro e V. Minkovich, "*Compact Modal Interferometer Built With Tapered Microstructured Optical Fiber*", IEEE Photonics Technology Letters, 2006, Vol. 18.

- [15] K. Grattan e B. Meggitt, "*Optical Fiber Sensor Technology: Applications and systems*", Springer, 1999.
- [16] J. Baptista, "*Comunicações Ópticas*", Universidade da Madeira, 2011.
- [17] J. Higuera, "*Handbook of optical fibre sensing technology*", Wiley, 2002.
- [18] M. Gallas, "Coerência", [Online] [Citação: 27 do 12 de 2010] <http://www.if.ufrgs.br/~marcia/coerencia.pdf>.
- [19] W. Silfvast, "*Laser fundamentals*", Cambridge University Press, 2004.
- [20] S. Aref e H. Latifi, "*Fiber optic Fabry–Perot pressure sensor with low sensitivity to temperature changes for downhole application*", Optics Communications 269, 2007.
- [21] E. Li, "*Sensitivity-Enhanced Fiber-Optic Strain Sensor Based on Interference of Higher Order Modes in Circular Fibers*", IEEE Photonics Technology Letters, 2007, Vol. 19.
- [22] O. Frazão, J. Baptista e J. Santos, "*Temperature-Independent Strain Sensor Based on a Hi-Bi Photonic Crystal Fiber Loop Mirror*", IEEE Sensors Journal, 2007, Vol. 7.
- [23] J. Ding, e A. Zhang, "*Fiber-Taper Seeded Long-Period Grating Pair as a Highly Sensitive Refractive-Index Sensor*", IEEE Photonics Technology Letters, 2005, Vol. 17.
- [24] O. Frazão e P. Caldas, "*Optical flowmeter using a modal interferometer based on a single nonadiabatic fiber taper*", Optics Letters, 2007, Vol. 32.
- [25] J. Ju e W. Jin, "*Compact In-Fiber Interferometer Formed by Long-Period Gratings in Photonic Crystal Fiber*", IEEE Photonics Technology Letters, 2008, Vol. 20.
- [26] J. Ju e W. Jin, "*Sensors and Devices Based on Modified Microstructure Optical Fibers*", Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, 2009.
- [27] H. Aref, O. Frazão e P. Caldas, "*Modal Interferometer Based on ARROW Fiber for Strain and Temperature Measurement*", IEEE Photonics Technology Letters, 2009, Vol. 21.
- [28] P. Russell, "*Photonic Crystal Fibers*", Science, 2003, Vol. 299.
- [29] H. Aref, et al., "*Modal interferometer based on hollow-core photonic crystal fiber for strain and temperature measurement*", OSA, 2009.
- [30] H. Choi, e M. Kim, "*All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber*", Optical Society of America, 2007.

- [31] O. Frazão, C. Jesus e J. Baptista, “*Fiber-Optic Interferometric Torsion Sensor Based on a Two-LP-Mode Operation in Birefringent Fiber*”, IEEE Photonics Technology Letters, 2009, Vol. 21.
- [32] Y. Jung e S. Kim, “*Compact three segmented multimode fibre modal interferometer for high sensitivity refractive-index measurement*”, Measurement Science and Technology, 2006.
- [33] D. Jackson, et al., “*Pseudoheterodyne Detection Scheme for Optical Interferometers*”, Electronics Letters, 1982, Vol. 18.
- [34] P. Jorge, L. Ferreira e J. Santos, “*Analysis of the flyback effects on the serrodyne interferometric demodulation of fiber optic bragg grating sensors*”, Optical Engineering, 2000, Vol. 39.
- [35] C. Misas e F. Araújo, “*Interrogation of Low-Finesse Fabry–Pérot Cavities Based on Modulation of the Transfer Function of a Wavelength Division Multiplexer*”, IEEE Journal of Lightwave Technology, 2001, Vol. 19.
- [36] Y. Lo e C. Chuang, “*New Synthetic-Heterodyne Demodulator for an Optical Fiber Interferometer*”, IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, Vol. 37.
- [37] *Toptica DFB Laser 1572 nm 40 mW*, 2011.
- [38] *Avanex DFB Laser 1530 nm 10 mW*, 2005.
- [39] A. Wada e S. Tanaka, “*Optical fiber vibration sensor using FBG Fabry-Perot interferometer with wavelength scanning and Fourier analysis*”, IEEE Sensors Journal, 2011.
- [40] L. Gonçalves, “*Configuração interferométrica diferencial para medição de deformação e temperatura*”, Universidade da Madeira, 2010.
- [41] Instrumentação Virtual - Developer Zone - National Instruments, [Online] [Citação: 04 do 01 de 2011] <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/9909>.
- [42] H. Goldberg, “*What is Virtual Instrumentation?*”, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2000.
- [43] R. Bitter, “*LabView-Advanced Programming Techniques*”, CRC Press, 2007.
- [44] S. Sumathi e P. Surekha, “*LabVIEW based advanced instrumentation systems*”, 2007.

[45] N. Kehtarnavaz e N. Kim, “*Digital Signal Processing System Level Design Using LabVIEW*”, Newnes, 2005.

[46] Corning SMF-28 Optical Fiber Datasheet, [Online] 02 do 03 de 2011, <http://www.photonics.byu.edu/FiberOpticConnectors.parts/images/smf28.pdf>.

[47] C. Gouveia, “*Sensores em fibra óptica para monitorização ambiental*”, Universidade da Madeira, 2008.

[48] L. Lang e F. Gao, “*Study on Temperature Compensation Principle of Fiber-Optic Fabry-Perot Strain Sensor*”, Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application, 2009.

[49] S. Tripathi e A. Kumar, “*Strain and Temperature Sensing Characteristics of Single-Mode–Multimode–Single-Mode Structures*”, Journal Of Lightwave Technology, 2009, Vol. 29.

[50] L. Yu-Lung e C. Kuo, “*Packaging a Fiber Bragg Grating Without Preloading in a Simple Athermal Bimaterial Device*”, IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2002, Vol. 25.

[51] K. Hill e G. Meltz, “*Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview*. Journal of Lightwave Technology”, 1997, Vol. 15.

[52] A. Kersey e M. Davis, “*Fiber Grating Sensors*”, Journal of Lightwave Technology, 1997, Vol. 15.

[53] J. Yang e Y. Yuan, “*A novel Quasi-distributed sensing Network based on non-balance Mach-Zehnder autocorrelator*”, SPIE, 2011, Vol. 7753.

[54] W. Du e X. Tao, “*Fiber Bragg Grating Cavity Sensor for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature*”, IEEE Photonics Technology Letters, 1999, Vol. 11.

Anexos

A) Programa de Simulação de cavidades

A1) Código em Mathscript que gera o espectro dos sensores

```

% ----- Model Parameters -----
% ***** FBG Parameters *****
R1 = 0.04;           % Reflectivity of the FBG1
R2 = 0.04;           % Reflectivity of the FBG2
%R_ext = 0.04;      % Reflectivity of the junction fiber-air
%C = 1571e-9;       % FBG center wavelenght

%BW = 0.3e-9;       % FBG spectral width
% ***** Fibre Cavity Parameters *****
nf = 1.458;         % Fibre refractive index

%Comprimmentos das cavidades
%Ficam como entradas

% ***** Fringe Period *****
delta l1 = C^2/(2*nf*l1)
delta l2 = C^2/(2*nf*l2)
delta l3 = C^2/(2*nf*(l1+l2))
% ***** External Parameters *****
nf = 1.458;         %Fiber core index
%ne = 1.41;         % External refractive index
% ***** Other Parameters *****
opmax=0;           % Autoreference level variable.
% ----- Model -----
% ----- Preliminary -----
ne=n_ext;
Fr = ((nf-ne)/(nf+ne))^2; % Fresnel Reflection (%)
R_ext=Fr
% ----- Optical Power -----
Io = 10;           % Intensity of the source
Io1 = (1-R1)*Io;   % Intensity of light after FBG
I1 = Io*R1;       % Intensity of 1st beam
I2 = Io1*R2;
I3 = I2*(1-R1);
Io2 = Io1*(1-R2);
I4 = Io2*R_ext;
I5 = I4*(1-R2);
I6 = I5*(1-R1);

% ----- Spectra -----
l_low = C - 5e-10;
l_high = C + 5e-10;
lambda = [l_low:lambda_s:l_high]; % Wavelength

%Comprimmentos das cavidades
S=dL/Ls; %Strain
l1 = l1 + (S*l1)*i1;
l2 = l2 + (S*l2)*i2 3;

%Variação do índice de refração em função da temperatura
Temp sensibility = 1.24e-5;
nf = nf + (Temp sensibility*Temp);

%Spectrum of Gaussian Distribution:
% LB=2.355*sigma
% (http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/math/gaufcn2.html#c1)
FBG = exp((-0.5*(lambda-C).^2)/((BW/2.355)^2)); % FBG Simulated Spectrum

% ----- Reflection due FBGs -----
R1_FBG = R1*FBG;
R2_FBG = R2*FBG;

T1_FBG = 1-(R1_FBG);
T2_FBG = 1-(R2_FBG);

% ----- Case 1 -----
% ----|||-----| FBG and Mirror

%Optical Power
Io = 1; % Normalized Intensity of the source

```

```

I1 = I0*R1 FBG;      %FBG1

I2 = I0*T1 FBG;      %FBG1
I3 = I2*R2;          %Mirror
I4 = I3.*T1_FBG;    %FBG1

%Cavity Spectrum
FI0 = 0;
FI1 = ((4*pi*(nf*l1))./(lambda)) + FI0;          % FP Cavity Phase
FP1 = (I1+I4+2*sqrt(I1.*I4).*cos(FI1));          % FP Spectrum

If1 = FP1;
% ----- end Case 1 -----

% ----- Case 2 -----
% ----||-----|| 2 FBGs

%Optical Power
%Cavity number 1
I3 = I2.*R2_FBG;    %FBG2
I4 = I3.*T1_FBG;    %FBG1

%Cavity Spectrum
FI1 = ((4*pi*(nf*l1))./(lambda)) + FI0;          % FP Cavity Phase
FP1 = (I1+I4+2*sqrt(I1.*I4).*cos(FI1));          % FP Spectrum
If2 = FP1;
% ----- end Case 2 -----

% ----- Case 3 -----
% ----||-----||-----| 2 FBGs and Mirror

%Optical Power
I5 = I2.*T2 FBG;
I6 = I5*R ext;
I7 = I6.*T2 FBG;
I8 = I7.*T1_FBG;

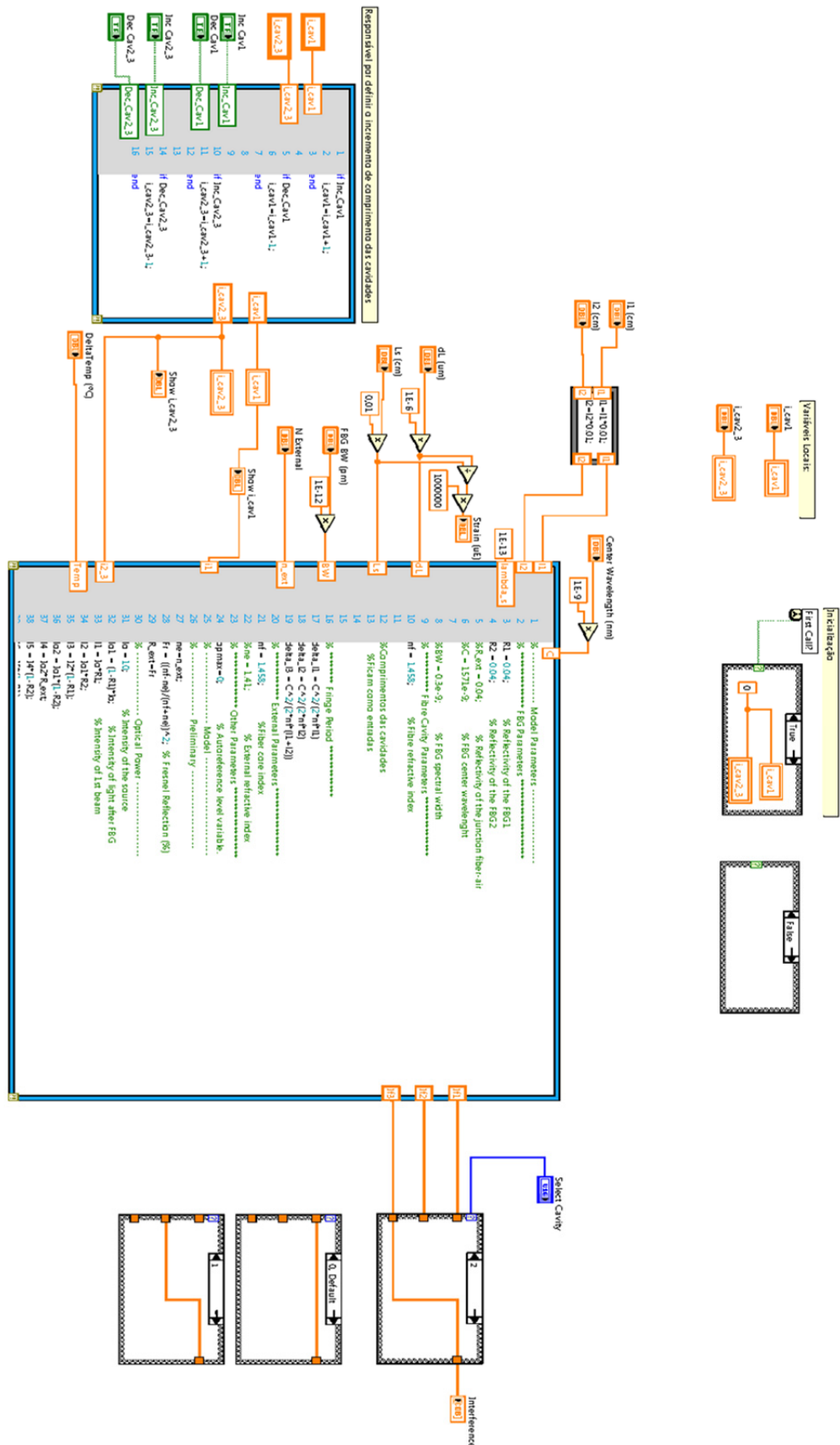
%2nd Cavity Spectrum
FI2 = ((4*pi*(nf*l2))./(lambda)) + FI0;          % FP Cavity Phase
FP2 = (I4+I8+2*sqrt(I4.*I8).*cos(FI2));          % FP Spectrum

%3rd Cavity Spectrum
FI3 = ((4*pi*(nf*(l1+l2))./(lambda)) + FI0;          % FP Cavity Phase
FP3 = (I1+I8+2*sqrt(I1.*I8).*cos(FI3));          % FP Spectrum

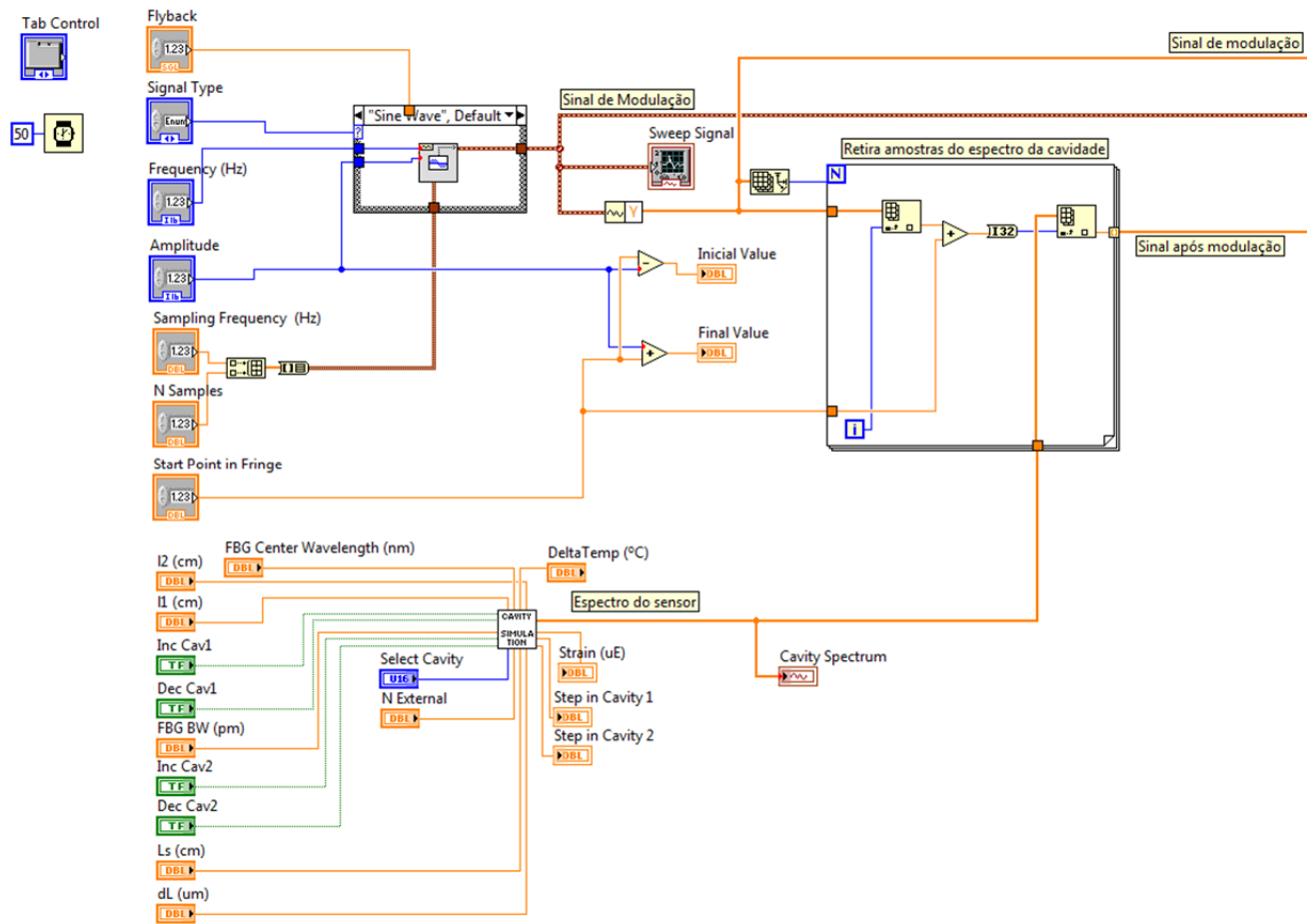
If3 = FP1.*FP2.*FP3;
% ----- end Case 3 -----

```

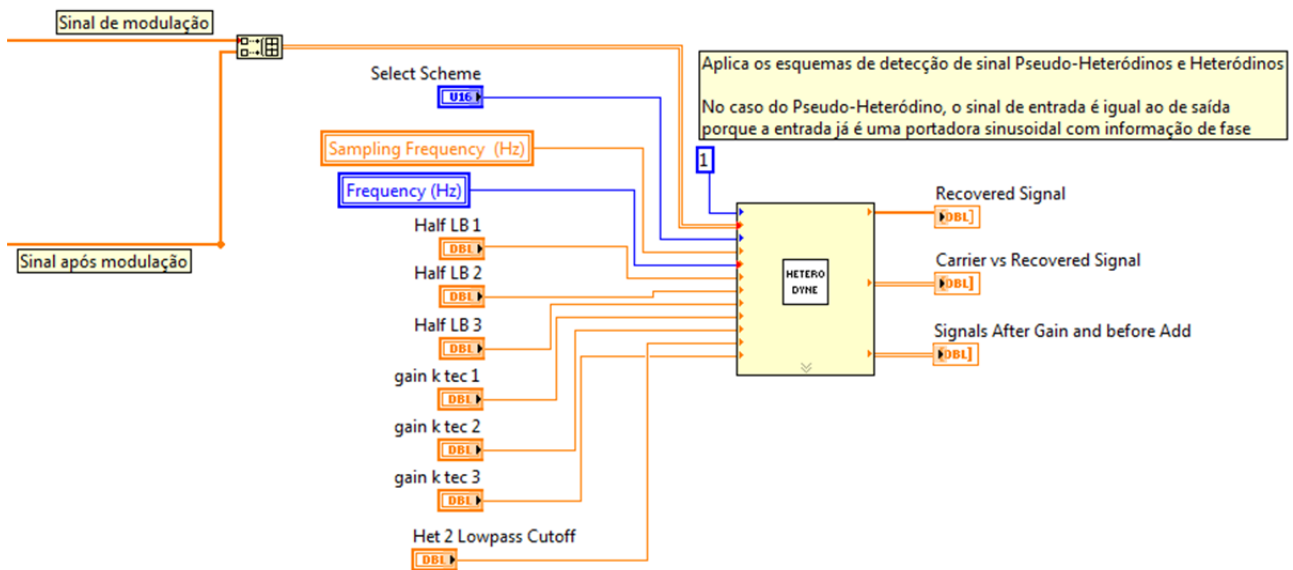
A2) Diagrama de blocos responsável por gerar o espectro do sensor pretendido "Cavity Simulation.vi"



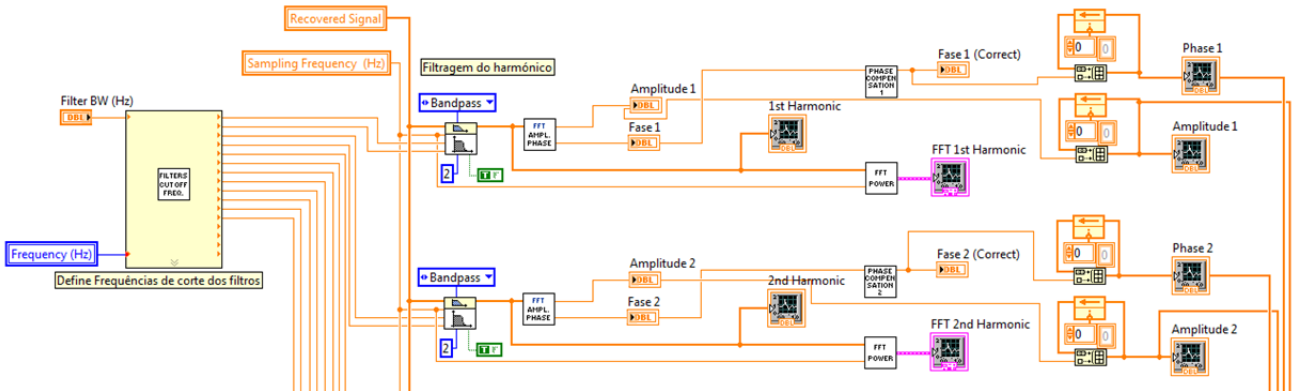
A3) Diagrama de blocos responsável por efectuar o varrimento do espectro da cavidade, de acordo com o sinal de modulação



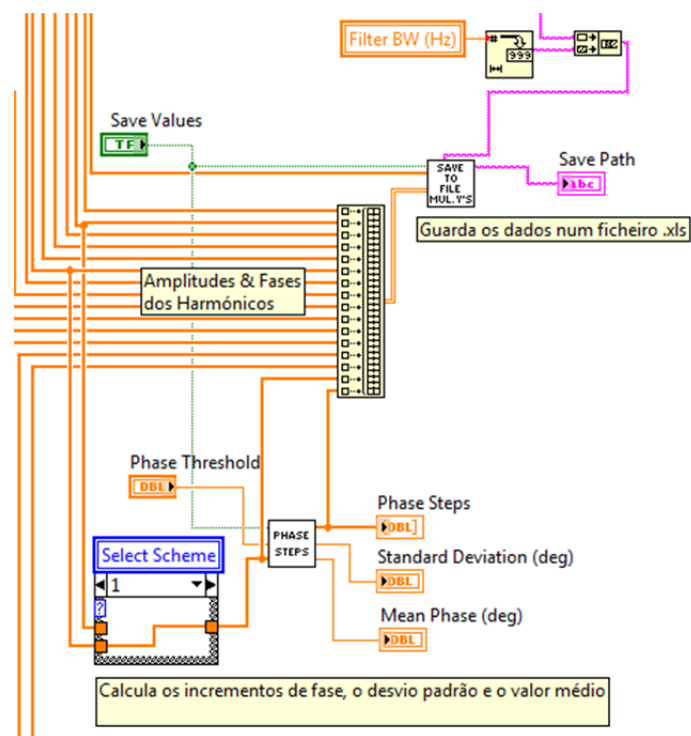
A4) Diagrama de blocos dos esquemas de detecção de sinal



A5) Diagrama de blocos responsável por calcular a FFT e retirar a fase do primeiro e segundo harmónico

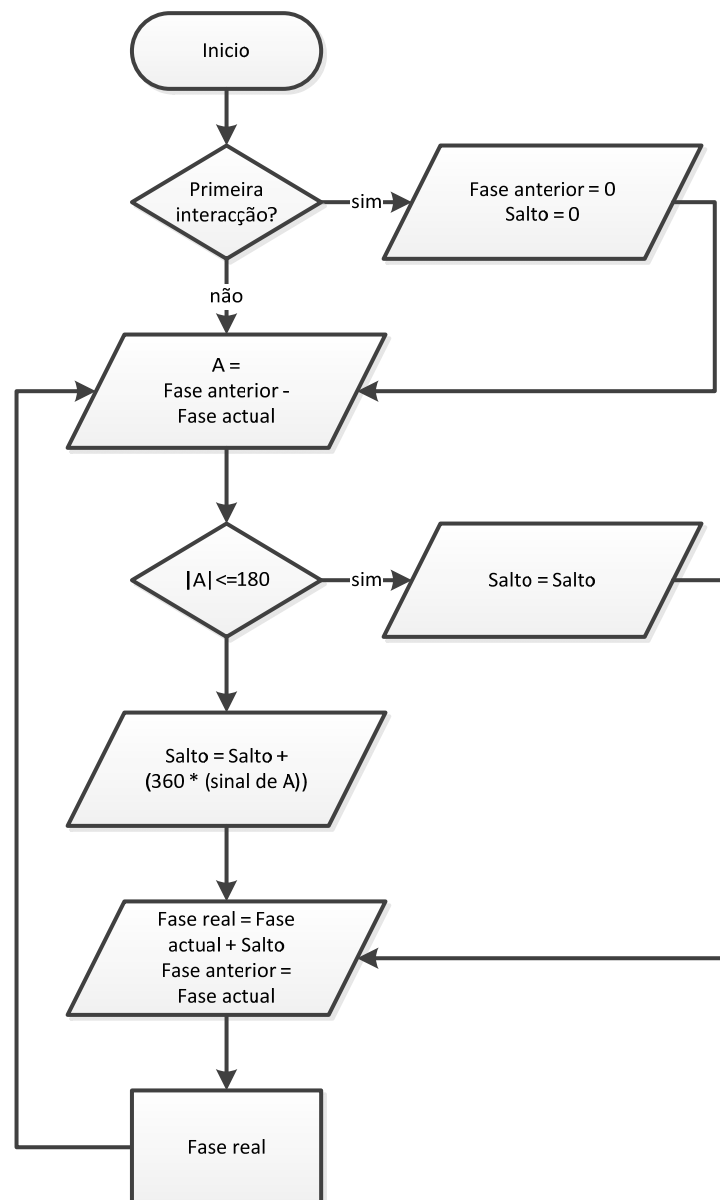


A6) Diagrama de blocos responsável por guardar as variações de fase e de amplitude dos harmónicos



B) Algoritmo de compensação de fase

B1) Fluxograma



B2) Implementação em LabVIEW

Painel Frontal

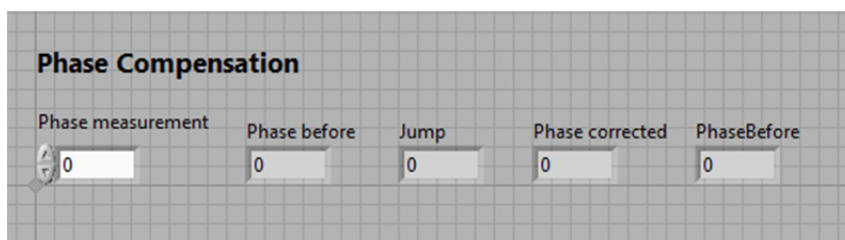
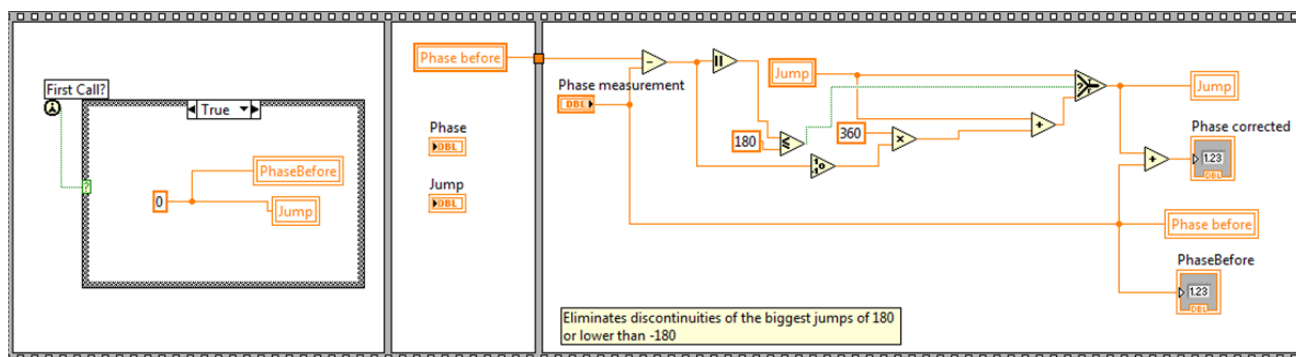
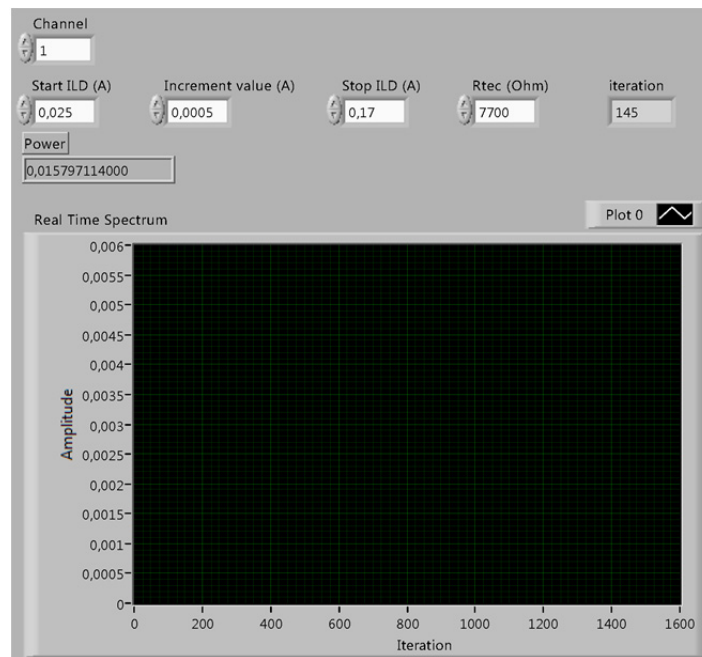


Diagrama de blocos

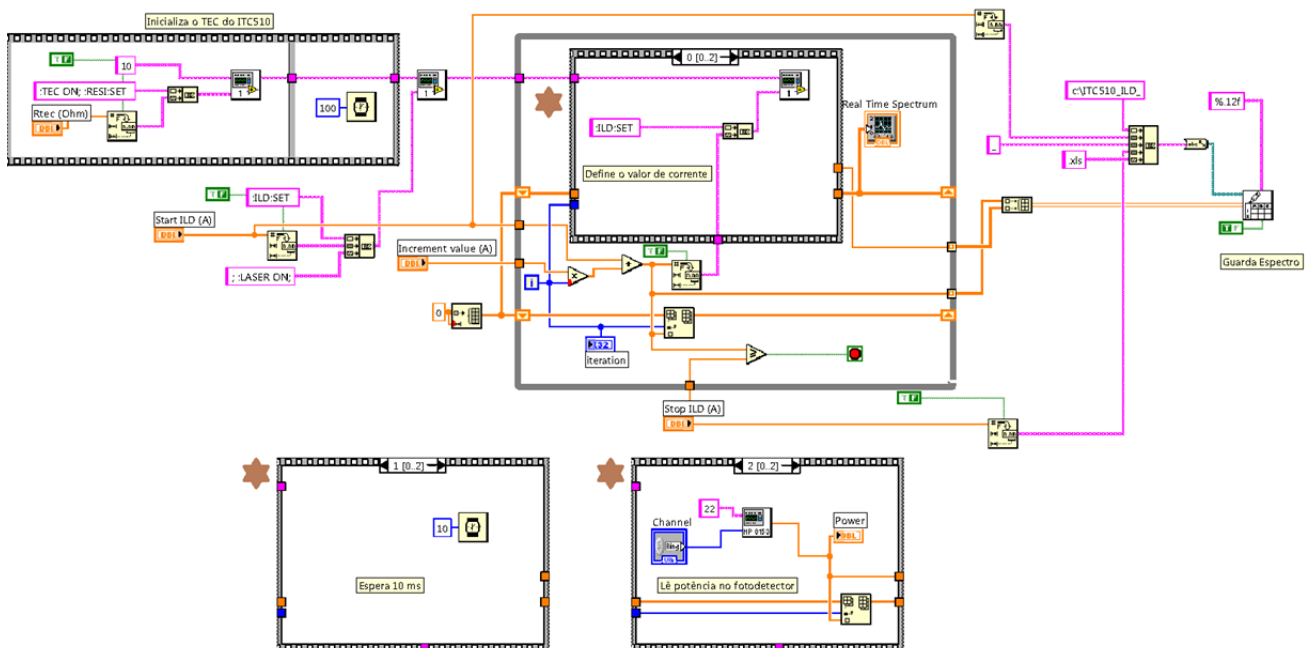


C) Programa de aquisição de espectros com controlador de corrente e tensão ITC-510 e fotodetector HP8153A

C1) Interface do utilizador

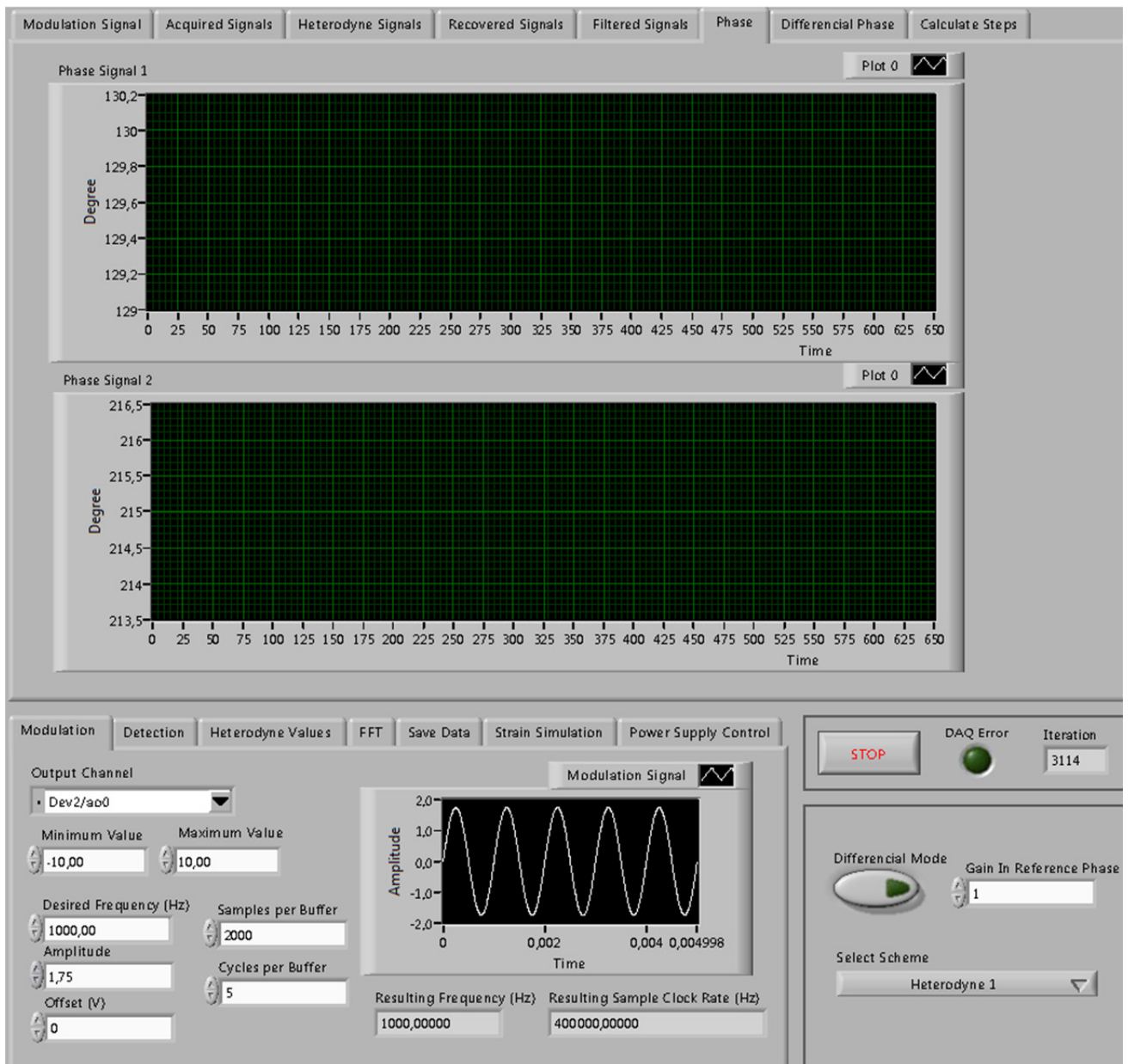


C2) Diagrama de blocos

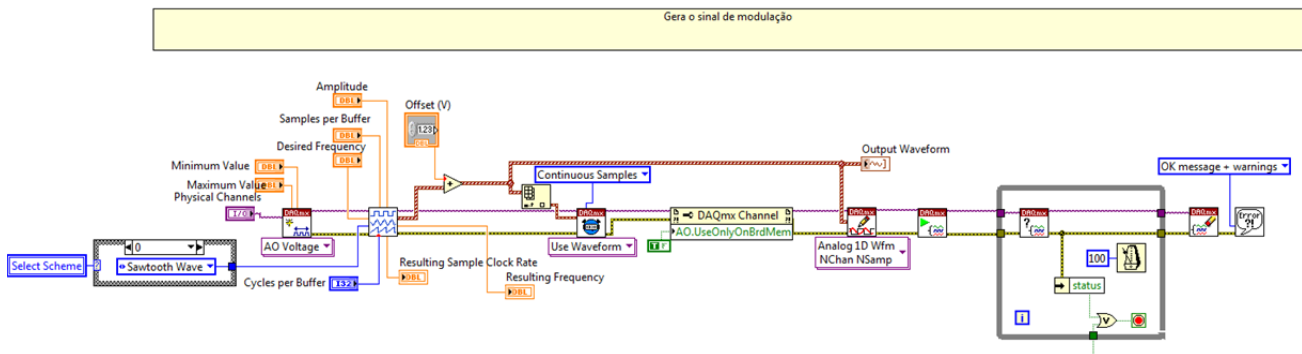


D) Programa de aquisição de fase

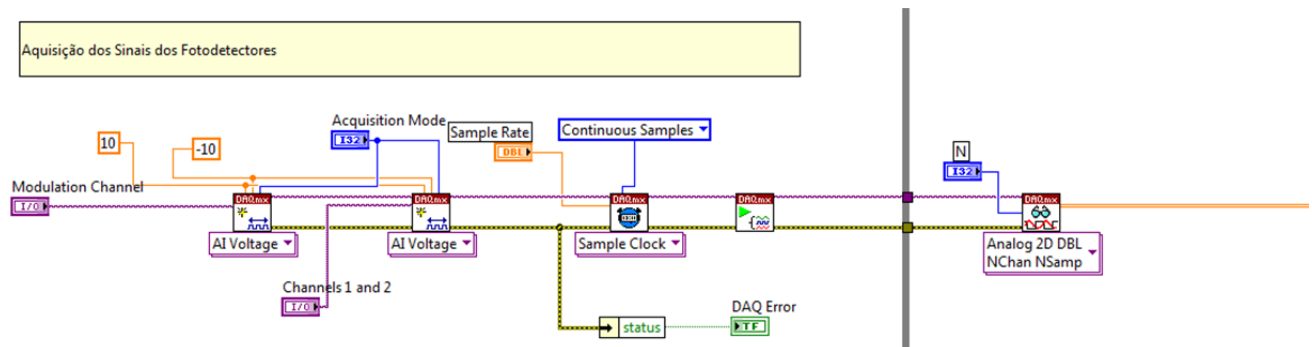
D1) Interface do utilizador



D2) Diagrama de blocos responsável por gerar o sinal de modulação, de acordo com o esquema de detecção de sinal



D3) Diagrama de blocos responsável por adquirir o sinal de modulação, sinais do sensor de medida e de referência



D4) Diagrama de blocos que efectua o processamento diferencial do sinal do sensor de medida e de referência

