



Leonardo Correia Gonçalves

# **Configuração interferométrica diferencial para medição de deformação e temperatura**

Centro de Competência de Ciências Exactas e da Engenharia

Universidade da Madeira

Outubro de 2010





Leonardo Correia Gonçalves

# **Configuração interferométrica diferencial para medição de deformação e temperatura**

*Dissertação submetida à Universidade da Madeira para a obtenção do grau de*

*Mestre em Engenharia de Telecomunicações e Redes*

Centro de Competência de Ciências Exactas e da Engenharia

Universidade da Madeira

Outubro de 2010



Dissertação realizada sob a supervisão do

**Doutor José Manuel Rocha Teixeira Baptista**

Professor Associado do Centro de Competência 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.



*A arte de vencer aprende-se nas derrotas.*

**Simón Bolívar**

(1783 - 1830)



# Agradecimentos

---

Agradeço a todos os que numa ou outra maneira contribuíram a que pudesse chegar ao fim desta jornada, com especial ênfase:

A minha avó, Lourdes; meus pais, Maria do Carmo e João Adriano, meus irmãos, [Adriano José](#) e [Roberto António](#), pelo apoio e todo o esforço que fizeram durante minha vida que me tornaram na pessoa que sou hoje. A minha madrinha [Liliana](#) pela sua amizade incondicional.

A instituição que me deu formação primária e secundária, [Colégio La Salle La Colina](#), que não se limitou a dar-me uma formação académica senão afixar os valores que são minha referência na vida.

A [Hélder Freitas](#), [Ricardo Gonçalves](#), Luís Bacanhim e Sílvia Gordon donos e colegas da empresa [Insularmática](#) que me deram a oportunidade de ser seu colaborador e foram de grande importância na minha adaptação à realidade da Região.

A [Universidade da Madeira](#) por a qualidade de sua formação científica, e semear as capacidades de trabalho e perseverança, fazendo uma especial referência ao: [Prof. Luís Gomes](#), [Prof. Amândio Azevedo](#), [Eng. Filipe Santos](#), e [Prof. Dionísio Barros](#).

Ao [Prof. José Manuel Baptista](#) por sua colaboração como orientador desta dissertação e pela oportunidade dada para realizar a parte experimental deste trabalho nas instalações do [INESC-Porto](#).

Ao bom recebimento, e as condições materiais e humanas que me foram disponibilizadas no INESC-Porto, com especial referência ao: [Prof. José Luís Santos](#), [Prof. Manuel Joaquim Marques](#), [Prof. Paulo Marques](#), [Prof. Sérgio Mendonça](#), Askari Ghalam, [Carina Correia](#), [Carlos de Jesus](#), [Diana Viegas](#), Gaspar Pacheco, [Gerardo González](#), Hamid Hosseiny, [Ireneu Dias](#), Jaime Viegas, [João Ferreira](#), [Joel Carvalho](#), José Carlos Azevedo, Judyta Tillak, Luís Amaral, [Luís Coelho](#), [Luísa Mendonça](#), [Orlando Frazão](#), [Paula Tafulo](#), [Paulo Caldas](#), [Pedro Jorge](#), [Raquel Queirós](#), [Susana Silva](#) e [Yonny Romaguera](#).

E finalmente, e não por menos importantes, a colegas e amigos que acompanharam lado a lado este percurso, com o risco de esquecer de algum: Adrian Ocneanu, Alexandre Nunes, Alice Andrade, [Carla Santos](#), Catarina Bruno, [Darío Baptista](#), Eduardo Velosa, [Enrique](#)

[Gonçalves](#), Fávio Gomes, Felipe Oliveira, Filipe Gouveia, Filipe Ramos, Francisco Dinis, Guido Silva, José Miguel, [Ivo Nascimento](#), [Jenny Gouveia](#), Juan Teixeira, Lina Teixeira, Luis Marques, [Maurício Rodrigues](#), [Norberto Freitas](#), [Priscilla Moraes](#), Ricardo Luís, Rodolfo Neves, [Rosália Pestana](#), Sandra Duarte, Tiago Braga, Tiago Marques, [Tony Pereira](#), [Victor Andrade](#) e [Vitor Rodrigues](#).

# Sumário

---

Este documento descreve a implementação de um sistema interferométrico diferencial para a interrogação de redes de Bragg com o objectivo da medição diferencial de deformação e temperatura. Foram implementados dois sistemas de interrogação, um utiliza uma configuração implementada através de instrumentação física, e outro, uma configuração implementada através de instrumentação virtual, desenvolvida com recurso ao ambiente LabVIEW®. O esquema diferencial permite diminuir os efeitos de sensibilidade cruzada indissociáveis a estes sistemas.

Foram realizados testes de deformação e temperatura de forma a validar o funcionamento do sistema virtual. Em ambos os casos, os resultados foram próximos dos obtidos com o sistema convencional, verificando-se que a instrumentação virtual é uma forma de aproveitar as vantagens que este esquema de interrogação apresenta: grande sensibilidade e elevada gama dinâmica, e permite reduzir uma de suas desvantagens, o elevado custo.

Verificou-se ainda a viabilidade da aplicação da configuração estudada num sistema de análise térmica diferencial para identificação de compostos em amostras desconhecidas. O sistema foi demonstrado utilizando uma mistura de acetona e metanol.

Do trabalho realizado nesta dissertação foi possível efectuar algumas publicações que foram submetidas em Revistas e Conferências Científicas. A primeira ao *Symposium On Enabling Optical Networks and Sensors SEON - 2010*, Anexo A. A segunda à *21<sup>st</sup> International Conference on Optical Sensors - OFS 2011*, Anexo B. E uma terceira submetida à revista *Journal of Lightwave Technology*, Anexo C.

Palavras-chave: interferometria diferencial, análise térmica diferencial, FBG, instrumentação virtual.



# Summary

---

This work describes the implementation of a differential interferometric sensing system for the interrogation of fiber Bragg gratings, with the aim of achieving the differential measurement of strain and temperature. The system is interrogated using a traditional hardware setup as well as a virtual instrumentation setup, which was developed using the LabVIEW® environment. The differential scheme allows the reduction of the effects of cross-sensitivities, which are intrinsic to these systems.

Tests of strain and temperature were performed to validate the virtual instrumentation system. Similar results were obtained, for temperature and strain measurements, using the hardware and the virtual systems.

It was verified that virtual instrumentation is a way to take advantage of the interferometric interrogation scheme, with high sensitivity and wide dynamic range, and at the same time reducing one of its major drawbacks, which is its high implementation cost. Also it was verified the feasibility of application of the differential thermal analysis for the detection of unknown samples. The system was demonstrated using a mixed acetone and methanol sample.

The work performed in this thesis was possible that some publications were submitted in Scientific Journals and Conferences. The first one to the *Symposium On Enabling Optical Networks and Sensors SEON - 2010*, Appendix A. The second one *21<sup>st</sup> International Conference on Optical Sensors - OFS 2011*, Appendix B. And the third submitted to a *Journal of Lightwave Technology*, Appendix C.

Key-words: Differential interferometry, Differential thermal analyse, FBG, Virtual Instrumentation.

# Índice de conteúdos

---

Agradecimentos .....	9
Sumário .....	11
Summary .....	13
Índice de conteúdos.....	14
Índice de figuras.....	16
Índice de tabelas.....	18
Lista de acrónimos .....	19
1. Introdução.....	21
1.1. Motivação.....	21
1.1. Objectivos.....	22
1.2. Sensores.....	23
1.3. Sensores em fibra óptica.....	24
1.4. Interferometria.....	25
1.5. Organização da dissertação .....	27
2. Sensores interferométricos.....	29
2.1. Introdução.....	29
2.1.1. Visibilidade ou contraste.....	30
2.1.2. Coerência duma fonte óptica.....	31
2.2. Interferómetros .....	31
2.2.1. Interferómetro de Michelson.....	32
2.2.2. Interferómetro de Mach-Zehnder.....	32
2.2.3. Interferómetro de Fabry-Pérot .....	34
2.3. Esquemas de detecção .....	36
2.3.1. Técnica homódina .....	36
2.3.2. Técnica heteródina .....	38
2.3.3. Técnica Pseudo-heteródina .....	39
2.4. Instrumentação virtual.....	42
2.5. Redes de Bragg.....	43
2.6. Caracterização de um sensor .....	45
3. Caracterização do sistema.....	49
3.1. Esquema desenvolvido .....	49
3.2. Implementação do esquema de detecção.....	54
3.3. Medição da diferença de fase .....	55
3.3.1. Implementação virtual.....	57

4. Medição diferencial de deformação .....	61
4.1. Introdução .....	61
4.2. Testes e resultados .....	62
5. Medição diferencial de temperatura .....	69
5.1. Introdução .....	69
5.2. Diferença de temperatura .....	69
5.3. Calibração .....	71
5.4. Análise térmica diferencial .....	80
5.4.1. Introdução .....	80
5.4.2. Processo de implementação .....	81
5.4.3. Testes e resultados .....	84
6. Conclusões .....	89
6.1. Trabalho futuro .....	90
Referências bibliográficas .....	91
Anexos .....	95
Anexo A .....	96
Anexo B .....	99
Anexo C .....	104
Anexo D .....	110
Anexo E .....	114

# Índice de figuras

---

Figura 1.1 - Estrutura geral de um sensor [6].	23
Figura 1.2 - Classificação dos sensores em fibra óptica [10].	25
Figura 1.3 - Exemplificação da teoria do éter. Movimento de translação da terra e direcção e sentido do éter [13].	26
Figura 1.4 - Esquema do interferómetro de Michelson-Morley [13].	27
Figura 2.1 - Interferograma de dois feixes provenientes da mesma fonte óptica [17].	30
Figura 2.2 - Esquema do interferómetro de Michelson implementado em fibra [10].	32
Figura 2.3 - Interferómetro de Mach-Zehnder implementado em fibra óptica.	33
Figura 2.4 - Variação da intensidade em função da fase relativa entre os feixes do interferómetro de Mach-Zehnder e Michelson [18].	33
Figura 2.5 - Utilização do interferómetro de Mach-Zehnder para a geração de uma portadora através da modulação em fase de um dos braços [18].	34
Figura 2.6 - Esquema de um interferómetro de Fabry-Pérot, ( $P_i$ : potência incidente, $P_r$ : potência reflectida e $P_t$ : potência transmitida) [18].	35
Figura 2.7 - Interferómetro de Fabry-Pérot implementado em fibra óptica.	35
Figura 2.8 - Esquema do sistema de detecção homódino aplicado a um interferómetro de Mach-Zehnder.	36
Figura 2.9 - Desmodulador homódino passivo.	38
Figura 2.10 - Esquema de detecção pseudo-heteródino aplicado a um interferómetro de Mach-Zehnder.	39
Figura 2.11 - Sinais intervenientes no esquema de detecção pseudo-heteródino: (a) Na parte superior, sinal de modulação, na parte inferior, sinal detectado pelos fotodetectores; (b) Espectro do sinal detectado pelos fotodetectores [10].	40
Figura 2.12 - Detector Pseudo-heteródino para um interferómetro não balanceado de Mach-Zehnder com uma rede de difracção de referência [23].	41
Figura 2.13 - Rede de Bragg e propagação de sinais através dela [29].	43
Figura 2.14 - Gama dinâmica e FSO de um sensor.	46
Figura 2.15 - Resposta de um sensor que apresenta histerese.	46
Figura 2.16 - Grau de exactidão de um sensor.	46
Figura 2.17 - Exemplificação da linearidade de um sensor.	47
Figura 2.18 - <i>Threshold</i> (limiar) e resolução de um sensor.	48
Figura 3.1 - Esquema do sistema desenvolvido.	49
Figura 3.2 - Percurso aéreo.	50
Figura 3.3 - Interferómetro modulador.	51
Figura 3.4 - Espectros ópticos: (a) Fonte óptica; (b) Saída do sistema com a diferença de percurso óptico entre os braços do interferómetro perto de zero; (c) Saída do sistema com a diferença de percurso óptico entre os braços do interferómetro maior que zero.	52
Figura 3.5 - Envoltente da Função de transferência do interferómetro de Mach-Zehnder implementado.	54
Figura 3.6 - Esquema do sistema implementado com a inclusão dos fotodetectores e a DAQ.	54
Figura 3.7 - (a) Sinal de modulação; (b) Sinais detectados pelos fotodetectores.	55
Figura 3.8 - Esquema de montagem utilizando um LIA físico.	56
Figura 3.9 - Esquema implementado em que a comparação da fase dos sinais à saída é realizada através de instrumentação virtual.	57

Figura 3.10 - Esquema de funcionamento do <i>software</i> de comparação de fase implementado em LabVIEW®.....	57
Figura 3.11 - Algoritmo de compensação de fase para valores mudanças superiores a $\pm 180^\circ$ .....	59
Figura 3.12 - Desvio de fase no esquema diferencial e não diferencial.....	60
Figura 4.1 - Esquema de posicionamento da rede de Bragg para a medição de deformação.....	61
Figura 4.2 - Espectro das redes de Bragg: (a) Par com comprimentos de onda de 1550 nm; (b) Par com comprimentos de onda de 1550 e 1552 nm; (c) Par com comprimentos de onda de 1545 e 1550 nm.....	63
Figura 4.3 - (a) Esquema da montagem realizada para a medição de deformação; (b) e (c) Área de trabalho.....	64
Figura 4.4 - Medição da deformação utilizando um par de redes de Bragg de 1550, com os sistemas de aquisição físico e virtual.....	64
Figura 4.5 - Medição de reversibilidade do sistema.....	65
Figura 4.6 - Resultados de desvio médio de fase e aplicação da deformação para os diferentes pares de redes de Bragg; (a) e (b) 1545 - 1550 nm; (c) e (d) Ambas de 1550 nm; (e) e (f) 1550 - 1552 nm.....	66
Figura 5.1 - Medição dinâmica de temperatura.....	71
Figura 5.2 - Variação da tensão em função da temperatura nos diferentes tipos de termopares.....	72
Figura 5.3 - Termopar do tipo J.....	72
Figura 5.4 - (a) Esquema da montagem; (b) Montagem realizada.....	74
Figura 5.5 - Calibração da resistência de platina.....	74
Figura 5.6 - Curva de calibração do termistor utilizado.....	75
Figura 5.7 - Esquema de montagem para a medição diferencial de temperatura.....	76
Figura 5.8 - Resultados da variação de temperatura medidos com os sistemas virtual e físico.....	76
Figura 5.9 - Resultados da variação de temperatura medidos com o sistema virtual para três pares diferentes de redes de Bragg com diferentes comprimentos de onda (variação total de temperatura $\sim 5^\circ\text{C}$ ).....	77
Figura 5.10 - Resultados de variação de temperatura medidos com o sistema virtual para três pares diferentes de redes de Bragg com diferentes comprimentos de onda (variação total de temperatura $\sim 40^\circ\text{C}$ ).....	78
Figura 5.11 - Medição dinâmica perante variações de temperatura, sendo utilizando diferentes variações de percurso óptico no interferómetro modulador.....	79
Figura 5.12 - Curvas detectadas ao aplicar a análise térmica: (a) Amostra e referência aquecidas; (b) Só amostra aquecida [67].....	80
Figura 5.13 - Esquema de montagem.....	82
Figura 5.14 - Resultados obtidos da temperatura em função do tempo ao aplicar-se uma taxa de corrente em função do tempo: (a) Taxa de 1 mA/s; (b) Taxa de 5 mA/s.....	82
Figura 5.15 - (a) e (b) Esquema da embalagem utilizada para a aplicação da análise térmica diferencial; (c) Embalagem já construída.....	84
Figura 5.16 - Resultado obtido ao aplicar a análise térmica diferencial sendo utilizada acetona como amostra.....	84
Figura 5.17 - Comparação de duas experiências ao aplicar a análise térmica diferencial sendo utilizada acetona como amostra.....	85
Figura 5.18 - Resultado obtido na aplicação da análise térmica diferencial utilizando acetona e metanol como amostras.....	86

# Índice de tabelas

---

Tabela I - Comprimento físico e óptico do interferómetro modulador.....	51
Tabela II - Medição da deformação utilizando os sistemas físico e virtual.....	65
Tabela III - Desvio médio de fase e sensibilidade medidos utilizando diferentes pares de redes de Bragg.....	67
Tabela IV - Comparação entre sistemas interferométricos de medição de deformação.....	67
Tabela V - Tipos de termopares em função dos seus constituintes.....	72
Tabela VI - Sensibilidade dos sistemas físico e virtual perante variações de temperatura.....	77
Tabela VII - Resultados de sensibilidade à temperatura medidos com o sistema virtual, utilizando três pares diferentes de redes de Bragg, (variação total de temperatura ~5 °C).....	77
Tabela VIII - Resultados de sensibilidade à temperatura medidos com o sistema virtual, utilizando três pares diferentes de redes de Bragg, (variação total de temperatura ~40 °C)....	78
Tabela IX - Variação da sensibilidade em função da diferença de percurso óptico no interferómetro de leitura.....	79
Tabela X - Resultados de linearidade do incremento de temperatura para diferentes taxas de incremento de corrente.....	82

# Lista de acrónimos

---

A.D. - Acoplador Direccional.

A/D - Analógico/Digital.

APC - Contacto físico angulado.

APTH - Seguidor homódino de fase activo,.

AWTH - Sintonizador homódino activo de comprimento de onda.

DAQ - Placa de aquisição.

D/A - Digital/Analógico.

DC - Valor médio de amplitude.

EDFA - Amplificador de Fibra Dopada com Érbio.

FBG - Rede de Bragg.

FC - Ligação fixa.

FPI - Interferómetro de Fabry-Perót.

FSO - Gama de saída.

GPIB - Interface em Barramento para Propósitos Gerais.

GRIN - Lentes de Índice Variável.

IEEE - Instituto de Engenharia Eléctrica e Electrónica.

LIA - Amplificador *Lock-in*.

NTC - Coeficiente de Temperatura Negativo.

OPD - Diferença de Percurso Óptico.

OSA - Analisador de Espectro Óptico.

PID - Proporcional, Integrativo e Derivativo.

PTC - Coeficiente de Temperatura Positivo.

PZT - Transdutor Piezoeléctrico.

UV - Ultravioleta.

WLI - Interferometri de Luz Branca.



# 1. Introdução

---

## 1.1. Motivação

A necessidade de medir é tão antiga como o início da civilização. A realização de medidas encontra-se intimamente ligada a muitas das tarefas mais simples e quotidianas. Desde quantificar ou pesar os produtos que se compram, vendem ou trocam, medir distâncias, superfícies de terrenos, até definir as medidas de um edifício que se pretenda construir e o período de tempo que leva até o concluir [1].

A medição pode ser definida como o processo pelo qual são atribuídos números ou símbolos a atributos de entidades do mundo real, de tal forma que os descreva de acordo com regras claramente definidas. É comparar com uma unidade de medida ou critério, e quantificar quantas vezes a contém. Determinar a proporção entre os objectos e uma unidade de medida referencial padronizada [2].

Os resultados obtidos pelo processo de medição são transformados em informação, através do contraste e análise. Esta por sua vez transforma-se em conhecimento quando comparada com a experiência prévia. O conhecimento é a nossa percepção da realidade, logo, é perceptível a necessidade de medir para as diferentes actividades técnicas e científicas.

A medição é um elemento essencial para estabelecer um diagnóstico, um ponto de referência que permite o melhoramento. Com o aumento da precisão na medida o diagnóstico é mais rigoroso, facilitando o processo de aperfeiçoamento e incrementando as possíveis aplicações [3].

Com os avanços tecnológicos, acresceram as áreas onde foi necessário quantificar a presença de um elemento ou o registo de um acontecimento de forma precisa. Dentro delas encontram-se a medição de parâmetros bioquímicos, sendo estes de particular relevância para variadas aplicações tais como: o controlo de processos industriais, a detecção de elementos perigosos, a monitorização de parâmetros ambientais, as aplicações biomédicas, entre outras.

Na procura de medidas cada vez mais precisas, a fibra óptica destaca-se como um elemento fundamental. Embora ela seja comumente associada às telecomunicações, as suas características intrínsecas tornam-na apelativa na área dos sensores. Algumas destas características são: o peso reduzido, a flexibilidade, a alta velocidade de transmissão a longa

distância, a elevada capacidade de multiplexagem de sinais, a resistência a altas temperaturas, o facto de ser não condutor e a imunidade a radiação electromagnética [4].

Dado o papel fundamental da fibra óptica nas comunicações globais, são realizados grandes esforços e investimentos para a investigação e desenvolvimento nesta área, resultando no aperfeiçoamento dos diferentes elementos dos sistemas de comunicação ópticos como: a fibra e os componentes ópticos e optoelectrónicos. Aproveitando estas melhorias surgem como *spin-off* desta tecnologia os sensores em fibra óptica [5].

Assim, existe um leque de possibilidades de medição no mercado dos sensores de fibra óptica, abrangendo diversos parâmetros, tais como: temperatura, pressão, vibração, velocidade, aceleração, deformação, quantidade de movimento angular, entre outros. No entanto existe ainda um extenso caminho por percorrer no desenvolvimento desta área, desde a criação de sensores capazes de medir diferentes parâmetros, até à optimização ou criação de novas técnicas que permitam aumentar a precisão e sensibilidade da medida [4].

Dentro das técnicas utilizadas para o desenvolvimento de sensores de fibra óptica, a interferometria é uma técnica de detecção extremamente sensível e a sua aplicação pode permitir a medição de variações, sejam: do índice de refração, associadas à presença de uma dada grandeza bioquímica; variações do comprimento de onda associada a uma rede de Bragg, pela variação de temperatura, deformação ou curvatura; entre outras. No entanto, a implementação de um sistema operacional requer que sejam ultrapassados problemas associados ao ruído de fase, sensibilidades cruzadas com a temperatura e vibração, entre outros.

### **1.1. Objectivos**

Neste contexto, este trabalho versa sobre a implementação de um sistema sensor interferométrico com capacidade de eliminar estas interferências, através de uma configuração diferencial, permitindo implementar um sensor diferencial de temperatura, utilizando redes de Bragg como elemento transdutor.

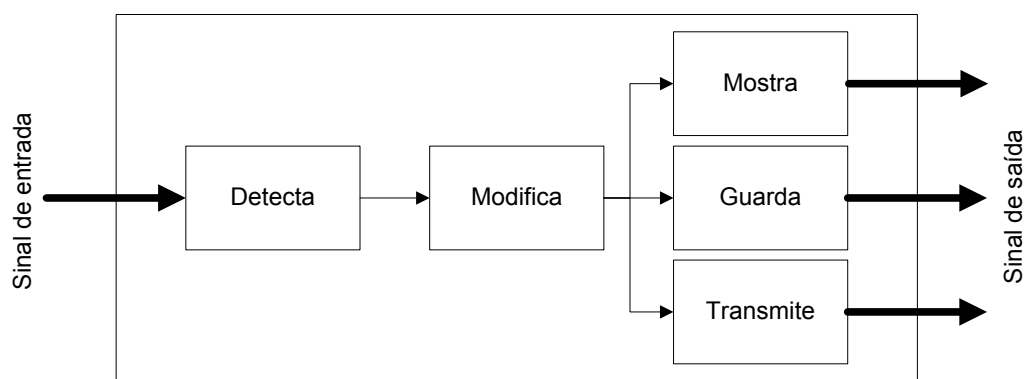
Uma vez verificado o correcto funcionamento do sistema, procuram-se formas para a diminuição de seu tamanho e custo, através da instrumentação virtual, e avaliando o seu comportamento em comparação com os sistemas desenvolvidos através de instrumentação tradicional.

Dada a complexidade do processo de fabrico de duas redes de Bragg idênticas, pretendeu-se também verificar o desempenho do sistema, utilizando pares de redes de Bragg com diferentes comprimentos de onda.

Finalmente, o objectivo último passou por utilizar o sistema desenvolvido numa aplicação concreta, tendo como base a análise térmica diferencial, para a identificação de amostras desconhecidas.

## 1.2. Sensores

Um sensor pode ser definido como sendo um dispositivo que responde a um estímulo e transmite como resultado um impulso proporcional à quantidade medida. Os sensores surgem ante a necessidade de quantificar os fenómenos físicos na natureza para a geração de informação ou para controlo de processos, que o ser humano, em alguns casos, percebe através dos seus próprios sentidos de forma qualitativa. De forma genérica, a estrutura básica de um sensor encontra-se esquematizada na Figura 1.1 [6].



**Figura 1.1** - Estrutura geral de um sensor [6].

O sensor precisa de um elemento transdutor que detecta o parâmetro a ser medido e o transforma geralmente num sinal eléctrico proporcional, para assim ser convertido em dados coerentes. O sensor poderá ser considerado a extensão do transdutor, com uma configuração adequada para a medida, com amplificação, conversão analógico/digital (A/D), e processamento de sinal adequado [6].

Os sensores podem ser classificados de acordo com vários parâmetros, não havendo uma classificação clara na bibliografia [7]. De entre as classificações encontradas, os sensores podem ser agrupados pelo tipo de sinal que geram: em analógicos, digitais ou temporais; pelo

tipo de valor que proporcionam: de medida ou de mudança de estado; pelo nível de integração: discretos, integrados ou inteligentes; pelo tipo de saída: lineares ou não lineares; pelo modo de operação: por deflexão ou por comparação; pelo tipo de variável a medir: temperatura, pressão, presença de um determinado elemento químico, entre outros; ou pelo tipo de elemento transdutor: mecânicos, térmicos, magnéticos, eléctricos, químicos, radioactivos ou ópticos [8].

Nesta última forma de classificação a presença do mensurando produz uma alteração do sistema de medição, motivando uma variação da energia mecânica, ou uma mudança da temperatura, ou uma alteração numa propriedade magnética ou eléctrica, ou originando um reacção química, ou mudando a intensidade da radiação emitida ou modulando de alguma forma um feixe óptico, respectivamente.

Este trabalho propõe um sistema de medição através de um sensor óptico. Dentro dos sensores ópticos podem-se identificar aqueles que utilizam a fibra óptica como guia de onda e os que prescindem dela.

### **1.3. Sensores em fibra óptica**

As técnicas de sensores ópticos têm sido ao longo do tempo associadas à medição com precisão e/ou de forma não intrusiva. Os sensores ópticos são constituídos por materiais dieléctricos, que são intrinsecamente seguros e imunes às interferências electromagnéticas. São também versáteis, já que o feixe óptico pode ser caracterizado por vários parâmetros independentes, tais como: intensidade; comprimento de onda; fase e polarização. Cada um destes parâmetros é potencialmente sensível quando aplicado a um mensurando. Portanto, existe uma grande variedade de mecanismos transdutores [9].

Os instrumentos ópticos convencionalmente precisam de mecanismos de estabilidade, de forma a manter o alinhamento óptico, restringindo as suas aplicações e necessitando de ambientes favoráveis. Esta situação foi revolucionada com a introdução da fibra óptica, a qual permitiu a interconexão flexível com o sensor. A disponibilidade de melhorias no processo de fabrico das guias de onda tem permitido que os sistemas sejam mais estáveis, facilitando o alinhamento e diminuindo custos. A fibra óptica também pode ser utilizada para criar a própria ponta de prova, com o propósito de realizar monitorização remota.

Os sensores podem ser classificados como intrínsecos e extrínsecos. Nos intrínsecos, o feixe óptico é guiado até ao ponto onde o mensurando modula o feixe óptico dentro da fibra, isto é, o mecanismo de transdução é baseado na modulação das propriedades do guia de onda, provocada pelo mensurando. Nos extrínsecos, o feixe não é guiado no local de medição. A Figura 1.2 apresenta uma classificação dos sensores ópticos implementados em fibra [9].

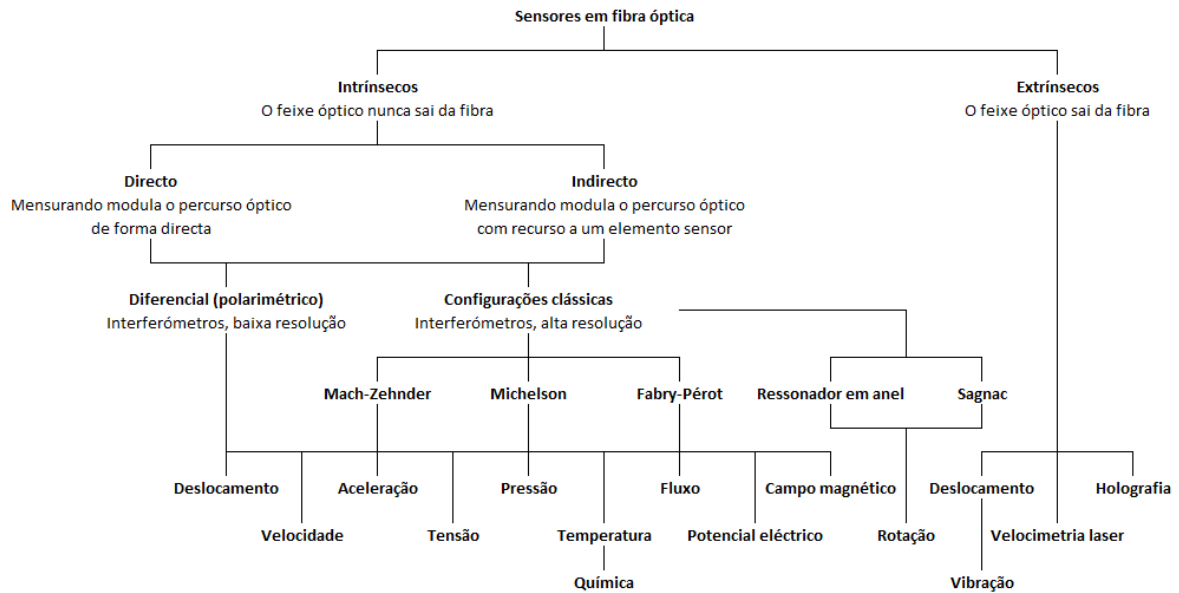


Figura 1.2 - Classificação dos sensores em fibra óptica [10].

#### 1.4. Interferometria

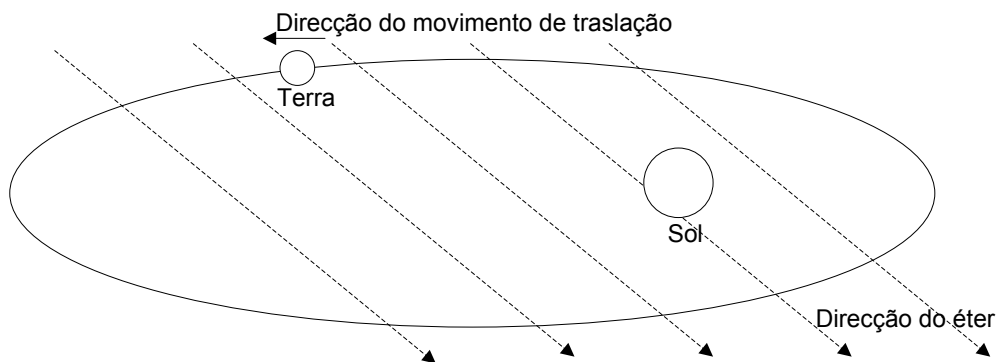
A interferometria é uma técnica que realiza a análise das propriedades de duas ou mais ondas, estudando o padrão de interferência criado pela sua sobreposição. O instrumento utilizado para sobrepor as ondas é denominado de interferómetro. A interferometria é uma técnica de investigação importante em variados campos, como o da astronomia, metrologia, oceanografia, sismologia, mecânica quântica, entre outras [11].

A interferometria faz uso do princípio da superposição, ao combinar ondas separadas de maneira a que o resultado da sua combinação tenha alguma característica significativa. O funcionamento geral pode ser descrito como a combinação de duas ondas com a mesma frequência, sendo o padrão resultante determinado pela diferença de fase entre ambas ondas. Ondas em fase criam uma interferência construtiva, no entanto, ondas desfasadas criam

interferência destrutiva. A maior parte dos interferómetros utilizam luz ou outra forma de ondas electromagnéticas [12].

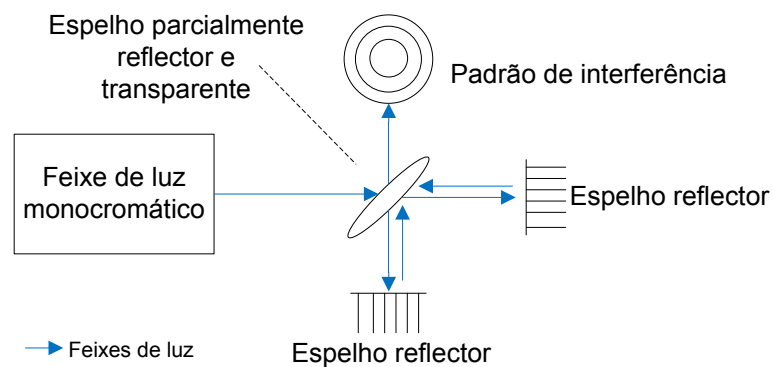
Um dos primeiros interferómetros foi inventado e implementado por Albert Abraham Michelson e Edward Morley, em 1887. O propósito central foi a criação de uma experiência que comprovasse a existência do éter. A teoria Física de finais do século XIX postulava a existência de um meio pelo qual a luz devia viajar, do sol à Terra, como a água que servia de suporte às ondas do mar ou o ar para o som. Esse meio era denominado éter [13].

Para comprovar tal assumpção, procuraram uma forma de calcular a velocidade relativa com que se moveria a terra em relação ao éter. Era assumido que o éter se movia numa determinada direcção e sentido. A terra seria impulsionada quando viajasse no mesmo sentido ou travada quando o fizesse no sentido oposto. A Figura 1.3 mostra um esquema da teoria do éter como meio pelo qual a luz se propagava no espaço do sol à Terra [13].



**Figura 1.3** - Exemplificação da teoria do éter. Movimento de traslação da terra e direcção e sentido do éter [13].

Procurando uma forma de comprovar esta teoria, foi apresentada, por Michelson e Morley, a seguinte experiência. Foi colocada um espelho parcialmente transparente e reflectora, para dividir um feixe de luz monocromático em dois feixes que viajavam a um determinado ângulo um do outro; e dois espelhos a uma determinada distância do primeiro espelho. Os feixes eram reflectidos nesses espelhos, para depois reunirem-se novamente e formarem um padrão de interferência. A Figura 1.4 apresenta o esquema do interferómetro de Michelson-Morley [13].



**Figura 1.4** - Esquema do interferômetro de Michelson-Morley [13].

Se o comprimento de algum dos caminhos ópticos do interferômetro variar, as franjas de interferência movem-se, reforçando-se ou anulando-se sucessivamente, não sendo possível concluir nada sobre o padrão formado. Ao girar o aparelho  $90^\circ$ , os caminhos ópticos mudam a sua direcção em relação à hipotética direcção do éter, o que provocaria uma mudança do padrão de interferência. No entanto, os resultados obtidos não detectaram nenhuma mudança no padrão de interferência. Os criadores pensaram ter fracassado, mas esta experiência desencadeou em uma teoria alternativa, a contracção de Lorentz, que deu origem à teoria da relatividade de Einstein[11].

Desde a experiência de Michelson-Morley, o conceito de interferometria tem sido utilizado em diversas áreas, devido às suas características de alta sensibilidade, larga gama dinâmica e imunidade a variações de potência [10]. Algumas destas aplicações são a modulação de sinais ópticos para a sua transmissão, no âmbito das comunicações ópticas [14][15], na implementação de sistemas de interrogação de sensores, como redes de Bragg [16], ou de outros interferómetros, no esquema da Interferometria de Luz Branca (WLI) [17].

### 1.5. Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. O presente capítulo dá uma cobertura geral do enquadramento desta dissertação, dos seus objectivos e fornece informação introdutória a área de sensores.

No segundo capítulo faz-se uma abordagem aos sensores interferométricos, realizando-se uma revisão dos princípios fundamentais e dando ênfase aos métodos de interrogação de redes de Bragg, passando pelos sistemas já desenvolvidos nesta área.

O terceiro capítulo aborda o processo de construção do sistema implementado, sendo justificadas todas as escolhas de conceição e sendo descrita a interrogação realizada através de sistemas físicos, neste caso através de um Amplificador *Lock-in* (LIA), e através da utilização do processamento de sinal virtual, com recurso ao LabVIEW®. Por último, é caracterizado o sistema a nível de seu desvio médio de fase.

O quarto capítulo descreve os testes realizados na medição diferencial de deformação, utilizando como elemento transdutor pares de redes de Bragg, permitindo a comparação do desempenho entre a instrumentação virtual e a física, bem como a influência no sistema da utilização de pares de redes com diferentes comprimentos de onda.

O quinto capítulo descreve o processo para a implementação da medição diferencial de temperatura, reeditando os testes antes realizados na medição de deformação, a comparação de desempenho entre a instrumentação física e a virtual, assim como, a influência no sistema da utilização de pares de redes com diferentes comprimentos de onda. Por último, foi ainda implementada a análise térmica diferencial como meio na detecção de amostras desconhecidas.

Finalmente, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido, assim como as perspectivas futuras de evolução do sistema implementado.

Do trabalho realizado nesta dissertação foi possível efectuar algumas publicações que foram submetidas em Revistas e Conferências Científicas. A primeira ao *Symposium On Enabling Optical Networks and Sensors SEON - 2010*, Anexo A. A segunda à *21<sup>st</sup> International Conference on Optical Sensors - OFS 2011*, Anexo B. E uma terceira submetida à revista *Journal of Lightwave Technology*, Anexo C.

## 2. Sensores interferométricos

---

De entre os vários tipos de sensores em fibra óptica, este trabalho aborda uma solução baseada na interferometria, sendo assim, neste capítulo são revistos os princípios fundamentais que suportam este tipo de sensores e o desenvolvimento existente nesta área. São ainda estudadas as redes de Bragg como elemento transdutor e são apontadas as vantagens da utilização de *software* no processo de desenvolvimento deste tipo de sistemas.

### 2.1. Introdução

Como foi referido no primeiro capítulo, a interferometria é uma técnica que realiza a análise das propriedades resultantes da sobreposição de duas ou mais ondas, estudando o padrão de interferência criado. No caso óptico, o padrão de interferência varia em função da diferença de fase entre as ondas sobrepostas, segundo a expressão (2.1).

$$\Delta\Psi = \frac{2\pi n\Delta L}{\lambda} \quad (2.1)$$

onde  $\Delta\Psi$  é a diferença de fase entre os feixes,  $n$  o índice de refração do meio,  $\Delta L$  a diferença de percurso geométrico entre os feixes, e  $\lambda$  o comprimento de onda central da radiação.

A utilização deste princípio como método de medição sustenta-se na presença de um mensurando que produz uma variação proporcional na fase de um dos feixes. Ao considerar-se que a fonte que origina os feixes tem um comprimento de onda central fixo, a variação de fase é induzida pela diferença de percurso óptico, OPD, entre os feixes, sendo que o OPD é dado pela expressão (2.2).

$$OPD = n\Delta L \quad (2.2)$$

Logo, ao considerar-se que os feixes viajam através de fibra óptica, a presença do mensurando deve induzir a variação do índice de refração do guia de onda e/ou a alteração de seu comprimento.

Para que se confirme a presença de interferência entre os feixes sobrepostos deve verificar-se que o comprimento de coerência da fonte seja maior que a diferença de percursos ópticos dos feixes. Mais ainda, o padrão deve ser estacionário pelo que não devem existir variações

temporais e os feixes devem encontrar-se à mesma frequência. Esta última condição só verifica-se, se ambos feixes forem gerados pela mesma fonte [4] [10] [18].

### 2.1.1. Visibilidade ou contraste

Na presença de um padrão de interferência pode ser medida a visibilidade ou contraste entre os sinais que interferem. Este parâmetro é dado pela expressão (2.3).

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2.3)$$

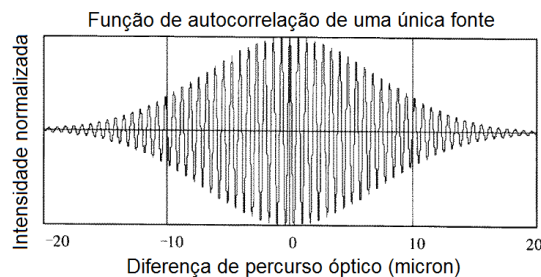
em que as intensidades  $I_{max}$  e  $I_{min}$  são dadas pelas expressões (2.4) e (2.5), respectivamente, supondo que a interferência ocorre entre dois feixes:

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \quad (2.4)$$

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2(I_1 I_2)^{1/2} \quad (2.5)$$

sendo que  $I_1$  e  $I_2$  são as intensidades resultantes devido à actuação individual de cada feixe [10].

A visibilidade é um parâmetro importante na verificação dos sistemas interferométricos dada a sua relação proporcional com a relação sinal-ruído. Refere-se que a visibilidade pode ser estimada através da medição da diferença entre máximos e mínimos subsequentes das franjas visíveis [19]. A Figura 2.1 ilustra a função de autocorrelação de dois feixes da mesma fonte óptica em função da diferença de percursos ópticos entre ambos, cuja envolvente apresenta uma forma gaussiana.



**Figura 2.1** - Interferograma de dois feixes provenientes da mesma fonte óptica [17].

Pode ser observado que qualquer alteração do OPD no interferómetro resulta numa mudança na visibilidade das franjas e na fase do sinal.

### 2.1.2. Coerência duma fonte óptica

A coerência de uma fonte óptica é uma medida da extensão em que as relações de fase são mantidas ao longo do feixe, ou seja, uma medida espacial, mas também pode ser medida quando essa mesma relação de fase é mantida ao longo de um determinado período de tempo, como uma medida temporal.

Existe uma relação entre o comprimento de coerência e o tempo de coerência dada pela expressão (2.6).

$$l_c = cT_0 \quad (2.6)$$

onde  $l_c$  é o comprimento de coerência;  $c$  a velocidade da luz no vácuo, e  $T_0$  é o tempo de coerência.

Na ocorrência de interferência, a coerência dos feixes sobrepostos garantirá que a relação entre a fase dos feixes é mantida traduzindo-se numa maior visibilidade das franjas. Considerando que o parâmetro que se deseja verificar é precisamente a fase do sinal, a existência de variações aleatórias da fase dos feixes, diminuirá a visibilidade produzindo uma diminuição da relação sinal-ruído. O comprimento de coerência duma fonte óptica está associado à largura de banda espectral da fonte, como é mostrado através da expressão (2.7).

$$l_c \cong \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} \quad (2.7)$$

onde  $\lambda_0$  é o seu comprimento de onda central, e  $\Delta\lambda$  a sua largura de banda espectral [20].

## 2.2. Interferómetros

A variedade de interferómetros ópticos desenvolvidos nos últimos 100 anos é enorme, sendo aqui enunciados apenas aqueles que podem ser implementados através fibra óptica monomodo. A literatura agrupa os interferómetros nas seguintes categorias:

- Interferómetros de duas ondas: Michelson e Mach-Zehnder.
- Interferómetros de múltiplas ondas: Fabry-Pérot ou Ressonador em anel.
- Diferenciais: Birrefringente e Polarimétrico.
- Caminho recíproco: Sagnac.

Considerando que os interferômetros diferenciais oferecem uma resolução inferior aos restantes, e sabendo que os interferômetros de caminho recíproco e de ressonador em anel não permitem a medição de temperatura, apresentam-se em seguida os restantes [10].

### 2.2.1. Interferómetro de Michelson

Este interferómetro é aquele cuja configuração é mais simples, sendo o primeiro interferómetro reportado, como referido no primeiro capítulo. A Figura 2.2 mostra o esquema deste interferómetro implementado através de fibra óptica.

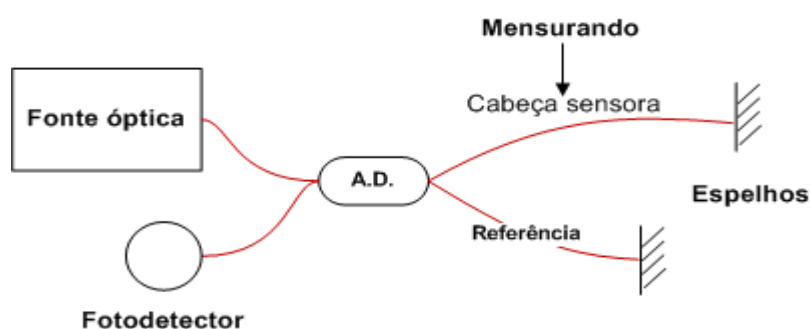
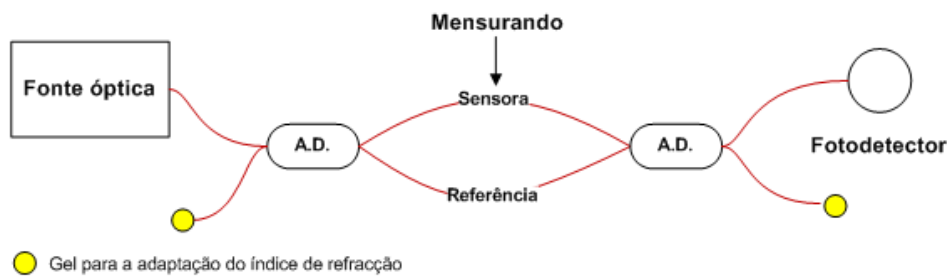


Figura 2.2 - Esquema do interferómetro de Michelson implementado em fibra [10].

A fonte óptica, geralmente coerente, ilumina o interferómetro. A luz é dividida pelos dois braços do interferómetro através de um acoplador direccional (A. D.). No fim de cada braço encontra-se um espelho, onde os feixes são reflectidos, sendo posteriormente recombinados no mesmo acoplador direccional. O sinal resultante da sobreposição dos feixes provenientes de cada braço é um sinal de interferência, que é entregue a um fotodetector para o seu processamento. Na utilização do interferómetro como sistema sensor, um dos braços é exposto ao mensurando e o outro funciona como referência [10].

### 2.2.2. Interferómetro de Mach-Zehnder

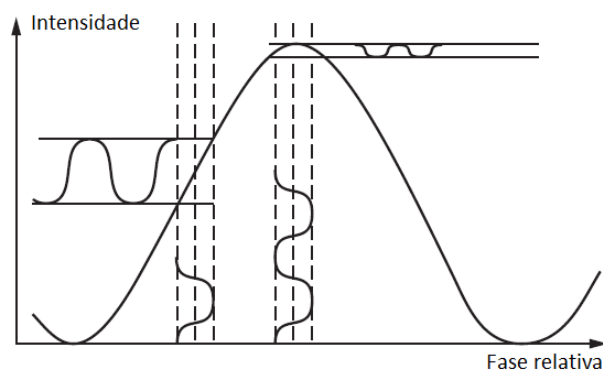
Este interferómetro apresenta uma configuração mais complexa que o interferómetro de Michelson, possuindo mais um acoplador direccional. A Figura 2.3 mostra o esquema deste interferómetro implementado em fibra óptica.



**Figura 2.3** - Interferômetro de Mach-Zehnder implementado em fibra óptica [10].

As principais vantagens desta implementação são: a melhoria da estabilidade do sistema, ao diminuir o *feedback* para a fonte no caso da implementação em fibra; o sistema possui duas saídas de igual magnitude desfasadas em  $180^\circ$  pelo acoplador direccional, que podem ser utilizadas para incrementar sua estabilidade [10].

A sensibilidade destes interferômetros (Mach-Zehnder e Michelson) varia em função da fase relativa dos feixes de luz nos dois braços do interferômetro, como o apresenta a Figura 2.4.

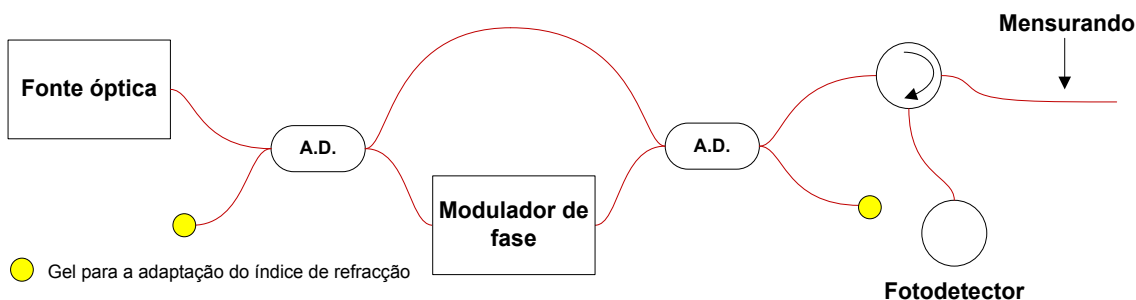


**Figura 2.4** - Variação da intensidade em função da fase relativa entre os feixes do interferômetro de Mach-Zehnder e Michelson [18].

Verifica-se que quando os feixes sobrepostos encontram-se em quadratura, obtem-se a maior sensibilidade, mas no caso de encontrar-se em fase poderá desvanecer-se. Uma forma de resolver este problema de desvanecimento do sinal é a introdução de um tensor piezoelétrico num dos braços de fibra para ajustar o comprimento do caminho relativo dos dois braços para uma ótima sensibilidade [18].

Outras melhorias sobre essas técnicas foram desenvolvidas. Por exemplo, uma abordagem para a geração de uma portadora através da modulação da fase de um dos braços do interferômetro, como mostra a Figura 2.5.

O feixe de um diodo laser é modulado em fase através do próprio interferómetro ou directamente no próprio laser. Se um interferómetro de Mach-Zehnder é configurado de modo que o feixe de referência e o feixe modulado pela amostra, difiram em comprimento de  $(L_1 - L_2)$ , então a diferença de fase efectiva entre dois feixes de luz é  $2\pi f(L_1 - L_2) n/c$ , onde  $n$  é um índice de refacção da fibra óptica e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Se a modulação em fase, realizada num dos braços, tem uma frequência de  $\omega$ , então as diferenças de fase relativas são moduladas a esta taxa e a saída do detector será constituída por harmónicos ímpares e pares do mesmo. Os sinais que viajam através dos harmónicos da portadora de  $\omega$  e  $2\omega$  encontram-se em quadratura em relação um ao outro e podem ser processados utilizando electrónica semelhante [18].

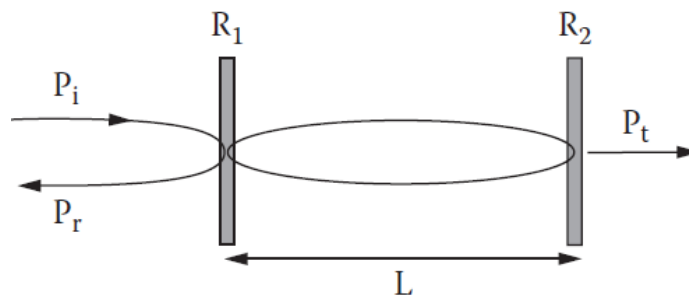


**Figura 2.5** - Utilização do interferómetro de Mach-Zehnder para a geração de uma portadora através da modulação em fase de um dos braços [18].

Esta configuração pode ser utilizada na interrogação de sensores interferométricos no esquema WLI [17] ou na interrogação de redes de Bragg [16].

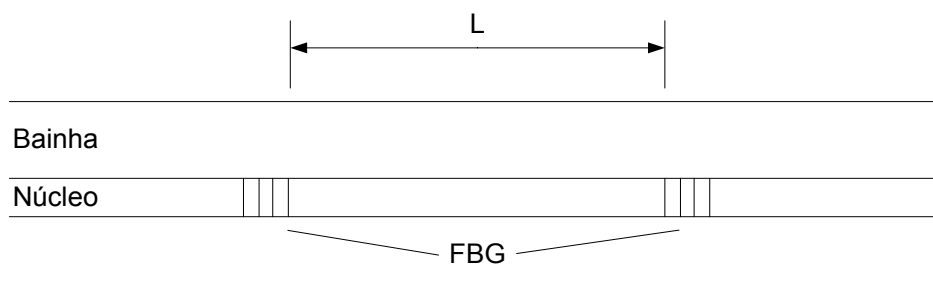
### 2.2.3. Interferómetro de Fabry-Pérot

O interferómetro de Fabry-Pérot (FPI) consiste em dois espelhos, com coeficientes de reflexão  $R_1$  e  $R_2$ , separados por uma cavidade de comprimento  $L$ , como se apresenta na Figura 2.6. Desde a sua invenção no fim do século XIX, a maior parte dos FPI tem sido amplamente utilizada para a espectroscopia de alta resolução. No início dos anos 80, foram reportados os primeiros resultados em fibra óptica, e no final dessa década começaram a ser utilizados para a monitorização de temperatura, tensão e pressão ultra-sónica em materiais compostos [18].



**Figura 2.6** - Esquema de um interferômetro de Fabry-Pérot, ( $P_i$ : potência incidente,  $P_r$ : potência reflectida e  $P_t$ : potência transmitida) [18].

O interferômetro de Fabry-Pérot é extremamente sensível a perturbações que afectam o percurso óptico entre os dois espelhos. A região de detecção pode ser muito compacta e ao contrário de outros interferômetros em fibra não contém acopladores direccionais. O interferômetro de Fabry-Pérot em fibra apresenta-se como uma estrutura ideal para muitas aplicações de detecção inteligente. Estes dispositivos de medição versáteis são favoráveis às aplicações de divisão de espaço, divisão de tempo, divisão de frequência e técnicas de multiplexagem coerentes para reduzir o custo da monitorização multiponto. A Figura 2.7 mostra um esquema de um interferômetro de Fabry-Pérot implementado em fibra óptica [18].



**Figura 2.7** - Interferômetro de Fabry-Pérot implementado em fibra óptica.

A estrutura básica do interferômetro de Fabry-Pérot mantém um princípio geral semelhante ao do interferômetro de Michelson. Consiste em duas superfícies planas que são paralelas. A distância entre as superfícies reflectoras pode ser mudada como também ocorre no caso do interferômetro de Michelson. Este interferômetro faz uso de reflexões múltiplas entre as superfícies já indicadas. Uma porção da luz é transmitida cada vez que a luz alcança a segunda superfície reflectora, resultando em múltiplos desvios dos feixes, os quais podem

interferir uns com os outros. O grande número de raios de interferência produz um interferómetro com elevada resolução.

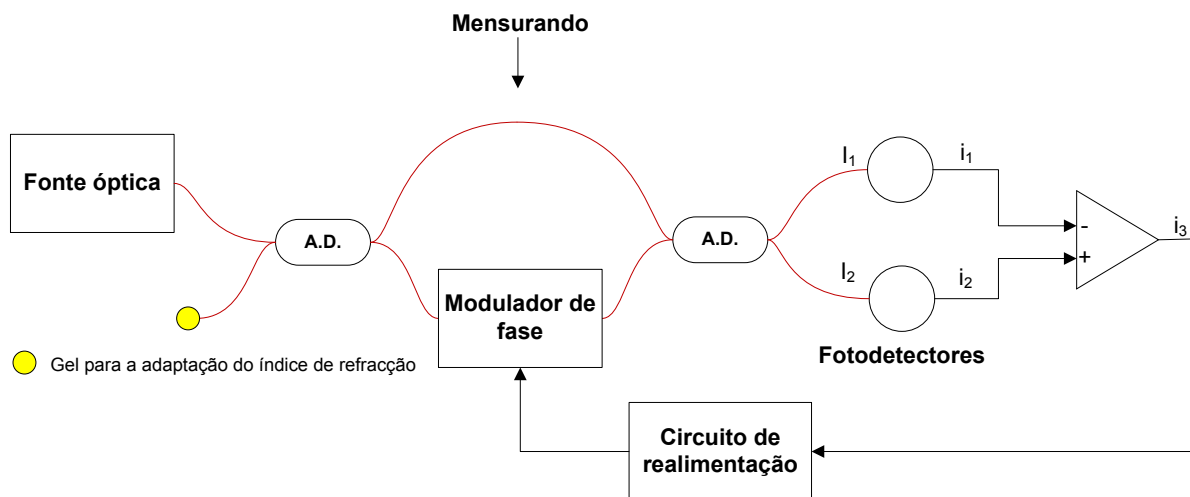
### 2.3. Esquemas de detecção

Uma vez modulado o feixe óptico pela presença do mensurando, traduzido numa modulação da fase do feixe, passa a ser necessário procurar formas para passar essa modulação para o domínio eléctrico, para a sua efectiva tradução em informação. De seguida são descritas várias das técnicas de detecção aplicadas a sistemas interferométricos.

#### 2.3.1. Técnica homódina

As técnicas de detecção homódina são técnicas de detecção coerente, onde a frequência do oscilador local utiliza a mesma frequência do sinal emitido. Podem ser classificadas em activas e passivas. Duma forma geral o princípio de funcionamento das técnicas activas pode ser explicado da seguinte forma:

A Figura 2.8 mostra um interferómetro de duas ondas, onde o feixe de um dos braços é modulado por um sinal a uma frequência  $\omega_s$ .



**Figura 2.8** - Esquema do sistema de detecção homódina aplicado a um interferómetro de Mach-Zehnder [10].

A diferença de fase entre os feixes dos dois braços pode ser traduzida pela expressão (2.8).

$$\phi(t) = \phi_d + \phi_s \sin(\omega_s t) \quad (2.8)$$

onde  $\phi_d$  representa a diferença estática de fase entre o sinal de referência e o sinal dos braços do interferómetro, e  $\phi_s$  é a mudança de fase induzida pela perturbação do sinal exposto ao

mensurando. As correntes à saída dos fotodetectores,  $i_1$  e  $i_2$ , correspondem às intensidades de saída,  $I_1$  e  $I_2$ , sendo expressas pelas equações (2.9) e (2.10), respectivamente.

$$i_1 = i_0\{1 - k\cos[\varnothing_d + \varnothing_s\sin(\omega_s t)]\} \quad (2.9)$$

$$i_2 = i_0\{1 + k\cos[\varnothing_d + \varnothing_s\sin(\omega_s t)]\} \quad (2.10)$$

onde  $i_0$  está relacionado com a potência óptica de entrada e  $k$  é uma função da visibilidade do sistema. A combinação diferencial destas correntes, produz uma saída como descrita na expressão (2.11).

$$\begin{aligned} i_3 &= 2i_0k\cos[\varnothing_d + \varnothing_s\sin(\omega_s t)] \\ &= 2i_0k\{\cos(\varnothing_d)\cos[\varnothing_s\sin(\omega_s t)] - \sin(\varnothing_d)\sin[\varnothing_s\sin(\omega_s t)]\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Considerando que  $\varnothing_s \ll 1$ , como  $\cos[\varnothing_s\sin(\omega_s t)] \approx 1$  e  $\sin[\varnothing_s\sin(\omega_s t)] \approx \varnothing_s\sin(\omega_s t)$ , a expressão (2.11) pode ser aproximada à expressão (2.12).

$$i_3 \approx 2i_0k\{\cos(\varnothing_d) - \sin(\varnothing_d)\varnothing_s\sin(\omega_s t)\} \quad (2.12)$$

Verificando-se que esta saída retém a informação de fase e amplitude da perturbação. A amplitude também é dependente de  $\sin(\varnothing_d)$ , podendo conduzir a desvanecimento no sinal recuperado, produzindo a máxima sensibilidade quando  $\varnothing_d \approx (2n + 1)\pi/2$  e zero sensibilidade quando  $\varnothing_d \approx n\pi$ , sendo  $n$  um número inteiro.

Os sistemas homódinos activos são classificados em: *Active Phase Tracking Homodyne* (APTH) e *Active Wavelength Tuning Homodyne* (AWTH). Os APTH realizam modulação de um dos braços do interferómetro, sendo esta modulação realizada através de um circuito de realimentação, com a finalidade de manter o interferómetro no seu ponto de máxima sensibilidade ajustando o OPD. Esta técnica tem como mais-valias a sua facilidade de implementação, a sua linearidade e o pequeno contributo para o ruído do sistema. Por outro lado, tem como pontos negativos: a gama limitada de saída coberta pelo elemento activo, normalmente um piezoeléctrico; e a necessidade de um elemento electricamente activo o que não é viável para algumas aplicações.

Os AWTH são uma variante do esquema APTH, que procura ultrapassar a segunda desvantagem destes, sendo mantida a quadratura necessária para máxima sensibilidade através

de um controlo da frequência da fonte óptica. A variação da frequência induzirá uma variação de fase procurando manter os feixes sobrepostos em quadratura.

Por outro lado, as técnicas homódinas passivas não possuem circuito de realimentação, estas técnicas podem ser exemplificadas através da Figura 2.9.

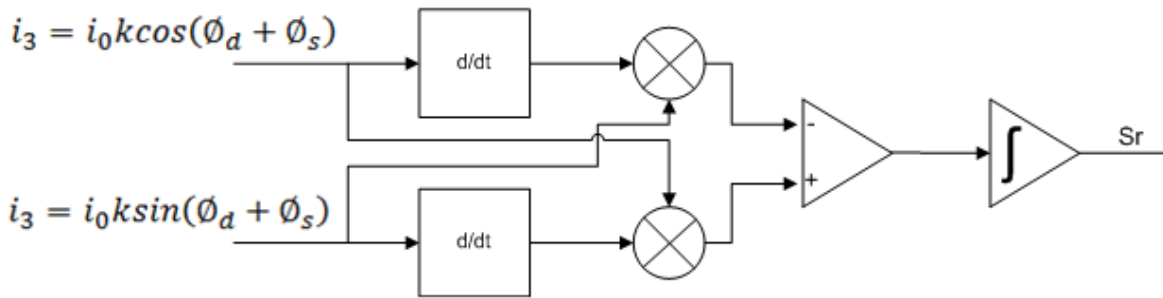


Figura 2.9 - Desmodulador homódino passivo.

O sinal é detectado nas suas componentes em quadratura para posterior diferenciação. Após aplicação de multiplicação cruzada com os sinais detectados pelos fotodetectores, realiza-se a diferença dos sinais resultantes e posterior integração. O sinal à saída,  $S_r$ , é dado pela expressão (2.13).

$$S_r = \phi_d \sin(\omega_s t) \quad (2.13)$$

Duas formas de aplicar este esquema de detecção são: utilizando dois comprimentos de onda ou através da utilização de um acoplador direccional 3 x 3 [10].

### 2.3.2. Técnica heteródina

Nesta técnica, o feixe num dos braços do interferómetro é trasladado em frequência em relação ao outro braço. Este processo costuma ser realizado através de um modulador acústico-óptico. O sinal eléctrico à saída do interferómetro é dado pela expressão (2.14) [10].

$$i_3 = 2i_0k \cos[\omega_0 t + \phi_d + \phi_s \sin(\omega_s t)] \quad (2.14)$$

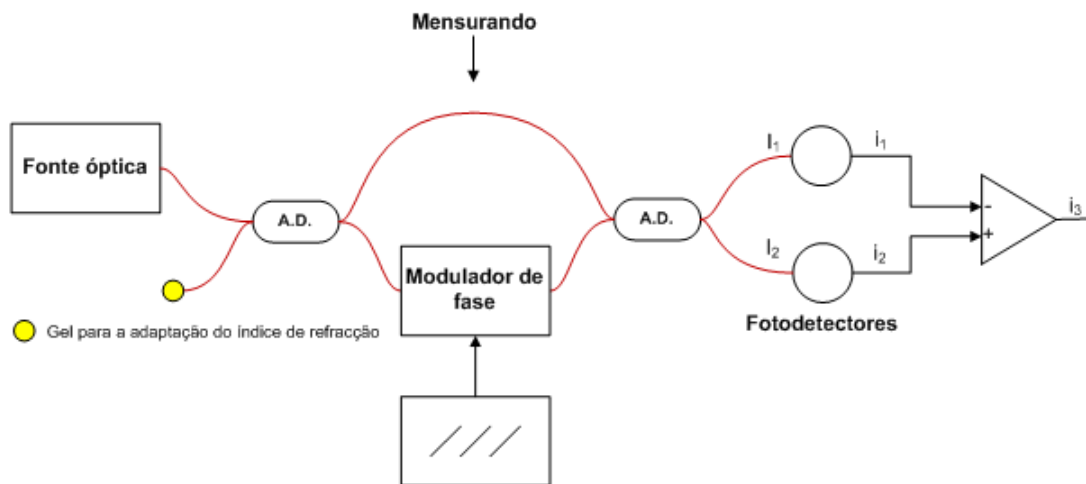
onde  $\omega_0$  é o desvio de frequência introduzido entre os braços do interferómetro. O sinal  $i_3$  representa uma portadora de frequência  $\omega_0$ ; a qual é modulada em fase pelo termo de fase do interferómetro  $\phi_d + \phi_s \sin(\omega_s t)$ .

A desmodulação do sinal modulado pode ser realizada de duas formas: uma através de um desmodulador convencional FM[21] sintonizado na frequência  $\omega_0$  ou através de um seguidor electrónico de fase.

Esta técnica tem como principal vantagem uma gama dinâmica ilimitada e como desvantagens a necessidade de um elemento electricamente activo e variações na frequência  $\omega_0$  devido a instabilidades no oscilador gerador.

### 2.3.3. Técnica Pseudo-heteródina

Esta técnica gera uma saída do tipo heteródino utilizando o facto que o movimento do padrão de franjas de um interferómetro não balanceado pode ser produzido pela modulação em rampa da emissão em frequência da fonte óptica, de forma directa ou utilizando o próprio interferómetro. A Figura 2.10 ilustra este esquema de detecção.



**Figura 2.10** - Esquema de detecção pseudo-heteródina aplicado a um interferómetro de Mach-Zehnder.

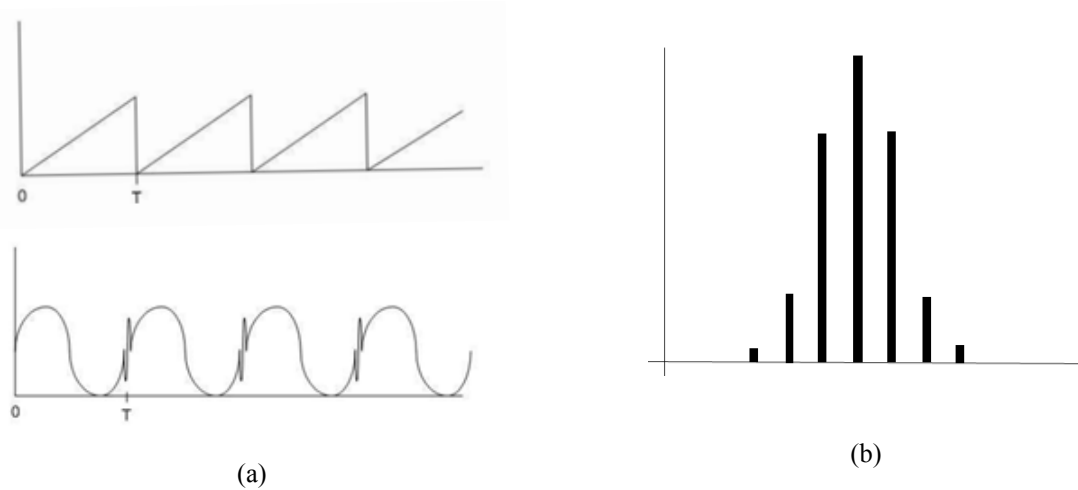
Para um interferómetro não balanceado, com variação do percurso óptico  $l$ , uma mudança na frequência de emissão,  $dv$ , resulta numa mudança na fase,  $d\phi$ , no padrão de interferência à saída do sistema como mostra a expressão (2.15).

$$d\phi = \frac{2\pi nl}{c} dv = \frac{2\pi nl}{c} k_d(\omega) di \quad (2.15)$$

A taxa de mudança na fase à saída do interferómetro é dada pela expressão (2.16).

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2\pi nl}{c} \frac{di}{dt} k_d(\omega) \quad (2.16)$$

onde  $d_i/d_t$  é o declive da rampa de corrente e  $k_d$  é uma constante de proporcionalidade. A saída típica deste sistema no domínio dos tempos e das frequências é apresentada na Figura 2.11.



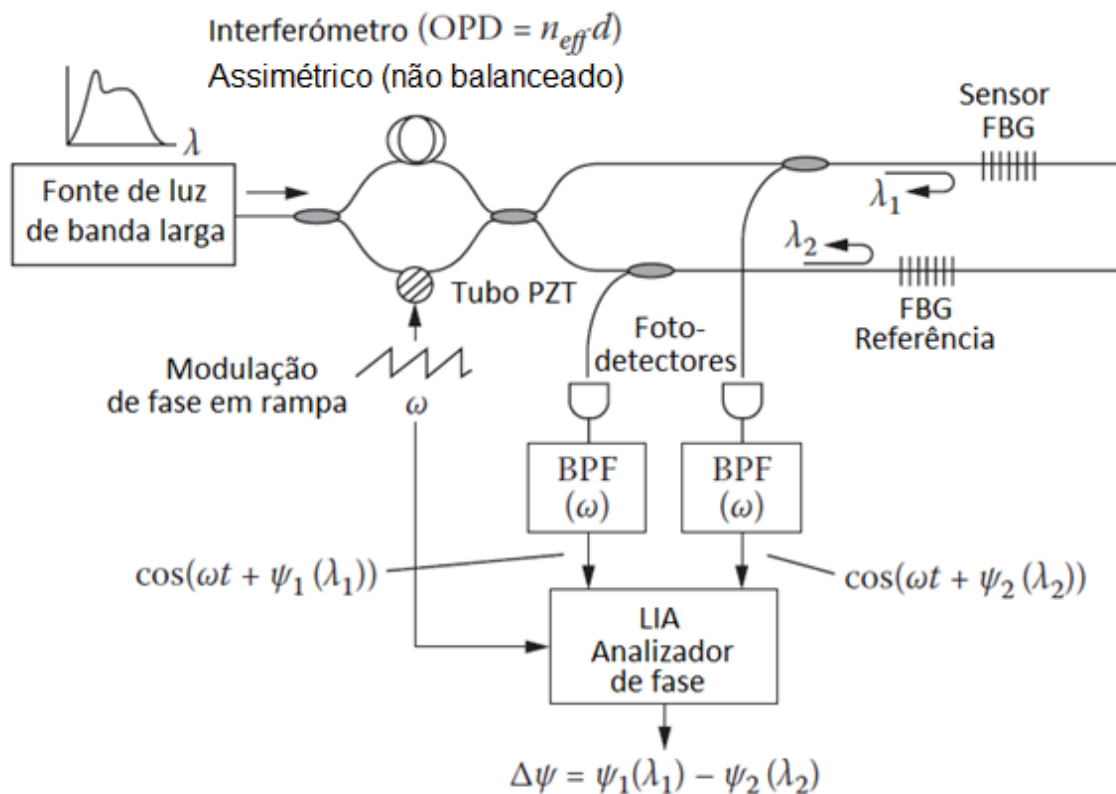
**Figura 2.11** - Sinais intervenientes no esquema de detecção pseudo-heteródino: (a) Na parte superior, sinal de modulação, na parte inferior, sinal detectado pelos fotodetectores; (b) Espectro do sinal detectado pelos fotodetectores [10].

Verifica-se que o espectro do sinal detectado é complexo, composto pela componente fundamental e harmónicos, que se repetem à frequência de modulação da rampa. A distribuição de potência pode ser concentrada na frequência fundamental variando o declive da rampa e verificando a condição apresentada na expressão (2.17).

$$\frac{d\phi}{dt} T = 2m\pi \quad (2.17)$$

onde  $T$ , é o período da rampa e  $m$  o número inteiro de franjas dentro de um período da rampa.

A técnica de detecção pseudo-heteródina foi apresentada inicialmente em 1982 por D. A. Jackson [22]. O desenvolvimento destes sistemas tem continuado, sendo desenvolvidas variadas configurações, tais como o detector pseudo-heteródino para um interferómetro não balanceado de Mach-Zehnder para a interrogação de redes de Bragg apresentado na Figura 2.12 [23].



**Figura 2.12** - Detector Pseudo-heteródino para um interferómetro não balanceado de Mach-Zehnder com uma rede de difração de referência [24].

A amplitude do sinal em rampa deve ser cuidadosamente controlada para se obter a forma de onda sinusoidal. A saída do detector é filtrada através de um filtro passa-banda à frequência de modulação e assim elimina as restantes componentes espectrais (componentes criadas pelas descontinuidades do sinal em rampa). Utilizando o sinal filtrado e o sinal em rampa, como sinal de referência do LIA, podem-se medir as mudanças do comprimento de onda da luz na forma de variações de fase. A grande vantagem desta técnica é sua facilidade de implementação, e como já referido, o sinal à saída do sistema trata-se de um sinal quase sinusoidal, o que facilita o processamento de sinal. Em contrapartida, a descontinuidade do sinal dente-de-serra produz uma limitação a este sistema, denominado de *flyback* finito [23] [24] [25].

Uma vez desmodulado o sinal óptico, através de uma técnica de desmodulação é necessário traduzir os impulsos eléctricos desmodulados em dados e estes serem convertidos em informação com algum significado. A instrumentação virtual, dada a sua versatilidade, é uma das formas mais apelativas para o fazer.

## 2.4. Instrumentação virtual

Um instrumento virtual consiste num computador com *software* apropriado e *hardware* com custo optimizado, tais como placas de *plug-in* e os seus respectivos *drivers*, que em conjunto desempenham as funções dos instrumentos tradicionais e podem acrescentar algumas outras. A instrumentação tradicional tinha o seu foco em sistemas baseados em *hardware* e a instrumentação virtual mudou esse paradigma para sistemas centrados em *software*, permitindo tirar proveito da quase omnipresença, poder computacional, produtividade, visualização gráfica e facilidade de conectividade dos computadores pessoais [26].

O desenvolvimento de instrumentos virtuais permite aos utilizadores a construção de sistemas que se adequam com maior precisão aos requisitos do sistema que desejam elaborar, conseguindo libertar-se das limitações dos instrumentos tradicionais, diminuir os custos de implementação, realizar adaptações ante as mudanças de requisitos e ainda incluir a portabilidade inerente aos computadores portáteis [26].

Com esta abordagem, o *software* passa a ser a componente fundamental da instrumentação virtual, não só incrementando a flexibilidade do desenvolvedor para adaptar a sua solução aos requisitos apresentados, como também, pela modularidade do próprio *software*, o qual permite a divisão do problema a ser resolvido em problemas de menor complexidade, para uma mais fácil solução. Esta visão complementa-se com a visão distribuída dos sistemas, onde várias tarefas podem ser realizadas de forma compartilhada por vários nós numa rede [26].

Para o desenvolvimento do *software* necessário para este tipo de aplicações pode ser utilizada qualquer linguagem de programação, desde C, C++, Java, G (LabVIEW®), Python, entre outras. Dentro de todas estas linguagens, a linguagem G destaca-se frente às outras por várias razões: linguagem gráfica o que permite uma curva de aprendizagem com um declive elevado, indicando uma fácil percepção da linguagem; o processo de *debugging* resulta facilitado, dada a possibilidade de simular impulsos externos ao sistema; a implementação de processamento paralelo (*multi-threads*) é simples, bastando a implementação de áreas de código não ligadas; a disponibilização por parte de fabricantes de *drivers* para esta linguagem através do padrão de comunicação IEEE-488 [27]; a quantidade de funções já implementadas; entre outras [28].

## 2.5. Redes de Bragg

As *Fiber Bragg Grating* (FBG), redes de Bragg em fibra óptica, são um tipo de reflector construído num pequeno segmento de fibra óptica. Em geral, uma rede de Bragg é uma estrutura formada por múltiplas camadas de materiais com diferentes índices de refração, ou por variações periódicas de algumas características, tais como a altura de um guia de onda dieléctrico, resultando numa variação periódica no índice de refração efectivo do guia. Cada camada produz uma reflexão parcial do feixe óptico. Para feixes cujos comprimentos de onda são aproximadamente quatro vezes a espessura óptica das camadas, as múltiplas reflexões combinam-se construtivamente e as camadas actuam como um reflector de alta qualidade, numa banda de comprimentos de onda. Dentro desta gama de comprimentos de onda, a luz reflecte-se em uma elevada percentagem, e restante propaga-se no guia de onda [29]. A Figura 2.13 apresenta a propagação de sinais na presença de uma rede de Bragg.

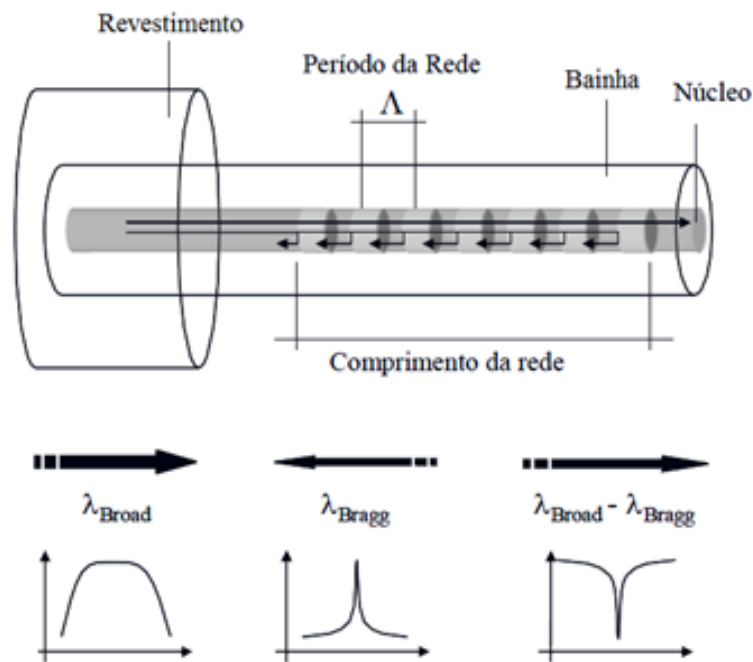


Figura 2.13 - Rede de Bragg e propagação de sinais através dela [30].

As principais vantagens desta tecnologia são o seu baixo custo, atenuação reduzida ( $\sim 0,1$  dB), acoplamento fácil com outras fibras, insensibilidade à polarização, baixo coeficiente de variação com a temperatura ( $\sim 10$  pm/ $^{\circ}$ C) e fácil empacotamento [29].

O processo de construção baseia-se na foto-impressão. A técnica é baseada na fotossensibilidade da sílica dopada com germânio. Isto significa que pode ser induzida uma mudança no índice de refração do núcleo através da exposição à radiação ultravioleta (244nm) [29].

As primeiras redes de Bragg foram impressas através de um feixe laser visível propagando-se ao longo do núcleo da fibra. Posteriormente, G. Meltz descobriu uma técnica mais versátil utilizando a sobreposição interferométrica de dois feixes ultravioletas de modo lateral à fibra (*transverse holographic technique*). O ângulo entre os feixes determina o período do padrão de luz no núcleo da fibra e conseqüentemente o comprimento de onda de Bragg. Os dois feixes ultravioletas são frequentemente gerados pela exposição de uma máscara de fase periódica (*photomask*) a um simples feixe ultravioleta (UV, *phase mask technique*), utilizando os dois feixes difractados de primeira ordem. A utilização de máscaras de fase não periódicas permite a obtenção de padrões mais complexos. Outra técnica é a denominada técnica ponto-por-ponto, onde as zonas onde se pretende um incremento do índice de refração são impressas, ponto por ponto, através de um feixe laser pequeno e focado. Esta técnica é apropriada e flexível para a escrita de redes de período longo [31].

A fotossensibilidade da fibra pode ser variável de acordo com o tipo de dopagem do núcleo ou a sua proporção de germânio, por isso, em alguns casos, as fibras são mantidas em atmosferas com hidrogénio em alta pressão e assim é possível incrementar a sua fotossensibilidade [32].

O padrão impresso na fibra pode ser representado como uma modulação sinusoidal uniforme do índice de refração do núcleo, como descrito através da expressão (2.18).

$$n(z) = n_{core} + \delta_n \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi z}{\Lambda} \right) \right] \quad (2.18)$$

onde,  $n_{core}$  é o índice de refração do núcleo não exposto aos feixes ultra-violetas,  $\Lambda$  é o período da rede e  $\delta_n$  é a mudança foto-induzida do índice de refração do núcleo [29].

A maior reflectividade ocorre quando é verificada a condição de Bragg, isto é, ocorre uma reflexão para  $\lambda_{bragg}$ , comprimento de onda de Bragg, quando se verifica a expressão (2.19) [31].

$$\lambda_B = 2\Lambda n \quad (2.19)$$

onde,  $n$  é o índice de refração efectivo do núcleo exposto aos feixes ultravioletas [29].

Quando uma rede de Bragg actua como elemento sensor e ilumina um interferómetro de Mach-Zehnder, a variação de fase provocada pela variação do comprimento de onda de Bragg é dada pela expressão (2.20) [16].

$$\Delta\Psi = -\frac{2\pi n\Delta L}{\lambda_B^2} \Delta\lambda_B \quad (2.20)$$

onde  $\Delta\Psi$  é a variação de fase,  $n$  o índice de refração,  $\Delta L$  é a diferença de percursos geométricos entre os braços do interferómetro, e  $\lambda_B$  é o comprimento de onda de Bragg.

A construção de redes de Bragg idênticas não é um processo simples, dada a necessidade de controlo de vários parâmetros, entre eles a própria concentração de germânio na dopagem do núcleo da fibra, a concentração de hidrogénio, variações de temperatura no processo de fabrico e a dificuldade da replicação de máscaras [33].

## 2.6. Caracterização de um sensor

Os sensores são caracterizados de acordo com múltiplos parâmetros, alguns deles exclusivos, dependendo da especificidade do sensor. De forma geral, alguns deles são comuns a qualquer sensor, permitindo ter uma noção do comportamento do sensor e se for o caso permitir sua comparação. Estes parâmetros terão maior ou menor exigência de acordo com a aplicação pretendida. De entre os parâmetros mais importantes temos os seguintes:

**Gama dinâmica:** limite máximo e mínimo entre os quais pode variar a entrada.

**Full Scale Output (FSO):** limite máximo e mínimo entre os quais pode variar a saída do sensor. A Figura 2.14 ilustra a relação entre a gama dinâmica e FSO de um sensor.

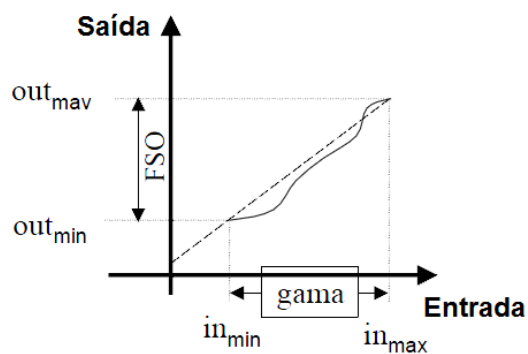


Figura 2.14 - Gama dinâmica e FSO de um sensor.

**Histerese:** representa a dependência de alguns sistemas físicos a valores prévios. Sendo definida pela capacidade de um instrumento medir o mesmo valor incrementando-se ou decrementando-se na escala. A Figura 2.15 ilustra um sensor que apresenta histerese.

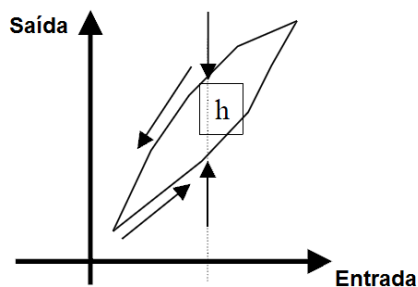


Figura 2.15 - Resposta de um sensor que apresenta histerese.

**Exactidão:** Grau em que o valor medido está de acordo com o valor verdadeiro. Em outras palavras, indica o desvio da saída em relação a uma entrada conhecida. A Figura 2.16 exemplifica a exactidão de um sensor.

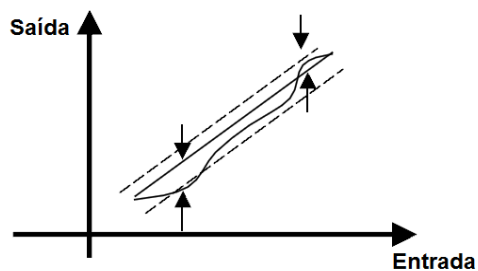
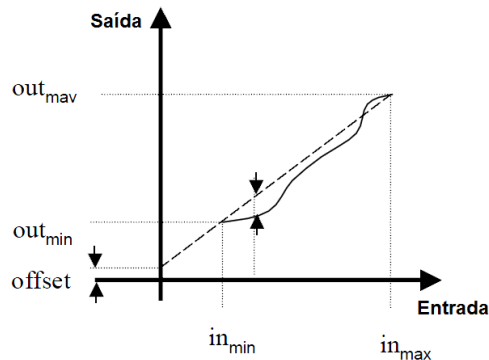


Figura 2.16 - Grau de exactidão de um sensor.

**Precisão:** capacidade de um instrumento para reproduzir certa leitura com a mesma exactidão.

**Linearidade:** é o máximo desvio da resposta do instrumento a uma linha recta. Normalmente, expresso como uma percentagem do valor da escala total. A Figura 2.17 exemplifica a linearidade de um sensor.



**Figura 2.17** - Exemplificação da linearidade de um sensor.

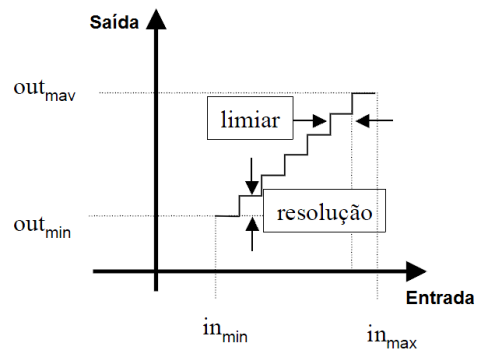
**Sensibilidade:** capacidade do dispositivo de medição de detectar diferenças na quantidade medida. O cálculo da sensibilidade é realizado a partir da expressão (2.21),

$$K = \frac{out_{max} - out_{min}}{in_{max} - in_{min}} \quad (2.21)$$

onde  $K$ , é a sensibilidade; o numerador é a diferença entre o valor máximo e mínimo de saída; e o denominador é a diferença entre o máximo e mínimo valor de entrada.

**Threshold (limiar):** é o valor mínimo de entrada para o qual se produz uma mudança definitiva à saída quando a entrada é incrementada gradualmente do valor zero.

**Resolução:** é o valor mínimo de entrada para o qual se produz uma mudança definitiva à saída quando a entrada é incrementada gradualmente de um valor diferente de zero. A Figura 2.18 ilustra o limiar e a resolução de um sensor.



**Figura 2.18** - *Threshold* (limiar) e resolução de um sensor.

**Estabilidade:** capacidade de manter o mesmo valor da saída quando é mantido constante o mensurando por um período de tempo [34] [35].

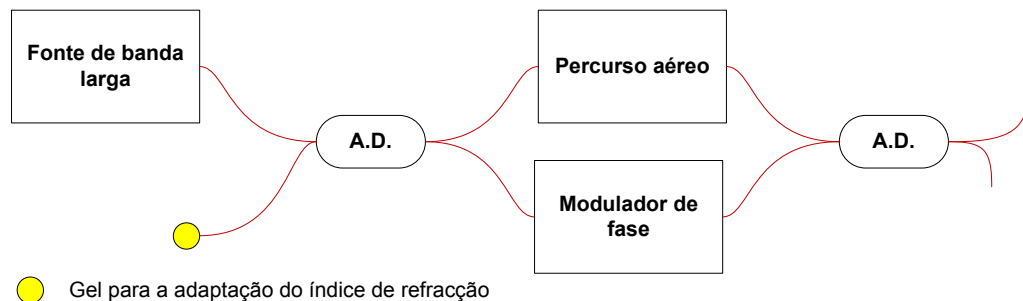
### 3. Caracterização do sistema

---

Uma vez verificadas as vantagens dos sensores em fibra óptica, e dentro destes as vantagens da interferometria como método de interrogação de redes de Bragg, assim como reunidas as componentes mínimas para a construção de um sistema deste tipo, passou-se à sua implementação.

#### 3.1. Esquema desenvolvido

Tendo como orientação os requisitos apresentados no primeiro capítulo, foi desenvolvido um sistema base, com a suficiente flexibilidade para adaptar-se às necessidades da aplicação proposta. Assim, foi desenvolvido um sistema interferométrico diferencial para a medição de temperatura, que fosse capaz de aproveitar as características intrínsecas destes sistemas, como a elevada gama dinâmica e a alta resolução. O esquema do sistema desenvolvido é exposto na Figura 3.1.



**Figura 3.1** - Esquema do sistema desenvolvido.

As principais opções tomadas para a implementação deste sistema foram:

- O esquema de detecção escolhido foi o pseudo-heterodino, já que dos esquemas de detecção estudados, é o que permite melhores resultados, dado o seu menor custo computacional, ao gerar na saída do sistema uma onda quase sinusoidal que exige um menor processamento de sinal [36].
- De forma a implementar o dito esquema de detecção, é necessário modular o feixe óptico, tendo sido estudadas duas opções, uma através de um piezoeléctrico, marca Noliac, modelo CMAP2 [37], e outra através de um modulador electro-óptico, marca JDSU, modelo APE [38]. Os piezoeléctricos são amplamente utilizados neste tipo de

aplicações [16] [39] [40], mas apresentam uma pequena largura de banda, precisam de valores de tensão de alimentação elevados e sofrem variações de temperatura durante o seu funcionamento, afectando o desempenho do sistema. Por isso, optou-se pelo modulador electro-óptico apesar deste ter como limitação, elevadas perdas de inserção (~3,5 dB).

- O interferómetro de modulação escolhido foi o de Mach-Zehnder, uma vez que o interferómetro de Michelson era desvantajoso dadas as elevadas perdas do modulador de fase. Note-se que com esse interferómetro as perdas provocadas pelo modulador seriam a dobrar, já que a sua leitura é feita em reflexão. Por outro lado, o interferómetro de Fabry-Pérot não possui acopladores, complicando a aquisição dos dados, e a variação do OPD e do esquema diferencial é mais complexa [18].
- O percurso aéreo permite operacionalizar dois aspectos importantes no interferómetro. Por um lado, e no caso da interrogação de redes de Bragg, possibilita o controlo da sensibilidade do sistema como se verifica na expressão (2.20). Por outro lado, permite também a sintonização de interferómetros em esquemas WLI [17].
- Foram utilizadas *Gradient Index lenses* GRIN [41] no percurso aéreo para colimar o feixe óptico.

O percurso aéreo consiste em dois tubos de alumínio, inserido um dentro do outro, cada um com uma lente de GRIN. Um dos tubos encontra-se fixo e o segundo numa carruagem de precisão, permitindo alterar a distância entre as lentes no eixo horizontal e assumindo o alinhamento nas outras direcções [36]. A Figura 3.2 apresenta o esquema deste elemento.

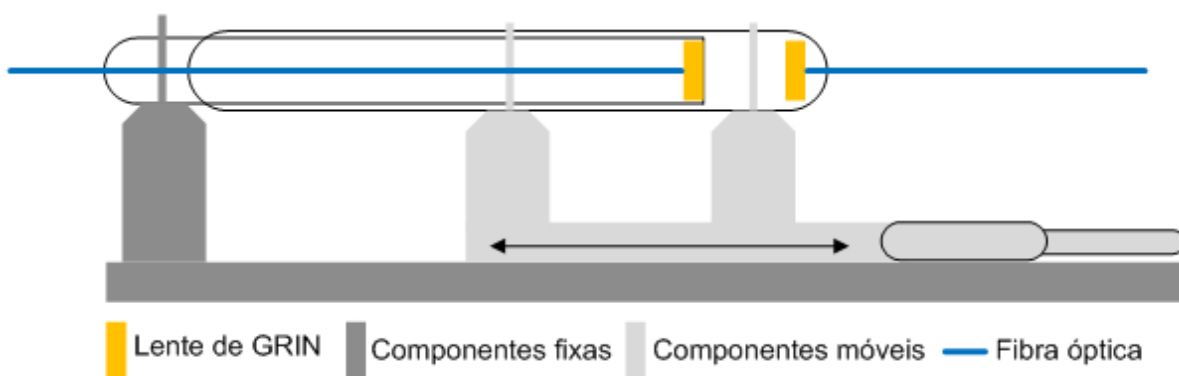
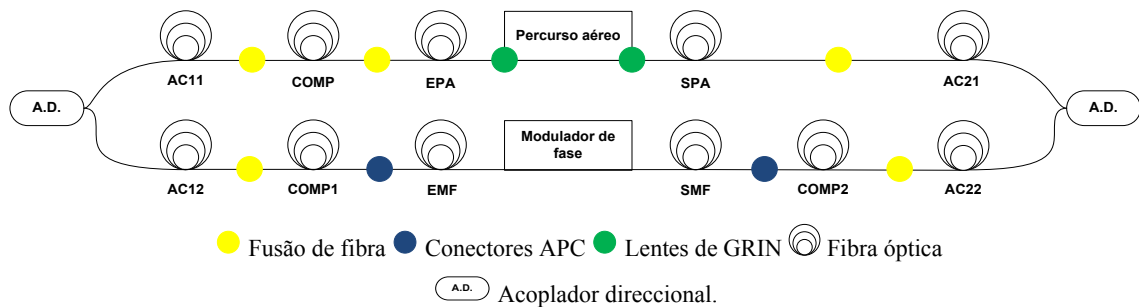


Figura 3.2 - Percurso aéreo.

Foi realizado o dimensionamento do interferómetro, tendo como limitações: o comprimento da fibra óptica ligada aos acopladores direccionais, não os podendo diminuir, de forma a

evitar o desperdício de fibra e aumentar o tempo útil do componente; o percurso óptico do modulador de fase, já que é inalterável; e a limitação do percurso aéreo a um comprimento máximo de poucos centímetros, dado pela máxima excursão do parafuso da carruagem. Consideraram-se também as perdas de potência que afectariam a visibilidade do sistema e que teriam como consequência a diminuição da relação sinal-ruído [19]. Na Figura 3.3 é apresentado um esquema pormenorizado dos braços do interferómetro.



**Figura 3.3** - Interferómetro modulador.

Com as condicionantes referidas, o interferómetro implementado possui as dimensões apresentadas na Tabela I, onde é apresentada o comprimento geométrico, que é a distância que o feixe óptico atravessa, e o comprimento óptico que toma em consideração a constituição do meio por onde o feixe óptico viaja, sendo que o comprimento óptico é a multiplicação do comprimento geométrico pelo índice de refração do meio  $n$ , este último é a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio considerado.

**Tabela I** - Comprimento físico e óptico do interferómetro modulador.

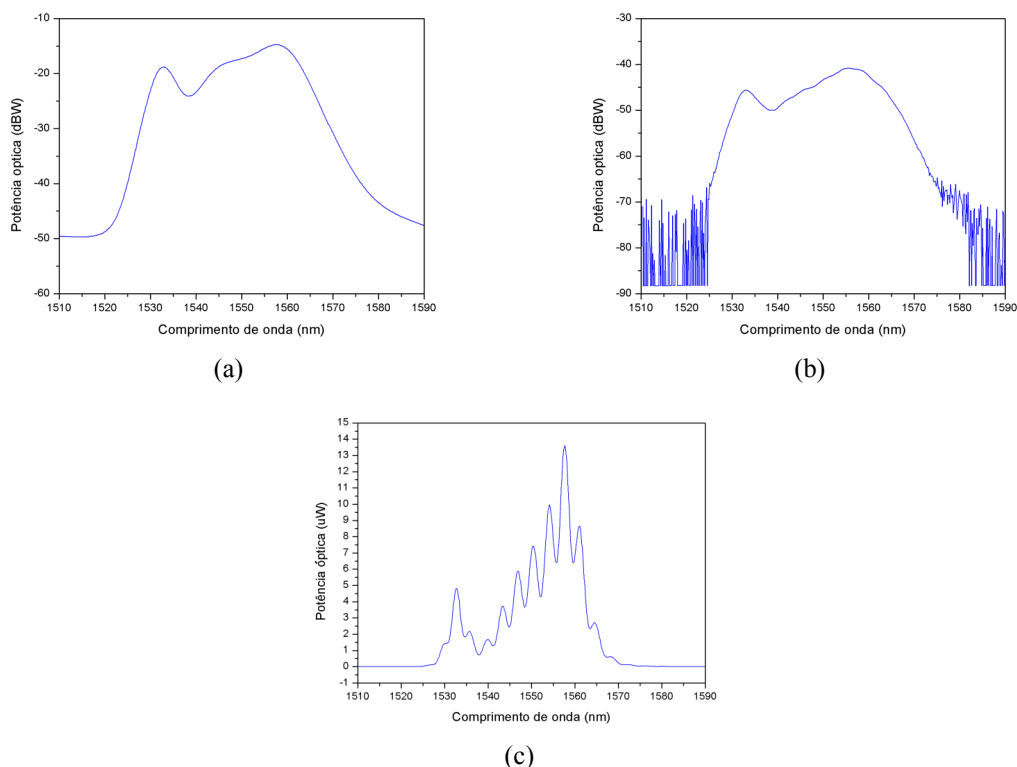
<b>Braço com percurso aéreo</b>				
Abreviação		Geométrico (cm)	n	Óptico (cm)
AC11	Acoplador direccionais	109,5	1,46	159,87
COMP	Comprimento de ajuste	121,9	1,46	177,97
EPA	Entrada ao percurso aéreo	132	1,46	192,72
Aéreo	Percurso aéreo	1,47	1	1,47
SPA	Saída ao percurso aéreo	164	1,46	239,44
AC21	Acoplador direccionais	74,5	1,46	108,77
		603,37		880,25

<b>Braço com o modulador de fase</b>				
Abreviação		Geométrico (cm)	n	Óptico (cm)
AC12	Acoplador direccionais	116,8	1,46	170,53

COMP1	Comprimento de ajuste	172,9	1,46	252,43
EMF	Entrada ao modulador de fase	98,9	1,46	144,39
Modulador	Modulador de fase	4,4	2,12	9,39
SMF	Saída ao modulador de fase	101,82	1,46	148,66
COMP2	Comprimento de ajuste	38,7	1,46	56,50
AC22	Acoplador direccional	67,4	1,46	98,40
		600,92		880,25

Uma vez implementado o interferómetro de leitura, iluminou-se o sistema através de uma fonte de espectro largo. A fonte óptica utilizada é da Photonetics, modelo Fiber White [42], e foi amplificada através da fonte/amplificador da Multiwave, modelo EDFA-C [43]. Ambas utilizam fibra dopada com érbio para gerar este tipo de espectro. Verificaram-se os espectros ópticos na entrada e na saída do interferómetro, com recurso a um analisador de espectros ópticos (OSA), marca ANDO, modelo AQ-6315B [44]. Na Figura 3.4 são apresentados os espectros na entrada e na saída do sistema.



**Figura 3.4** - Espectros ópticos: (a) Fonte óptica; (b) Saída do sistema com a diferença de percurso óptico entre os braços do interferómetro perto de zero; (c) Saída do sistema com a diferença de percurso óptico entre os braços do interferómetro maior que zero.

Através da Figura 3.4(a) mediu-se a largura espectral da fonte, a menos 3 dB como sendo de 45,6 nm, e com recurso a (2.7), calculou-se o comprimento de coerência da fonte, obtendo-se o valor de  $\sim 34 \mu\text{m}$ . O comprimento de coerência é um parâmetro de importância no caso da implementação de um esquema de interrogação WLI [17].

Na Figura 3.4(b) verificou-se a diminuição de potência óptica, devido às perdas impostas pelo sistema (acopladores direccionais [45], modulador de fase [38], fusões [10] e pelo percurso aéreo [17]).

A Figura 3.4(c) permitiu calcular a visibilidade do sistema através da expressão (2.3), obtendo-se um valor de 0,34. E sendo a visibilidade proporcional a relação sinal ruído permitiu comprovar que o sistema era viável na recuperação dos sinais de interesse na saída do mesmo [46].

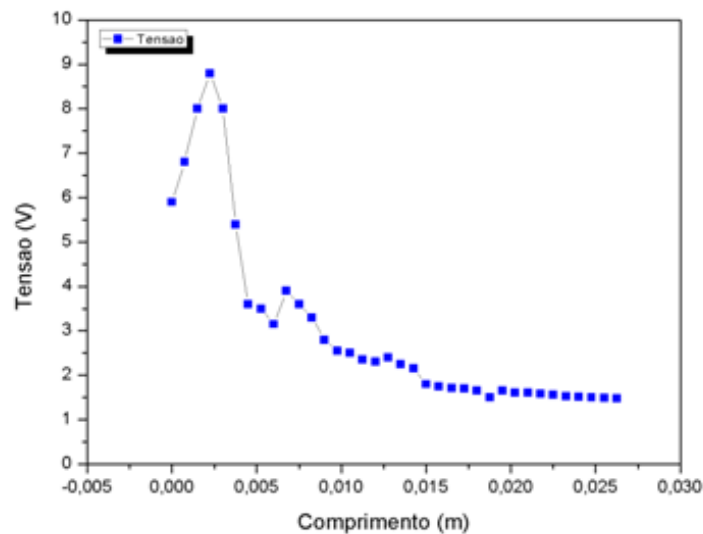
A razão pela qual não foi possível obterem-se melhores resultados de visibilidade foram as elevadas perdas impostas pelo percurso aéreo, devido ao alinhamento imperfeito entre as lentes de GRIN, o qual permitia apenas o deslocamento na horizontal. Assim, as perdas neste dispositivo foram superiores às impostas pelo modulador de fase no outro braço do interferómetro.

Este desalinhamento foi verificado ao estimarem-se as perdas que ocorreram no braço do interferómetro com o percurso aéreo. Assim, as perdas produzidas pela transição da luz lente-lente (reflexão de Fresnel  $\sim 4\%$ ), pelas duas fusões ( $\sim 0,02 \text{ dB}$ ), e a possível perda na divisão de potência pelo acoplador são em conjunto inferiores aos 6,5 dB registados.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho foi necessária a alteração deste percurso, através da colocação de uma carruagem de precisão. Estas alterações, em conjunção com o desalinhamento, chegaram a criar uma cavidade de Fabry-Pérot, que afectava o desempenho do sistema quando se verificar a condição de que diferença de percursos ópticos entre o interferómetro de modulação e o comprimento da cavidade de Fabry-Pérot era inferior ao comprimento de coerência da fonte [17], produzindo harmónicos que o afectavam significativamente o sistema, sendo necessária a realização de realinhamentos contínuos.

Após a resolução dos problemas anteriormente descritos, e verificada a existência de interferência no interferómetro principal de Mach-Zehnder, variou-se o percurso aéreo em intervalos regulares de 1 mm, e mediu-se a tensão DC num dos fotodetectores, podendo assim

reconstruir-se a envolvente da função de transferência do interferómetro, como ilustrado na Figura 3.5.

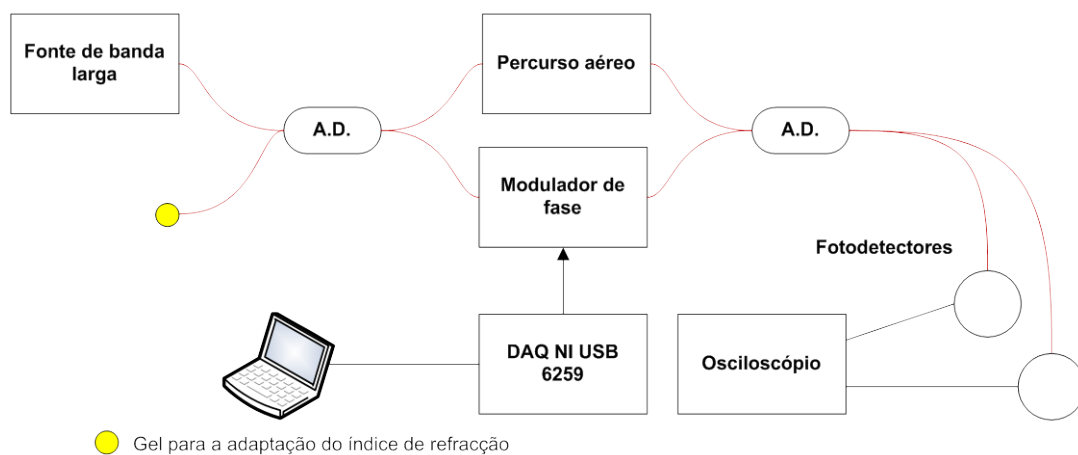


**Figura 3.5** - Envolvente da Função de transferência do interferómetro de Mach-Zehnder implementado.

A partir da Figura 3.5, é possível observar um comportamento semelhante à envolvente do padrão de interferência apresentado na Figura 2.1.

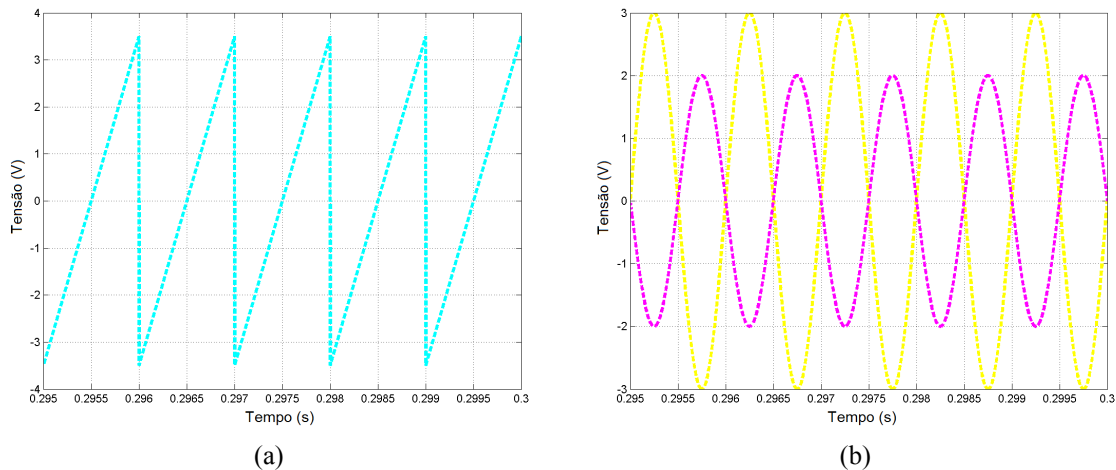
### 3.2. Implementação do esquema de detecção

Ao sistema até aqui descrito foram acrescentados alguns elementos para assim poder-se implementar o esquema de detecção pseudo-heteródino. Foram colocados dois fotodetectores, marca Thorlabs, modelos PDA10CS [47] e PDA400 [48], na saída do sistema e uma *Data Acquisition Board* (DAQ) marca National Instruments, modelo NI USB 6259 [49], inicialmente ligada apenas ao modulador de fase electro-óptico, como ilustrado na Figura 3.6.



**Figura 3.6** - Esquema do sistema implementado com a inclusão dos fotodetectores e a DAQ.

Foi implementado, com recurso ao LabVIEW®, um pequeno programa que gerava um sinal dente-de-serra, com frequência de 1 kHz e amplitude pico a pico de 7,2 V, tal como recomendado por [36] de forma a obterem-se os melhores resultados. A Figura 3.7(a) ilustra o sinal de modulação e a Figura 3.7(b) ilustra os sinais detectados pelos fotodetectores.



**Figura 3.7** - (a) Sinal de modulação; (b) Sinais detectados pelos fotodetectores.

As imagens mostram o efeito de amostragem e quantização do sinal, a diferença de  $180^\circ$  entre os sinais à saída do sistema, produzida pelo acoplador direccionado, e a diferença de amplitude entre os dois sinais, dado que os ganhos dos fotodetectores utilizados eram diferentes. Verificou-se também que era praticamente imperceptível o efeito de *fly-back*, sendo que a fase do interferómetro era guiada em número inteiro de franjas durante cada período do sinal de modulação, verificando-se a condição apresentada na expressão (2.17) [36].

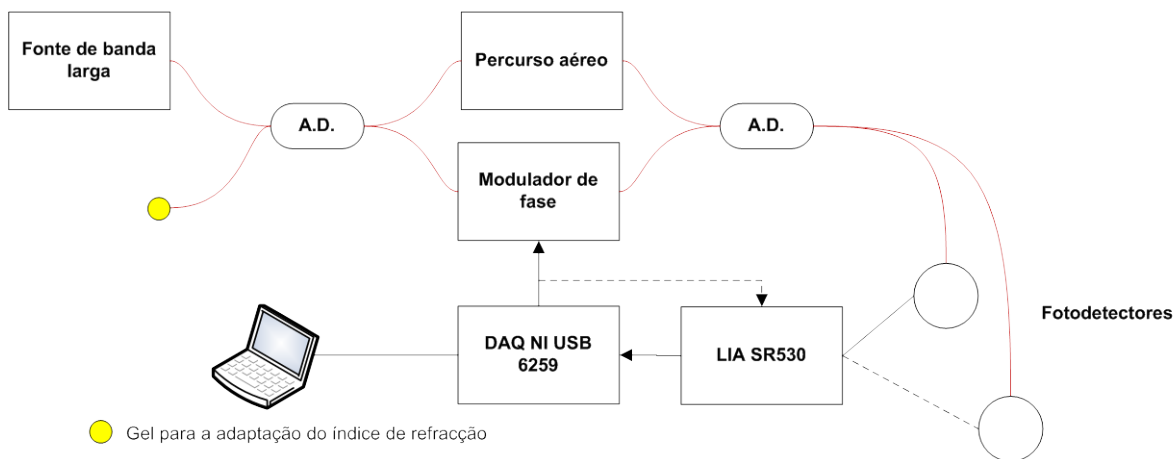
### 3.3. Medição da diferença de fase

No sistema implementado a informação do mensurando introduz uma variação de fase do sinal óptico, por isso é necessário procurar formas que permitam recuperar essa informação. A forma mais usual de o fazer é através de um LIA (Stanford Research SR530) [9] [16] [40]. Este quantifica a diferença de fase entre dois sinais com a mesma frequência [50], mas tem como desvantagem um preço elevado, em torno dos 2.200 € [51].

Inicialmente desenvolveu-se o sistema utilizando a abordagem tradicional, podendo-se assim, verificar o correcto funcionamento do sistema e ter um ponto de comparação para uma variante desta solução. Nesse processo realizaram-se testes sistemáticos de forma a escolher as configurações do LIA que permitiam obter o melhor resultado, tendo sido utilizadas as

seguintes: utilizar a constante de tempo para o filtro PRE de 1 ms e para o filtro POST de 0,1 s [51].

Procedeu-se então à implementação do sistema, utilizando um LIA como método de desmodulação da informação contida na fase da portadora. Verificou-se o funcionamento do modo diferencial e não diferencial. No caso da implementação diferencial, a comparação de fase é realizada entre os sinais detectados pelos fotodetectores. Para o caso da implementação não diferencial é medida a diferença de fase entre um sinal de referência, sendo este o sinal de modulação aplicado ao modulador de fase, e o sinal detectado por um dos fotodetectores. O esquema do sistema é apresentado na Figura 3.8.



**Figura 3.8** - Esquema de montagem utilizando um LIA físico.

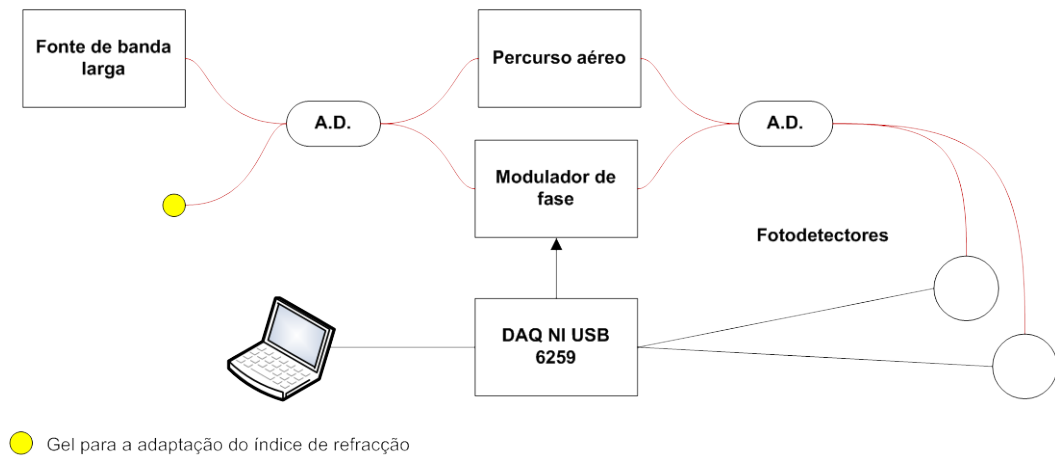
Desenvolveu-se uma aplicação em LabVIEW® para gerar um sinal de modulação, através da DAQ, aplicado ao modulador de fase electro-óptico. Sempre que era utilizada a DAQ para gerar o sinal de modulação, foi necessário inserir um seguidor de tensão, dado que a DAQ só era capaz de fornecer correntes até 5 mA, sendo que o modulador de fase tem uma impedância de entrada de 50  $\Omega$  e a tensão de pico de modulação encontra-se em torno dos 7 V, ou seja, necessita de 140 mA para a tensão de pico. O circuito seguidor de tensão foi fabricado no INESC-Porto.

À saída do LIA, o valor de fase é apresentado num ecrã e simultaneamente é gerada uma tensão proporcional à essa fase, variando entre -9 até 9 V, o que representa uma variação de -180° até 180° em termos de fase. O valor de tensão é gerado por um conversor digital/analógico (D/A) de 13 bits de precisão, interno ao LIA, o que permite ao equipamento

através desta via assinalar variações de  $0,04^\circ$ . Este valor de tensão é adquirido pela DAQ onde é realizada a conversão de valor de tensão para fase para depois ser armazenado no computador.

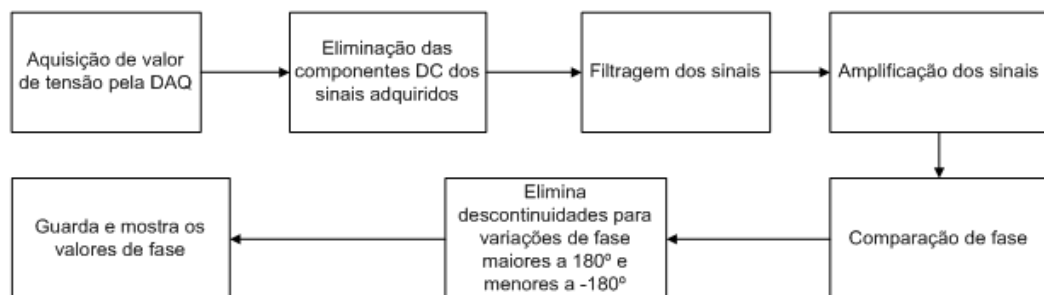
### 3.3.1. Implementação virtual

Sendo um dos objectivos a minimização de custos e a simplificação de um sistema deste tipo, procurou-se uma forma de substituir o LIA por um instrumento virtual que fosse capaz de realizar a mesma função sem ter um decréscimo no desempenho. Evitou-se a utilização do LIA virtual fornecido pela National Instruments, já que a versão disponibilizada de forma gratuita não permite um controlo completo do instrumento. O esquema implementado é apresentado na Figura 3.9.



**Figura 3.9** - Esquema implementado em que a comparação da fase dos sinais à saída é realizada através de instrumentação virtual.

A implementação do comparador de fase entre os dois sinais detectados pelos fotodetectores foi realizada com recurso ao LabVIEW®. O código utilizado é baseado num exemplo fornecido pela National Instruments [52]. O esquema geral apresenta-se na Figura 3.10.



**Figura 3.10** - Esquema de funcionamento do *software* de comparação de fase implementado em LabVIEW®.

O algoritmo de comparação de fase segue o seguinte raciocínio.

Considere-se que os sinais recebidos nos fotodetectores vêm dados por:

$$\begin{aligned} \cos(\omega_0 t + \varphi) \\ \cos(\omega_0 t + \theta) \end{aligned}$$

Em primeiro lugar, calcula-se a transformada de Fourier de ambos sinais:

$$\begin{aligned} \cos(\omega_0 t + \varphi) &\xrightarrow{F} \pi e^{j\varphi} \delta(\omega - \omega_0) + \pi e^{-j\varphi} \delta(\omega + \omega_0) \\ \cos(\omega_0 t + \theta) &\xrightarrow{F} \pi e^{j\theta} \delta(\omega - \omega_0) + \pi e^{-j\theta} \delta(\omega + \omega_0) \end{aligned}$$

Em segundo lugar, dado que a informação desejada se encontra nas posições dos Diracs, tanto na região negativa e positiva do espectro, seleccionou-se neste caso a região positiva.

$$\begin{aligned} \pi e^{j\varphi} \delta(\omega - \omega_0) \\ \pi e^{j\theta} \delta(\omega - \omega_0) \end{aligned}$$

Em terceiro lugar, recupera-se o sinal de interesse.

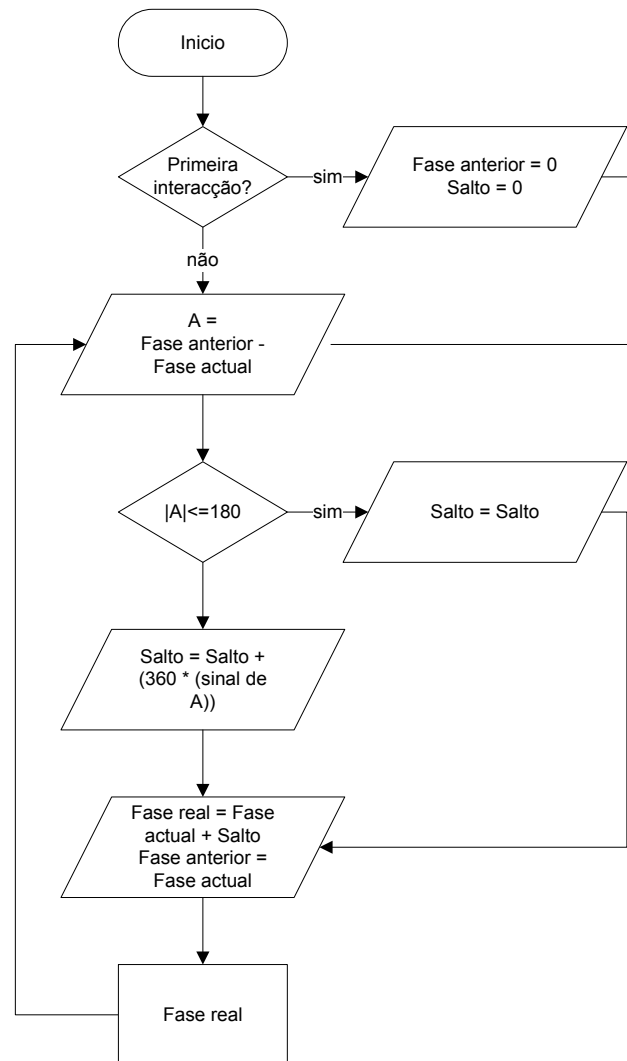
$$\begin{aligned} \pi e^{j\varphi} \\ \pi e^{j\theta} \end{aligned}$$

Em quarto lugar, passa-se da sua expressão na forma polar, para a forma cartesiana. Em seguida, calculam-se as fases e a sua respectiva diferença.

$$\begin{aligned} \pi(\cos(\varphi) - j\text{sen}(\varphi)) \\ \pi(\cos(\theta) - j\text{sen}(\theta)) \\ r_1 = r_2 = \sqrt{\pi^2 + \pi^2} = \sqrt{2}\pi \\ \varphi = \text{arctg} \left( -\frac{\text{sen}(\varphi)}{\cos(\varphi)} \right) \\ \theta = \text{arctg} \left( -\frac{\text{sen}(\theta)}{\cos(\theta)} \right) \\ \text{Diferença de fase} = \varphi - \theta \end{aligned}$$

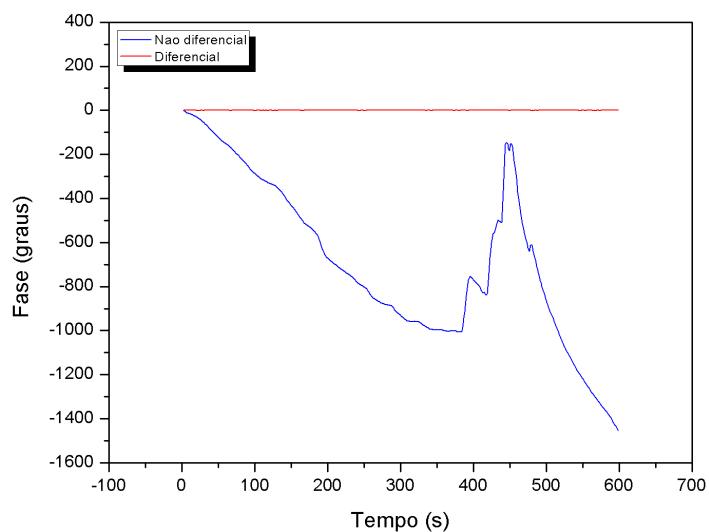
Tanto para a aquisição virtual como para a física, a diferença de fase entre sinais é considerada como tendo à saída um valor entre  $-180^\circ$  até  $180^\circ$ . Se no espaço da medição for ultrapassada esta gama de valores, o resultado produziria uma descontinuidade dificultando a

percepção dos resultados. Por isto, foi desenvolvido um algoritmo para compensar essa limitação. O fluxograma deste algoritmo é apresentado na Figura 3.11.



**Figura 3.11** - Algoritmo de compensação de fase para valores mudanças superiores a  $\pm 180^\circ$ .

Verificou-se o desempenho do sistema, medindo tanto para o caso da utilização do LIA e para o caso da implementação virtual o desvio médio de fase num espaço de 10 minutos, obtendo-se um resultado de  $0,20^\circ$  e  $0,23^\circ$ , respectivamente. Também realizou-se a comparação entre os sinais de saída do sistema usando o esquema diferencial e o não diferencial através do esquema implementado com instrumentação virtual, obtendo-se o resultado apresentado na Figura 3.12.



**Figura 3.12** - Desvio de fase no esquema diferencial e não diferencial.

Verificou-se que o desvio de fase no caso do esquema não diferencial, não é caracterizável, sendo o seu comportamento bastante aleatório devido à sua grande sensibilidade a factores externos como a temperatura, vibrações, entre outros. Comprovou-se que através de um esquema diferencial este desvio de fase é reduzido a um nível inferior a um grau. Mais ainda, a implementação virtual até este ponto consegue ter um desempenho com iguais resultados à implementação realizada através de um LIA.

Os painéis frontais dos programas desenvolvidos em LabVIEW® encontram-se no Anexo D.

## 4. Medição diferencial de deformação

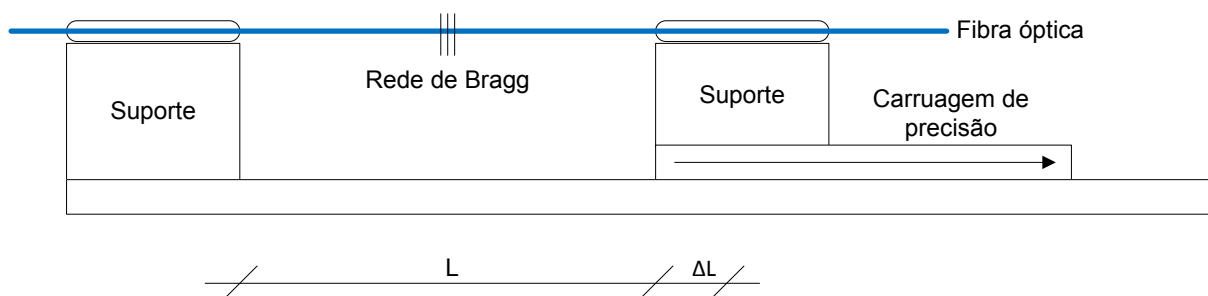
Uma vez caracterizado o sistema base, passou-se à verificação do funcionamento do sistema com a introdução dos elementos sensores, neste caso redes de Bragg. Dada a maior complexidade requerida para a realização de medições diferenciais, os testes de validação do sistema foram realizados através da medição de deformação.

### 4.1. Introdução

Um corpo é submetido a um deslocamento de corpo rígido se as distâncias entre todas as partículas permanecem inalteradas, caso contrário, o corpo é deformado [53]. A medição da deformação tem um considerável interesse na monitorização do estado de estruturas, como pontes, edifícios, entre outras [54]. A medição da deformação é realizada com recurso à expressão (4.1).

$$\varepsilon = 10^6 \mu\varepsilon \frac{\Delta L}{L} \quad (4.1)$$

onde  $\mathcal{E}$  corresponde à deformação aplicada, medida em  $\mu\text{strains}$ ;  $\Delta L$  é o comprimento esticado;  $L$  é comprimento entre os suportes onde é colocado o sensor; e o factor  $10^{-6}$  corresponde ao ajuste para  $\mu\varepsilon$  [55]. A Figura 4.1 ilustra o esquema de posicionamento da rede de Bragg para a medição da deformação, a qual utiliza uma rede de Bragg como elemento transdutor.



**Figura 4.1** - Esquema de posicionamento da rede de Bragg para a medição de deformação.

Como referido no segundo capítulo, quando uma rede de Bragg actua como elemento sensor, e esta é interrogada por um interferómetro de Mach-Zehnder, a diferença de fase entre os

braços do interferómetro é dada pela expressão (2.20), sendo que a variação do comprimento de onda de Bragg é dada pela expressão (4.2).

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda(1 + n_{eff}^2P)\varepsilon \quad (4.2)$$

onde  $P$  é um termo retirado de factores de Poisson e Pockels, que representam os coeficientes de tensão de *stress* óptico. Tipicamente, este termo é aproximado pelo valor de 0,78 e utilizando a expressão (4.1) obtemos a expressão (4.3) [55].

$$\Delta\lambda_B \cong 0,78\lambda_B \frac{\Delta L}{L} \quad (4.3)$$

Ao considerar o esquema apresentado na Figura 4.1 inserido no sistema apresentado na Figura 2.12, a variação do comprimento de onda de Bragg reflectirá numa variação de fase, como o indica a expressão (2.20).

Apesar do objectivo central do trabalho ser a monitorização diferencial de temperatura, começou-se por testar o sistema através da medição de deformação, já que a medição diferencial de temperatura envolveria a resolução de alguns problemas, como por exemplo, a forma de incrementar a temperatura, entre outros.

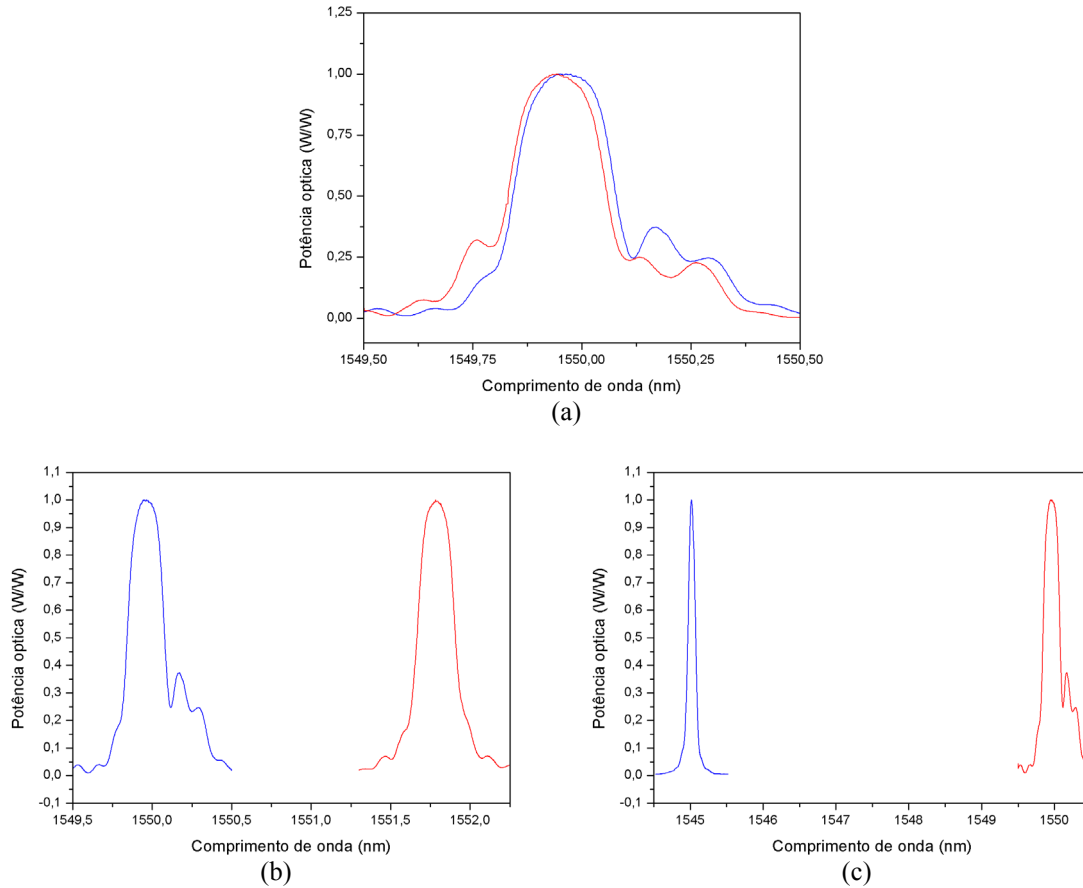
A intenção de realização destes testes teve os seguintes objectivos:

- Realizar a validação do *software* desenvolvido.
- Verificar a estabilidade do sistema implementado através de instrumentação virtual e através da implementação física com a inclusão dos sensores.
- Comparar o desempenho entre o sistema implementado através da instrumentação tradicional e o sistema implementado através de instrumentação virtual.
- Verificar se a utilização de redes de Bragg com comprimentos de onda diferentes, teria um impacto importante na sensibilidade e resolução do sistema, dada a dificuldade de fabrico de redes de Bragg exactamente iguais [33].
- Verificar a histerese do sistema.

## 4.2. Testes e resultados

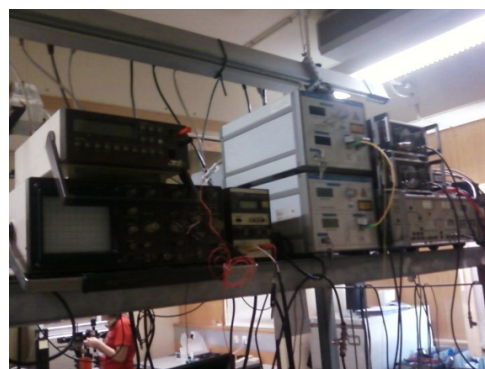
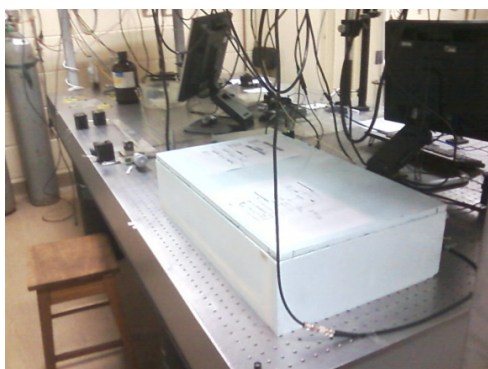
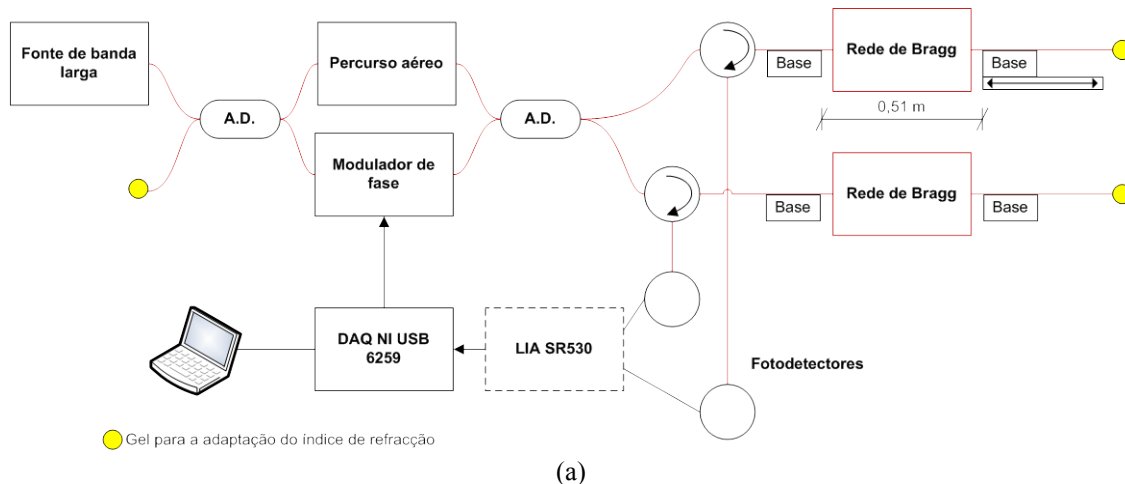
Durante a realização destes testes foram utilizados três pares de redes de Bragg, um par com comprimentos de onda idênticos (1550 nm), e dois pares com comprimentos de onda

diferentes, mas próximos (1550-1552 e 1545-1550 nm). Na Figura 4.2 são apresentados os espectros dos três pares.



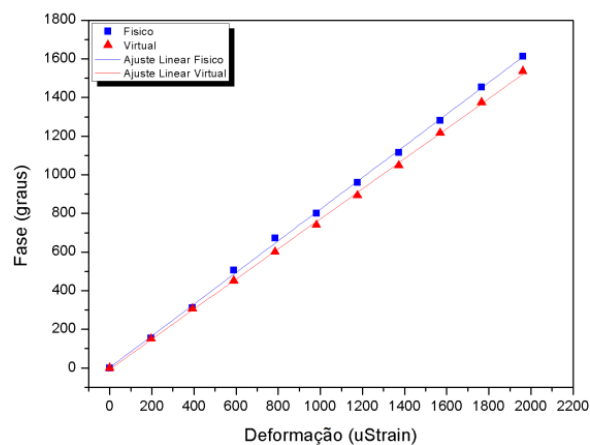
**Figura 4.2** - Espectro das redes de Bragg: (a) Par com comprimentos de onda de 1550 nm; (b) Par com comprimentos de onda de 1550 e 1552 nm; (c) Par com comprimentos de onda de 1545 e 1550 nm.

Inicialmente incorporou-se no sistema o par de redes de Bragg com comprimentos de onda iguais, os de 1550 nm. Ambas as redes de Bragg foram estendidas, de igual forma, e o mais próximo possível, de forma a garantir a maior igualdade de condições. A distância entre os pontos de apoio,  $L$ , foi de 510 mm. O estiramento foi realizado em passos de 0,1 mm até atingir 1 mm. A Figura 4.3 apresenta o esquema da montagem realizada e a área de trabalho.



**Figura 4.3** - (a) Esquema da montagem realizada para a medição de deformação; (b) e (c) Área de trabalho.

O par de redes de Bragg utilizado foi aquele com comprimentos de onda idênticos, e verificou-se o comportamento do sistema a nível do desvio médio de fase e da sensibilidade, utilizando tanto a implementação realizada com instrumentação física como virtual. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.4.



**Figura 4.4** - Medição da deformação utilizando um par de redes de Bragg de 1550, com os sistemas de aquisição físico e virtual.

A Tabela II apresenta os valores obtidos de desvio médio de fase, sensibilidade e os valores de resolução obtidos na medição da deformação, tanto para o caso da implementação através de instrumentação física como virtual.

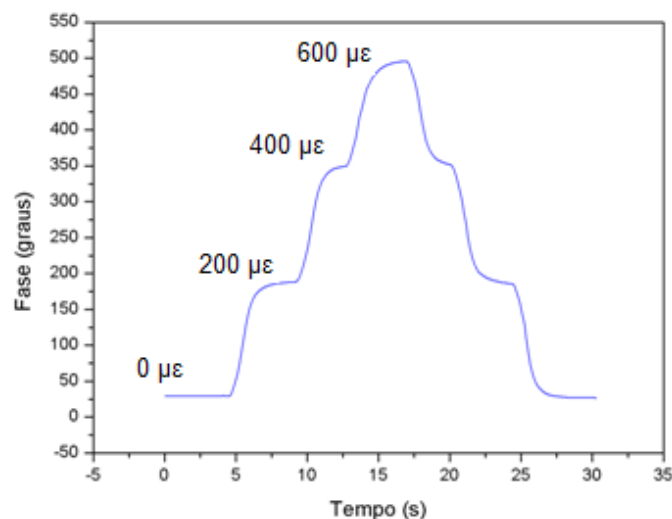
**Tabela II** - Medição da deformação utilizando os sistemas físico e virtual.

Sistema	Desvio padrão (graus)	Sensibilidade (graus/ $\mu$ strains)	Ajuste linear ( $R^2$ )	Resolução (nanostrains)
Físico	0,20	0,82	0,9993	243,90
Virtual	0,23	0,78	0,9995	294,87

De acordo com os resultados obtidos podemos afirmar que os valores de sensibilidade e de resolução entre o sistema implementado através de instrumentação física e aquele implementado por instrumentação virtual são bastante próximos.

A nível do desempenho, o *software* foi avaliado por fases, desde a aquisição dos sinais, passando pela remoção de sua componente DC, pela filtragem, amplificação, obtenção do valor de fase, compensação de saltos de fase maiores que  $\pm 180^\circ$ , obtendo-se em qualquer dos casos os valores esperados.

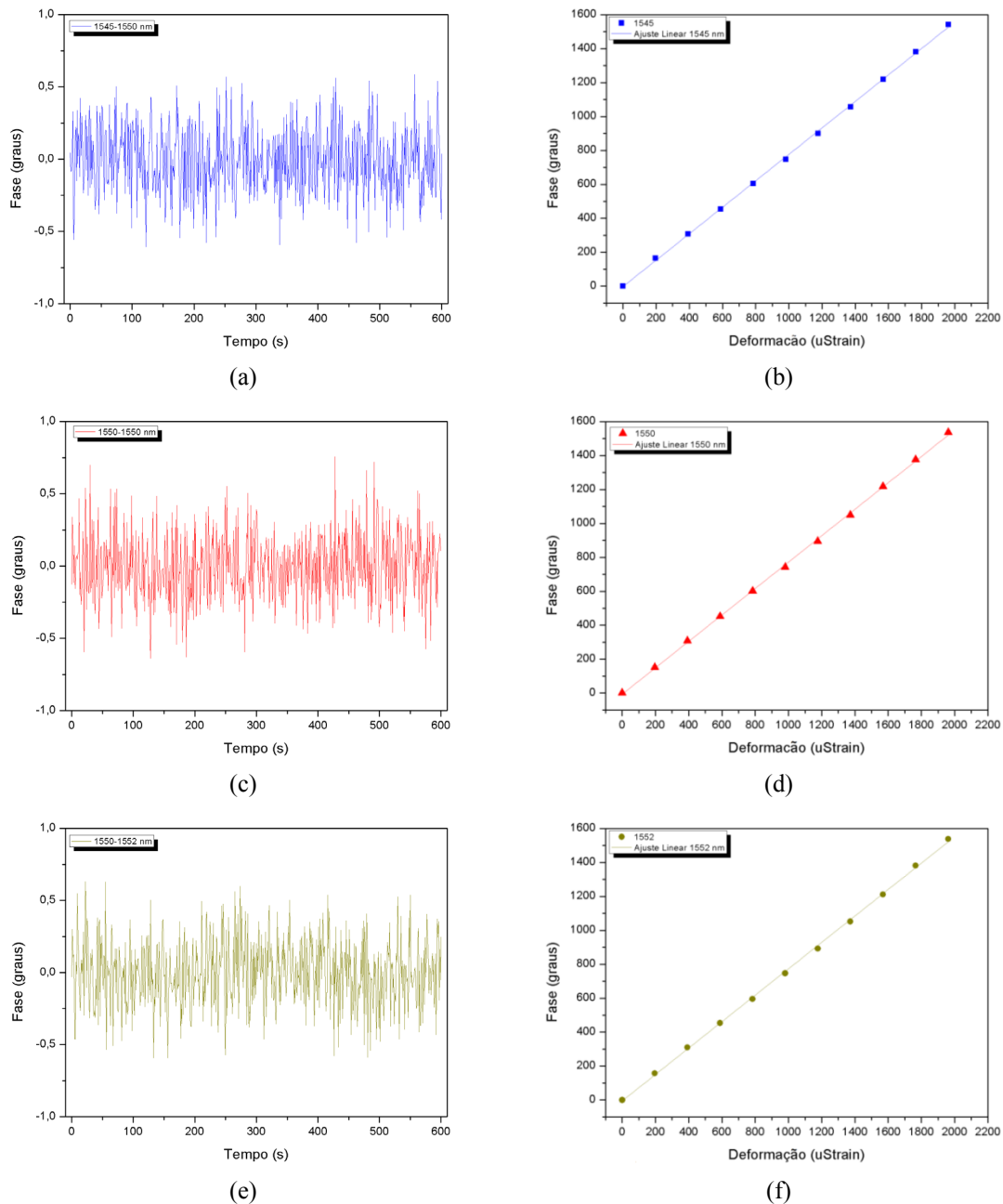
Posteriormente, foi verificada a reversibilidade do sistema com o incremento e posterior decremento da deformação. A Figura 4.5 apresenta os resultados obtidos.



**Figura 4.5** - Medição de reversibilidade do sistema.

Verificou-se que o sistema apresenta boa reversibilidade, e a presença de algum desvio pode ser devido a pequenas variações de temperatura entre as redes, sendo verificado no capítulo seguinte a grande sensibilidade do sistema ante estas variações.

Finalmente e de forma sequencial foram incorporados os dois outros pares de redes de Bragg referidos anteriormente. Para cada par mediu-se o desvio médio de fase e a sensibilidade, utilizando o sistema implementado com instrumentação virtual. A Figura 4.6 apresenta os resultados obtidos.



**Figura 4.6** - Resultados de desvio médio de fase e aplicação da deformação para os diferentes pares de redes de Bragg; (a) e (b) 1545 - 1550 nm; (c) e (d) Ambas de 1550 nm; (e) e (f) 1550 - 1552 nm.

A Tabela III apresenta os valores de desvio médio de fase e sensibilidade medidos utilizando os diferentes pares de redes de Bragg.

**Tabela III** - Desvio médio de fase e sensibilidade medidos utilizando diferentes pares de redes de Bragg.

<b>Par de redes de Bragg</b>	<b>Desvio padrão (graus)</b>	<b>Sensibilidade (graus/<math>\mu</math>Strain)</b>	<b>Ajuste linear (<math>R^2</math>)</b>	<b>Resolução (nanoStrain)</b>
<b>1550 - 1545 nm</b>	0,23	0,780	0,9995	294,87
<b>1550 - 1550 nm</b>	0,23	0,778	0,9995	295,63
<b>1550 - 1552 nm</b>	0,23	0,778	0,9994	295,63

Verificou-se com estes resultados que a utilização de redes de Bragg com comprimentos de onda diferentes, em pouco afecta a sensibilidade e a resolução do sistema, perante medições da deformação.

Na Tabela IV são comparados os resultados obtidos com ambos os sistemas desenvolvidos, com um sistema previamente desenvolvido no INESC-Porto e com um sistema comercial de interrogação de redes de Bragg.

**Tabela IV** - Comparação entre sistemas interferométricos de medição de deformação.

<b>Sistema</b>	<b>Resolução (nanoStrain)</b>	<b>Sensibilidade (graus/<math>\mu</math>Strain)</b>
<b>INESC Porto [36]</b>	718,31	0,71
<b>Comercial * [56]</b>	1000	-
<b>Instrumentação física</b>	243,90	0,82
<b>Instrumentação virtual</b>	294,87	0,78

\* Os dados obtidos só fornecem a resolução em picómetros, sendo este valor 1 pm convertido em nanoStrain para uma fácil comparação, considerando que uma resolução de 1 pm  $\cong$  1  $\mu$ Strain [55].

Verifica-se que o sistema desenvolvido ocupa o segundo lugar após a instrumentação física. Este resultado é consideravelmente positivo, dado que a implementação realizada não é vocacionada para esta aplicação, e assim, existem vários elementos que poderiam ser optimizados e que conduziram a um melhor resultado do sistema desenvolvido. Por exemplo, a eliminação do percurso aéreo, com as respectivas perdas de potência previamente mencionadas, bem como o balanceamento da potência óptica entre os braços do interferómetro, entre outras.



## 5. Medição diferencial de temperatura

---

O objectivo central desta dissertação foi o desenvolvimento de um sistema interferométrico diferencial para a medição de temperatura. Nos capítulos anteriores descreveu-se o processo de implementação do sistema assim como a sua validação através da medição de deformação. Neste capítulo, descreve-se o comportamento do sistema ante variações de temperatura e a utilização do sistema desenvolvido na implementação da análise térmica diferencial.

### 5.1. Introdução

A temperatura pode ser definida como uma grandeza que diz quão quente ou frio está um corpo. As alterações de temperatura num corpo não só dependem da quantidade de calor a este aplicada, como também, dependem de sua capacidade mássica e da sua condutividade térmica. A capacidade mássica refere-se à quantidade de energia que é necessária fornecer à uma unidade de massa de uma substância para que a sua temperatura aumente em 1 K e a condutividade térmica define-se como a energia transmitida por segundo através de uma camada de material de 1 m<sup>2</sup> de área e de 1 m de espessura, quando a diferença de temperatura entre as duas superfícies é 1 K [57].

No sistema desenvolvido, o elemento transdutor é uma rede de Bragg, sendo que a variação da sua temperatura,  $\Delta T$ , produz uma alteração linear no comprimento de onda central da rede, dado pela expressão (5.1) [55].

$$\Delta\lambda_B = \frac{\partial\lambda_B}{\partial T} \Delta T \quad (5.1)$$

A variação do comprimento de onda de Bragg provocada por uma variação de temperatura de 1 °C corresponde aproximadamente a 10 pm [55]. No sistema de interrogação implementado, por outro lado, a alteração do comprimento de onda de Bragg, produzirá uma variação na fase do sinal, de acordo com a expressão (2.20).

### 5.2. Diferença de temperatura

Para poder levar a cabo uma medição diferencial de temperatura é necessário induzir uma diferença de temperatura entre os elementos transdutores. Considerando que uma das redes de Bragg fosse colocada em água e gelo garantido sua estabilidade térmica [57] [58], bastava encontrar uma maneira de variar a temperatura da segunda rede de forma controlada.

A primeira opção disponibilizada consistia em utilizar um *hotplate* [59], que utiliza um controlo Proporcional, Integrativo e Derivativo (PID) [60]. Uma vez atingida a temperatura programada, esta apresenta uma flutuação de cerca de 1 °C, sendo, este infelizmente, um valor muito elevado. Considerando que o sistema deverá ter uma resolução maior em várias ordens de grandeza, esta opção não era viável.

Numa segunda instância foi disponibilizado um módulo termoeléctrico Peltier. O seu princípio de funcionamento, o efeito Peltier, enuncia que quando uma pequena corrente eléctrica atravessa a junção de dois metais diferentes numa direcção, uma superfície arrefece e a contrária aquece. Quando a direcção da corrente é invertida, as superfícies trocam o seu estado.

A potência trocada por calor, libertada ou absorvida,  $\delta Q_P / dt$ , é proporcional à intensidade de corrente eléctrica,  $I$ , como mostra a expressão (5.2).

$$\frac{\delta Q_P}{dt} = \pi_{AB} I \quad (5.2)$$

onde  $\pi_{AB}$  é o coeficiente (ou tensão) de Peltier. O coeficiente  $\pi_{AB}$  representa a energia libertada ou absorvida na forma de calor pela junção por unidade de tempo e por unidade de corrente eléctrica [57].

Sendo que a estabilidade deste tipo de elementos já foi reportada em 0,0003 °C, decidiu-se optar por esta alternativa [61].

Decidida a utilização de um Peltier como meio de variação de temperatura de uma das redes de Bragg, apresentou-se um problema: como ter um controlo da corrente fornecida ao Peltier e por conseguinte o controlo da temperatura aplicada à rede. Utilizou-se para este fim uma fonte de tensão, marca Kepco, modelo ABC [62], com interface *General Proporse Interface Bus* (GPIB), e através de LabVIEW® desenvolveu-se um *software* para controlar os parâmetros desejados. Em muitos casos, o *software* deste tipo de controladores é disponibilizado pelos fabricantes, mas neste caso só se teve acesso à lista de comandos através de seu *datasheet*.

Foram desenvolvidas duas funcionalidades principais, a primeira com objectivo de realizar a calibração do sistema, indicando o valor de corrente a ser fornecido. E a segunda funcionalidade tinha como objectivo a possibilidade de incrementar a corrente fornecida ao Peltier a uma determinada taxa, tendo em vista a aplicação da análise térmica diferencial.

Integraram-se estes novos elementos no sistema de medição, e colocou-se uma das redes de Bragg a temperatura controlada, em água com gelo, e a outra sobre o Peltier. Registou-se a variação da fase provocada pelas variações da corrente aplicada ao Peltier, e a temperatura absoluta através de um simples termómetro obtendo-se o resultado apresentado na Figura 5.1.

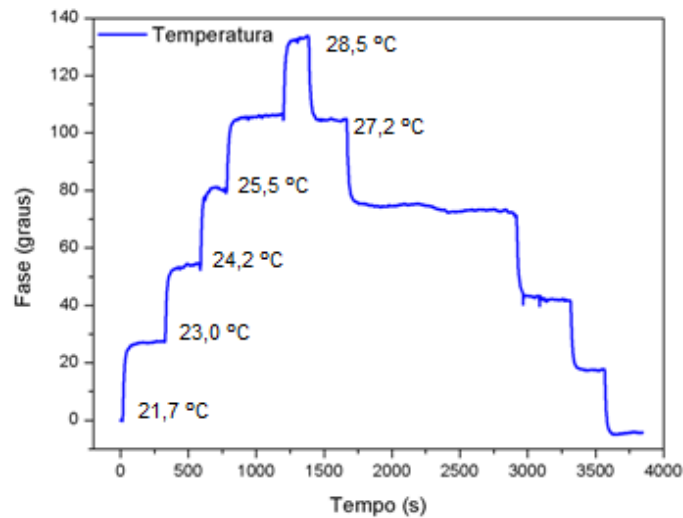


Figura 5.1 - Medição dinâmica de temperatura.

Verificou-se que a variação de corrente produziu variações de fase com estabilidade, embora só depois do processo de calibração se poderia dizer se o sistema era estável ou não.

### 5.3. Calibração

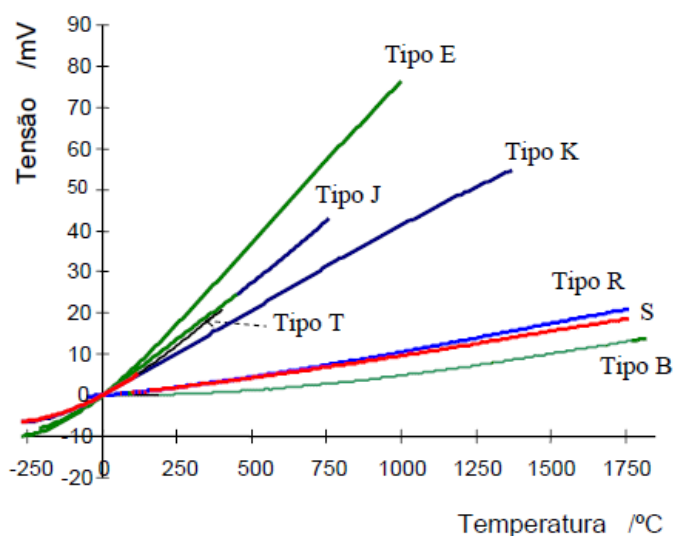
Procurou-se uma forma de calibração cruzada, de modo a verificar a sensibilidade do sistema perante as variações de temperatura. Esta calibração deve ser, idealmente, padronizada e com uma resolução superior ou pelo menos semelhante à do sistema que se deseja calibrar. Não existindo nenhum equipamento disponível, procurou-se formas de medir a temperatura com a maior resolução possível com os recursos existentes.

Estudou-se a possibilidade de utilizar um termopar ou um termistor. Os termopares são sensores de temperatura, que utilizam como meio de transdução o efeito Seebeck. Este efeito descreve a variação da diferença de potencial entre duas junções de materiais condutores, uma junção serve de referência e a segunda é exposta ao mensurando. De acordo com o par de elementos condutores utilizados, os termopares são classificados segundo a Tabela V [57].

**Tabela V** - Tipos de termopares em função dos seus constituintes.

Tipo	Constituição	Gama de temperatura
B	Platina / 30% Ródio-Platina	0 - 1800 °C
C	Tungstênio-5% Rénio/ Tungstênio-26% Rénio	0 - 2320 °C
E	Cromel / Constantan	-270 - 1000 °C
G	Tungstênio / Tungstênio-26% Rénio	0 - 2300 °C
J	Ferro / Constantan	-210 - 1370 °C
K	Cromel / Alumel	-270 - 1370 °C
N	Nicrosil / Nisil	-270 - 1300 °C
R	Platina / 13% Ródio-Platina	-50 - 1750 °C
S	Platina / 10 % Ródio-Platina	-50 - 1750 °C
T	Cobre / Constantan	-270 - 400 °C

As variações de tensão em função da temperatura são apresentadas na Figura 5.2.



**Figura 5.2** - Variação da tensão em função da temperatura nos diferentes tipos de termopares.

O termopar disponibilizado é do tipo J, da marca Omega, o qual possui uma resolução de 0,1 °C, as variações de tensão são da ordem dos  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , e com uma dimensão de 30 cm de comprimento, tal como se representa na Figura 5.3 [63].



**Figura 5.3** - Termopar do tipo J.

Por outro lado, os termistores são resistências sensíveis à temperatura, construídas em material semicondutor. Como material semicondutor utilizam-se os óxidos de níquel, cobalto

e manganês, e sulfatos de ferro, alumínio e cobre, e para aumentar a estabilidade, misturas de outros óxidos. É de pequenas dimensões, a medição é associada a um valor de resistência na ordem dos kΩ, e possui elevadas sensibilidades, com resolução na ordem dos 0,001 K [57].

Existem basicamente dois tipos de termistores, os *Negative Temperature Coefficient* (NTC), cujo coeficiente de variação de resistência com a temperatura é negativo: a resistência diminui com o aumento da temperatura de forma exponencial, e os *Positive Temperature Coefficient* (PTC) cujo coeficiente de variação de resistência com a temperatura é positivo: a resistência aumenta exponencialmente com o aumento da temperatura [57].

A gama de medição de um termistor é de -100°C até 300 °C. Para um termistor, a variação da resistência com a temperatura é elevada, sendo a sua relação não linear. A resistência em função da temperatura para um termistor NTC é dada pela expressão (5.3).

$$R = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (5.3)$$

onde:  $R$  é a resistência do termistor à temperatura absoluta  $T$ ;  $R_0$  é a resistência do termistor à temperatura de referência  $T_0$ ;  $\beta$  é um parâmetro característico do termistor, dependente da sua constituição. As resistências são dadas em Ω e as temperaturas em K [64].

Devido à maior sensibilidade e menores dimensões optou-se pela utilização de um termistor. Assim, foi disponibilizado um termistor de 10 kΩ, da RS modelo 256-045 [64]. Pelas especificações do produto, o parâmetro  $\beta$  tem um valor de 3.555 com 3% de tolerância. No entanto, decidiu-se calibrar o termistor para obter um valor mais preciso deste parâmetro e por conseguinte uma maior exactidão do comportamento do termistor.

Para esta calibração, foi utilizada uma configuração desenvolvida na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, por Alcinda Maria da Costa, durante a sua tese de Mestrado, intitulada "Temperatura e sua medição" [57]. A configuração é constituída por um bloco de cobre o qual possui um orifício para colocar uma resistência de platina, que é o padrão, e outro para o termistor que se deseja calibrar. A sua superfície superior é revestida por um bloco de acrílico de forma a minimizar as variações térmicas com o exterior. Do outro lado do bloco de cobre foi colocado um Peltier colado com massa térmica. Por sua vez, o Peltier encontra-se sobre um dissipador, e finalmente este é pousado sobre uma ventoinha para assim, melhorar o efeito de dissipação. Toda a montagem foi colocada sobre um suporte, garantindo

o melhor funcionamento da ventoinha, e coberta com algodão procurando a maior estabilidade térmica. A Figura 5.4 apresenta a montagem realizada.

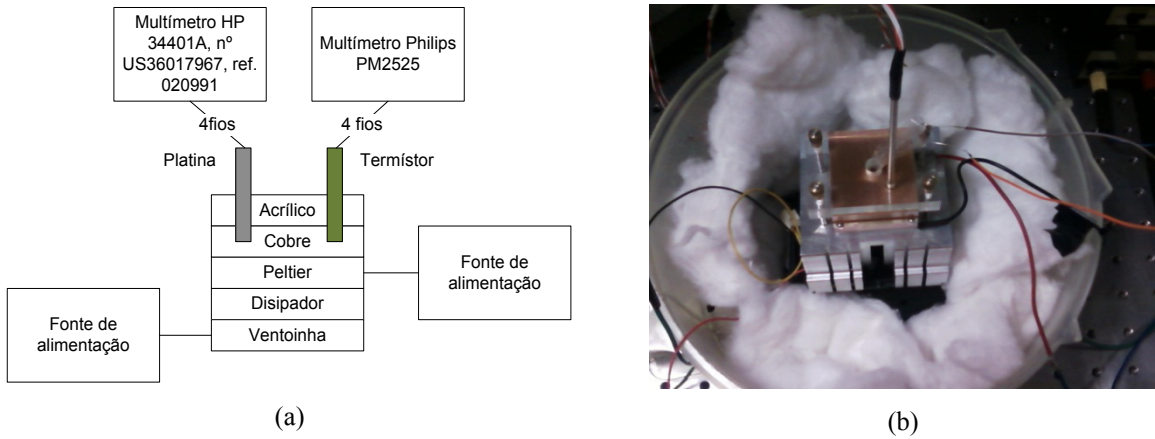


Figura 5.4 - (a) Esquema da montagem; (b) Montagem realizada.

A resistência de platina foi calibrada em conjunto com um multímetro pelo Instituto Electrotécnico Português, encontrando-se o certificado no Anexo E.

Utilizando os valores da calibração homologada, foi obtida a expressão (5.4), com recurso ao *software* Origin [65], como curva de calibração da resistência de platina, ilustrado na Figura 5.5.

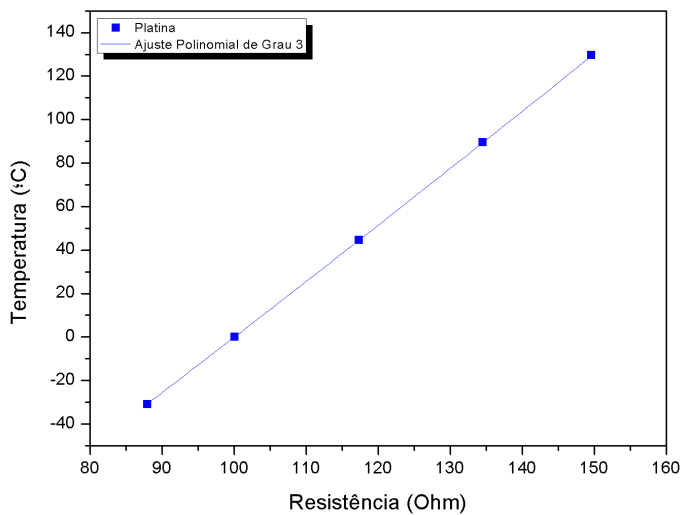


Figura 5.5 - Calibração da resistência de platina.

$$T = -248.456,86e^{-3} + 2.418,22e^{-3}R + 4.880,91e^{-7}R^2 + 1.634,58e^{-9}R^3 \quad (5.4)$$

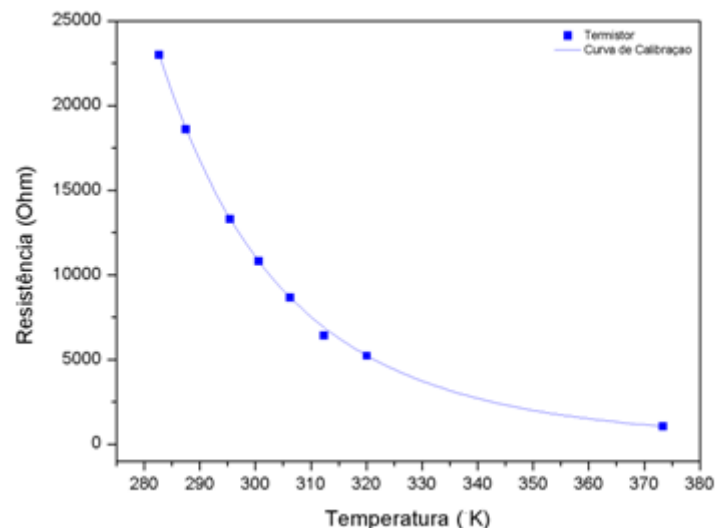
onde:  $R$  é a resistência de platina à temperatura absoluta  $T$ ; as resistências são dadas em  $\Omega$  e as temperaturas em  $^{\circ}\text{C}$ .

Posteriormente, foram realizadas variações de temperatura através do Peltier, registrando-se os valores de resistência tanto da resistência de platina, através do multímetro, marca HP, modelo 34401A [66], como do termistor, com um segundo multímetro, marca Philips, modelo PM2525 [67]. Ainda com recurso ao *hotplate*, já referido, obteve-se o valor de resistência para os 100  $^{\circ}\text{C}$ . Em cada medição aguardou-se o tempo necessário até que existisse estabilidade na medição. No caso de ambos os multímetros, os controladores para LabVIEW® foram fornecidos pelos fabricantes, permitindo automatizar o processo de medição.

Novamente utilizando o *software* Origin, foi inserida a forma da curva indicada na expressão (5.3), e com os valores recolhidos, fez-se o seu ajuste e obteve-se a expressão (5.5), com um coeficiente de correlação de 0,9993.

$$R = 10803 \exp^{3590,55 \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{300,64} \right)} \quad (5.5)$$

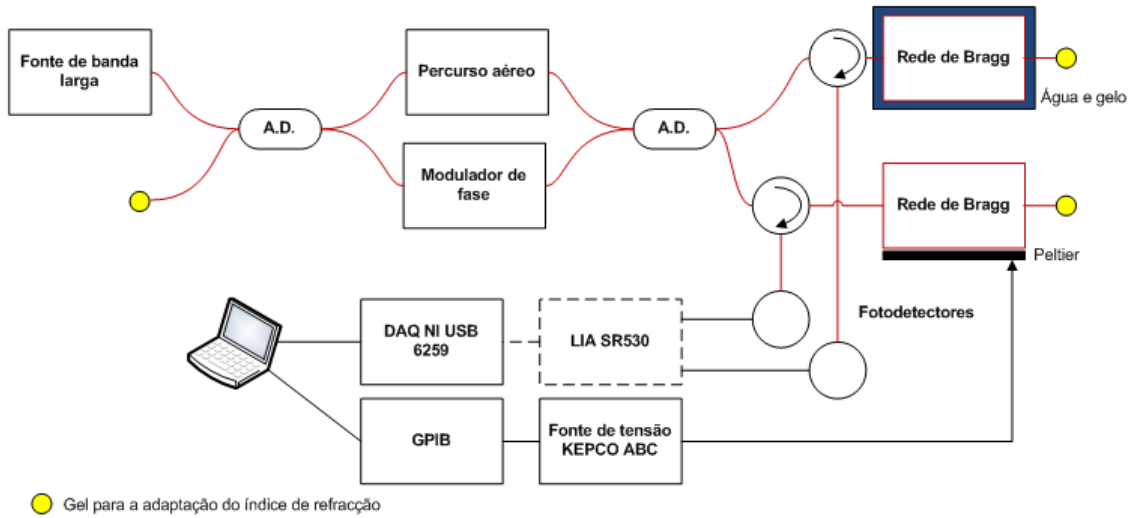
A Figura 5.6 apresenta os resultados obtidos experimentalmente e a curva de calibração.



**Figura 5.6** - Curva de calibração do termistor utilizado.

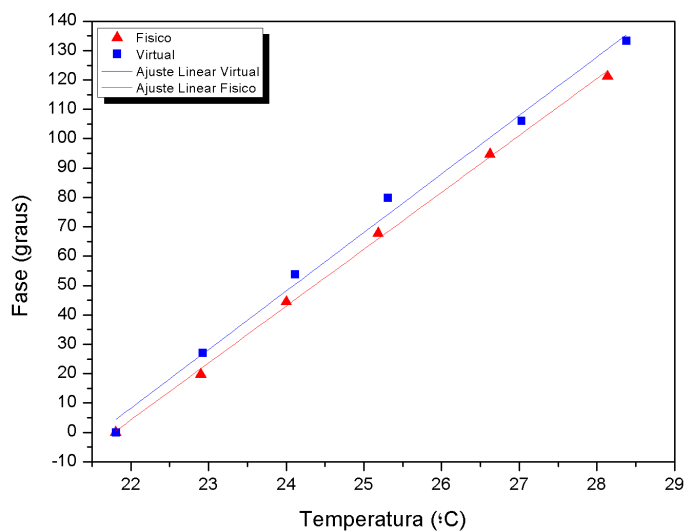
Uma vez caracterizado o termistor com o qual se realizaria a calibração cruzada, procedeu-se à calibração do sistema desenvolvido. Como sempre uma das redes de Bragg foi colocada em

água com gelo e a segunda foi sujeita a variações de temperatura através do Peltier, como apresentado na Figura 5.7, incrementando em passos de 100 mA, desde os 0 mA até 500 mA.



**Figura 5.7** - Esquema de montagem para a medição diferencial de temperatura.

Este processo repetiu-se, registrando-se as variações de fase através do sistema que utiliza instrumentação física e o implementado através da instrumentação virtual. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.8.



**Figura 5.8** - Resultados da variação de temperatura medidos com os sistemas virtual e físico.

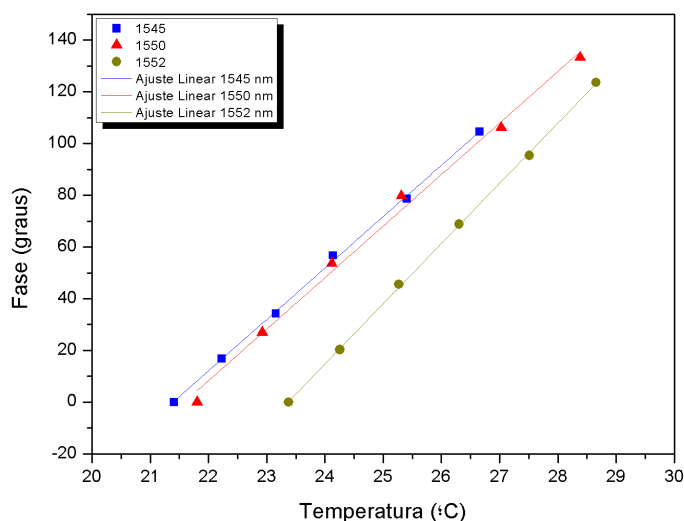
A Tabela VI mostra os resultados da sensibilidade em função de variações de temperatura, medidos pelo sistema implementado através de instrumentação física e virtual.

**Tabela VI** - Sensibilidade dos sistemas físico e virtual perante variações de temperatura.

Sistema	Sensibilidade (graus/°C)	Ajuste linear ( $R^2$ )	Resolução (°C)
Físico	20,00	0,993	0,012
Virtual	19,61	0,998	0,010

Verifica-se, novamente com estes resultados, que a sensibilidade e a resolução do sistema implementado através da instrumentação virtual e através da instrumentação tradicional têm desempenhos muito semelhantes.

Utilizando o sistema implementado através de instrumentação virtual, repetiu-se o processo anteriormente descrito de incremento de temperatura, mas utilizando os outros dois pares de redes de Bragg com diferentes comprimentos de onda, já mencionados no capítulo anterior. Os resultados são apresentados na Figura 5.9.



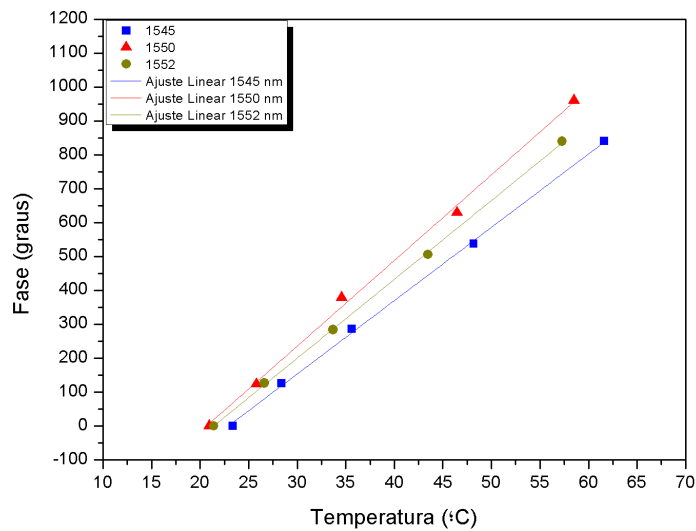
**Figura 5.9** - Resultados da variação de temperatura medidos com o sistema virtual para três pares diferentes de redes de Bragg com diferentes comprimentos de onda (variação total de temperatura ~5 °C).

A Tabela VII apresenta os resultados de sensibilidade, medidos pelo sistema virtual, em função das variações de temperatura utilizando três pares diferentes de redes de Bragg.

**Tabela VII** - Resultados de sensibilidade à temperatura medidos com o sistema virtual, utilizando três pares diferentes de redes de Bragg, (variação total de temperatura ~5 °C).

Par de redes de Bragg	Sensibilidade (graus/°C)	Ajuste linear ( $R^2$ )	Resolução (°C)
1550 - 1545 nm	19,88	0,999	0,0116
1550 - 1550 nm	19,92	0,993	0,0115
1550 - 1552 nm	23,28	0,999	0,0098

Verifica-se que a sensibilidade e a resolução são muito próximas para o primeiro e o segundo par de redes, mas que o terceiro par apresenta uma diferença de aproximadamente 14% em relação ao primeiro par, considerando 100% o valor mais alto. De forma a verificar estes resultados, repetiram-se os testes incrementando-se os passos em 500 mA desde 0 até 2 A. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.10.



**Figura 5.10** - Resultados de variação de temperatura medidos com o sistema virtual para três pares diferentes de redes de Bragg com diferentes comprimentos de onda (variação total de temperatura ~40 °C).

A Tabela VIII apresenta os resultados de sensibilidade, medidos pelo sistema virtual, em função das variações de temperatura utilizando três pares diferentes de redes de Bragg, sendo as variações de temperatura aplicadas superiores aos resultados anteriores.

**Tabela VIII** - Resultados de sensibilidade à temperatura medidos com o sistema virtual, utilizando três pares diferentes de redes de Bragg, (variação total de temperatura ~40 °C).

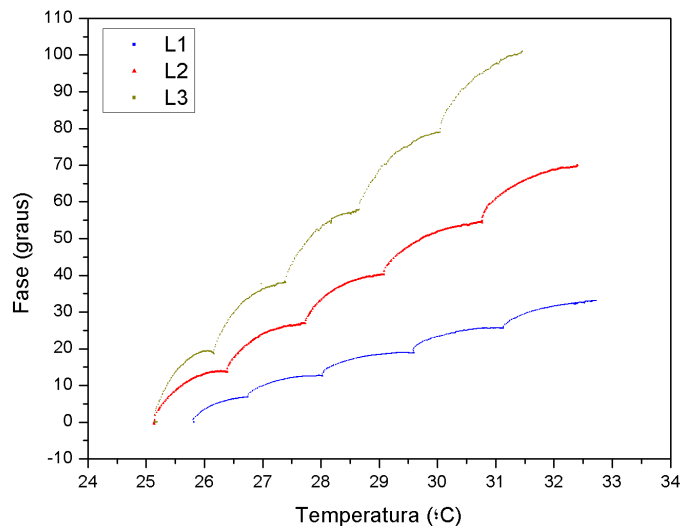
Par de redes de Bragg	Sensibilidade (graus/°C)	Ajuste linear ( $R^2$ )	Resolução (°C)
1550 - 1545 nm	21,64	0,999	0,0106
1550 - 1550 nm	25,27	0,997	0,0091
1550 - 1552 nm	23,27	0,999	0,0098

Verifica-se novamente que os resultados foram próximos, mas existindo de novo uma variação entre eles em torno dos 14 %. Comparando também estes resultados com os anteriores verifica-se uma variação de aproximadamente 21 %, variação atribuível a erros na medição da temperatura com o termistor, ocasionado pelo efeito de autoaquecimento [57] e/ou à difícil manutenção do equilíbrio térmico. Apesar de estes valores em percentagem serem significativos ao traduzirem-se em graus de temperatura, apenas estamos a falar de uma

variação de 0,002 °C, valor inferior numa ordem de grandeza à resolução pretendida para o sistema.

A nível de desvio padrão, foram obtidos resultados idênticos aos obtidos no capítulo anterior, demonstrando que a capacidade de rejeição do ruído do sistema diferencial continua efectiva apesar das diferentes sensibilidades dos FBGs

Realizaram-se ainda medidas dinâmicas com o sistema virtual, para três diferentes variações do percurso óptico no interferómetro modulador ( $L_1 < L_2 < L_3$ ), sendo realizadas iguais variações de corrente aplicada ao Peltier, cujos resultados são apresentados na Figura 5.11. As variações do percurso óptico no interferómetro modulador foram realizadas através do percurso óptico apresentado na Figura 3.2.



**Figura 5.11** - Medição dinâmica perante variações de temperatura, sendo utilizando diferentes variações de percurso óptico no interferómetro modulador.

A Tabela IX mostra os valores de sensibilidade obtidos para três valores diferentes de OPD.

**Tabela IX** - Variação da sensibilidade em função da diferença de percurso óptico no interferómetro de leitura.

$\Delta L$	$\Delta T$ (°C)	Fase (graus)	Sensibilidade (graus/°C)
L1	7,3	32	4,4
L2	7,5	71	9,5
L3	6,5	101	15,5

Verificou-se empiricamente a expressão (2.20), onde se verifica que a sensibilidade do sistema é proporcional ao aumento da diferença de percursos ópticos entre os braços do

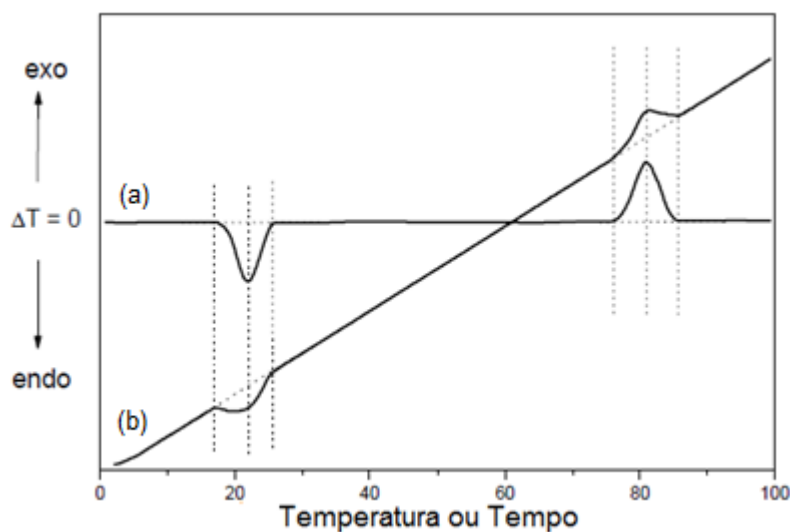
interferómetro modulador. Mesmo que limitados pelo comprimento coêrencia da fonte e condição de quadratura.

#### 5.4. Análise térmica diferencial

Com os resultados anteriores verificou-se que o sistema é capaz de quantificar pequenas variações de temperatura em forma diferencial, sendo um passo fundamental para a implementação da análise térmica diferencial.

##### 5.4.1. Introdução

A análise térmica diferencial é uma técnica de medição contínua das temperaturas da amostra e de um material de referência termicamente inerte. Existem duas formas de aplicar esta técnica, uma em que tanto a amostra como a referência são aquecidas simultaneamente e outra em que só a amostra é aquecida, obtendo-se resultados como os apresentados na Figura 5.12 [68].



**Figura 5.12** - Curvas detectadas ao aplicar a análise térmica: (a) Amostra e referência aquecidas; (b) Só amostra aquecida [68].

Estas medições de temperatura são diferenciais, pois regista-se a diferença entre a temperatura da referência  $T_r$ , e a da amostra  $T_a$ , ou seja  $\Delta T = T_r - T_a$ , em função da temperatura aplicada ou do tempo, dado que o aquecimento ou arrefecimento são sempre feitos em ritmo linear [68].

Através desta técnica pode-se acompanhar os efeitos térmicos associados com alterações físicas ou químicas da amostra, tais como transições de fase (fusão, ebulição, sublimação, congelação, inversões de estruturas cristalinas) ou reacções de desidratação, dissociação, decomposição, óxido-redução, entre outras, capazes de causar variações de calor. Em geral transições de fase, desidratações, reduções e certas reacções de decomposição produzem efeitos endotérmicos, enquanto que cristalizações, oxidações e algumas reacções de decomposição produzem efeitos exotérmicos. A ocorrência destas alterações físicas são diferentes para cada elemento ou composto, logo, ao realizar uma correspondência entre o  $\Delta T$  e a temperatura absoluta é possível reconhecer o conteúdo duma amostra desconhecida [68].

A ideia da utilização das transições de estado da matéria para sua identificação não é uma novidade, tendo sido já comprovada a sua funcionalidade, utilizando um sistema puramente electrónico, com uma sensibilidade de 0,2 °C [69]. Também foi reportado um sensor interferométrico para a medição diferencial, implementado através de instrumentação física, com uma sensibilidade na ordem de  $10^{-8}$  °C para a detecção de variações de temperatura causada por elementos radioactivos [70]. A utilização do sistema desenvolvido para esta aplicação tenta fornecer uma solução mais simples, com uma sensibilidade do sistema de 0,01 °C, resultado melhor que o sistema apresentado no trabalho [69].

#### **5.4.2. Processo de implementação**

Um dos requisitos para a aplicação da análise térmica diferencial que o incremento de temperatura aplicado à amostra deve ser linear. Como já foi referido no ponto 5.1, a aplicação de controlo do Peltier, implementada em LabVIEW®, tinha sido prevista com a opção de realizar um aumento da corrente fornecida ao Peltier a uma determinada taxa. Realizou-se a montagem esquematizada na Figura 5.13 e verificou-se a linearidade do aumento de temperatura para várias taxas de incremento de temperatura.

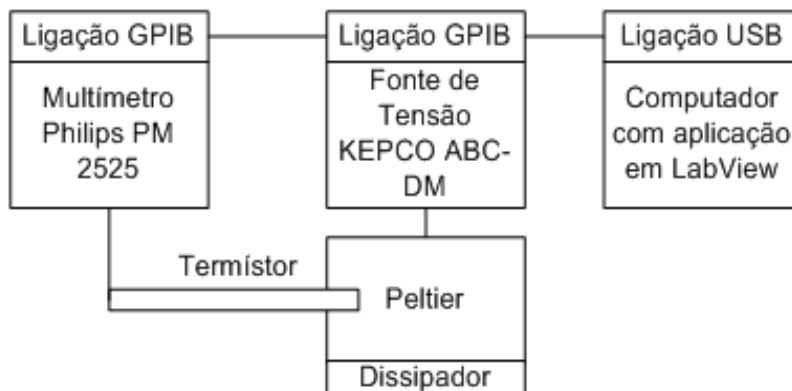


Figura 5.13 - Esquema de montagem.

Realizaram-se vários testes, sendo apresentados na Figura 5.14, os dois melhores resultados.

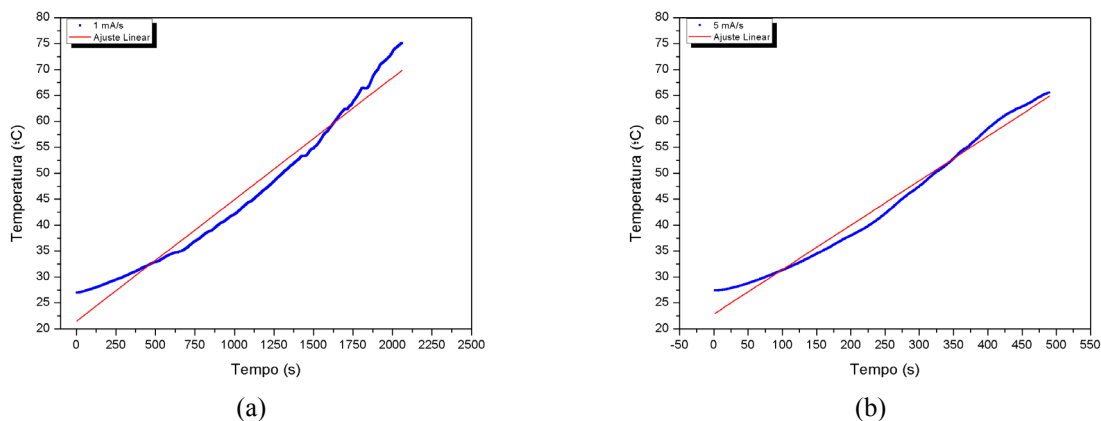


Figura 5.14 - Resultados obtidos da temperatura em função do tempo ao aplicar-se uma taxa de corrente em função do tempo: (a) Taxa de 1 mA/s; (b) Taxa de 5 mA/s.

A Tabela X mostra os resultados de linearidade do incremento de temperatura para diferentes taxas de incremento de corrente.

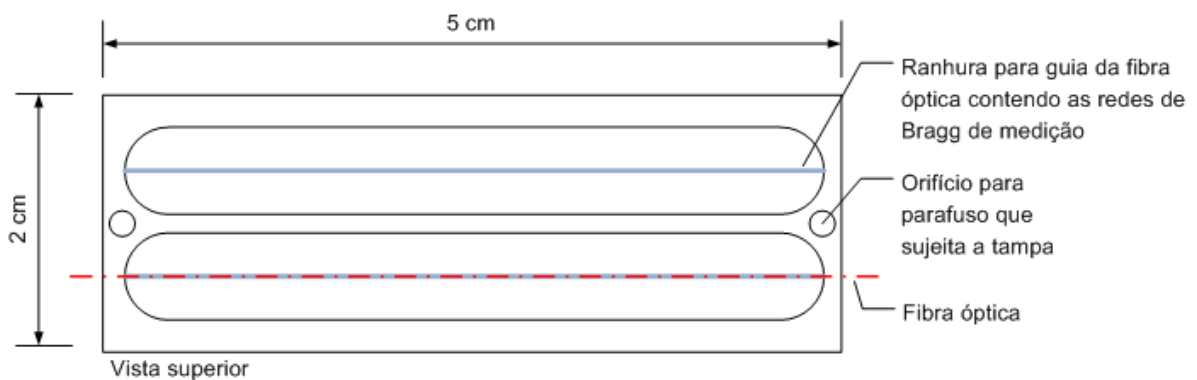
Tabela X - Resultados de linearidade do incremento de temperatura para diferentes taxas de incremento de corrente.

Taxa: Corrente/Tempo	Taxa: Temperatura/Tempo	Ajuste linear ( $R^2$ )
1 mA/s	0,023 °C/s	0,968
5 mA/s	0,086 °C/s	0,983

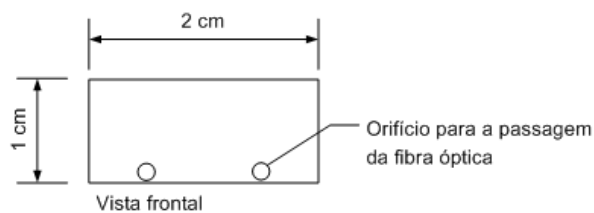
Ambos os resultados foram verificados como válidos para a aplicação da técnica, mas sendo preferida a utilização da taxa de 5 mA/s, pelo menor tempo que requereria na realização dos testes.

Uma vez resolvido este requisito do sistema, procedeu-se a escolha de alguma substância que servisse de amostra e que previamente fosse conhecida a sua temperatura de ebulição. Foram escolhidas duas substâncias, acetona e metanol, possibilitando o seu teste no sistema desenvolvido, o qual mantinha a linearidade da rampa até aos 70 °C. Os pontos de ebulição da acetona e metanol são de 56,53 e 64,7 °C, respectivamente.

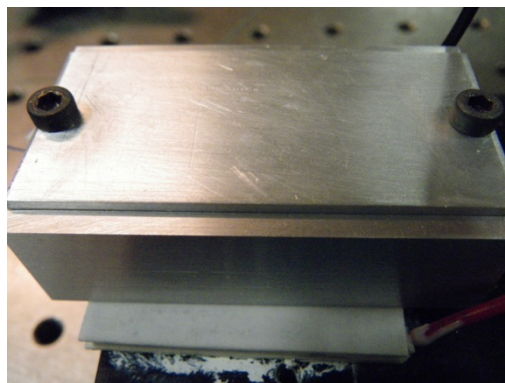
Dado que ambas substâncias são voláteis, foi necessário construir uma embalagem suficientemente selada, para evitar que durante o tempo da aplicação do gradiente de temperatura, o mensurando se mantivesse presente. A caixa foi desenhada para colocar o elemento transdutor, a rede de Bragg, exposto a estas substâncias, e outra câmara para a colocação da rede de Bragg de referência. Foi construída em alumínio, já que os metais são bons condutores térmicos [57]. A Figura 5.15 apresenta o esquema e a caixa construída.



(a)



(b)



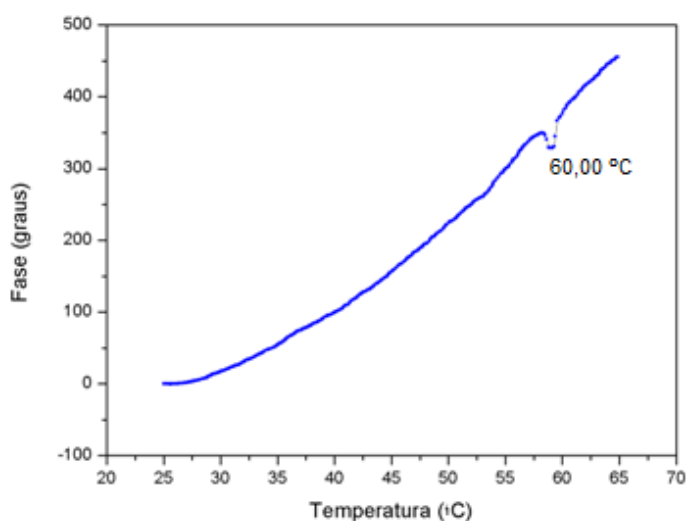
(c)

**Figura 5.15** - (a) e (b) Esquema da embalagem utilizada para a aplicação da análise térmica diferencial; (c) Embalagem já construída.

A construção desta embalagem foi realizada pela oficina da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. O desenho procura implementar a técnica, de forma a que ambas redes de Bragg sejam aquecidas simultaneamente, mas não é garantido o isolamento em temperatura entre as câmaras, nem a possibilidade de que passasse vapor do mensurando duma câmara para a outra. Estes elementos fizeram com que fosse decidida a aplicação da técnica em que só o mensurando fosse aquecido.

### 5.4.3. Testes e resultados

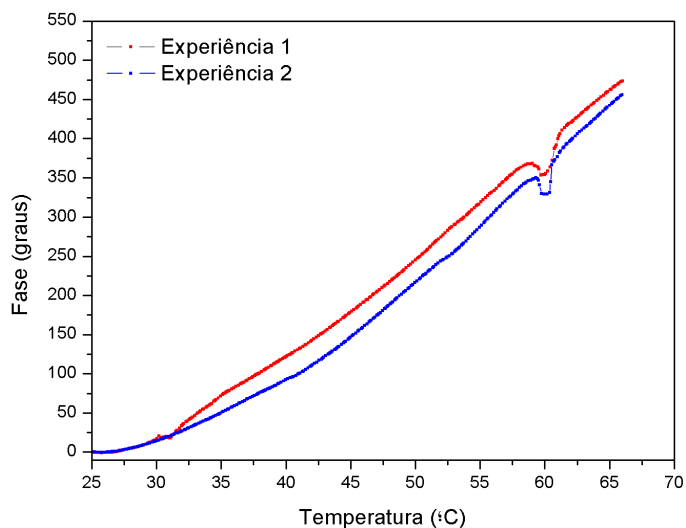
No primeiro teste realizado, utilizou-se 0,1 ml de acetona como mensurando. O resultado obtido é apresentado na Figura 5.16.



**Figura 5.16** - Resultado obtido ao aplicar a análise térmica diferencial sendo utilizada acetona como amostra.

Verificou-se uma descontinuidade produzida por uma diminuição da temperatura na rede de Bragg em contacto com o mensurando. Esta descontinuidade ocorreu aos 60 °C, sendo o valor teórico de 56,53 °C.

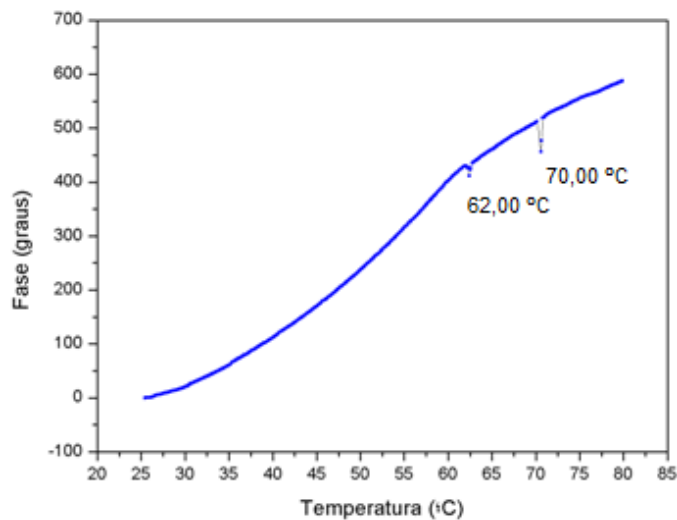
Repetiu-se a experiência, e comparou-se o resultado obtido com o anterior, como ilustrado na Figura 5.17.



**Figura 5.17** - Comparação de duas experiências ao aplicar a análise térmica diferencial sendo utilizada acetona como amostra.

Verificou-se com este resultado a repetibilidade na medição. O aumento da temperatura de ebulição verificada, face ao valor teórico esperado, é atribuível à taxa de aquecimento, sendo uma relação proporcional entre o aumento desta taxa e o deslocamento da temperatura de ebulição para valores mais elevados [68].

Como teste final, colocou-se como mensurando uma solução com acetona e metanol em partes iguais, 0,2 ml no total. O resultado obtido é apresentado na Figura 5.18.



**Figura 5.18** - Resultado obtido na aplicação da análise térmica diferencial utilizando acetona e metanol como amostras.

Verificaram-se duas descontinuidades: uma ocorreu nos 62 °C e outra nos 70 °C, sendo que as temperaturas de ebulição são de 56,53 e 64,7 °C, respectivamente. Neste caso, o desvio corresponde a um valor um pouco superior aos 5° C, para em ambas substâncias. Considerando que a quantidade da amostra foi o dobro das primeiras experiências, 0,2 ml, um aumento de pressão dentro da caixa poderá explicar o incremento na temperatura de ebulição do mensurando [68].

Por outro lado, pode verificar-se que a variação da temperatura face ao valor teórico que ocorre pela evaporação da acetona é inferior à produzida pelo metanol. Isto pode ser explicado por duas razões, a primeira é que sendo o ponto de ebulição da acetona inferior ao do metanol, esta volatiliza mais rapidamente, fazendo com que a presença de acetona seja inferior. Acresce que as capacidades caloríficas de ambas substâncias são diferentes e, por outro lado, apesar de serem introduzidas iguais quantidades das duas amostras, não foram em iguais quantidades de massa, dadas as suas densidades serem diferentes. Tanto a capacidade calorífica, como a massa são factores que afectam de forma determinante a absorção de calor e por consequência de temperatura. Isto verifica-se através da expressão (5.6).

$$Q = mC_p dT \quad (5.6)$$

em que,  $Q$  é o calor,  $m$  a massa,  $C_p$  a capacidade calorífica, e  $dT$  a variação de temperatura.

Portanto, o sistema desenvolvido pode ser avaliado como um sensor: linear; com sensibilidade de 19,61 graus de fase / °C, gama dinâmica virtualmente ilimitada, estável (desvio médio de fase de 0,23°) e resolução adequada à aplicação desenvolvida (0,012 °C). Por último, o sensor é capaz de detectar de pequenas amostras de composição desconhecida, através da aplicação da análise térmica diferencial.



## 6. Conclusões

---

Implementou-se um sistema interferométrico diferencial para a interrogação de redes de Bragg, através da instrumentação física tradicional e através de instrumentação virtual, permitindo a comparação do desempenho dos dois sistemas.

Este tipo de sistemas é vulnerável à sensibilidade cruzada com elementos externos aos que se desejam medir, por isso, a implementação diferencial permite a diminuição dessa sensibilidade, possibilitando prever o comportamento do sistema, e permitir assim, ser utilizado como sistema de medição.

A implementação virtual procurou tirar partido das vantagens comparativas deste tipo de sistemas, como grande sensibilidade, larga gama dinâmica, fácil portabilidade e reprodutibilidade, capacidade de adaptação e baixo custo.

O LabVIEW® foi o ambiente de programação utilizado para a referida implementação virtual, sendo uma escolha tomada na óptica de redução do tempo de desenvolvimento e por consequência de custos.

Realizaram-se testes de medição diferencial de deformação, e com eles foi possível avaliar o comportamento do sistema implementado através de instrumentação virtual, comparando-o com o implementado através da instrumentação tradicional, obtendo desempenhos muito próximos. Foi ainda possível verificar que a utilização de pares de redes de Bragg com diferentes comprimentos de onda, não tem uma influência significativa na sensibilidade e na resolução do sistema.

Efectuaram-se testes de medição diferencial de temperatura, confirmando-se as conclusões obtidas com as medições de deformação, relativamente à comparação da instrumentação virtual e física, assim como, na utilização de pares de redes de Bragg com diferentes comprimentos de onda.

Aproveitando a implementação do sistema para a medição diferencial de temperatura, aplicou-se a técnica de análise térmica diferencial, com o objectivo de identificar compostos desconhecidos. Demonstrou-se com sucesso a detecção de acetona e metanol, ao distinguir o decréscimo na temperatura diferencial, no instante em que estes elementos alcançaram a sua respectiva temperatura de ebulição.

De forma geral, pode ser avaliado o sensor desenvolvido como: sendo linear; com sensibilidade de  $19,61^\circ / ^\circ\text{C}$ , gama dinâmica virtualmente ilimitada, estável (desvio médio de fase de  $0,23^\circ$ ) e resolução adequada à aplicação desenvolvida ( $0,012^\circ\text{C}$ ). Com a calibração foi possível verificar a exactidão do sistema.

### **6.1. Trabalho futuro**

Na procura de maior sensibilidade, a maior limitação é a relação sinal-ruído, a qual impede o incremento da diferença de percurso óptico entre os braços do interferómetro. Sendo assim, uma das formas de melhorar este parâmetro é diminuindo as perdas sofridas pelo sinal óptico no seu percurso pelo sistema, incrementando deste modo a visibilidade através do equilíbrio de potência óptica entre os braços do interferómetro. Sendo o percurso aéreo um dos responsáveis pelas elevadas perdas do sistema, o seu melhoramento em termos de perdas de potência é uma opção a ser avaliada.

O desenvolvimento duma placa de aquisição e a migração do *software* desenvolvido de LabVIEW® para uma plataforma não proprietária poderia permitir também a diminuição de tamanho e custo do sistema.

A procura de melhores formas de aplicar o gradiente de temperatura para a aplicação da análise térmica diferencial, por exemplo através da deposição de pequeníssimas quantidades de material condutor num dieléctrico poderiam também permitir incrementar a linearidade e gama do gradiente de temperatura.

Melhorar a câmara de testes, utilizando para seu fabrico cobre o que garantiria melhor conductividade térmica. Garantir o isolamento total entre as sub-câmaras, permitindo a aplicação da técnica da análise térmica diferencial, em que tanto referência como mensurando são aquecidos, e assim, obter resultados de mais fácil tratamento.

Exploração do sistema de medição diferencial em outras aplicações, como por exemplo na interrogação de sensores de índice de refacção, a qual possui grande potencial para o desenvolvimento de sensores bioquímicos.

## Referências bibliográficas

---

- [1] L. S. Lopes, "A cultura da medição em Portugal ao longo da história," vol. 84, Educação e Matemática, pp. 42-48, 2005.
- [2] N. E. Fenton and S. L. Pfleeger, "Software metrics. A rigorous and practical approach," *PWS Pub.*, p. 2, 1997.
- [3] C. Luperdi. (2009, Nov.) Shvoon. [Online]. <http://es.shvoong.com/humanities/1747734-necesidad-medir/>
- [4] A. B. L. Ribeiro, "Sensores Interferométricos em fibra óptica," *Gazeta de Física*, vol. 21, pp. 18-21, 1998.
- [5] C. A. J. Gouveia, "Sensores em fibra óptica para monitorização ambiental," Universidade da Madeira Dissertação de Mestrado, 2008.
- [6] H. Carvalho. (2010, Apr.) Seminário: Princípios básicos sobre sensores e sistemas de aquisição. <http://www.dem.uminho.pt/People/mlima/I6/Sensores.pdf>.
- [7] R. M. White, "A Sensor Classification Schem," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. UFFC-34, p. 2, Mar. 1987.
- [8] E. P. Mandado and A. M. Roldan. (2010, Apr.) Apontamentos: Fundametos y clasificación de los sensores. [http://virtual.alfaomega.com.mx/file.php/100/fuentes/PDFs/SENSORES/TEMAS/SA\\_TEMA\\_01-INTRODUCCION.pdf](http://virtual.alfaomega.com.mx/file.php/100/fuentes/PDFs/SENSORES/TEMAS/SA_TEMA_01-INTRODUCCION.pdf).
- [9] D. A. Jackson e J. D. C. Jones, "Fibre Optic Sensors," *Journal of Modern Optics*, vol. 12, no. 33, pp. 1469-1503, 1986.
- [10] Kent University; Sira, "Single Mode Optical Fibre Sensor Technology - Lecture Notes," *University of Kent at Canterbury*, 1985.
- [11] B. H. Bunch and A. Hellemans, *The history of science and technology*. Houghton Mifflin Harcourt, 2004.
- [12] P. P. Bishnu, *Fundamentals of fibre optics in telecommunication and sensor systems*. Delhi: New Age International Ltd.publishers, 2005.
- [13] A. A. Michelson and E. W. Morley, "On the relative motion of the Earth and the Luminiferous Ether," *The American Journal of Science*, vol. XXXIV, pp. 449-463, Nov. 1887.
- [14] Marketwatch. (2010, Apr.) GigOptix Announces First Commercial Samples of 40Gb/s Electro-Optical Polymer Modulators to Major Telecom OEMs. [Online]. <http://www.marketwatch.com/story/gigoptix-announces-first-commercial-samples-of-40gbs-electro-optical-polymer-modulators-to-major-telecom-oems-2010-04-20>
- [15] S. Bonino, R. Galeotti, L. Gobbi, M. Belmonte, and M. Bonazzoli. (2010, Jul.) High Speed Packaging Solutions for LiNbO3 Electro-Optical Modulator. IEEE / Avanex Corporation.
- [16] A. D. Kersey and T. A. Berkoff, "Fiber-Optic Bragg-Grating Differential-Temperature Sensor," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 4, p. 10, 1992.
- [17] Y. J. Rao and D. A. Jackson, "Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 7, p. 981-999, 1996.
- [18] S. Yin, P. B. Ruffin, and F. T. S. Yu, *Fiber Optic Sensors*, Segunda ed., T. & F. Group, Ed. NW, USA: CRC Press, 2008.

- [19] J. M. Beckers, "Instrumental factors affecting the fringe contrast in optical interferometers," *Astrophysics and Space Science*, vol. 171, pp. 333-339, 1990.
- [20] M. R. Gallas. (2010, Apr.) Instituto de Física da Universidade Federal de Rio Grande do Sul. [Online]. [www.if.ufrgs.br/~marcia/coerencia.pdf](http://www.if.ufrgs.br/~marcia/coerencia.pdf)
- [21] J. A. R. Azevedo, "Apontamentos de Sistemas de Comunicação," Universidade da Madeira Apontamentos, 2008.
- [22] D. A. ., e. a. Jackson, "Pseudoheterodyne detection scheme for optical interferometers," *Electronics letters*, vol. 18(25), pp. 1081-1083, 1982.
- [23] S. Yin, P. B. Ruffin, and F. T. S. Yu, *Fiber Optic Sensors*, Segunda ed., T. & F. Group, Ed. NW, USA: CRC Press, 2008.
- [24] K. A. D. and B. T. A., "LIA Lock-in Amplifier," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 4, 10, p. 1183-1185, 1992.
- [25] J. E. Correia Velosa, "Controlo automático de um interferómetro para monitorização e caracterização de sensores interferométricos," Universidade da Madeira Tese de Mestrado, 2009.
- [26] National Instruments. (2009, Dec.) [www.ni.com](http://www.ni.com). [Online]. [http://digital.ni.com/worldwide/brazil/nsf/web/all/45789169BAF412F48625757F006E9162?OpenDocument&node=35140\\_pt](http://digital.ni.com/worldwide/brazil/nsf/web/all/45789169BAF412F48625757F006E9162?OpenDocument&node=35140_pt)
- [27] IEEE. (2010, Jul.) IEEE-488. [Online]. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?tp=&isnumber=29721&arnumber=1352831&punumber=9359](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?tp=&isnumber=29721&arnumber=1352831&punumber=9359)
- [28] B. Zimer. (2009, Apr.) Labview for C++ FRC Programmers. Enable Training and Consulting, Inc.
- [29] S. O. Silva, "Fibre Bragg Grating Based Structures for Optical Sensing and Filtering," Faculdade de Ciências da Universidade de Porto Tese de Mestrado, 2007.
- [30] A. C. Zimmermann, et al., "Sensores baseados em redes de Bragg e Fibras Ópticas para Medição de Grandezas em Sistemas Eléctricos de Alta Tensão," in *Simpósio Brasileiro de Sistemas Eléctricos*, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2006.
- [31] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*. Singapore: McGraw-Hill International Editions, 2000.
- [32] R. N. Nogueira, "Redes de Bragg em fibra óptica," Departamento de Física, Universidade de Aveiro Tese de doutoramento, 2005.
- [33] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*. Londres, Reino Unido: Academic Press, 1999.
- [34] R. Gutierrez-Osuna. (2010, Jul.) Texas A&M University Computer Science and Engineering Department. [Online]. [courses.cs.tamu.edu/rgutier/ceg499\\_s02/12.pdf](http://courses.cs.tamu.edu/rgutier/ceg499_s02/12.pdf)
- [35] Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas. (2010, Apr.) Universidade de São Paulo - Escola Politécnica. [Online]. [www.gmsie.usp.br/Downloads/Download.aspx?FileID=118](http://www.gmsie.usp.br/Downloads/Download.aspx?FileID=118)
- [36] J. E. C. Velosa, "Controlo automático de um interferómetro para monitorização e caracterização de sensores interferométricos," Universidade da Madeira Dissertação de Mestrado, 2009.
- [37] NOLIAC. (2010, Mar.) Datasheet CMAP02. [Online]. [http://www.noliac.com/Files/Billeder/02%20Standard/Actuators/Noliac\\_Actuators\\_data\\_sheet.pdf](http://www.noliac.com/Files/Billeder/02%20Standard/Actuators/Noliac_Actuators_data_sheet.pdf)
- [38] JDSU. (2010, Mar.) Datasheet Modulator APE Phase. [Online]. <http://www.jdsu.com/products/optical->

- [communications/products/modulators/modulator-ape-phase.html](http://www.thorlabs.com/communications/products/modulators/modulator-ape-phase.html)
- [39] D. A. Jackson, A. D. Kersey, M. Corke, and J. D. C. Jones, "Pseudoheterodyne Detection Scheme for Optical Interferometers," *Electronics Letters*, vol. 18, p. 25, 1982.
- [40] C. Jesus, et al., "Measurement of acetic acid using a fibre Bragg grating interferometer," *IOP Publishing*, vol. 20, p. 5, Sep. 2009.
- [41] Thorlabs. (2010, Apr.) Datasheet Pigtailed GRIN Lens Collimators. [Online]. <http://www.thorlabs.com/Thorcat/1300/1366-S01.pdf>
- [42] Photonetics. (2010, Feb.) Datasheet Photonetics Fiber White. [Online]. <http://www.artisan-scientific.com/>
- [43] Mutiwave. (2010, Mar.) Datasheet Mutiwave EDFA-C. [Online]. [http://www.mutiwavephotonics.com/img\\_upload/produtos/5121\\_3.pdf?PHPSESSID=540846502b9edfb43bdc1994a97e5c32](http://www.mutiwavephotonics.com/img_upload/produtos/5121_3.pdf?PHPSESSID=540846502b9edfb43bdc1994a97e5c32)
- [44] Yokogawa. (2010, Feb.) Datasheet OSA ANDO AQ-6315A/-6315B. [Online]. <http://www.yokogawa.com/tm/pdf/comm/aq6315/buaq6315e.pdf>
- [45] Thorlabs. (2010, Apr.) Datasheet Acoplador direccional 6015-3. [Online]. [http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup\\_ID=374&pn=10202A-50](http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=374&pn=10202A-50)
- [46] C. Z. Shi, et al., "Noise Limit in Heterodyne Interferometer Demodulator for FBG-Based Sensors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, p. 10, 2004.
- [47] Thorlabs. (2010, Feb.) Datasheet Photodetector PDA10CS. [Online]. <http://www.thorlabs.com/Thorcat/13100/13194-S01.pdf>
- [48] Thorlabs. (2010, Feb.) Datasheet Photodetector PDA400. [Online]. <http://www.thorlabs.com/Thorcat/2100/2196-D02.pdf>
- [49] National Instruments. (2010, Feb.) Datasheet DAQ NI USB 6259. [Online]. <http://sine.ni.com/nips/cds/print/p/lang/en/nid/202598>
- [50] M. O. Sonnaillon, "Procesamiento Digital de Señales em Amplificadores Lock-in," Universidad Nacional de Cuyo Tese de Doutoramento, 2007.
- [51] Stanford Research Systems. (2010, Feb.) Thinkers. [Online]. <http://www.thinksrs.com/products/SR850.htm>
- [52] National Instruments. (2010, Apr.) Phase Difference between waveforms. [Online]. <http://decibel.ni.com/content/docs/DOC-2135>
- [53] J. Lubliner, "Plasticity Theory," University of California at Berkeley, 2006.
- [54] X. Yu, Y. Yu, Y. Liao, M. Zhang, and S. Lai, "Strain measurement of steel and concrete structure using novel surface-mounted fiber Bragg grating sensors," *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, 2005.
- [55] A. D. Kersey, et al., "Fiber Grating Sensors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, p. 8, 1997.
- [56] Fiber Sensing. (2010, May) Industrial BraggMETER. [Online]. [http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WCMCM\\_PaginaId=32037](http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WCMCM_PaginaId=32037)
- [57] A. M. C. Anacleto, "Temperatura e sua medição," Universidade de Porto, Faculdade de Ciências Tese de Mestrado, 2007.
- [58] Omega. (2010, May) Estabilidade térmica da água com gelo. [Online]. <http://www.omega.com/techref/thermoref.html>
- [59] Somatco. (2010, May) Datasheet Hotplate Yellow Line basic C. [Online]. [http://www.somatco.com/MST\\_BasicC-a.pdf](http://www.somatco.com/MST_BasicC-a.pdf)

- [60] M. Araki, "PID Control," *Control Systems, Robotics, and Automation*, vol. II.
- [61] Tetch. (2010, Mar.) Estabilidade térmica de um Peltier. [Online]. <http://www.tetch.com/FAQ-Technical-Information.html>
- [62] Kepco, Inc. (2010, Apr.) Datasheet Power Supply ABC. [Online]. <http://www.kepcopower.com/support/abcopr.pdf>
- [63] Omega. (2010, May) Datasheet Thermocouple type J. [Online]. [http://www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=IRCO\\_CHAL\\_P13R\\_P10R](http://www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=IRCO_CHAL_P13R_P10R)
- [64] RS. (2010, May) Datasheet Thermistor 256-045. [Online]. [http://www.pcsilencioso.com/cpemma/rs\\_thermistors.pdf](http://www.pcsilencioso.com/cpemma/rs_thermistors.pdf)
- [65] Origin Lab. (2007, May) Origin 7. [Online]. [www.originlab.com](http://www.originlab.com)
- [66] Hewlett-Packard. (2010, Apr.) Datasheet Multimeter HP34401A. [Online]. [https://wiki.engr.illinois.edu/download/attachments/1933565/HP34401A\\_user\\_guide.pdf?version=1&modificationDate=1210781135280](https://wiki.engr.illinois.edu/download/attachments/1933565/HP34401A_user_guide.pdf?version=1&modificationDate=1210781135280)
- [67] Philips. (2010, Apr.) Datasheet Multimeter Pm2525. [Online]. [http://www.teknetelectronics.com/DataSheet/PHILIPS/PHILI\\_252545818.pdf](http://www.teknetelectronics.com/DataSheet/PHILIPS/PHILI_252545818.pdf)
- [68] M. Ionashiro and Giolito, *Fundamentos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial*. São Paulo, Brasil: Giz Editorial, 2005.
- [69] Y. S. Liu, V. M. Ugaza, S. W. North, W. J. Rogers, and M. S. Mannan, "Development of a miniature calorimeter for identification and detection of explosives and other energetic compounds," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 142, p. 662–668, 2007.
- [70] P. G. Davis, I. J. Bush, S. Bayliss, and R. C., "Fiber Optic Calorimeter," *Fourth Pacific Northwest Fiber Optic Sensor Workshop*, May 1998.

## **Anexos**

---

**A. Artigo apresentado no “Symposium On Enabling Optical Networks and Sensors – SEON 2010”.**

**B. Artigo submetido a “21<sup>st</sup> International Conference on Optical Sensors - OFS 2010”.**

**C. Artigo submetido à revista *Journal of Lightwave Technology*.**

**D. Capturas de imagem do *software* desenvolvido.**

**E. Certificado de calibração.**

## **Anexo A**

---

**Artigo apresentado no “Symposium On Enabling Optical Networks and Sensors – SEON 2010”.**

# Differential interferometric sensing system with digital control for high sensitivity measurement of strain and temperature

L. C. Gonçalves, O. Frazão, P. A. S. Jorge, J. M. Baptista, J. L. Santos

**Abstract**— This work describes the implementation of a differential interferometric sensing system for interrogation of fiber Bragg gratings for the measurement of strain and temperature. The system is interrogated using a traditional hardware setup as well as a virtual instrumentation setup, which was developed using the Labview® environment. The differential scheme allows reducing the effects of cross-sensitivities intrinsic to these systems. Similar results were obtained for temperature and strain measurements using the hardware and virtual systems. It was verified that virtual instrumentation is a way to take advantage of the interferometric interrogation scheme and at the same time reduces one of its major drawbacks which is its high implementation cost.

**Index Terms**— Optical fibers sensors, differential interferometry, fiber Bragg gratings, virtual instrumentation, temperature sensor, strain sensor.

## I. INTRODUCTION

Fiber optic sensors are a reality in the market and they offer comparative advantages to other systems as they present immunity to electromagnetic interferences, and multiplexing capability. Among fiber optic sensors, interferometric sensors allow very high sensitivity. In particular systems based in WLI (White Light Interferometry) offer advantages in terms of noise reduction, increased dynamic range and the possibility to interrogate remotely and in real time interferometric fiber sensors or fiber Bragg gratings enabling the measurement of physical and chemical parameters. The implementation of these systems is inseparable from the cross-sensitivities to factors such as temperature and vibration and a differential implementation is one way of overcoming these problems.

The use of differential interferometric sensing systems is not new, but it is common that these systems are associated with bulky implementations and they use expensive equipments [1]. Nevertheless, these systems are attractive because they have a high sensitivity, high dynamic range and are immune to power fluctuations that might occur during propagation through the optical fiber. In order to exploit the gains of the system while

Manuscript received June 15, 2010.

All authors are with INESC Porto Optoelectronics Unit, Rua do Campo Alegre 687, 4169 007 Porto, Portugal. (Pedro Jorge, +351220402301, pjorge@inescporto.pt). O. Frazão and J.L. Santos are also with Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. J. M. Baptista and L.C. Gonçalves are also with Universidade da Madeira.

minimizing the downsides, virtual instrumentation, is one solution that enables cost reduction by replacing some of the physical instruments by virtual instruments, also facilitating the data processing and storage.

LabView® is a programming environment turned to virtual instrumentation and offers a quick way to interact with external hardware with the computer through various forms like data acquisition boards, GPIB connections, among others.

This paper describes the virtual control of a differential interferometric system, which uses a pseudo-heterodyne detection scheme. Comparison on equal terms of the implemented system using physical and virtual instrumentation, in the interrogation of Bragg gratings, for differential temperature and strain measurements is carried out.

When a Bragg grating, acting as sensing element, is used to illuminate a Mach-Zehnder interferometer, the phase difference between the two interferometer arms is given by equation 1 [2].

$$\Delta\Psi = -\frac{2\pi n\Delta L}{\lambda_B^2} \Delta\lambda_B \quad (1)$$

Where  $\Delta\Psi$  is the phase variation,  $n$  is the refractive index,  $\Delta L$  is the path difference between the arms of the interferometer and  $\lambda_B$  is the wavelength of Bragg. The variation of the Bragg wavelength by the temperature variation is given by equation 2.

$$\Delta\lambda_B = \frac{\partial\lambda_B}{\partial T} \Delta T \quad (2)$$

Otherwise, if the change in Bragg wavelength is caused by the application of strain, it is given by equation 3 [3].

$$\Delta\lambda_B \cong 0,78\lambda_B \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

## II. CHARACTERIZATION

The implemented experimental scheme is shown in Figure 1. This setup was implemented with either physical instrumentation, using a LIA (Lock-in Amplifier), or using virtual instrumentation.

The system implements a scheme of pseudo-heterodyne detection and it is illuminated by an erbium doped fiber broadband source. The optical signal is modulated in phase, in one of the arms of the interferometer, through an electro-optic modulator, with a sawtooth waveform. In the other arm, it was placed an adjustable air path, which allows varying the difference in optical paths between the arms and thus alter the sensitivity of the measurement, as verified in equation 1.

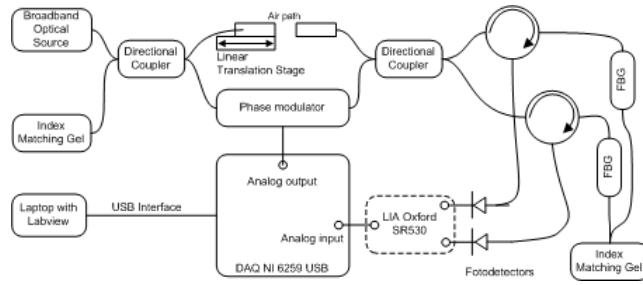


Fig. 1. Experimental setup, physical implementation with LIA and virtual implementation without LIA.

The FBGs used have the same central wavelength. At the output of the system, two sine waves with the same frequency, but with a phase difference are detected by two photodetectors. The phase difference is imposed by temperature or strain variation that may exist between both gratings. These signals are acquired through a DAQ and processed using LabView®. This processing involves the amplification and filtering of the signals for subsequent detection of the phase difference which is obtained by Fourier transform, as shown in equation 4.

$$\cos(\omega_0 t + \varphi) \xrightarrow{F} \pi e^{j\varphi} \delta(\omega - \omega_0) + \pi e^{-j\varphi} \delta(\omega + \omega_0) \quad (4)$$

### III. TESTS AND RESULTS

To verify the proper functioning of the system, it was necessary to perform a previous calibration. This calibration was performed using a calibrated thermistor. One grating was placed in controlled temperature in water and ice, and the second grating was subjected to temperature variations through a Peltier. The phase difference and the resistance value of the thermistor were measured simultaneously. Figure 2 shows the phase variation as function of temperature change, both for the the physical and virtual instrumentation setups.

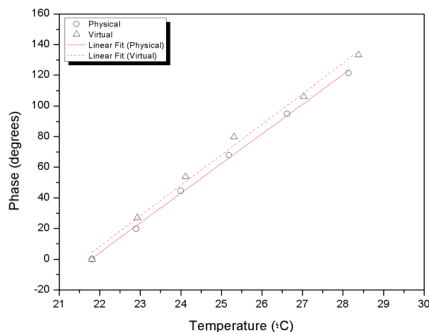


Fig. 2. Results of phase as a function of temperature for both the virtual and the physical implementations.

The sensitivity for the implemented system with physical instrumentation was 20.00 degrees of phase per °C and, while for the virtual instrumentation, it was 19.61 degrees of phase per °C. The resolution was 0.010 and 0.012 °C, respectively.

In the case of differential measurements of strain, both gratings were initially outstretched 0.51 m, after that one of them being subject to strain from 0 to 2000  $\mu$ Strain. The results are presented in Figure 3, for both systems

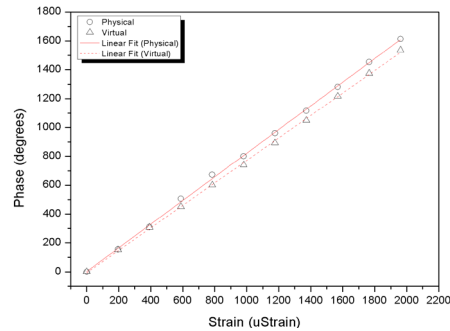


Fig. 3. Results of phase as function of strain for both physical and virtual implementations.

$\mu$ Strain and for the virtual instrumentation was 0.78 degrees of phase by  $\mu$ Strain. The resolution was 0.24 and 0.29  $\mu$ Strain, respectively.

### IV. CONCLUSION

A differential interferometric scheme for interrogation of fiber Bragg gratings using traditional and virtual instrumentation was implemented. Differential measurements of temperature and strain were carried out and it can be seen that the sensitivities and resolutions, between the physical and virtual implementations were very close. Such results confirm that the virtual instrumentation is a valid way to implement this type of systems, maintaining the advantages of an interferometric sensing system, as high sensibility and wide dynamic range, reducing their drawbacks such their high cost.

### ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by “Fundação para a Ciência e Tecnologia” (PTDC/SAU-BEB/102247/2008, Hybrid).

### REFERENCES

- [1] J. E. C. Velosa, C. Gouveia, O. Frazão, P.A. S. Jorge, J. M. Baptista, J. L. Santos, System for interrogation of interferometric optical fiber sensors with digital control, *Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors*, Nokia Siemens Networks Amadora, Jun 2009.
- [2] A. D. Kersey and T. A. Berkoff, Fiber- Op tic Bragg-Grating Differential-Temperature Sensor, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 4, no. 10, Oct. 1992.
- [3] A. D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick, Michel LeBlanc, K. P. Koo, Member, IEEE, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. Joseph Friebele, Fiber Grating Sensors, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, Aug 1997.

## **Anexo B**

---

**Artigo submetido a “21<sup>st</sup> International Conference on Optical Sensors - OFS 2011”.**

# Interferometric system controlled by virtual instrumentation for differential thermal analysis

L.C. Gonçalves<sup>a,b</sup>, G. González-Aguilar<sup>a</sup>, J. M. Baptista<sup>a,b</sup>, P.A. S. Jorge<sup>a</sup>

<sup>a</sup>INESC Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007, Porto, Portugal

<sup>b</sup>Centro de Competências de Ciências Exactas e de Engenharia, Universidade da Madeira, Campus da Penteada, 9000-390 Funchal, Portugal;

## ABSTRACT

This work describes the implementation of an optical fiber interferometric system for differential thermal analysis. The system is based on a white light Mach-Zehnder configuration, with serrodyne phase modulation, to interrogate two identical fiber Bragg gratings (FBG) in a differential scheme. Operation and signal processing with low cost digital instrumentation developed in Labview environment enabled FBG temperature measurement with a  $\pm 0.01^\circ\text{C}$  resolution nearly matching the performance of standard hardware. Preliminary results were obtained, where mixed samples of acetone and methanol could be successfully identified, indicating the suitability of the system for high accuracy differential thermal analysis.

**Keywords:** White light Interferometry, Differential thermal analysis, FBG, Virtual instrumentation.

## 1. INTRODUCTION

The fiber optic sensors are very interesting because of their comparative advantages to other systems, such as the electromagnetic immunity, and multiplexing capability [1]. Within the fiber optic sensors, the interferometric sensors allow high resolution measurements [2]. The implementation of these systems is inseparable from the cross-sensitivities to factors such as temperature and vibration; where a differential implementation is one way of overcoming this problem [1].

The use of differential interferometric systems is not new, but it is common that these systems are associated with bulky implementations and the use of expensive equipments. Nevertheless these systems are very attractive because they have a high sensitivity, high dynamic range and are immune to power fluctuations that might occur in the lead-in optical fibers [3]. In order to exploit the gains of the interferometric system while minimizing the downsides, virtual instrumentation, is one solution that enables cost reduction by replacing some of the physical instruments for virtual instruments, and also facilitates the treatment process and storage of the data.

This document describes the virtual control of a differential interferometric system, which uses the pseudo-heterodyne detection scheme for the detection of unknown samples through temperature measurement. A comparison on equal terms of the implemented system using physical and virtual instrumentation is performed. The virtual implementation was developed using LabView®.

## 2. THEORETICAL CONCEPTS

### 2.1. White Light Interferometry

When our sensor element is a Bragg grating the phase difference between the signals to the system output is given by the next expression [2]

$$\Delta\Psi = -\frac{2\pi n\Delta L}{\lambda_B^2} \Delta\lambda_B \quad (1)$$

Where  $\Delta\Psi$  is the phase variation,  $n$  is the refractive index,  $\Delta L$  is the path difference between the arms of the interferometer and  $\lambda_B$  is the Bragg wavelength of the grating. If the change in Bragg wavelength ( $\Delta\lambda_B$ ) is caused by the application of temperature variation, it is given by the next expression [2]

$$\Delta\lambda_B = \frac{\partial\lambda_B}{\partial T} \Delta T \quad (2)$$

The differential temperature measurement with high resolution allows the implementation of several applications, for instance the detection of unknown samples.

This technique measures a differential temperature, ( $\Delta T$ ), between a sample, ( $T_s$ ), and a reference material, ( $T_r$ ), when both are being heated or cooled. These measurements are made as a function of temperature versus time, since the heating or cooling have always a linear behavior ( $dT/dt = \text{Constant}$ ).

Through this technique, it is possible to monitor the effects of heat associated with physical or chemical changes of the sample, such as phase transitions or dehydration reactions, dissociation, decomposition, oxidation-reduction, among others, capable to cause variations in heat. In general, phase transitions, dehydration, reductions and certain reactions of decomposition produce endothermic effects, whereas crystallization, oxidation, some reactions of decomposition produce exothermic effects. The occurrence of these changes is different for each element. If we correlate the recorded temperature variation,  $\Delta T$ , with the absolute temperature, we will be able to know the content of the sample [4].

## 2.2. Characterization

The implemented experimental scheme is shown in Figure 1. This setup was implemented using virtual instrumentation, and also a configuration with physical instrumentation, using a LIA (Lock-in Amplifier).

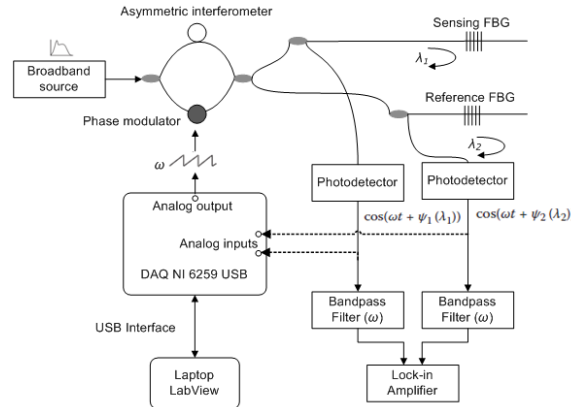


Fig. 1. The experimental scheme implemented.

The system implements a scheme of pseudo-heterodyne detection and is illuminated by a source of wide spectrum of erbium doped fiber. The optical signal is modulated in phase, in one of the arms of the Mach-Zehnder interferometer, through an electro-optic modulator, with a sawtooth shape. In the other interferometer arm an adjustable air path was placed, which allows varying the difference in optical paths between the arms and thus altering the sensitivity of the measurement, as verified in expression 1.

It was used two FBGs with equal wavelengths in order to study the difference in performance between the physical and virtual systems. On the other hand, two FBGs with different wavelengths were also used to study the behavior of the measuring system under these conditions. At the output of the system two photodetectors collected two sine waves with the same frequency, equal to the modulation frequency, but with a phase difference imposed by temperature variation that may exist between both gratings. These signals were acquired through a DAQ (NI-USB-6259) and processed using LabView®. This processing involves the amplification and filtering of the signals for subsequent detection of the phase difference which is obtained by Fourier transform.

For the application of differential thermal analysis, it was necessary to apply a temperature gradient that it has to be the most linear as possible. It was used a Peltier to increase the temperature of the sample by varying the current applied at a rate of 5 mA/s using a voltage source controlled by LabView®. The gradient applied corresponded to an increase of 0.086 °C / s with a linear correlation coefficient of 98%.

## 3. Test and results

After a validation process of the virtual system with the developed software, we proceeded to the differential temperature measurements. To accomplish these measurements, it was necessary to have an element to do a cross calibration of the system. In our setup a precalibrated thermistor was used.

For the temperature measurement, one grating was placed in controlled temperature in water and ice, and the second grating was subjected to temperature variations through a Peltier. The phase difference was measured and simultaneously the resistance value of the thermistor. The blocks' scheme of the differential temperature measurement is shown in Figure 2.

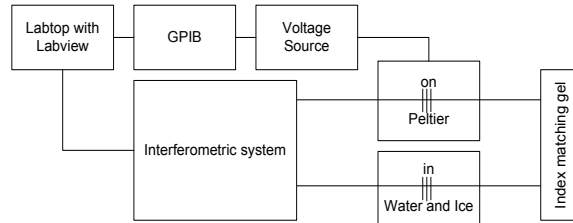


Fig. 2. Blocks' scheme of the differential temperature measurement.

Figure 3 shows the phase variation as a function of temperature change, for both cases of using physical and virtual instrumentation, respectively.

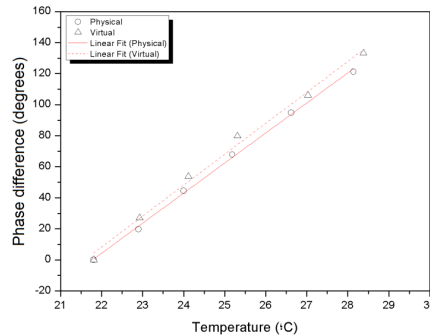


Fig. 3. Results of phase difference as a function of temperature for both the virtual and the physical implementation.

The sensitivity for the system implemented with physical instrumentation was 20 degrees of phase per °C and by the use of virtual instrumentation was 19.61 degrees of phase per °C. The resolution was 0.010 and 0.012 °C, for the physical and virtual systems, respectively. The standard deviation in the three cases are almost identical, proving the capacity of noise rejection of the differential scheme. Tables I show the values of sensitivity and resolution for temperature for pairs of FBGs with different wavelengths.

TABLE I  
RESULTS OF TEMPERATURE MEASUREMENTS

Wavelengths (nm)	Standard deviation (degree)	Sensibility (degrees/°C)	Resolution (°C)
1550 - 1545	0,23	19,88	0,0116
1550 - 1550	0,23	19,92	0,0115
1550 - 1552	0,23	23,28	0,0098

It was verified that the results of temperature using pairs of FBGs with different wavelengths are close to those obtained with equal pairs in terms of wavelength.

The system was tested to the detection of unknown samples using the thermal analysis. Thus, one of the gratings was placed in a controlled temperature and the other one was placed in an aluminum box. This box was placed on a Peltier, and was controlled through the LabView® in order to apply a linear temperature gradient. A rate of 5 mA/s corresponding to a temperature rate of 0.086 °C/s with a linear correlation factor of 98% was used. It was placed, 0.1 ml of acetone and methanol were placed inside the box, after that temperature was incremented up to 80 °C and recorded the differential temperature between the FBGs. Figure 4 shows the obtained results.

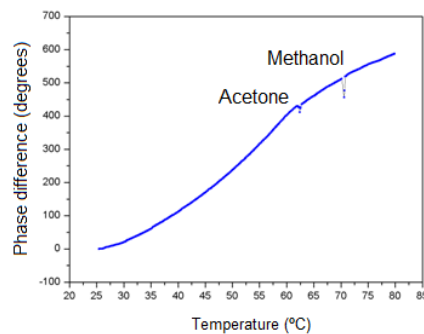


Fig. 4. Results of the measurement of differential temperature between both FBGs applying the thermal analysis, using acetone and methanol as samples.

It was registered a decrease of the phase at 62 and 70 °C, due to the presence of acetone and methanol, respectively, with an offset from the theoretical value of 56.53 and 64.7 °C. This offset is almost the same and approximately to 5 °C. The offset of the evaporation temperature of acetone is the same seen before, accounting for the reproducibility of our measurements. As expected, although the amount of samples was identical, the phase variations recorded were not. This occurs because the samples have different mass and heat capacities and as is known the absorbed or release heat in a given physical process depends on these two factors [5].

#### **4. Conclusion**

A differential interferometric scheme for interrogation of fiber Bragg gratings using traditional and virtual instrumentation was implemented. Differential measurements of temperature were carried out and it can be seen that the sensitivities and resolutions, between the physical and virtual implementations were very close. Such results confirm that the virtual instrumentation is a valid way to implement this type of systems, maintaining the advantages of an interferometric sensing system, as high sensibility and wide dynamic range, but reducing of their major drawbacks such as their high cost.

With measurements of temperature using pairs of FBGs with different wavelengths was possible to verify that the system was not affected significantly.

It was proved that the system can be used for the detection of unknown samples through the application of the differential thermal analysis. Work is in course to improve aspects of the design of the heating chamber in order to eliminate the differences between theoretical boiling points and the results of the measurements.

#### **ACKNOWLEDGEMENTS**

This work was supported by “Fundação para a Ciência e Tecnologia” (PTDC/SAU-BEB/102247/2008, Hybrid).

#### **REFERENCES**

- [1] S. Yin, P. B. Ruffin, and F. T. S. Yu, "Fiber Optic Sensors", Second Ed., T. & F. Group, Ed. NW, USA: CRC Press, 2008.
- [2] A. D. Kersey and T. A. Berkoff, "Fiber- Optic Bragg- Grating Differential-Temperature Sensor", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 4, no. 10, Oct. 1992.
- [3] Y. J. Rao and D. A. Jackson, "Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry," Meas. Sci. Technol., vol. 7, p. 981–999, 1996.
- [4] Y. S. Liu, V. M. Ugaza, S. W. North, W. J. Rogers, M. S. Mannana, "Development of a miniature calorimeter for identification and detection of explosives and other energetic compounds", Journal of Hazardous Materials, no. 142, p. 662–668, 2007.
- [5] E. S. Watson, M. J. O’Neill, J. Justin, N. Brenner, Anal. Chem., vol. 36, p. 1233, 1964.

## **Anexo C**

---

**Artigo submetido à revista *Journal of Lightwave Technology***

# Fiber optic interferometric system with digital control for differential thermal analysis

L.C. Gonçalves, G. González-Aguilar, O. Frazão, J. M. Baptista, P.A. S. Jorge

**Abstract** — This work describes the implementation of an interferometric system for differential interrogation of fiber Bragg gratings for the measurement of strain and temperature. The system is interrogated using a traditional hardware setup as well as a virtual instrumentation setup, which was developed using the Labview® environment. The differential scheme allows reducing the effects of cross-sensitivities, intrinsic to these systems. Similar results were obtained for temperature and strain measurements using the hardware and the virtual systems. Results demonstrate the feasibility of high resolution temperature ( $\pm 0.01^\circ\text{C}$ ) and strain ( $\pm 0.2 \mu\epsilon$ ) measurements with low cost and versatile digital instrumentation. Identification of unknown samples is demonstrated using differential thermal analysis.

**Index Terms** — White light interferometry, FBG, Virtual instrumentation, differential thermal analysis.

## I. INTRODUCTION

THE fiber optic sensors are a reality in the market and they offer comparative advantages to other systems as the electromagnetic immunity, and multiplexing capability [1]. Within the fiber optic sensors, the interferometric sensors allow the implementation of WLI schema [2] and the interrogation of fiber Bragg gratings [3], enabling the measurement of physical and chemical parameters remotely and in real time [4]. The implementation of these systems is inseparable from the cross-sensitivities to factors such as temperature and vibration; where a differential implementation is one way of overcoming this problem [1].

The use of differential interferometric systems is not new, but it is common that these systems are associated with bulky implementations and the use of expensive equipments [5]. Nevertheless these systems are very attractive because they have a high sensitivity, high dynamic range and are immune to power fluctuations that might occur on the lead-in optical fibers [2]. In order to exploit the gains of the interferometric system while minimizing the downsides, virtual instrumentation, is one solution that enables cost reduction by replacing some of the physical instruments for virtual

instruments, and also facilitates the treatment process and storage of the data.

The LabView® is a programming environment turned to virtual instrumentation and offers a quick way to interact with external hardware to the computer through various forms like data acquisition boards, GPIB connections, among others.

This paper describes the virtual control of a differential interferometric system, which uses the pseudo-heterodyne detection scheme for the detection of unknown samples through temperature measurement. A comparison on equal terms of the implemented system using physical and virtual instrumentation is performed.

When our sensor element is a Bragg grating the phase difference between the signals to the system output is given by the next expression [3]

$$\Delta\Psi = -\frac{2\pi n\Delta L}{\lambda_B^2} \Delta\lambda_B \quad (1)$$

Where  $\Delta\Psi$  is the phase variation,  $n$  is the refractive index,  $\Delta L$  is the path difference between the arms of the interferometer,  $\lambda_B$  is the Bragg wavelength of the grating. And if the change in Bragg wavelength ( $\Delta\lambda_B$ ) is caused by the application of strain is given by the next expression [6]

$$\Delta\lambda_B \cong 0,78\lambda_B \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

The variation of the Bragg wavelength by the temperature variation is given by the next expression [3]

$$\Delta\lambda_B = \frac{\partial\lambda_B}{\partial T} \Delta T \quad (3)$$

The differential temperature measurement with high resolution allows the implementation of several applications, for instance the detection of unknown samples.

This technique measures a differential temperature, ( $\Delta T$ ), between a sample, ( $T_s$ ), and a reference material, ( $T_r$ ), when both are being heated or cooled. These measurements are made as a function of temperature versus time, since the heating or cooling have always a linear behavior ( $dT/dt = \text{Constant}$ ).

Through this technique, it is possible to monitor the effects of heat associated with physical or chemical changes of the sample, such as phase transitions (melting, boiling,

This work was supported by “Fundação para a Ciência e Tecnologia” under Grant PTDC/SAU-BEB/102247/2008, Hybrid.

All authors are with INESC Porto Optoelectronics Unit, Rua do Campo Alegre 687, 4169 007 Porto, Portugal. (Pedro Jorge, +351220402301, pjorge@inescporto.pt). O. Frazão and J.L. Santos are also with Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. J. M. Baptista and L.C. Gonçalves are also with Universidade da Madeira.

sublimation, freezing, inversions of crystal structures) or dehydration reactions, dissociation, decomposition, oxidation-reduction, among others, capable to cause variations in heat. In general, phase transitions, dehydration, reductions and certain reactions of decomposition produce endothermic effects, whereas crystallization, oxidation, some reactions of decomposition produce exothermic effects [7].

The occurrence of these changes is different for each element. If we correlate the recorded temperature variation,  $\Delta T$ , with the absolute temperature we will be able to know the content of the sample [7].

## II. CHARACTERIZATION

The implemented experimental scheme is shown in Figure 1. This setup was implemented using virtual instrumentation, and also a configuration with physical instrumentation, using a LIA (Lock-in Amplifier).

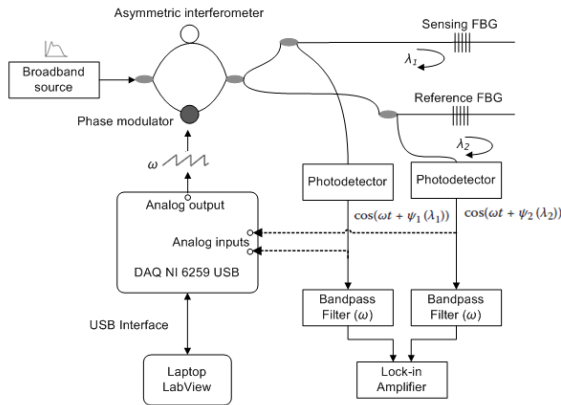


Fig. 1. The experimental scheme implemented.

The system implements a scheme of pseudo-heterodyne detection and is illuminated by a source of wide spectrum of erbium doped fiber. The optical signal is modulated in phase, in one of the arms of the Mach-Zehnder interferometer, through an electro-optic modulator, with a sawtooth shape. In the other interferometer arm an adjustable air path was placed, which allows to vary the difference in optical paths between the arms and thus altering the sensitivity of the measurement, as verified in expression 1.

It was used two FBGs with equal wavelengths in order to study the difference in performance between the physical and virtual systems. On the other hand, two FBGs with different wavelengths were also used to study the behavior of the measuring system under these conditions.

At the output of the system two photodetectors collected two sine waves with the same frequency, equal to the modulation frequency, but with a phase difference imposed by temperature or strain variation that may exist between both gratings. These signals are acquired through a DAQ (NI-USB-6259) and processed using LabView®. This processing involves the amplification and filtering of the signals for subsequent detection of the phase difference which is obtained

by Fourier transform, as shown in the next expression.

$$\cos(\omega_0 t + \varphi) \xrightarrow{F} \pi e^{j\varphi} \delta(\omega - \omega_0) + \pi e^{-j\varphi} \delta(\omega + \omega_0) \quad (4)$$

For the application of differential thermal analysis, it was necessary to apply a temperature gradient that it has to be the most linear as possible. It was used a Peltier to increase the temperature of the sample by varying the current applied at a rate of 5 mA/s using a voltage source controlled by LabView®. The gradient applied corresponded to an increase of 0.086 °C / s with a linear correlation coefficient of 98%.

## III. TESTS AND RESULTS

To verify the proper functioning of the system, it was necessary to perform a validation process for the software developed, this process was made using strain measurements.

The FBGs were placed and glued on two supports that were located 0.51 m apart. One of the support was attached to a precision carriage that pulled the fiber away up to 0.001 m in steps of 0.1e-3 m, like it is shown in Figure 2.

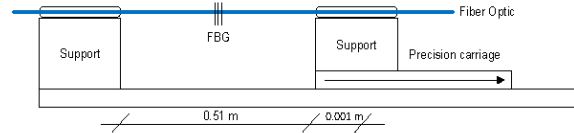


Fig. 2. Scheme of the experimental setup to introduce strain to the FBG.

The results are presented in Figure 3, for both cases of using the physical and virtual instrumentation.

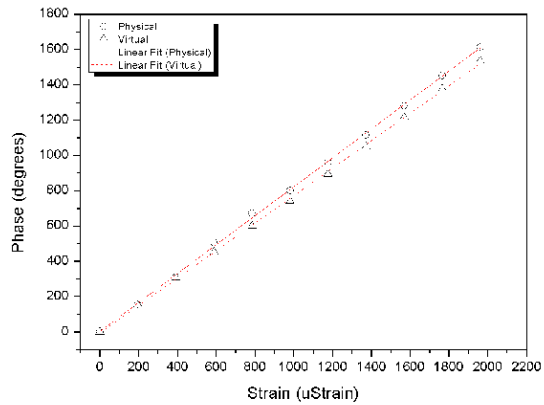


Fig. 3. Results of phase function of strain for both physical and virtual implementation.

It appears from these results that the virtual system has a response very similar to the system implemented by physical instrumentation. And it was proved the correct operation of the algorithm that obtain the phase difference between the signals outputs system and of the algorithm that compensates phase jumps of 360° and more. The sensitivity for the implemented system with physical instrumentation was 0.82 degrees of

phase by  $\mu\text{Strain}$  and for the virtual instrumentation was 0.78 degrees of phase by  $\mu\text{Strain}$ . The resolution was 0.24 and 0.29  $\mu\text{Strain}$ , for the physical and virtual systems, respectively.

To make the differential temperature measurement, it is necessary to have an element to do a cross calibration of the system. In our setup a precalibrated thermistor was used.

For the temperature measurement, one grating was placed in controlled temperature in water and ice, and the second grating was subjected to temperature variations through a Peltier. The phase difference was measured and simultaneously the resistance value of the thermistor. The scheme of the differential temperature measurement is shown in Figure 4.

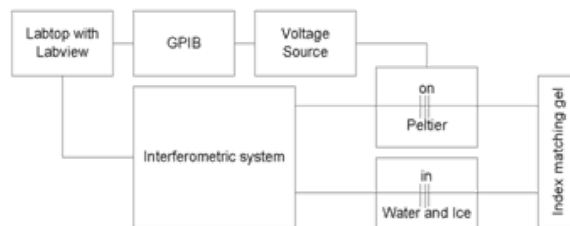


Fig. 4. Scheme of the differential temperature measurement.

Figure 5 shows the phase variation as a function of temperature change, for both cases of using physical and virtual instrumentation, respectively.

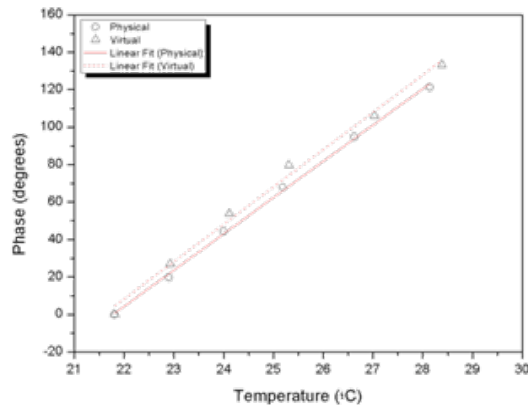


Fig. 5. Results of phase as a function of temperature for both the virtual and the physical implementation.

The sensitivity for the system implemented with physical instrumentation was 20 degrees of phase per  $^{\circ}\text{C}$  and by the use of virtual instrumentation was 19.61 degrees of phase per  $^{\circ}\text{C}$ . The resolution was 0.010 and 0.012  $^{\circ}\text{C}$ , for the physical and virtual systems, respectively. Figure 6 presents both measurements of strain and temperature, but now using FBGs with different wavelengths.

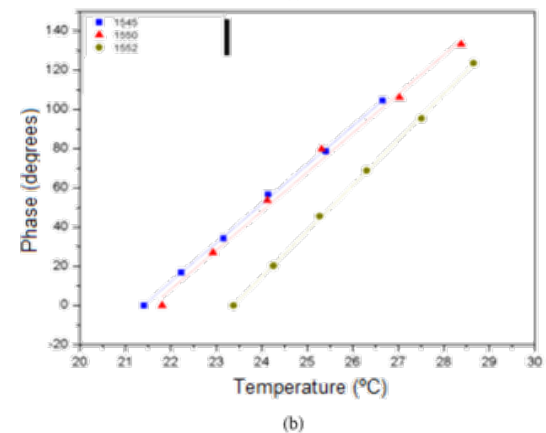
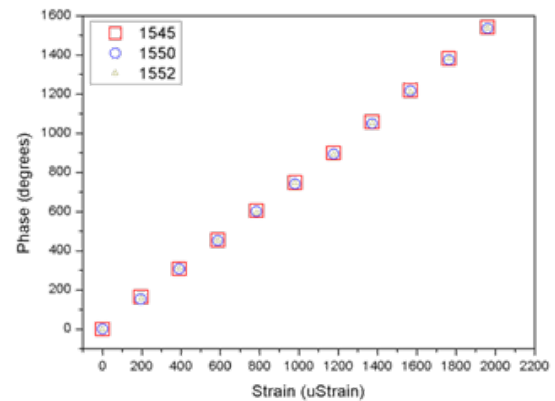


Fig. 6. Results of phase as function of strain (a) and temperature (b).

Tables I and II show the values of sensitivity and resolution for strain and temperature for pairs of FBGs with different wavelengths.

TABLE I  
RESULTS OF STRAIN MEASUREMENTS

Wavelengths (nm)	Standard deviation (degree)	Sensibility (degrees/ $\mu\text{Strain}$ )	Resolution (nanoStrain)
1550 - 1545	0,23	0,78	294,87
1550 - 1550	0,23	0,778	295,63
1550 - 1552	0,23	0,778	295,63

TABLE II  
RESULTS OF TEMPERATURE MEASUREMENTS

Wavelengths (nm)	Standard deviation (degree)	Sensibility (degrees/ $^{\circ}\text{C}$ )	Resolution ( $^{\circ}\text{C}$ )
1550 - 1545	0,23	19,88	0,0116
1550 - 1550	0,23	19,92	0,0115
1550 - 1552	0,23	23,28	0,0098

It was verified that the results of strain and temperature using pairs of FBGs with different wavelengths are close to those obtained with equal pairs in terms of wavelength. The

standard deviation in the three cases are almost identical, proving the capacity of noise rejection of the differential scheme.

Once we proved the proper functioning of the differential temperature measurement system and its resolution, the system was tested to the detection of unknown samples using the thermal analysis.

Thus, one of the gratings was placed in a controlled temperature and the other one was placed in an aluminum box. This box was placed on a Peltier, and was controlled through the LabView® in order to apply a linear temperature gradient. A rate of 5 mA/s corresponding to a temperature rate of 0.086 °C/s with a linear correlation factor of 98% was used.

For the first measurement, 0.1 ml of acetone was placed inside the box, after that temperature was incremented up to 68 °C and recorded the differential temperature between the FBGs. The results are shown in Figure 7.

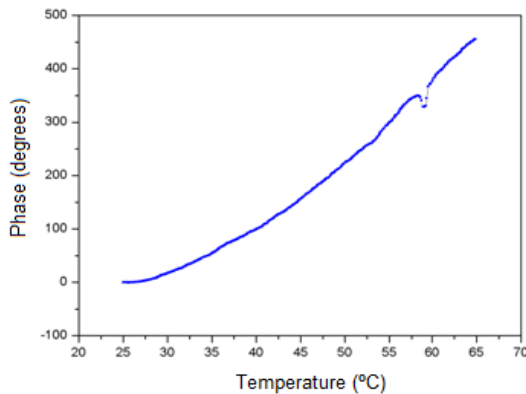


Fig. 7. Results of the measurement of differential temperature between both FBGs applying the thermal analysis, using acetone as sample.

It was registered a decrease of the phase at 60 °C, due to the presence of acetone, with an offset from the theoretical value of 56.53 °C. This was due to relatively high volume of the heating chamber when compared with the sample volume and the heating ramp used throughout the experiment [8].

In the second measurement, the process was repeated but using acetone and methanol, (0.1 ml of each) and the temperature was incremented up to 80 °C. Figure 8 shows the obtained results.

It was registered a decrease of the phase at 62 and 70 °C, due to the presence of acetone and methanol, respectively, with an offset from the theoretical value of 56.53 and 64.7 °C. This offset is almost the same and approximately to 5 °C. The offset of the evaporation temperature of acetone is the same seen before, accounting for the reproducibility of our measurements.

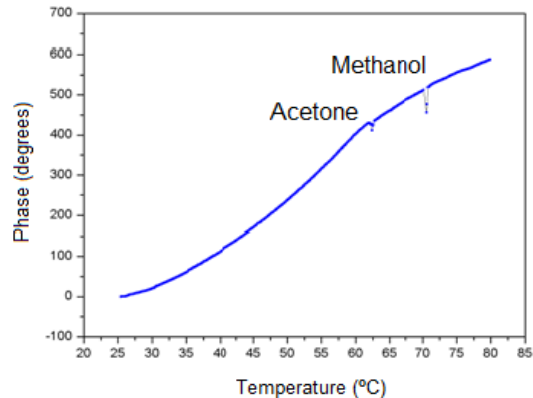


Fig. 8. Results of the measurement of differential temperature between both FBGs applying the thermal analysis, using acetone and methanol as samples.

As expected, although the amount of samples was identical, the phase variations recorded were not. This occurs because the samples have different mass and heat capacities and as is known the absorbed or release heat in a given physical process depends on these two factors [9].

#### IV. CONCLUSION

differential interferometric scheme for interrogation of fiber Bragg gratings using traditional and virtual instrumentation was implemented. Differential measurements of temperature and strain were carried out and it can be seen that the sensitivities and resolutions, between the physical and virtual implementations were very close. Such results confirm that the virtual instrumentation is a valid way to implement this type of systems, maintaining the advantages of an interferometric sensing system, as high sensibility and wide dynamic range, but reducing of their major drawbacks such as their high cost.

With measurements of strain and temperature using pairs of FBGs with different wavelengths was possible to verify that the system was not affected significantly.

It was proved that the system can be used for the detection of unknown samples through the application of the differential thermal analysis. Work is in course to improve aspects of the design of the heating chamber in order to eliminate the differences between theoretical boiling points and the results of the measurements.

#### REFERENCES

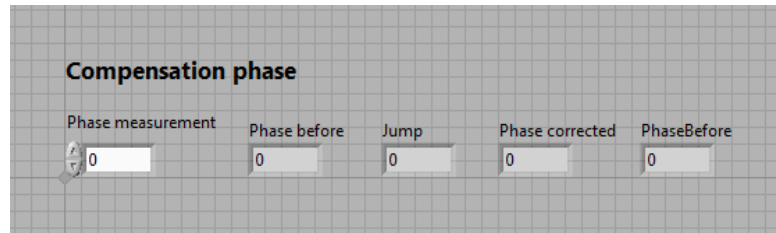
- [1] S. Yin, P. B. Ruffin, and F. T. S. Yu, "Fiber Optic Sensors", Second Ed., T. & F. Group, Ed. NW, USA: CRC Press, 2008.
- [2] Y. J. Rao and D. A. Jackson, "Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 7, p. 981-999, 1996.
- [3] A. D. Kersey and T. A. Berkoff, "Fiber-Optic Bragg-Grating Differential-Temperature Sensor", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 4, no. 10, Oct. 1992.
- [4] C. Jesus, S. F. O. Silva, M. Castanheira, G. González-Aguilar, O. Frazão, P. A. S. Jorge, J. M. Baptista, "Measurement of acetic acid

- using a fibre Bragg grating interferometer", IOP Publishing, vol. 20, p. 5, Sep. 2009.
- [5] J. E. C. Velosa, C. Gouveia, O. Frazão, P.A. S. Jorge, J. M. Baptista, J. L. Santos, "System for interrogation of interferometric optical fiber sensors with digital control", Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors, Nokia Siemens Networks Amadora, Jun 2009.
  - [6] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, Member, IEEE, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber Grating Sensors", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, Aug 1997.
  - [7] Y. S. Liu, V. M. Ugaza, S. W. North, W. J. Rogers, M. S. Mannana, "Development of a miniature calorimeter for identification and detection of explosives and other energetic compounds", *Journal of Hazardous Materials*, no. 142, p. 662-668, 2007.
  - [8] P. L. Arens, "A study on the Differential Thermal Analysis of Clays and Clays Minerals", Excelsiors Foto-Offset, The Hague, 1951.
  - [9] E. S. Watson, M. J. O'Neill, J. Justin, N. Brenner, *Anal. Chem.*, vol. 36, p. 1233, 1964.

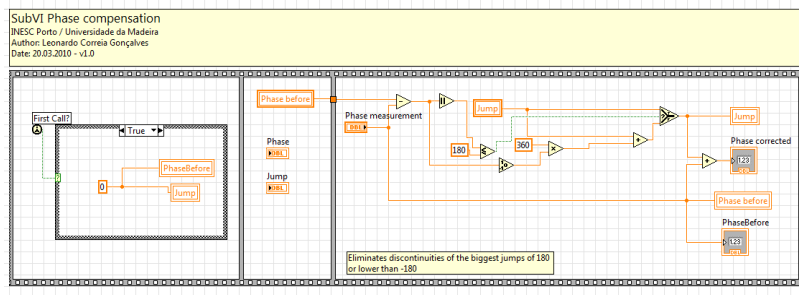
## **Anexo D**

---

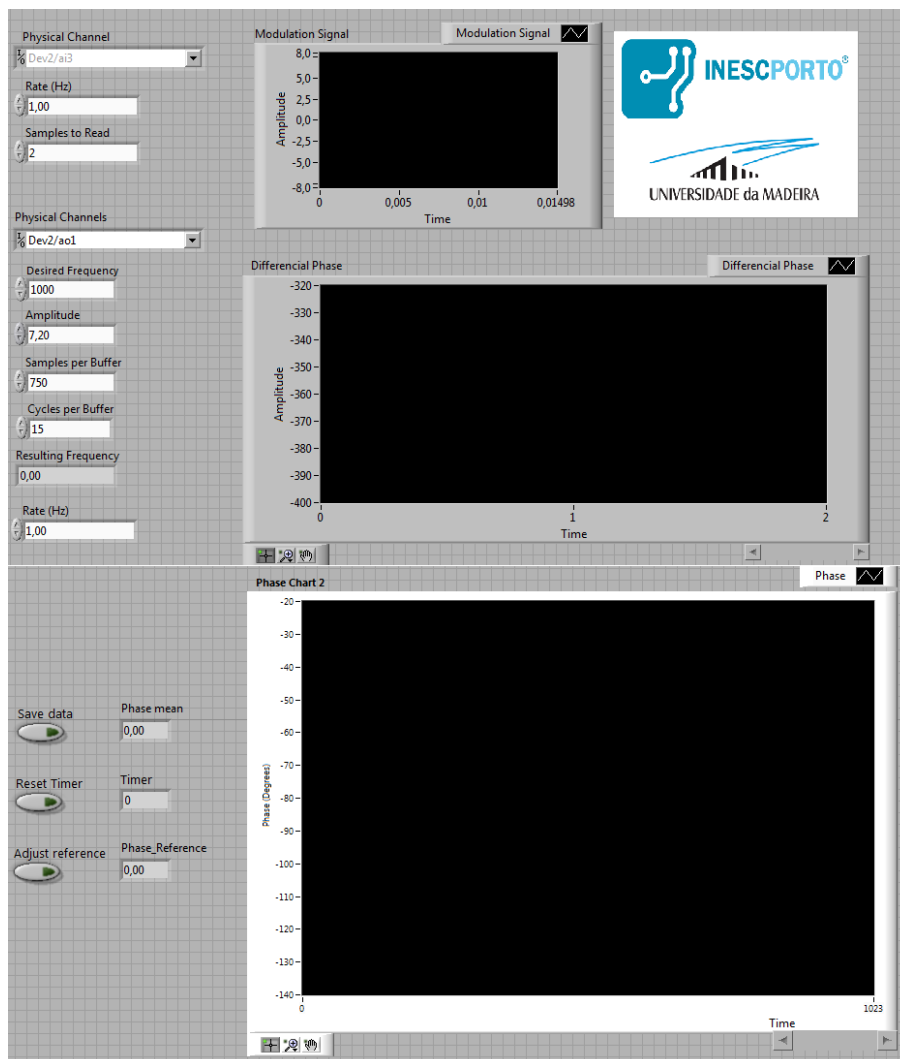
**Capturas de imagem do *software* desenvolvido.**



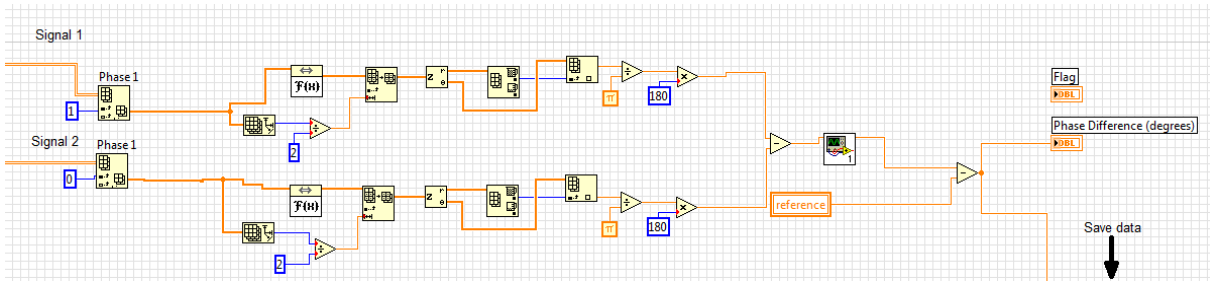
**B1** - Compensação caso existam saltos inferiores a  $-180^\circ$  ou superiores a  $180^\circ$ , Painel frontal.



**B2** - Compensação caso existam saltos inferiores a  $-180^\circ$  ou superiores a  $180^\circ$ , Painel de programação.



### B3 - Controlo de sistema implementado através de instrumentação física.



### B4 - Comparação de fase virtual



### B5 - Parte do painel frontal do sistema implementado através de instrumentação virtual.



**B6** - Parte do painel frontal do sistema implementado através de instrumentação virtual, para aplicar o DTA.

## **Anexo E**

---

**Certificado de calibração**



## Certificado de Calibração Calibration Certificate

Data de calibração **2007-03-14** Certificado n.º **M-2007-0345** Pág. **1** de **2**  
Date of calibration Certificate number Page of

Cliente **Faculdade de ciências UP**  
Customer **Rua do Campo Alegre, 687**  
**4169-007 Porto**

Instrumento calibrado **TRP**  
Object

Fabricante / Marca **—** Modelo / Tipo **—**  
Manufacturer Model / Type

N.º série **—** Ref.º inventário **020991**  
Serial number Customer ref.

Condições ambientais **Temperatura = (23 ± 5) °C**  
Environmental conditions

Rastreabilidade **Termómetro de resistência de platina LMT704, rastreado ao IPQ.**  
Traceability

Operação efectuada **Calibração conforme o procedimento PC/061.**  
Method

Observações **Associado a um multímetro HP 34401A, nº US36017967, refº 020991.**  
Remarks

Data de emissão deste Certificado **2007-03-14**  
Date of issue

Calibrado por  
Calibrated by

Inácio Gonçalves

Responsável pelo Laboratório  
Head of the Laboratory

Paulo Cabral

A incerteza expandida apresentada está expressa como a incerteza-padrão multiplicada pelo factor de expansão  $k=2$ , o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de aproximadamente 95%. A incerteza foi calculada de acordo com o documento EA 4/02.

The stated uncertainty is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor  $k=2$ . It has been determined in accordance with document EA 4/02. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

Os resultados indicados referem-se apenas ao momento e às condições em que se efectuaram os ensaios, sendo válidos somente para a amostra ensaiada. Este Relatório não pode ser reproduzido parcialmente, salvo autorização escrita do Laboratório.

The reported results are valid only at the moment and in the conditions of the calibration, and refer only to the calibrated object. This calibration certificate may not be reproduced, other than in full, except with the written permission of the Laboratory.

O IPAC é signatário dos acordos de reconhecimento mútuo da EA para calibrações, ensaios, certificações e inspeções.

IPAC is signatory to the EA MLA for calibration, testing, certification and inspection scopes.

Instituto Electrotécnico Português  
Laboratório de Metrologia e Ensaios  
Rua de S. Gens, 3717  
4460-409 Senhora da Hora - Portugal  
Tel: +351-22 957 0023 - Fax: +351-22 953 0594  
E-mail: met@iep.pt - http://www.iep.pt  
Mod. LME 02a/1

<b>Multímetro HP</b>		<b>Temperatura lida no padrão ( °C)</b>	<b>Profundidade de imersão (mm)</b>	<b>Incerteza ( °C)</b>	<b>Erro ( °C)</b>
<b>Resistência medida (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Temperatura equivalente (°C)</b>				
87,961	-30,76	-30,86	100	$\pm 0,11$	+ 0,10
100,046	0,00	0,00	100	$\pm 0,10$	0,00
117,311	44,45	44,58	100	$\pm 0,10$	- 0,13
134,507	89,31	89,62	100	$\pm 0,11$	- 0,31
149,606	129,22	129,72	100	$\pm 0,11$	- 0,50

**OBSERVAÇÕES:**

Divisão = 0,001  $\Omega$

A conversão de R em t, é baseada na norma CEI 751 com  $R_0 = 100,046 \Omega$

**Fim**

