



**Carlos Alberto  
Ferreira Marques**

**Gravação de redes de Bragg avançadas em fibra  
óptica**



**Carlos Alberto  
Ferreira Marques**

**Gravação de redes de Bragg avançadas em fibra  
óptica**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Rogério Nogueira, Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações.

## **O júri**

presidente

**Prof. Dr. Manuel Almeida Valente**

Professor Associado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. José Maria Longras Figueiredo**

Professor Auxiliar do Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Algarve

**Doutor Rogério Nunes Nogueira**

Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações, pólo Aveiro

**Prof. Dr. João de Lemos Pinto**

Professor Catedrático do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Doutor Rogério Nogueira pela orientação, apoio e pelas suas qualidades, não só profissionais como também humanas, ao longo de todo o projecto. Estou também grato pela paciência e frequente apoio a mim concedido, para me inserir numa área da física em que tinha ainda poucas bases científicas.

Quero agradecer ao Miguel Drummond pela ajuda prestada no esclarecimento de várias dúvidas que surgiram ao longo deste trabalho.

Agradeço à Francelli pela ajuda na gravação de determinadas redes e pela companhia, em alguns períodos, no laboratório.

Gostaria de agradecer ao Sr. Ivo e Miguel pelo fabrico de vários componentes necessários à montagem deste sistema.

Agradeço também ao Rui Silva pelo apoio dado em vários momentos.

Um agradecimento especial à Vera, pela força e apoio constante a mim concedido.

Queria agradecer também aos meus pais e irmãos que sempre acreditaram em mim e me ajudaram, a todo o momento, a atingir os meus objectivos.

A todos vocês,

Muito obrigado!

**Palavras-chave**

Redes de Bragg em fibra, sistema de gravação, *stitching*, *software* de suporte à implementação, telecomunicações, *steps*, máscara de fase.

**Resumo**

A necessidade de soluções tecnológicas que se apresentem flexíveis e eficientes é cada vez maior, justificada pela crescente exigência de mercado que tem vindo a acontecer ao longo dos últimos anos. As redes de Bragg em fibra óptica são componentes ópticos com capacidades de filtragem únicas, tornando-os bastante úteis no desenvolvimento de diversos dispositivos para as comunicações ópticas, sensores, entre outros.

O presente trabalho tem por objectivo o desenvolvimento de um sistema de optimização de produção de redes de Bragg avançadas em fibra óptica. O objectivo principal foi a concepção de um processo automático que permita o fabrico deste tipo de dispositivos de uma forma simples, eficaz e eficiente. Foi desenvolvido um modelo teórico do sistema, que permite tornar o processo de gravação totalmente automatizado.

O objectivo final consiste na obtenção de um método flexível que permita uma elevada reprodutibilidade na definição dos parâmetros das redes produzidas. Foram gravadas vários tipos de redes de Bragg e posteriormente comparadas com simulações.

**Keywords**

Fiber Bragg Gratings, recording system, stitching, software to support the implementation, telecommunications, steps, phase mask.

**Abstract**

The need for technology solutions which are flexible and efficient is increasing, justified by the increasing demand of the market that we have seen over recent years. The fiber Bragg gratings are optical components with unique filtering capabilities, making them useful in the development of various devices for optical communications, sensors, among others.

This study focuses on the development of a system optimization production of advanced fiber Bragg gratings. The main objective was to design an automatic process that allows the manufacture of such devices in a simple, effective and efficient way. It was developed a theoretical model of the system, which makes the recording process completely automated.

The ultimate goal is to obtain a flexible method that allows a high reproducibility in defining the parameters of the Bragg gratings produced. Were recorded various types of Bragg gratings and later compared with simulations.



## Glossário de acrónimos

CFBG	Chirped Fiber Bragg Grating	Redes <i>chirped</i>
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Multiplexagem densa no comprimento de onda
FBG	Fiber Bragg Grating	Rede de Bragg em fibra óptica
GFF	Gain Flattening Filters	Filtros equalizadores de ganho
LANs	Local Area Networks	Redes de área local
MF	Phase Mask	Máscara de fase
OCDMA	Optical Code Division Multiple Access	Acesso múltiplo por divisão do código no domínio óptico
ONA	Optical Network Analyzer	Analisador de espectros ópticos
PC	Personal Computer	Computador
PS	Phase sift	Deslocamento de fase
RF	Radio Frequency	Radiofrequência
SI	International System	Sistema Internacional
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	Sistema Universal de Telecomunicações móveis
UV	Ultraviolet	Ultravioleta
VI	Virtual Instrument	Instrumento virtual
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexagem no comprimento de onda



## Lista de símbolos e constantes

$a$	Valor máximo que pode variar a distância entre a máscara de fase à fibra.
$A_p(z)$	Função de apodização (FBG)
$Amp$	Ampliação
$AS$	Área do sensor
$b$	Distância da máscara de fase à fibra
$c$	Velocidade da luz no vazio ( $299792458 \text{ ms}^{-1}$ )
$cdo$	Comprimento de onda
$CV$	Campo de visão
$d$	Distância da fibra óptica até á normal do limite da zona de sobreposição.
$D$	Dispersão
$F$	Abertura da slit
$k^{th}$	Secção
$L$	Comprimento da rede de Bragg (comprimento de gravação)
$L_{exp}$	Comprimento de cada exposição
$L_k$	Comprimento da secção de índice $\kappa$ da FBG
$m$	Ordem de difracção
$n$	Índice de refracção
$n_0$	Índice inicial no núcleo
$n_{baínha}$	Índice de refracção da baínha
$n_{eff}$	Índice de refracção efectivo do núcleo da fibra
$n_i$	Índice de refracção no meio da onda incidente
$n_m$	Índice de refracção no meio da onda difractada
$n_{núcleo}$	Índice de refracção do núcleo
$\overline{n_{eff}}$	Valor médio do índice de refracção efectivo numa FBG
$N$	Número total de exposições
$N_{exp}$	Valor inteiro positivo
$R_F$	Coefficiente de reflexão (Fresnel)
$step$	Valor(es) do deslocamento do estágio de translação
$T$	Período da rede sinc
$v(z)$	Visibilidade (FBG)
$u_k$	Visibilidade da secção $k$
$\alpha$	Ângulo de incidência do feixe na fibra

$\delta n$	Alteração / Transição de índice de refração
$\delta n_{eff}(z)$	Variação do índice de refração do modo guiado de uma fibra ao longo do eixo longitudinal (FBG)
$\overline{\delta n_{eff}}$	Variação do valor médio do índice de refração na FBG
$\Delta n$	Amplitude de modulação do índice de refração (FBG)
$\Delta n_{eff}$	Variação do índice de refração
$\Delta z_k$	Deslocamento da segunda exposição para a primeira
$\theta$	Ângulo da onda difractada com a normal
$\theta_b$	Ângulo dos planos da perturbação do índice de refração (FBG inclinada)
$\theta_i$	Ângulo da onda incidente
$\theta_m$	Ângulo da onda difractada
$\lambda$	Comprimento de onda
$\lambda_{Bragg}$	Comprimento de onda de Bragg
$\lambda_{UV}$	Comprimento de onda do laser UV
$\Lambda$	Período da perturbação induzida no índice de refração (FBG)
$\Lambda_0$	Período à entrada da rede (FBG aperiódica)
$\Lambda_{MF}$	Período das depressões da máscara de fase
$\Lambda(z)$	Período de modulação ao longo de uma FBG
$\phi(z)$	Variação do período (FBG)
$\phi$	Valor do <i>phase shift</i> em radianos
$\phi_k$	Diferença de fase aplicada na secção $k^{th}$
$\Gamma$	Factor de correcção
$\xi$	Precisão do posicionador

# Índice

O júri

Agradecimentos

Resumo

Abstract

Glossário de Acrónimos

Lista de símbolos e constantes

Índice

<b>Capítulo 1- Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 – Motivação .....	1
1.2 – Objectivos .....	1
1.3 – Estrutura da dissertação.....	2
1.4 – Principais contribuições .....	2
<b>Capítulo 2 - Redes de Bragg em fibra óptica</b> .....	<b>3</b>
2.1– Introdução .....	3
2.2 – Teoria e Propriedades das Redes de Bragg .....	4
2.2.1 – Rede de difracção .....	5
2.3 – Tipos de Redes de Bragg .....	6
2.3.1 – Redes uniformes .....	6
2.3.2 – Redes apodizadas .....	7
2.3.3 – Redes aperiódicas .....	9
2.3.4 – Redes sinc.....	10
2.3.5 – Redes com deslocamento de fase.....	11
2.3.6 – Redes inclinadas .....	11
2.4 – Técnicas de gravação de redes de Bragg .....	12
2.4.1 – Introdução .....	12
2.4.2 – Método por máscara de fase .....	13
2.4.3 – Interferómetro por divisão de amplitude.....	14
2.4.4 – Método por varrimento da máscara de fase.....	15
2.4.5 – Método por colagem ( <i>stitching</i> ).....	15
<b>Capítulo 3 – Implementação de sistema de escrita de redes de Bragg</b> .....	<b>23</b>
3.1 – Introdução .....	23

3.2 – Processo de alinhamento da máscara de fase com a fibra óptica e fundamentos da respectiva distância.....	23
3.3 – Montagem experimental.....	25
3.4 – Software desenvolvido e seus fundamentos.....	28
3.4.1 – Introdução.....	28
3.4.2 – Controlo dos estágios.....	29
3.4.3 – Alinhamento máscara de fase – fibra óptica.....	30
3.4.4 – Interface e controlo da fonte laser.....	31
3.5 – Métodos implementados de escrita de FBG.....	31
3.5.1 – Gravação por máscara de fase.....	31
3.5.2 – Gravação por varrimento da máscara de fase.....	32
3.5.3 – Gravação por método Stitching.....	32
3.6 – Processo de escrita.....	32
<b>Capítulo 4 – Caracterização das redes de Bragg gravadas.....</b>	<b>35</b>
4.1 – Introdução.....	35
4.2 – Estudo da variação do índice de refração com a energia acumulada.....	35
4.3 – Caracterização e comparação de redes Uniformes.....	36
4.4 – Caracterização e comparação de redes com deslocamento de fase.....	38
4.5 – Caracterização e comparação de redes <i>Chirped</i> .....	38
4.6 – Caracterização de arrays de redes de Bragg.....	40
4.7 – Caracterização de redes de Bragg em transmissão.....	43
<b>Capítulo 5 – Conclusões e trabalho futuro.....</b>	<b>45</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>47</b>
<b>Apêndice A – Comandos fundamentais do setup.....</b>	<b>49</b>

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 – Motivação

A necessidade de soluções tecnológicas que se apresentem flexíveis e eficazes é cada vez maior, justificada pela crescente exigência de mercado que tem vindo a acontecer ao longo dos últimos anos. A crescente integração nas mais variadas áreas implica resposta face às expectativas criadas em relação às tecnologias desenvolvidas e consequente aplicação industrial. É neste teor que as fibras ópticas surgem e sofrem uma rápida evolução num período de tempo relativamente reduzido, intervindo de uma forma significativa nos diversos campos do sector tecnológico.

Desde o aparecimento das redes de *Bragg* em fibra óptica (FBG: *fiber Bragg gratings*), têm-se encontrado muitas aplicações para este componente devido às suas propriedades, versatilidade e variedade de parâmetros controláveis, que podem formatar de diversas maneiras as suas características espectrais [1]. As redes de Bragg em fibra óptica têm muitas aplicações no domínio das telecomunicações e sensores, devido a essas mesmas propriedades e quantidade de parâmetros controláveis.

Desde a descoberta e utilização das redes de Bragg no âmbito das comunicações ópticas, a sua implementação prática tem sido objecto de estudo e investigação, dada a dificuldade em controlar as diversas variáveis envolvidas. Um ponto comum dessa investigação tem sido a optimização dos sistemas de gravação, para obter uma resposta da rede de Bragg produzida o mais próxima possível da desenhada. Um foco importante dessa optimização é, comprovadamente, a automatização do sistema, que facilita a sistematização e controlo do mesmo.

A motivação para o trabalho desenvolvido no âmbito da dissertação surge neste contexto, de automatização de um sistema de gravação de redes de Bragg avançadas.

### 1.2 – Objectivos

No contexto apresentado, este trabalho consiste em desenvolver um sistema de optimização de produção de redes de Bragg avançadas em fibra óptica. O objectivo central foi a concepção de um processo automático que permita o fabrico deste tipo de dispositivo de uma forma simples e eficaz, com um objectivo final de se obter, de forma flexível, uma elevada reprodutibilidade na definição de parâmetros das redes produzidas.

### 1.3 – Estrutura da dissertação

O presente trabalho foi dividido em 5 capítulos onde são estudados diferentes aspectos relacionados com redes de Bragg.

Neste primeiro capítulo, para além da motivação em que se insere o trabalho, são também apresentados os objectivos, a estrutura do mesmo e as principais contribuições.

No segundo capítulo é feito um breve resumo da teoria das redes de Bragg, mais propriamente as suas propriedades, designação e tipos de redes, bem como algumas técnicas utilizadas na sua fabricação.

No terceiro capítulo apresenta-se detalhadamente todas as etapas inerentes ao processo de desenvolvimento e concepção de um setup para fabricação de redes de Bragg focando a montagem experimental, software de controlo e procedimentos de gravação.

No quarto capítulo é realizada a caracterização e análise das redes produzidas em comparação com as simulações dessas mesmas.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões e trabalho futuro a desenvolver.

## **1.4 – Principais contribuições**

As principais contribuições do trabalho descrito nesta dissertação, podem ser descritas da seguinte forma:

- Implementação e optimização de um sistema para fabricação de redes de Bragg.
- Desenvolvimento de um software de controlo automático de gravação de redes de Bragg, com várias soluções de gravação, desde as mais simples às mais complexas.
- Desenvolvimento de uma interface gráfica de fácil utilização.
- Publicação resultante: Rogério N. Nogueira, Miguel V. Drummond, Carlos Marques, Paulo S. André, António L. Teixeira, Hypolito Kalinowski, João L. Pinto, José F. Rocha. *“Produção e caracterização de redes de Bragg em fibra óptica”*. 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. Maputo, Moçambique. Ref. 39R009. 2-4 Setembro 2008.

## Capítulo 2

### Redes de Bragg em fibra óptica

#### 2.1 – Introdução

Uma rede de difracção é uma estrutura periódica que pode ser utilizada com o propósito de separar, espacialmente, luz policromática nos seus comprimentos de onda constituintes. Baseia-se num substrato transparente ou reflector aos comprimentos de onda de interesse e contém na sua superfície uma série de estruturas paralelas e equidistantes entre si que provocam variações periódicas de fase ou amplitude de uma onda. Quando a luz incide numa destas estruturas ocorrem efeitos de difracção e interferência mútua onde cada comprimento de onda é reflectido ou transmitido em direcções discretas denominadas por ordens. As redes de Bragg em fibra óptica constituem um tipo de segmento de redes de difracção que actuam por filtragem em reflexão de certos comprimentos de onda do espectro da luz incidente permitindo a transmissão sem perdas dos restantes. Este comportamento é conseguido através da modificação do índice de refração de pequenas secções do núcleo da fibra fazendo com que este se torne ligeiramente superior ao nominal. Em resultado, a estrutura irá transmitir a maioria dos comprimentos de onda da luz, reflectindo outros, específicos, actuando de uma forma idêntica a um filtro ressonante. Quando a luz que se propaga e incide nesta estrutura, uma certa porção é dispersada em cada período de modulação. Em condições ideais, a dispersão em fase para o modo contrapropagante acontece e é estabelecida uma forte condição de ressonância designada por condição de Bragg:

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff} \Lambda \quad (2.1)$$

onde  $n_{eff}$  representa o índice de refração efectivo do núcleo,  $\lambda_{Bragg}$  o comprimento de onda de ressonância da rede de difracção e  $\Lambda$  o período da perturbação do índice de modulação.

Pode-se descrever uma rede de Bragg em fibra como uma perturbação periódica ou aperiódica do índice de refração efectivo do núcleo de uma fibra óptica. Esta perturbação tem, usualmente, um período na ordem das centenas de nanómetros e existe ao longo de um comprimento de fibra especialmente de alguns milímetros ou centímetros.

A reflexão da luz que se propaga ao longo da fibra é assim possível para uma gama restrita de comprimentos de onda para os quais as condições de Bragg são satisfeitas. Os restantes comprimentos de onda não são afectados com a excepção de lóbulos laterais que ocorrem frequentemente no espectro de reflexão e que podem ser suprimidos através de um processo denominado por apodização. Na zona espectral correspondente ao comprimento de onda de Bragg é suficiente uma modulação do índice de refração relativamente pequena de forma a conseguir elevada reflectividade, caso o comprimento da rede seja suficientemente longo.

## 2.2 – Teoria e Propriedades das Redes de Bragg

O princípio fundamental de funcionamento das redes de Bragg assenta, principalmente, na reflexão de Fresnel que enuncia a possibilidade, simultânea, de reflexão e refacção da luz incidente num interface entre dois meios de propagação de diferentes índices de refacção. Por essa razão uma rede de Bragg actua como um filtro, específico a certos comprimentos de onda que são reflectidos, permitindo que o resto do espectro da luz incidente continue em transmissão.

Na Figura 2.1 estão representados alguns dos parâmetros mais importantes numa rede de Bragg, onde  $\Delta n$  é a amplitude de modulação do índice de refacção e  $\overline{\delta n_{eff}}$  o valor médio do índice de refacção da rede.

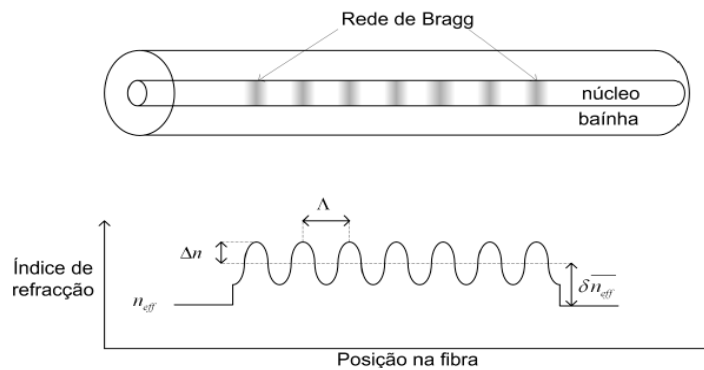


Figura 2.1 - Representação da variação do índice de refacção numa rede de Bragg em fibra óptica [2].

Recorrendo à reflexão de *Fresnel*, pode-se analisar, qualitativamente, o efeito da perturbação periódica do índice de refacção. Quando uma onda electromagnética atravessa uma interface entre dois meios dieléctricos diferentes, ocorre reflexão de parte da sua energia. No caso de uma incidência normal, o coeficiente de reflexão  $R_F$  é dado por:

$$R_F = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (2.2)$$

onde  $n_1$  e  $n_2$  representam os índices de refacção dos dois meios envolvidos. Considerando uma pequena transição do índice de refacção,  $\delta n$ , obtém-se um coeficiente de reflexão dado por:

$$R_F = \left[ \frac{n - (n + \delta n)}{n + (n + \delta n)} \right]^2 = \left[ \frac{\delta n}{2n + \delta n} \right]^2 \quad (2.3)$$

Para  $\delta n \approx 10^{-4}$  obtém-se  $R_F \approx 10^{-9}$ . Numa rede de Bragg existem milhares de transições destas. Assim, é possível ocorrer reflexão total caso cada contribuição das reflexões de Fresnel esteja em fase. As condições em que esta situação de acoplamento ocorre podem ser entendidas, de uma forma qualitativa, utilizando a teoria das redes de difracção em fibras ópticas. Para realizar um estudo quantitativo, é necessário recorrer à teoria dos modos acoplados [3].



## 2.2.1 – Rede de difracção

Uma rede de difracção consiste numa estrutura de fase ou amplitude com dimensões extensas comparativamente com o período de modulação.

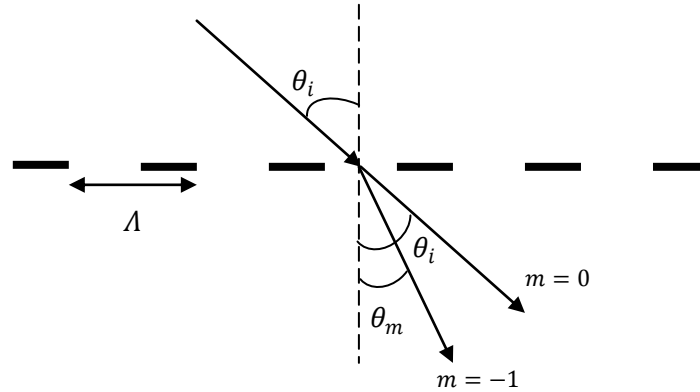


Figura 2.2 - Difracção de uma onda electromagnética por uma rede de difracção [3].

Uma rede de difracção em fibra óptica obedece às mesmas leis que as redes de difracção em espaço livre. Desta forma, o comportamento de uma onda electromagnética que atravessa uma rede de difracção com um determinado ângulo de incidência  $\theta_i$ , pode ser descrito pela equação das redes de difracção:

$$\Lambda(n_m \sin \theta_m - n_i \sin \theta_i) = m\lambda \quad (2.4)$$

onde  $\theta_m$  é o ângulo da onda difractada,  $n_i$  e  $n_m$  são os índices de refracção dos meios das ondas incidente e refractada, respectivamente,  $m$  a ordem de difracção e  $\lambda$  o comprimento de onda da onda incidente. Esta expressão permite calcular apenas os ângulos  $\theta_m$  onde ocorrem máximos de interferência construtiva.

Numa fibra monomodo, a propagação é efectuada perpendicularmente aos planos de índice constante da rede, pelo que se verifica a relação  $\theta_i = -\theta_m = \pi/2$ . Assim, considerando uma difracção de primeira ordem,  $m = -1$ , a expressão (2.4) é simplificada para a condição de Bragg (equação 2.1).

O comprimento de onda de Bragg,  $\lambda_{Bragg}$ , é então dependente, não só do período da rede de difracção como também do índice de refracção efectivo associado ao modo guiado pela fibra, ou seja, dos índices de refracção do núcleo e da baínha. Desta forma  $\lambda_{Bragg}$  será também função de todas as grandezas físicas que possam alterar esses parâmetros interagindo na fibra óptica que contém a rede de difracção de Bragg.

A variação do índice de refracção do núcleo ao longo do eixo longitudinal pode ser descrita pela expressão:

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) + A_p(z) \cdot f \left[ \frac{\Lambda(z)}{\cos(\theta_b)}, z \right] \quad (2.5)$$

onde  $\overline{\delta n_{eff}}(z)$  representa a variação do valor médio da modulação,  $A_p(z)$  descreve a amplitude e o valor médio de modulação, ou seja, a apodização e  $f\left[\frac{\Lambda(z)}{\cos(\theta_b)}, z\right]$  é a função que representa o perfil de modulação, onde  $\Lambda(z)$  representa o período de modulação ao longo da rede, incluindo a aperiodicidade e  $\theta_b$  é o ângulo no caso de uma rede de Bragg inclinada. Em termos de técnicas de gravação de redes de Bragg, grande parte recorrem a interferência óptica. Desta forma, a um maior tempo de exposição está associada uma maior variação da amplitude de modulação. Assim,  $A_p(z)$  pode ser descrito como:

$$A_p(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \cdot v(z), \quad 0 \leq v(z) \leq 1 \quad (2.6)$$

onde  $v(z)$  é a visibilidade das franjas de interferência e depende da qualidade de interferência óptica. A gravação de redes de Bragg por este método promove um perfil de modulação com características sinusoidais. Assim, pode-se escrever:

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + v(z) \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (2.7)$$

onde  $\phi(z)$  descreve a variação do período ao longo da rede. Por esta equação pode-se verificar que a visibilidade não altera o valor médio do índice de refração, apenas altera a amplitude de variação deste.

Nesta expressão temos as seguintes variáveis  $\overline{\delta n_{eff}}(z)$ ,  $v(z)$  e  $\phi(z)$ . No entanto é possível variar outros parâmetros, como por exemplo o ângulo de gravação da rede ou mesmo a disposição espacial de várias redes. Desta forma obtém-se redes de Bragg com diferentes aplicações e propriedades.

## 2.3 – Tipos de Redes de Bragg

Nesta secção serão abordadas vários tipos de redes de Bragg quanto aos seus comportamentos espectrais. Esses comportamentos dependem do perfil de modulação de índice de refração. Este perfil pode ser representado, de um modo geral, por:

$$n(x) = n_0 + \Delta n \quad (2.8)$$

em que  $n_0$  e  $\Delta n$  representam, o índice inicial e a modulação introduzida no núcleo da fibra, respectivamente. De acordo com este parâmetros pode-se, então, distinguir vários tipos de redes.

### 2.3.1 – Redes uniformes

Estas redes tratam-se das mais simples de todas. As propriedades espaciais mantêm-se constantes ao longo do eixo de propagação.

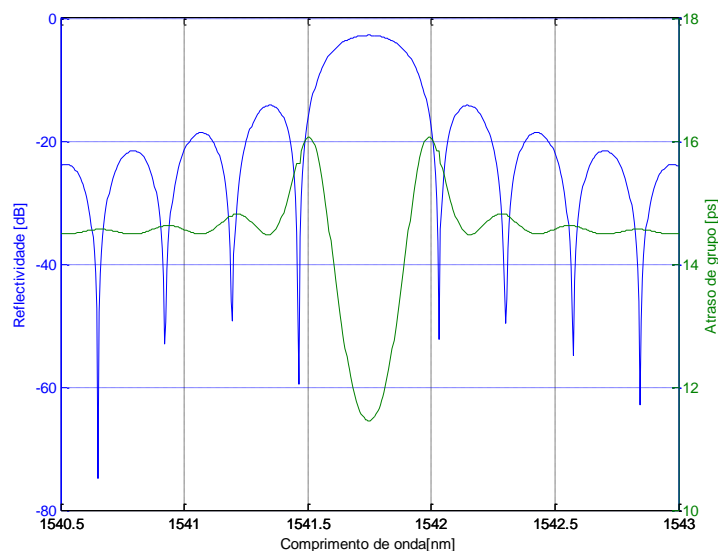


Figura 2.3 - Resposta espectral de uma rede de Bragg uniforme.  $L = 3 \times 10^{-3} \text{m}$ ,  $\Delta n_{eff} = 1.5 \times 10^{-4}$ ,  $\nu = 1$ .



Figura 2.4 - Esquema exemplificativo de uma rede de Bragg uniforme.

Desta forma,  $\overline{\delta n_{eff}}(z)$ ,  $\nu(z)$  e  $\phi(z)$  são constantes e independentes de  $z$ . Embora estes parâmetros sejam constantes, pode-se controlar a refletividade e a largura de banda, variando a amplitude de modulação e o comprimento da rede. A simplicidade de gravação constitui uma vantagem deste tipo de redes, no entanto a presença de lóbulos laterais de elevadas amplitudes no espectro de reflexão é uma enorme desvantagem. Estes lóbulos aparecem devido às fronteiras abruptas entre as redes de Bragg e a própria fibra. Em termos de aplicações este tipo de redes são mais indicados para utilização como sensores devido à sua simplicidade.

### 2.3.2 – Redes apodizadas

A escrita de uma rede de Bragg uniforme ao longo de um determinado comprimento de fibra leva ao aparecimento de lóbulos laterais em torno da ressonância em reflexão correspondente ao comprimento de onda de Bragg. Estes lóbulos laterais, muitas vezes indesejáveis, têm origem na descontinuidade do índice de refração nas extremidades da rede constituindo, dessa forma, uma cavidade Fabry-Pérot. Porém, em diversos casos, as aplicações que usam este tipo de estruturas não são compatíveis com este tipo de resposta espectral pelo facto de recorrerem a várias redes com frequências adjacentes. É, no entanto, possível suprimir os lóbulos laterais através de técnicas de apodização. Os lóbulos laterais das redes uniformes podem ser substancialmente reduzidos se a amplitude de modulação do índice de refração, nas extremidades da rede, iniciar e terminar de uma forma gradual. Esta técnica denomina-se por apodização.

Considerando a expressão 2.7, o controlo da apodização é efectuado através da variação dos parâmetros  $\overline{\delta n_{eff}}(z)$ ,  $\nu(z)$ . A apodização ideal consiste em manter constante o valor médio da modulação e variar apenas a visibilidade das franjas.

Designa-se por compensação DC este tipo de apodização. As funções de apodização mais comuns são a gaussiana, coseno-elevado, tanh, Cauchy.

São então considerados dois tipos de apodização. O primeiro diz respeito à aplicação de apodização apenas às extremidades da rede diminuindo gradualmente a amplitude de modulação do índice e eliminando os lóbulos que aparecem nos comprimentos de onda superiores. Porém, mantém-se a existência de uma estrutura Fabry-Pérot que resulta em lóbulos laterais para comprimentos de onda inferiores [12].

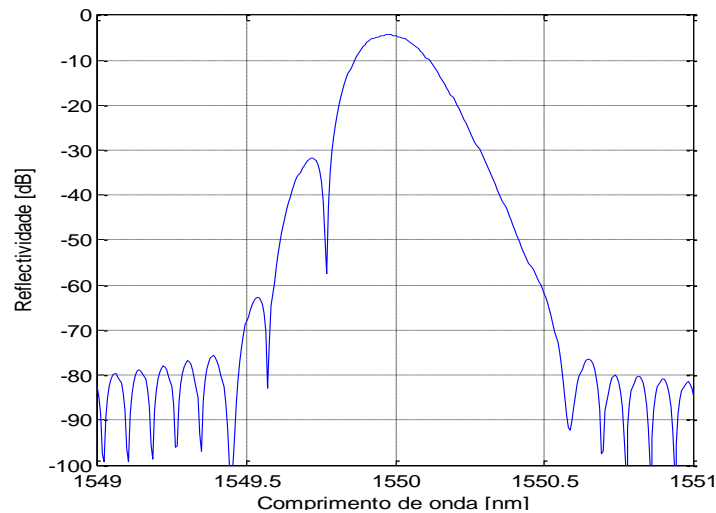


Figura 2.5 - Simulação da resposta espectral de uma rede de Bragg apodizada simples.  $L = 10 \times 10^{-3} m$ ,  $\Delta n_{eff} = 1 \times 10^{-4}$ .

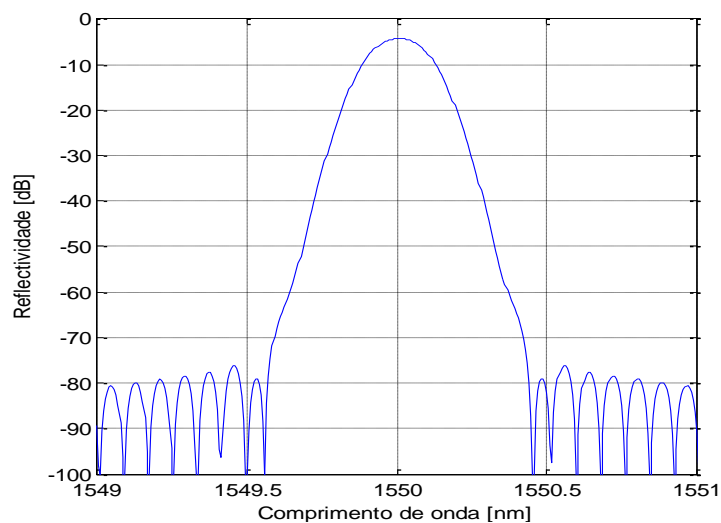


Figura 2.6 – Resposta espectral de uma rede de Bragg com apodização DC.  $L = 3 \times 10^{-3} m$ ,  $\Delta n_{eff} = 1.5 \times 10^{-4}$ .

O segundo tipo de apodização é designado de apodização DC. Neste caso, ambos os lóbulos laterais são suprimidos mantendo um índice de refração médio constante ao longo de todo o comprimento da rede. Como consequência, o espectro em reflexão da rede torna-se simétrico em torno do comprimento de onda de Bragg.

### 2.3.3 – Redes aperiódicas

Este tipo de redes também é conhecido por redes *chirped* (CFBG) e são assim conhecidas devido à variação da condição de ressonância ao longo do seu comprimento. Desta forma, diferentes comprimentos de onda do sinal incidente são reflectidos em diferentes posições da rede permitindo um controlo da curva do atraso de grupo. As redes aperiódicas mais comuns consistem em redes com período de modulação variável ao longo da sua extensão longitudinal. Uma das consequências resulta numa largura de banda maior em comparação com uma rede uniforme. Uma das características mais importantes nas redes aperiódicas é seu atraso de grupo e consequentemente a dispersão.

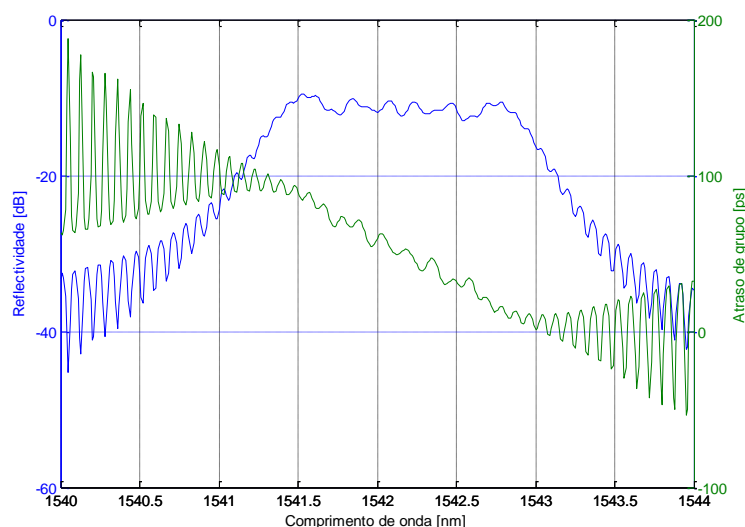


Figura 2.7 – Simulação de uma resposta espectral de uma rede de Bragg aperiódica.  $L = 10 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $\Delta n_{eff} = 1 \times 10^{-4}$ .

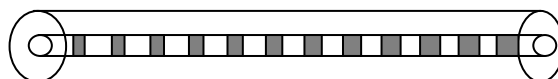


Figura 2.8 – Esquema de uma da modificação de índice de refração para uma rede de Bragg aperiódica.

O tipo de aperiodicidade é controlado pelo parâmetro  $\phi(z)$  da expressão (2.7). A aplicação de aperiodicidade traduz-se em mudanças do atraso de grupo e da largura de banda. Neste tipo de redes a condição de ressonância ocorre para vários comprimentos de onda, assim possuem geralmente uma largura de banda superior relativamente às redes periódicas. Por outro lado, o facto de diferentes comprimentos de onda serem reflectidos em diferentes posições da fibra, origina um atraso de grupo dependente do comprimento de onda. Se a aperiodicidade for linear, o atraso de grupo é também linear. Esta é a propriedade que torna estas redes atractivas para implementar técnicas de compensação de dispersão cromática em sistemas de comunicação por fibra óptica. O período numa rede aperiódica pode ser expresso por um polinómio de grau  $N$  dado por:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Lambda_1 z^2 + \Lambda_2 z^3 + \dots + \Lambda_N z^N \quad (2.9)$$

com  $\Lambda_0$  o período à entrada da rede.

Existe ainda a possibilidade de alterar a condição de ressonância através da variação linear do valor médio do índice de refração ao longo do eixo  $z$ .

### 2.3.4 – Redes *Sinc*

Uma rede com perfil de visibilidade seno cardinal é também conhecida por *sinc* [4]. Este perfil tem a seguinte expressão:

$$v(z) = \left| \text{sinc} \left( \frac{z-L/2}{T} \right) \right| \quad (2.10)$$

onde  $L$  é o comprimento da rede e  $T$  é o período da rede *sinc*. Na gravação de uma rede *sinc*, apenas um número limitado de lóbulos pode ser gravado. Obtém-se assim uma *sinc* truncada. A largura de banda do filtro pode ser controlada através do comprimento da rede e do número de zeros da função *sinc*. A uma maior largura de banda, corresponde um menor período, logo menor é o tamanho da rede. Desta forma, uma rede com elevada largura de banda tem um comprimento pequeno e uma variação do índice de refração elevada.

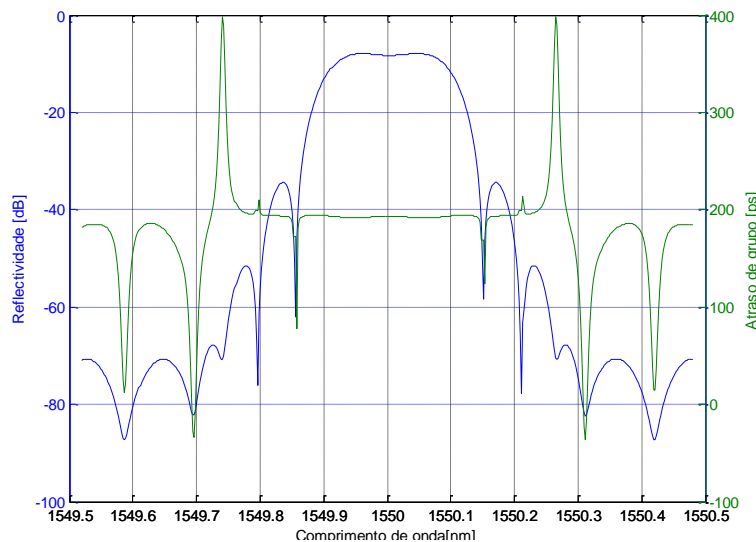


Figura 2.9 – Simulação de uma resposta espectral de uma rede de Bragg *sinc*.  $L = 40 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $\Delta n_{\text{eff}} = 5 \times 10^{-5}$ .

A vantagem deste tipo de redes é que o atraso de grupo permanece constante na banda de passagem. De forma a compensar a limitação do número de lóbulos pode-se apodizar o perfil *sinc* com um perfil gaussiano. Desta forma, a amplitude dos lóbulos laterais é reduzida no entanto, o decaimento das bandas de transição é menor. Este factor constitui uma desvantagem caso se pretenda um filtro o mais rectangular possível. Se se pretender um filtro de ordem menor, pode-se variar a apodização do perfil *sinc* até se obter a ordem pretendida. A apodização do perfil *sinc* denomina-se *shading*. Com esta solução é possível desenhar uma rede gaussiana com sintonia, largura de banda e ordem pretendidas, desde que dentro dos limites do sistema de gravação. Obtém-se desta forma um filtro com características quase ideais, uma vez que a resposta de fase resulta num atraso de grupo praticamente constante.

### 2.3.5 – Redes com deslocamento de fase

Este tipo de redes é caracterizado pela introdução de um desvio de fase na modulação do índice de refração. Este desvio origina uma divisão que resulta na formação de duas redes de Bragg desfasadas entre si que actuam como uma cavidade ressonante. Esse efeito produz uma ressonância muito estreita em transmissão definida num comprimento de onda que aparece contido na largura de banda de rejeição da propriedade espectral da rede de Bragg e determinado pelo valor e localização do desvio de fase.

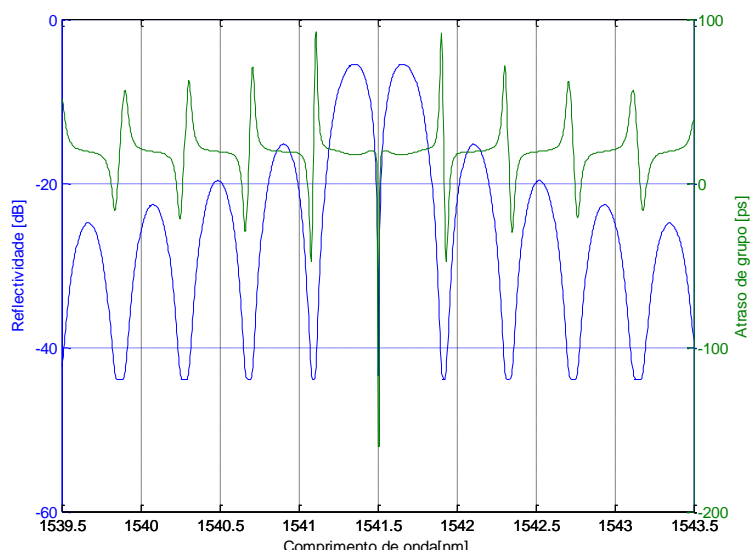


Figura 2.10 – Resposta espectral de uma rede de Bragg com desvio de fase.  $L = 4 \times 10^{-3} m$ ,  $\Delta n_{eff} = 1 \times 10^{-4}$ ,  $v = 1$ .

O comprimento de onda dessa ressonância pode ser sintonizado introduzindo um desvio de fase fixo de  $\pi$  em posições distintas ao longo de toda a extensão da rede ou introduzindo um desvio com uma variação entre 0 a  $2\pi$  situado, especialmente, na posição central da rede [7].

Um dos métodos utilizados na fabricação deste tipo de redes é por exposição UV selectiva após a fabricação da rede [8] e outro é a utilização de uma máscara que tem um desvio de fase e utilização de um feixe por varrimento sobre a máscara de fase. A utilidade destas redes está na possibilidade de atribuição de propriedades espectrais às redes de Bragg que permitem desempenhar funções exclusivas. Um exemplo será a sua utilização como filtro transmissivo para selecção de canais em sistemas baseados em multiplexagem no comprimento de onda (WDM – Wavelength Division Multiplexing).

### 2.3.6 – Redes inclinadas

Considera-se que se está na presença de uma rede inclinada ou angular sempre que o plano da modulação do índice de refração de uma rede de Bragg forma um ângulo com a direcção de propagação da luz.

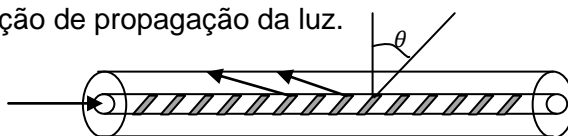


Figura 2.11 – Esquema de uma estrutura referente à modificação de índice de refração para uma rede de Bragg inclinada.

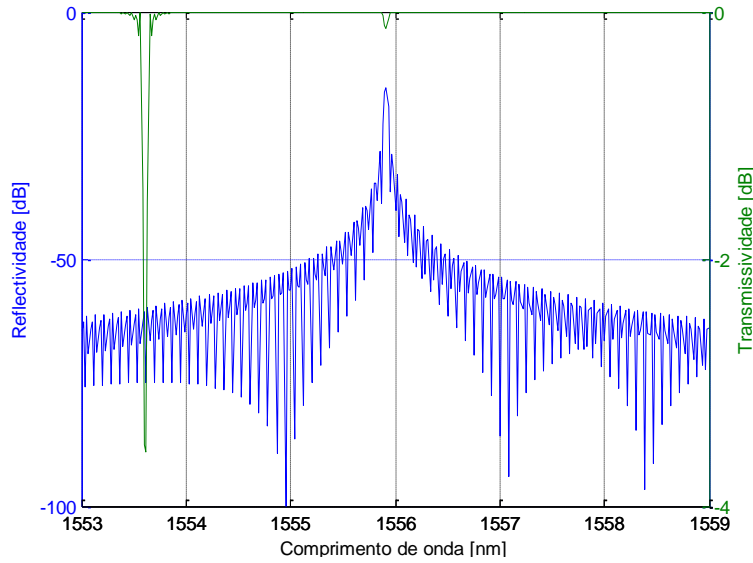


Figura 2.12 – Resposta espectral de uma rede de Bragg inclinada.  $L = 20 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $\Delta n_{eff} = 1 \times 10^{-4}$ ,  $\theta = 5^\circ$ .

Esse ângulo diz respeito ao desalinhamento de perpendicularidade que o padrão de interferência de exposição possui em relação à direção longitudinal da fibra. Assim, vai existir uma componente cuja direção não corresponde à direção de propagação. Ou seja, uma porção de luz vai ser radiada para os modos da bainha na direção de contrapropagação. Se a diferença entre índices de refração do núcleo e bainha não se mostrar suficiente para manter o confinamento dessa porção de luz, a rede vai induzir atenuação por dispersão. Considerando uma modulação de índice com período  $\Lambda$  e a normal à direção de propagação, pode-se definir o ângulo mínimo  $\theta$  que permite o acoplamento para os modos radiativos:

$$\theta = \sin^{-1} \left[ \frac{\Lambda(n_{\text{núcleo}} - n_{\text{bainha}})}{\lambda} \right] \quad (2.11)$$

À medida que o valor do ângulo  $\theta$  aumenta existe um pequeno incremento nas perdas induzidas até, aproximadamente,  $3^\circ$ , valor a partir do qual estas diminuem significativamente. Contudo, esta diminuição é acompanhada por um aumento em extensão da região espectral.

A utilidade destas redes está na capacidade de introduzir perdas por dispersão de forma reproduzível. Este efeito permite, por exemplo, definir atenuações de modo a obter uma resposta espectral complexa desejável por associação em série de várias redes destas [9].

## 2.4 – Técnicas de gravação de redes de Bragg

### 2.4.1 – Introdução

Existem várias técnicas utilizadas para a escrita de redes de Bragg e que podem ser divididas em técnicas interferométricas e técnicas não-interferométricas.



## 2.4.2 – Método por máscara de fase

O método com recurso a uma máscara de fase é o mais comum e um dos mais simples e eficazes na escrita de redes de Bragg em fibras fotossensíveis. Este tipo de máscaras é fabricado a partir de um processo de fotolitografia de elevada resolução consistindo num conjunto de depressões longitudinais na superfície de um substrato de sílica. Actuam como redes de difracção sobre o feixe em transmissão dividindo-o em várias ordens,  $m$ .

A máscara de fase age como um divisor de feixe quando é utilizada em transmissão, a luz  $UV$  é difractada em várias ordens junto à superfície da máscara de fase criando um padrão de interferência que leva à formação das redes de Bragg.

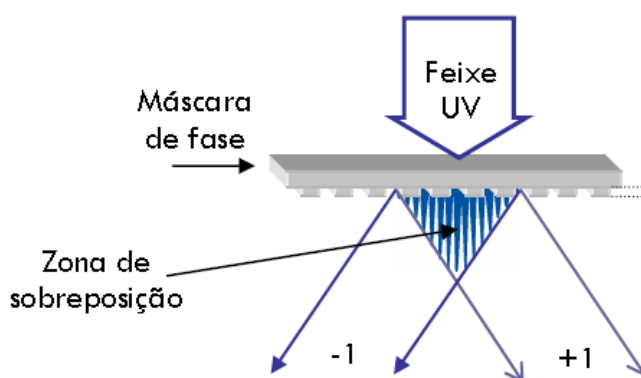


Figura 2.13 – Esquema do processo de geração de franjas de interferências utilizando a técnica da máscara de fase [3].

Existem dois métodos que permitem chegar a este tipo de comportamento. No método de incidência não-normal o feixe transmitido, respeitante à ordem 0, e a ordem -1 apresentam valores máximos [3], situação que corresponde à máxima visibilidade. No método que utiliza a incidência normal existe a supressão do feixe em transmissão fazendo com que as ordens  $\pm 1$  tenham valores máximos [3,11]. Neste processo o padrão de interferência gerado pelas ordens de difracção  $\pm 1$  possui um período  $\Lambda$ , relacionado com o ângulo de difracção  $\theta_m$  pela relação:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2\sin\theta_m} = \frac{\Lambda_{MF}}{2} \quad (2.12)$$

onde  $\Lambda_{MF}$  é o período da máscara de fase. Se a supressão da ordem 0 for completa, o padrão de interferência na fibra possui um período com um valor de metade do período relativo à máscara de fase e é independente do comprimento de onda da fonte  $UV$ .

A principal vantagem associada à utilização desta técnica é a baixa coerência necessária por parte da fonte  $UV$  para a formação do padrão de interferência e a boa reprodutibilidade no processo de escrita para se obter comprimentos de onda de Bragg específicos.

Uma vez que o período do padrão de interferência gerado pela sobreposição dos feixes associados às ordens de difracção depende apenas do período da máscara de fase, a fabricação de redes de Bragg a comprimentos de onda bastante separados só é possível através do recurso a máscaras de fase diferentes.

A fibra deve estar posicionada logo a seguir à máscara de fase, para que a parte onde se pretende gravar a rede esteja incluída na zona de sobreposição das ordens difractadas. Esta sobreposição origina franjas de interferência, que irão formar as redes de Bragg com um período  $\Lambda = \Lambda_{MF}/2$ . No caso da incidência normal, se a intensidade da radiação for muito elevada, poderá ocorrer interferência da ordem 0, sendo o período das franjas igual ao da máscara de fase. É importante também ter em conta a coerência espacial do laser que deve ser superior à distância entre a máscara de fase e do núcleo da fibra. Em relação à coerência temporal, não é tão importante nesta técnica, visto que o percurso óptico das duas ordens é semelhante.

A fibra não deve estar em contacto com a máscara uma vez que esta pode ficar danificada.

### 2.4.3 – Interferómetro por divisão de amplitude

A gravação de redes de Bragg pode ser efectuada por exposição transversal. Utiliza-se um interferómetro por divisão de amplitude. Podemos ver a representação desta técnica na Figura 2.14.

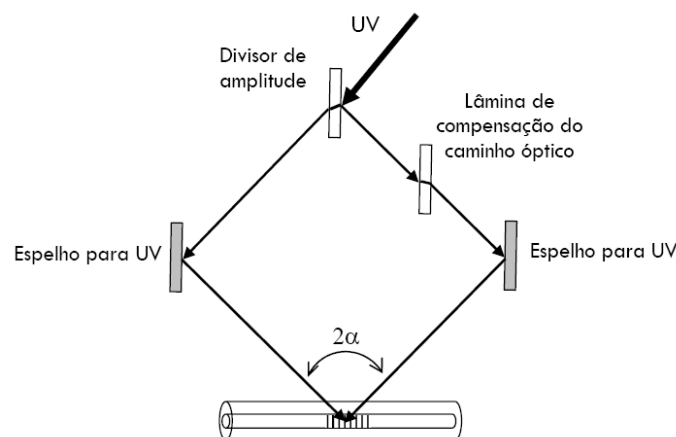


Figura 2.14 - Montagem experimental para a fabricação de redes de Bragg utilizando um interferómetro por divisão de amplitude [3].

Como se pode observar pela Figura 2.14, o feixe UV é dividido em dois, com amplitudes idênticas, através do divisor de amplitude. Estes dois feixes são reflectidos por espelhos próprios para a emissão ultravioleta e vão recombinar-se no núcleo da fibra formando um ângulo de  $2\alpha$  entre eles criando assim um padrão de interferência. O período das franjas de interferência,  $\Lambda$ , é dado por:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2n_{\text{eff}} \sin(\alpha)} \quad (2.13)$$

Comparando este método com o método da máscara de fase no que diz respeito às expressões obtidas, pode-se concluir que é possível gravar redes com comprimentos de onda de Bragg entre valores próximos de  $\lambda_{UV}$  até ao infinito (quando  $\alpha = 0$ ) o que torna este método mais flexível. Neste método é necessário ter cuidado com os factores externos, nomeadamente as vibrações e turbulência do ar, uma vez que podem

deteriorar significativamente a gravação. Em relação ao laser, se tiver baixa coerência temporal, é necessário corrigir a diferença de percursos ópticos provocada pelo divisor de amplitude.

#### 2.4.4 – Método por varrimento da máscara de fase

Esta técnica, que tanto pode ser utilizada na gravação por máscara de fase, como por interferómetro, consiste na utilização de um varrimento do feixe laser no plano de gravação. Se todo o sistema, com excepção do feixe laser, permanecer estático, o efeito é o mesmo que gravar com um feixe de diâmetro igual ao da amplitude de varrimento, para a mesma densidade de potência. Assim, o comprimento da rede será limitado pela amplitude de varrimento, pela largura dos espelhos e/ou pelo comprimento da eventual máscara de fase utilizada. No entanto, em aplicações onde são necessárias redes extremamente longas, como na compensação da dispersão, torna-se necessário gravar por outro método que permita a gravação de redes sem as limitações referidas anteriormente. Uma das formas de torner essa limitação consiste em gravar sequencialmente um conjunto de redes adjacentes na fibra. Caso a gravação seja efectuada com uma máscara de fase fixa, apenas se conseguirá gravar redes longas com o comprimento de onda definido pela máscara de fase. Para contornar essa situação, pode-se utilizar um interferómetro para gravar um conjunto sequencial de redes com o comprimento de onda desejado. Assim, é possível programar o controlador dos estágios para ajustar o interferómetro em função da posição da fibra. Esta técnica tem algumas exigências do ponto de vista técnico, uma vez que necessita também de um ajuste da posição da fibra, para que esta se mantenha na zona de sobreposição das duas ordens.

#### 2.4.5– Método por colagem (*stitching*)

Na implementação de um sistema de escrita de redes de Bragg avançadas, uma forma de conseguir a escrita dessas redes é utilizando um método que permita o controlo da variação do índice de refração através do tempo de exposição de um laser UV, sendo que a fase relativa entre as exposições é ajustada por um estágio de translação de elevada precisão.

É necessário lembrar que a apodização consiste na variação da média do índice de refração efectivo e que a visibilidade é a amplitude da variação sinusoidal do índice de refração efectivo. O índice de refração efectivo numa fibra depois de uma exposição é dada por:

$$n_{eff} = \begin{cases} n_{eff} + \frac{v}{2} \left( \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) + 1 \right) & , 0 \leq z \leq L_{exp} \\ n_{eff} & , z > L_{exp} \end{cases} \quad (2.14)$$

onde  $v$  é a visibilidade,  $L_{exp}$  é o comprimento de cada exposição e  $n_{eff}$  o índice de refração sem qualquer perturbação. O valor médio de uma exposição é  $n_{eff} + \frac{v}{2}$ . Se

uma rede tem um comprimento de  $L = N * L_{exp}$ , onde N é o número total de exposições, o índice de refração é dado por:

$$n_{eff}(z) = n_{eff} + \sum_{k=1}^N \frac{v_k}{2} \left( \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + z_k\right) + 1 \right) \tag{2.15}$$

Em que  $v_k$  é a visibilidade da secção  $k^{th}$  e  $z_k = -L_{exp}x(k - 1)$ . O valor médio do índice de refração é:

$$\overline{n_{eff}}(z) = n_{eff} + \frac{v_k}{2} \tag{2.16}$$

A fim evitar deslocamentos de fase não desejados, duas exposições consecutivas devem realizar-se em fase. No início de uma secção, o índice de refração efectivo é  $n_{eff} + \frac{v_k}{2}$  e no fim é  $n_{eff} + \frac{v}{2} \left( \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} L_{exp}\right) + 1 \right)$ . Deste modo, a continuidade da fase entre exposições é garantida se cada exposição possuir  $L_{exp} = \Lambda * N_{exp}$ , sendo  $N_{exp}$  um valor inteiro positivo.

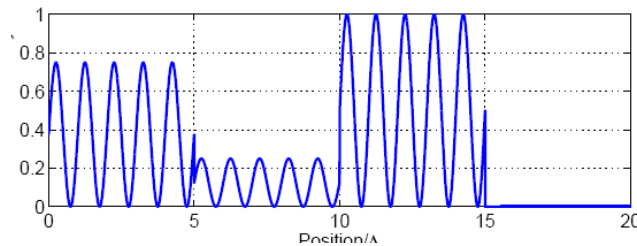


Figura 2.17 – Quatro secções de uma rede de Bragg. Cada exposição tem comprimento de cinco períodos. As visibilidades para cada secção são 0.75, 0.25, 1 e 0 [5].

Assim não haverá problemas nas transições de fase, contudo, a variação da visibilidade implica a variação da apodização que representa uma séria limitação aquando do desenho de filtros ópticos, porque a variação média do índice de refração efectivo resulta numa distorção da resposta espectral. Isto é ilustrado na Figura 2.18.

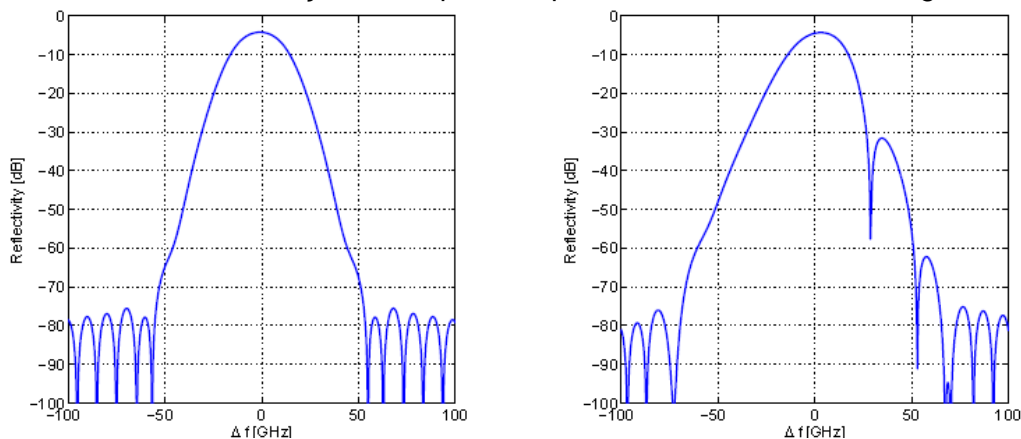


Figura 2.18 – Reflectividade de duas redes de Bragg. (a) Constante de apodização e visibilidade gaussiana; (b) Mesma visibilidade e a apodização tem um perfil gaussiano.  $\delta n_{eff} = 10^{-4}$  e  $L = 10\text{mm}$  [5].

De acordo com este método, uma secção tem uma variação do índice de refracção efectivo de:

$$n_{eff}(z) = n_{eff} + \frac{\overline{\delta n_{eff}}}{2} \left( \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) + 1 \right) + \frac{\overline{\delta n_{eff}}}{2} \left( \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi_k\right) + 1 \right) \quad (2.17)$$

onde  $\frac{\overline{\delta n_{eff}}}{2}$  é a média da variação do índice de refracção efectivo induzida por cada exposição,  $\phi_k$  a diferença de fase aplicada na  $k^{ésima}$  secção, e  $z_k \leq z \leq z_k + L_{exp}$ . A expressão derivada ignora as transições entre as duas secções e a equação acima pode ser escrita como:

$$n_{eff}(z) = n_{eff} + \frac{\overline{\delta n_{eff}}}{2} \left( \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi_k\right) + 2 \right) \quad (2.18)$$

Considerando as regras trigonométricas tem-se:

$$n_{eff}(z) = n_{eff} + \frac{\overline{\delta n_{eff}}}{2} \left( 2 \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \frac{\phi_k}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_k}{2}\right) + 2 \right) \quad (2.19)$$

$$= n_{eff} + \overline{\delta n_{eff}} \left( \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \frac{\phi_k}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_k}{2}\right) + 1 \right) \quad (2.20)$$

E o valor médio de cada secção é dado por:

$$\overline{n_{eff}}(z) = n_{eff} + \overline{\delta n_{eff}} \quad (2.21)$$

Por conseguinte, é constante ao longo da rede de Bragg. A visibilidade é dada por:

$$v = \overline{\delta n_{eff}} \cos\left(\frac{\phi_k}{2}\right) \quad (2.22)$$

É útil expressar a diferença de fase com a dependência do período:

$$\frac{\phi_k}{2} = \Delta z_k \frac{\pi}{\Lambda} \quad (2.23)$$

Onde  $\Delta z_k$  é o deslocamento da segunda exposição para a primeira.

Do mesmo modo considera-se que cada exposição tem um comprimento  $L_{exp} = N_{exp} * \Lambda$ . No início e no final de cada secção, o índice de refracção efectivo, é dado por:

$$n_{eff}(z = 0) = n_{eff}(z = L_{exp}) = n_{eff} + \overline{\delta n_{eff}} \left( \sin\left(\frac{\phi_k}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_k}{2}\right) + 1 \right) \quad (2.24)$$

A equação (2.24) mostra que a fase de cada secção depende da visibilidade. Duas secções consecutivas estão em fase apenas se a sua visibilidade for a mesma. Por conseguinte de forma a ter duas secções em fase consecutivas um factor  $\Gamma$  tem que ser considerado:

$$\frac{\phi_{k+1}}{2} + \Gamma_{k+1} = \frac{\phi_k}{2} \quad (2.25)$$

Usando a expressão (2.23), o factor de correcção pode ser escrito como:

$$\Gamma_{k+1} = \frac{\pi}{\Lambda} (\Delta z_k - \Delta z_{k+1}) \quad (2.26)$$

Um desfaseamento entre duas secções pode ser induzido pela segunda secção, deslocando a segunda para um dado valor  $\Delta z_{k,PS}$ :

$$\phi_{k,PS} = 2\pi \frac{\delta z_{k,PS}}{\Lambda} \quad (2.27)$$

Com as expressões derivadas é possível descrever o algoritmo do processo de escrita. O deslocamento  $k^{th}$  do estágio de translação é dado por:

$$\Delta z_k = \begin{cases} L_{exp} - \delta z_{k-1,v} + \Gamma_k + \delta z_{k,PS} & , k \text{ é par} \\ \delta z_{k,v} & , k \text{ é ímpar} \end{cases} \quad (2.28)$$

Onde  $L_{exp}$  é o comprimento de cada exposição,  $L_{exp} = N_{exp} * \Lambda$  e  $N_{exp}$  é o número de períodos  $\Lambda$  por exposição.  $\delta z_{k,v}$  pode ser obtido a partir de expressões (2.19) e (2.20):

$$\delta z_{k,PS} = \frac{\Lambda}{\pi} \arccos(v_k) \quad (2.29)$$

Onde  $v_k$  é a visibilidade normalizada da secção  $k$ . Tal como o factor de correcção  $\Gamma_k$  está associado para a posição, segundo a expressão (2.20), a expressão original (2.26) precisa de ser normalizada para  $2\pi/\Lambda$ .

Por conseguinte:

$$\Gamma_k = \frac{\delta z_{k-1,v} - \delta z_{k,v}}{2} \quad (2.30)$$

$\delta z_{k,PS}$  pode ser derivada a partir de equação 2.27.

O algoritmo funciona da seguinte maneira. Para iniciar a secção  $k^{th}$ , primeiro é preciso deslocar a máscara de fase a uma distância igual a uma exposição de comprimento  $L_{exp}$ . O deslocamento  $-\delta z_{k-1,v}$  é necessário para colocar a primeira exposição da  $k^{ésima}$  secção em fase com a primeira exposição da secção  $k - 1$ . O factor de correcção põe a secção  $k$  em fase com a secção  $k - 1$ . Os saltos de fase (phase shifts) são então adicionados através de  $\Delta z_{k,PS}$ . Esses steps de deslocamento dados nas exposições ímpares são utilizados para definir a fase correcta da actual secção. As exposições pares definem a visibilidade. Usando as expressões acima, (2.28) pode ser simplificada em:

$$\Delta z_k = \begin{cases} N_{exp} \Lambda - \frac{\delta z_{k-1,v} - \delta z_{k,v}}{2} + \delta z_{k,PS} & , k \text{ é par} \\ \delta z_{k,v} & , k \text{ é ímpar} \end{cases} \quad (2.31)$$

O método Stitching é ilustrado na Figura 2.19. Cada exposição tem um comprimento de  $L_{exp} = 2\Lambda$ . A rede de Bragg é composta por três secções, com uma visibilidade normalizada de 0.25, 0.75 e 1. Um salto de fase de  $\pi$  está definido na terceira secção. Pode ser visto que, embora a primeira exposição de cada secção não se encontra em fase com a rede de Bragg ideal, a segunda exposição permite fasear correctamente cada secção.

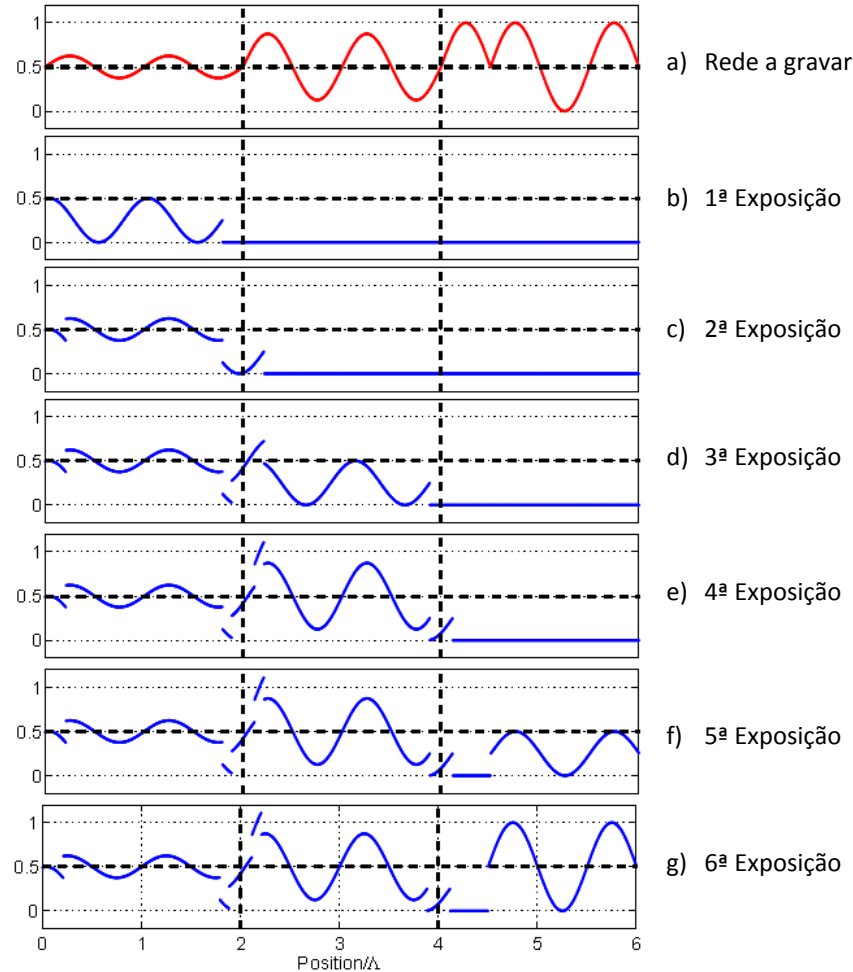


Figura 2.19 – Exemplo do método Stitching. a): rede de Bragg a gravar. b), c), d), e), f) e g): primeira até sexta exposição. O eixo vertical representa a visibilidade normalizada [5].

A Figura 2.19 mostra também os erros Stitching na transição entre duas secções. Estes erros são intrínsecos ao método e a sua amplitude depende da variação de visibilidade de uma secção para outra. Há dois casos extremos. Se a visibilidade não varia entre duas secções, não existem teoricamente erros. Usando a expressão (2.28) e considerando que  $\delta z_{k-1,v} = \delta z_{k,v}$ , tem-se:

$$\Delta z_k = \begin{cases} N_{exp} \Lambda - \delta z_{k,v} + \delta z_{k,PS} & , k \text{ é par} \\ \delta z_{k,v} & , k \text{ é ímpar} \end{cases} \quad (2.32)$$

Assim, o processo de escrita não depende da secção  $k - 1$ , garantindo a continuidade entre secções.

O outro caso é o extremo oposto do primeiro: a variação da visibilidade normalizada é unitária. Neste caso, o comprimento de erro é mais elevado,  $\Lambda/2$ . Ambos os casos são ilustrados na Figura 2.20.

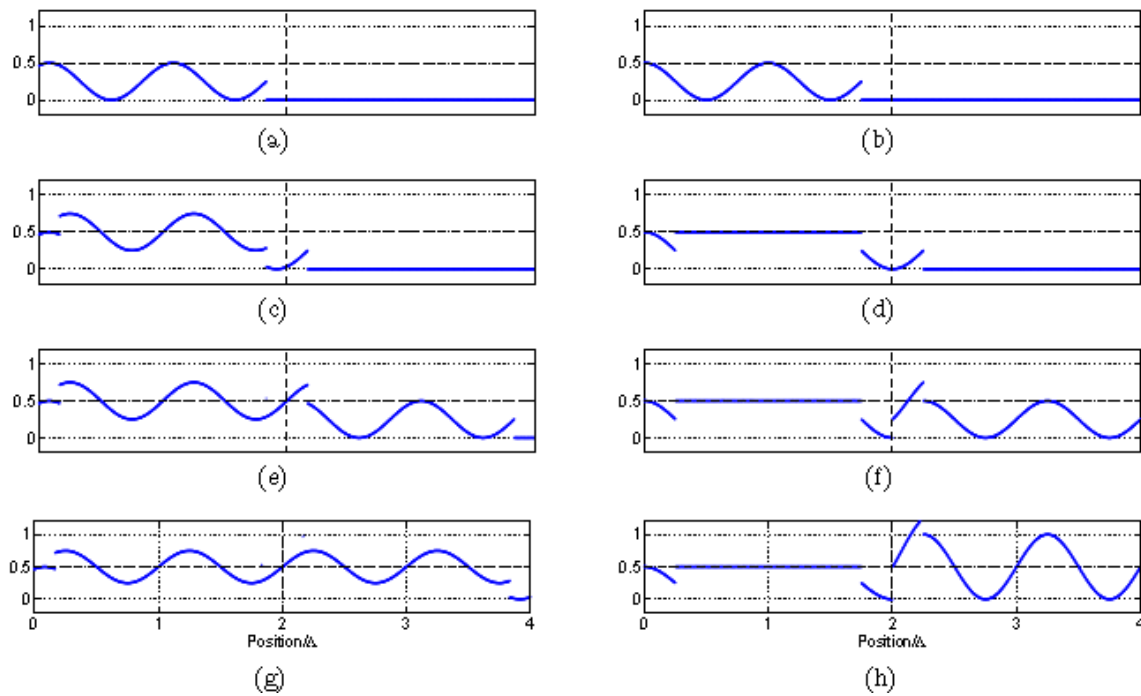


Figura 2.20 – Casos extremos de erros de *Stitching*. (a), (c), (e) e (g): duas secções com igual visibilidade normalizada de 0.5. (b), (d), (f) e (h): duas secções com visibilidade normalizada de 0 e 1. As exposições são feitas do topo para baixo. Não há deslocamento de fase [5].

O impacto dos erros é em geral desprezável. Dado que  $N_{exp}$  é geralmente superior a dois, existem mais períodos correctamente escritos do que erros. No entanto, embora existiam mais erros para valores abaixo de  $N_{exp}$ , são esperados que esses erros sejam baixos, uma vez que para pequenas secções  $v_k \simeq v_{k-1}$ .

O sistema de escrita de redes de Bragg implementado apresenta algumas limitações devido a erros do equipamento. Uma das principais fontes de erro é o posicionador. O estágio de translação tem uma precisão de cerca de  $1\text{ nm}$ . A dependência visibilidade em relação ao estágio de translação é dado em (2.22) e (2.23). Daí, para um período de  $\Lambda$ , existem  $\Lambda/2\xi$  valores possíveis de visibilidade, onde  $\xi$  é a precisão do posicionador. Para o caso implementado  $\xi = 1\text{ nm}$ . Portanto, por um período de  $\Lambda = 542\text{ nm}$ , 271 valores de visibilidade são possíveis. Isso deve ser levado em conta quando se simula a resposta de acordo com a precisão do estágio de translação. O impacto da amplitude de discretização e comprimento da exposição é ilustrado na Figura 2.21. A amplitude de discretização imposta por  $\xi = 1\text{ nm}$  não representa qualquer problema para a resposta, uma vez que existem formas de evitar a degradação da



visibilidade. No entanto, um grande comprimento de exposição leva a uma degradação da visibilidade. Lóbulos laterais com maior intensidade podem ser observados na resposta em frequência. A vantagem de ter altos comprimentos de exposição é que para o mesmo tamanho de uma rede de Bragg, é realizado um menor número de exposições. Isso resulta num processo de escrita mais rápido.

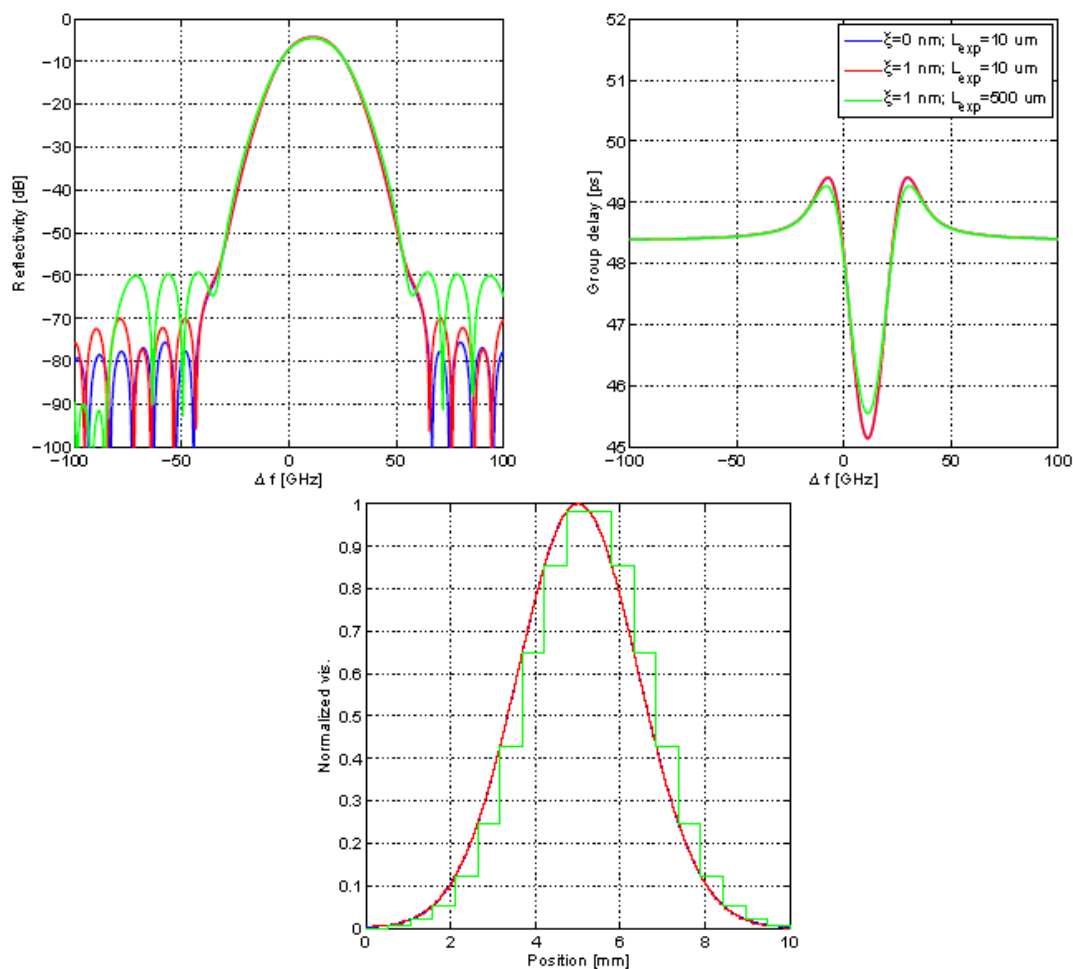


Figura 2.21 – Rede de Bragg com visibilidade gaussiana e apodização uniforme [5].

Este método foi desenvolvido em MatLab [5], com a finalidade de se obter um ficheiro com os *steps* de uma rede de Bragg pretendida. O termo *step* diz respeito aos valores de deslocamento do estágio de translação. Esses *steps* serão interpretados pelo programa em LabVIEW que fará o estágio de translação deslocar-se *step* a *step*. Através da implementação deste método é possível gravar redes uniformes, redes com deslocamento de fase, redes *sinc*, redes gaussianas, etc. Para o caso de redes uniformes com deslocamento de fase é possível definir num ficheiro de entrada do MatLab a posição que se quer o(s) deslocamento(s) de fase, bem como o valor desse deslocamento de fase. Da mesma forma, através da introdução de deslocamentos de fase graduais entre várias redes uniformes, é possível a escrita de redes *chirped*, ou seja, através da definição do perfil de fase, é possível gravar redes com uma resposta em frequência semelhante a redes aperiódicas. Por exemplo, uma variação quadrática da

fase entre sub-redes consecutivas vai originar uma resposta linear no atraso de grupo, ou seja, equivalente a uma rede com chirp linear.

## Capítulo 3

# Implementação de sistema de escrita de redes de Bragg

### 3.1 – Introdução

Nos últimos anos as redes de Bragg foram estudadas e aplicadas como elementos sensores para sistemas de monitorização, capazes de medir variações de intensidade, temperatura, pressão, deformação mecânica, flexão, etc. No que diz respeito às telecomunicações as redes de Bragg em fibra óptica ganharam particular atenção devido à sua versatilidade, propriedades únicas de filtragem, facilidade de utilização e potencial imenso de integração com outros componentes ópticos. Desempenham diversas funções nas mais variadas aplicações ligadas a esta área, sendo muito utilizados em sistemas DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). São parte integrante de dispositivos de equalização de ganho (GFF- Gain Flattening Filters), de multiplexadores ópticos do tipo add/DRop e actuam como elementos ópticos para compensação de dispersão.

Devido às exigências do progresso da tecnologia, a necessidade deste tipo de dispositivos para o uso nestas diversas aplicações é cada vez maior. É neste contexto que foi elaborado este setup de escrita de redes de Bragg para responder de forma eficiente e eficaz às exigências de flexibilidade e reprodutibilidade requeridas para tais aplicações.

Como já foi discutido no capítulo anterior, existem vários processos de gravação de redes de Bragg. As técnicas escolhidas foram por máscara de fase, por varrimento e o método de colagem (*Stitching*), sendo esta última mais utilizada. A escolha deste método utilizado é justificada pelo facto de este método permitir controlar com elevada precisão os perfis de apodização e de permitir a gravação de redes com comprimento muito superior ao comprimento das máscaras de fase.

### 3.2 – Processo de alinhamento da máscara de fase com a fibra óptica e fundamentos da respectiva distância

Um dos pontos cruciais para o sucesso na escrita de redes de Bragg por máscara de fase é o alinhamento da máscara de fase com a fibra óptica. Esse alinhamento deverá ser o mais preciso possível e a distância da máscara de fase à fibra deverá ser a mínima possível, sem que haja contacto. Por isso, optou-se por um sistema de aquisição de imagem de forma a conseguir um melhor alinhamento dado ser um ponto fulcral deste sistema.

Para este processo foi efectuado uma análise qualitativa acerca da câmara e lente a usar de forma a obter uma imagem que facultasse uma ampliação considerável do conjunto máscara de fase - fibra óptica.

Visto que a fibra óptica pronta a gravar tem um diâmetro na ordem  $125\ \mu\text{m}$ , foi adoptado uma câmara de alta resolução monocromática com resolução  $1280 \times 1024$  pixéis. A opção por monocromática pelo facto de uma câmara a cores não ter vantagem em relação à monocromática para esta aplicação, em termos de qualidade da imagem.

A câmara possui uma resolução vertical de 1024 pixéis com  $5.2\ \mu\text{m}$  cada, então o diâmetro da fibra ocupa cerca de 25 pixéis na imagem. A imagem obtida, com  $1280 \times 1024$  pixéis, poderia ser visualizada com equivalência de pixéis 1:1 ("sem ampliação") no ecrã do computador, correspondendo o diâmetro da fibra a cerca de  $5.75\text{mm}$  medidos no ecrã (assumindo que o *dot pitch* do ecrã é de  $0.25\text{mm}$ ). A ideia é ampliar a imagem da fibra ( $125\ \mu\text{m}$ ) para que se possa ter acesso a uma imagem com um campo de visão entre  $10$  e  $13\text{mm}$ . Uma vez que área horizontal do sensor da câmara é  $6.6\text{mm}$  tem-se pela expressão (3.1) a ampliação da lente:

$$Amp = \frac{AS}{CV} = \frac{6.6}{11.5} = 0.57X \quad (3.1)$$

Ou seja, uma lente com ampliação de  $0.6X$ . Outro factor a ter em conta é a distância de trabalho, isto é, dependendo da ampliação de cada lente, a distância de trabalho varia. Também foi tido em conta esse factor, uma vez que a distância entre a lente e o conjunto máscara de fase + fibra óptica não pode ser nem muito grande, pelo facto de o sistema estar dentro de uma caixa de acrílico, e nem muito pequena, para se ter espaço de manuseamento na colocação da fibra nas garras magnéticas. Foi escolhida uma lente telecêntrica uma vez que eliminam mais facilmente erros de paralaxe.

É possível calcular o comprimento de gravação ( $L$ ) tendo em conta a distância da máscara de fase à fibra óptica, a largura da slit, que define a largura do feixe laser (Figura 3.1).  $F$  corresponde à abertura da slit,  $c$  é a distância da máscara de fase à fibra óptica,  $a$  é o valor máximo que pode variar a distância entre a máscara de fase à fibra,  $d$  é a distância da fibra óptica até à normal do limite da zona de sobreposição,  $L_{exp}$  é o comprimento exacto que a rede será gravada e o  $\theta$  é o ângulo da onda difractada com a normal.

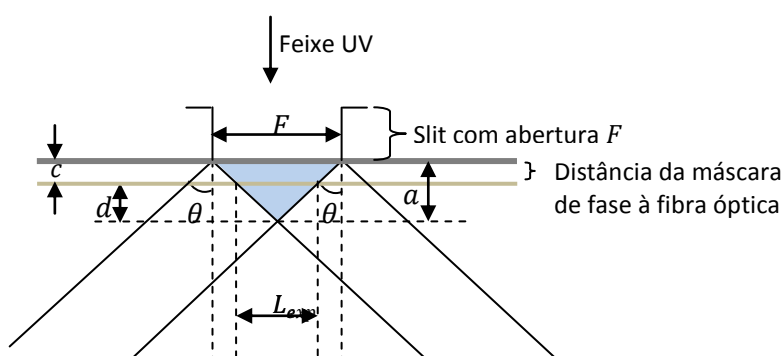


Figura 3.1 – Esquema geométrico da relação entre a abertura da slit com a distância da máscara de fase à fibra óptica.

A máscara de fase tem de estar a uma distância da fibra óptica de  $0 < z \leq a$ , uma vez que a máscara de fase não pode estar em contacto com a fibra nem fora da zona de sobreposição. Assim pode-se obter através de relações trigonométricas o seguinte:

$$\tan\theta = \frac{L/2}{d} \quad (3.2)$$

Por conseguinte,

$$L_{exp} = 2 * \tan\theta * d \quad (3.3)$$

Sabe-se que  $c + d = a$ , ou seja,  $d = a - c$ . Então substituindo na expressão (3.3) tem-se:

$$L_{exp} = 2 * \tan\theta * (a - c) \quad (3.4)$$

Sabe-se também que a relação entre  $F$  e  $a$  é dada por:

$$\tan\theta = \frac{F/2}{a} \quad (3.5)$$

Se substituir na equação (3.4), a equação (3.5) obtém-se:

$$L_{exp} = 2 * \tan\theta * \left( \frac{F}{2*\tan\theta} - c \right) \quad (3.6)$$

Que simplificada é dada por:

$$L_{exp} = F - 2 * \tan\theta * c \quad (3.7)$$

Para a determinação de ângulo  $\theta$ , recorrendo à equação para as redes de difracção dada em (2.4), considerando  $m = 1$  e assumindo uma incidência normal ( $\theta_i = 0$ ), tem-se:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda_{UV}}{\Lambda_{MF}}\right) \quad (3.8)$$

Daí o comprimento da rede gravada na fibra depende da abertura da slit, da distância entre máscara de fase e a fibra óptica e do ângulo  $\theta$ . De notar que o ângulo  $\theta$  depende do período da máscara de fase que se usa. O comprimento da rede gravada é sempre menor à abertura da slit. Por exemplo, para uma máscara de fase de período  $\Lambda_{MF} = 1065nm$ , com uma distância em relação à fibra óptica de  $c = 70\mu m$  e slit com abertura de  $F = 200\mu m$ , obtém-se na realidade uma rede com  $L_{exp} = 166\mu m$ .

### 3.3 – Montagem experimental

A concepção do sistema desenvolvido foi baseado com um objectivo bem definido, que é fabricar redes de Bragg de forma automática. Assim, é possível de uma forma consideravelmente simples actuar no sistema de modo a se obter, sistematicamente, redes com propriedades reprodutíveis.

A montagem experimental é constituída por um conjunto de componentes que abrange genericamente, laser, estágios de precisão elevada com passos na ordem de micrómetros e/ou nanómetros por actuação motorizada, um conjunto óptico de direccionamento de feixe, um sistema de aquisição de imagem para além de material

mecânico necessário à implementação do sistema. Na Figura 3.2 é esquematizado de uma forma simples o sistema montado.

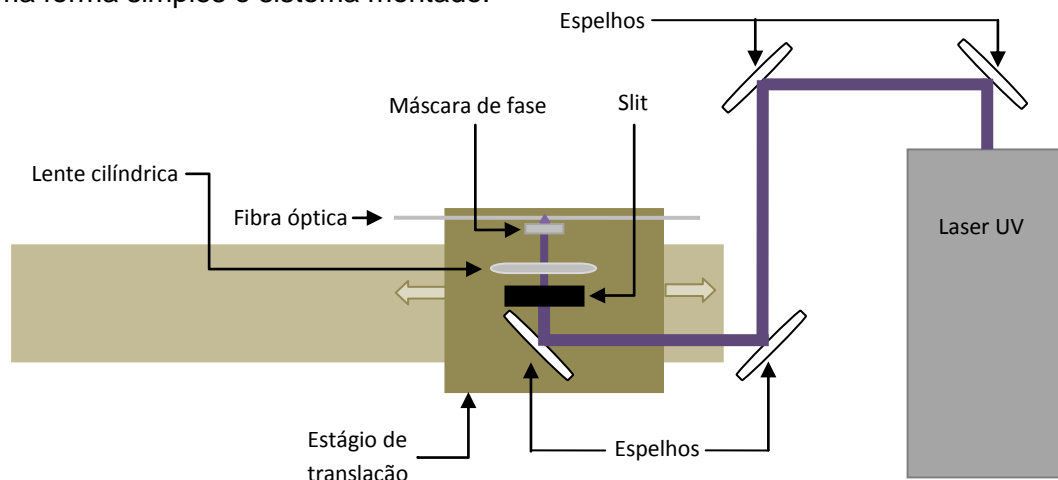


Figura 3.2 – Esquema geral da montagem experimental utilizada para a escrita de redes de Bragg.

De seguida são enumerados os principais componentes utilizados na montagem deste sistema.

- Laser *BraggStar Industrial* de excímeros pulsado que emite em 248nm da *Choerent*, sistema de refrigeração do laser.
- Mesa óptica *Newport RS4000* com comprimento de 3m e largura de 1.5m.
- Estágio de translação *Aerotech ABL20100* com curso de 1m e passo mínimo de 10nm.
- Amplificador *Aerotech* de 4 eixos para alimentação de estágios da *Aerotech*.
- Dois estágios de translação *MFA-CC* da *Newport* com curso de 25 mm e com passo mínimo de 0.05  $\mu\text{m}$ ; estágio de translação *ILS-PP* da *Newport* com curso de 150 mm e com passo mínimo de 0.5  $\mu\text{m}$ ; controlador *XPS-C8 Newport* com 8 eixos para dispositivos monitorizados.
- Plataforma *Newport TILT* de três eixos.
- Estágio de 3 eixos da *Melles Griot* com curso de  $\pm 4$  mm com resolução de 1.5 $\mu\text{m}$ .
- *Slit* da *Melles Griot* com largura ajustável de 0 a 4mm com resolução de 1.5 $\mu\text{m}$ .
- Câmara *USB Edmund Optics* de alta resolução com aquisição monocromática e lente telecêntrica 0.6X *Edmund Optics*.
- Duas garras magnéticas, suportes, espelhos, lente de focagem (cilíndrica), máscara de fase, Fibra óptica fotossensível.
- Analisador de espectros ópticos (ONA – Optical Network Analyzer) com resolução abaixo do nanómetro.

Uma grande parte destes componentes está sobre a mesa óptica, que se encontra suspensa através de ar comprimido para minimizar as perturbações mecânicas. Além disso, parte do conjunto encontra-se protegido de poeiras e vibrações de ar por uma caixa de acrílico.

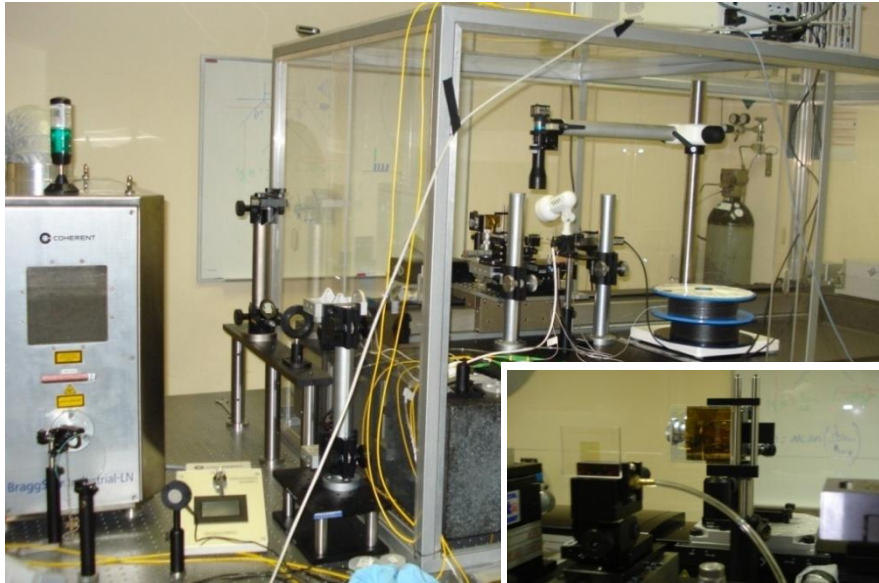


Figura 3.3 – Imagem do sistema de gravação de redes de Bragg.

A fibra óptica utilizada na escrita das redes de Bragg é presa pelas garras magnéticas cuja altura é determinada pelos postes com rack, em que um poste suporta um estágio de translação monitorizado *MFA-CC* para permitir a aplicação de tensão mecânica à fibra e o outro poste suporta um estágio de três eixos manual para necessários ajustes de alinhamento da fibra. O outro estágio de translação *MFA-CC*, que contém o suporte da máscara de fase, está colocado sobre uma plataforma *TILT* de três eixos para a escrita de redes de Bragg inclinadas. O estágio de translação *MFA-CC* tem como função aproximar a máscara de fase à fibra óptica.

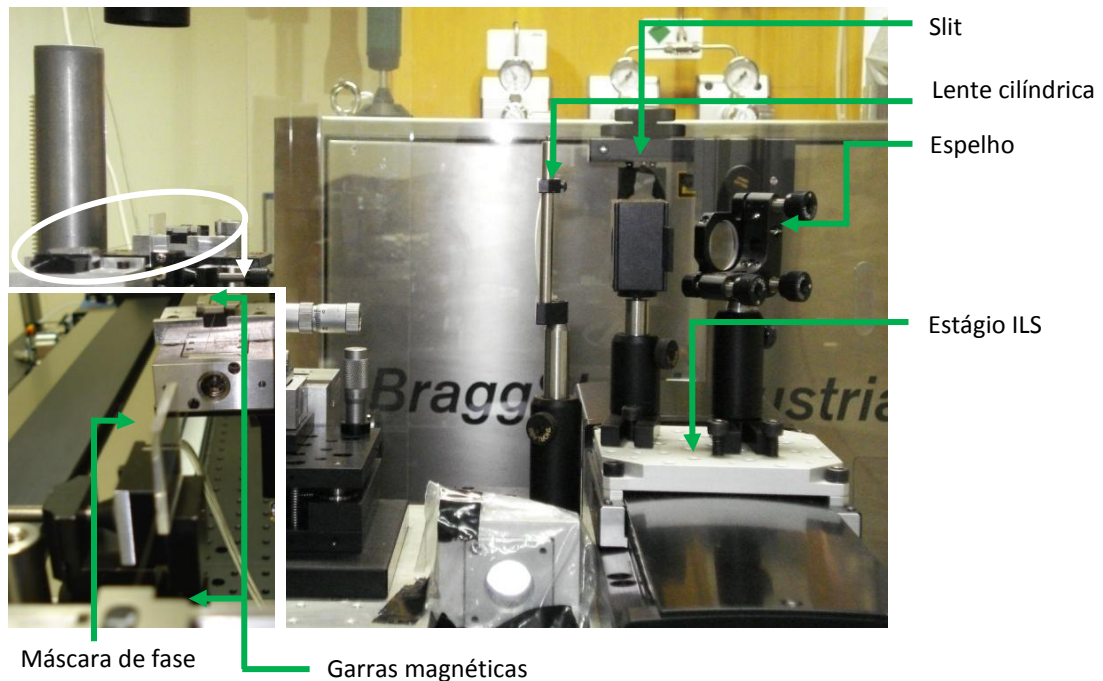


Figura 3.5 – Imagem da disposição de componentes sobre o estágio ABL20100.

O processo de alinhamento e distância da máscara de fase em relação à fibra é realizado através de um sistema de imagem constituído por uma câmara de alta resolução com aquisição monocromática e uma lente telecêntrica de ampliação 0.6X.

O estágio de translação *ABL20100* suporta não só, a plataforma *TILT* de três eixos, como também um estágio de translação *ILS-PP*. Este estágio *ILS-PP* suporta um espelho de redireccionamento do feixe de luz *UV*, uma *slit* que define a largura do feixe e uma lente cilíndrica.

O estágio *ABL20100* permite o deslocamento gradual de todo este conjunto, de modo a que o feixe de luz *UV* incida sobre a máscara de fase e seja projectado na secção de fibra destinada à escrita da rede de Bragg.

A fibra está sempre conectorizada ao ONA para permitir a leitura da reflectividade ou transmissividade da rede de Bragg em tempo real.

Os estágios *MFA-CC*, *ILS-PP* e *ABL20100* são interligados a um computador, por controladores específicos. Desta forma é possível a comunicação com estes dispositivos e, conseqüentemente, controlar os parâmetros dos estágios para o processo de escrita das redes de Bragg.

Todos os estágios da *Newport* são interligados a um controlador *XPS* que utiliza interface Ethernet de comunicação com o computador. Os movimentos do estágio *ABL20100* são controlados por software a partir da placa *Unidex 500* colocada no computador para o efeito. Para que haja feedback de movimentos do estágio de translação principal existe um *encoder* que fornece à placa *Unidex 500* uma onda quadrada. Para alimentar o motor do estágio de translação principal e para completar o feedback, é usado um amplificador *DR500* da *Aerotech*, o qual fornece potência após ordens dadas a partir da placa *Unidex 500*. A câmara que adquire a imagem do alinhamento máscara de fase com a fibra óptica comunica com o computador por *USB*.

## **3.4 – Software desenvolvido e seus fundamentos**

### **3.4.1 – Introdução**

Todo o software de controlo destes dispositivos de forma a se obter a escrita de redes de Bragg foi desenvolvido em linguagem de programação LabVIEW. Todos os dispositivos possuem bibliotecas de drivers que tornam possível este tipo de programação. O LabVIEW é apropriado para este tipo de implementação, pois consiste num ambiente de programação gráfica por diagramas de blocos que permite, de uma forma simples, a geração de código, apresentando posteriormente uma interface gráfica activa para sistemas de hardware de controlo e/ou medida. Em LabVIEW, cada rotina é baseada num *VI (Virtual Instrument)* que contém uma sequência de código que constitui um programa que pode actuar de forma independente. Sempre que é referido o termo *VI*, esta denominação diz respeito a uma subrotina associada a uma função de execução de instruções ou de leitura de dados, de uma forma específica.

Neste programa, criado em LabVIEW, é possível o controlo total do hardware disponível através da leitura dos parâmetros inerentes ao sistema e posterior execução de instruções de acordo com o processo lógico de escrita das redes de Bragg. Assim, é possível ao utilizador activar o sistema de uma forma fácil e executar a escrita com a inserção de alguns dados relativos à fonte laser, ao tipo de gravação a efectuar. O software desenvolvido é dividido em três partes fundamentais: controlo de movimentos de



posição (estágio *ABL20100* e *ILS*), alinhamento da máscara de fase - fibra óptica e controlo do laser.

### 3.4.2 – Controlo dos estágios

O *XPS* da *Newport* é um controlador de movimentos integrado, fácil de usar e com elevada e eficaz performance. Os estágios a ele ligados, podem ser manipulados para um controlo de elevada precisão desde as sequências de movimento mais básicas até às mais complexas. A comunicação é feita por cabo de rede.

No software desenvolvido tornou-se automático o movimento de cada estágio, por meio dos drivers fornecidos para LabVIEW. Desta forma, são accionadas todas as acções necessárias para colocar os estágios no estado 'ready', sendo este código executado cada vez que inicia o software desenvolvido (Apêndice A-I). Para controlar o estágio *ABL20100* é necessário e imprescindível o uso da placa *Unidex 500*, pois esta, por um lado fornece a informação de feedback do estágio, e por outro lado permite comandar o amplificador *DR500*. Este amplificador vai fornecer potência ao motor do estágio, criando-se assim uma realimentação, em que a placa *Unidex 500* é o controlador. Neste caso, por meio dos drivers fornecidos para LabVIEW permitiu incorporar as funcionalidades desta placa no software desenvolvido. Esta placa *Unidex* colocada no computador faz ligação ao amplificador *DR500*, que recebe o feedback de movimento do estágio. Este feedback é recebido através de um multiplicador que fornece uma onda quadrada descrevendo os movimentos. De seguida é enviada esta informação para a placa *Unidex 500*. Para se ter um controlo via LabVIEW deste estágio foram desenvolvidos trechos de código para cada acção necessária ao seu funcionamento, desde ficheiros fundamentais de inicialização necessários ao movimento do estágio até à leitura em tempo real do feedback proveniente do estágio, bem como o erro associado a cada movimento (Apêndice A-II).

Outra parte desenvolvida foi a possível leitura de ficheiros com sequências de posição de movimentos para gravação de redes de Bragg.

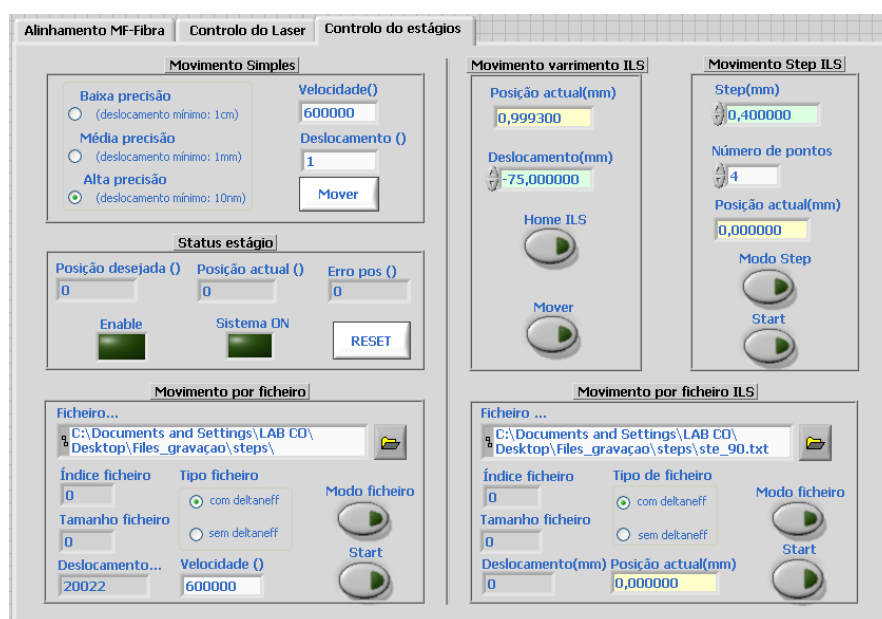


Figura 3.6 – Interface do controlo dos estágios principais de movimento.

Na Figura 3.6 observa o interface criado para o controlo dos dois estágios principais de movimento. De uma forma sucinta, o software carrega o ficheiro e lê o primeiro valor do ficheiro, movimenta o estágio de acordo com esse valor, é feita a exposição do laser com o número de pretendidos, lê de seguida o próximo valor a movimentar e faz nova exposição e assim sucessivamente até ao último valor do ficheiro. Este processo será apresentado e explicado pormenorizadamente mais adiante, quando se falar nos métodos de gravação de redes de Bragg implementados neste trabalho.

### 3.4.3 – Alinhamento máscara de fase – fibra óptica

Uma das partes mais importante para a gravação de redes de Bragg por máscara de fase é a distância e o alinhamento da máscara à fibra óptica. É necessário alinhar a máscara de fase com a fibra óptica, de forma que a máscara de fase seja posicionada o mais perto possível da fibra óptica para que esta esteja posicionada na zona de sobreposição das ordens +1 e -1.



Figura 3.7 – Interface do controlo do alinhamento máscara de fase – fibra óptica.

A máscara de fase deverá ter um alinhamento totalmente paralelo à fibra óptica, com a menor distância possível, que normalmente é na ordem das dezenas de micrómetros. Para tal, é usado um estágio de translação monitorizado, *MFA-CC* da *Newport*, que aproxima a máscara de fase à fibra óptica. Nesta parte também foi desenvolvido código de forma a tornar a acção de alinhamento máscara de fase - fibra automática, (Apêndice A-III). O software desenvolvido permite controlar essa distância através de imagem em tempo real adquirida por uma câmara monocromática, em que são detectáveis os pixels dos limites frontais, quer da máscara de fase, quer da fibra, e através disso é calculado a distância entre esses pixels ao longo da aproximação da máscara de fase à fibra (Figura 3.7).

De assinalar o facto de haver variação de velocidade, visto que se a diferença de distância for ainda elevada o estágio move-se rapidamente, caso contrário, move-se lentamente levando a um maior controlo da distância.

### 3.4.4 – Interface e controlo da fonte laser

Para se obter um controlo do laser *BraggStar Industrial* é necessário configurar uma comunicação Série com o computador. Todos os comandos, nomeadamente o controlo da frequência, número de pulsos por *burst*, número de *burst*, temperatura, pressão, etc, são explicados no apêndice A-IV.

No bloco de definição dos parâmetros do modo de disparo, é possível comutar entre o modo contínuo e modo *burst*, e definir parâmetros associados ao *burst*, mais a frequência de disparo do modo contínuo que corresponde à frequência de disparo dos pulsos que constituem cada sequência de *burst*. Um *burst* pode ser definido como uma sequência de pulsos que irá depender da frequência. Para escrever as alterações de informação no laser, basta premir o botão *update*, e poderá ser observada a mudança de parâmetros no menu de informações do *burst*. O interface pode ser observado na Figura 3.8.

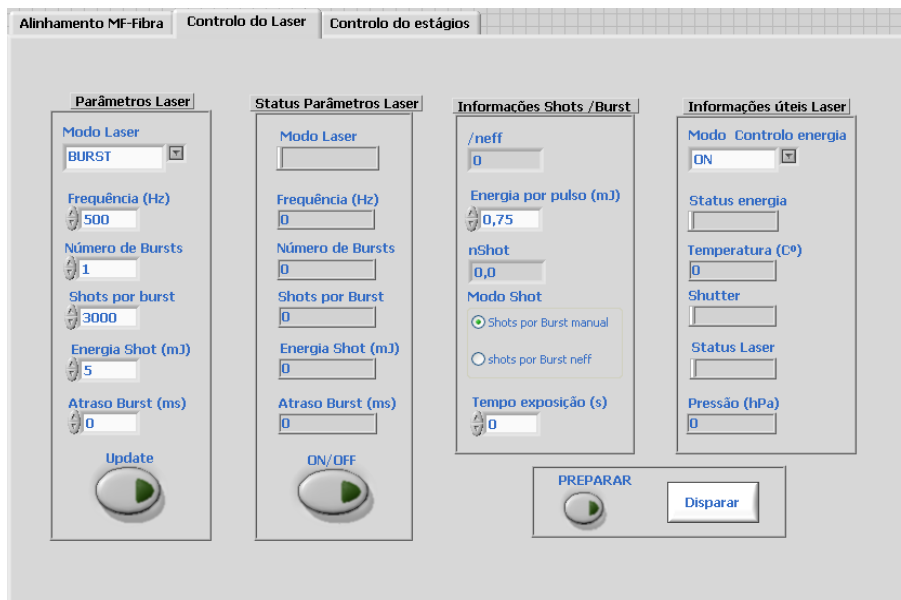


Figura 3.8 – Interface do controlo dos parâmetros essenciais do laser.

## 3.5 – Métodos implementados de escrita de FBG

Neste sistema pretende-se ter a possibilidade de gravar redes de Bragg mais simples até às mais complexas em termos de eficiência de resultados quando comparados a simulações do perfil dessas mesmas redes de Bragg, é possível a escrita de redes através de três métodos de escrita: método por *máscara de fase*, por *varrimento da máscara de fase* e por um método mais complexo, o método *Stitching*.

### 3.5.1 – Gravação por máscara de fase

Como foi referido anteriormente, a gravação por máscara de fase é um método simples onde é possível gravar redes uniformes através de uma única exposição de luz laser, em que é definido, pela *slit*, o comprimento da rede a gravar não necessitando de

mover o estágio de translação, isto é, não há movimentação da máscara de fase em relação à fibra óptica. O comprimento da rede está limitado à largura da *slit*, bem como à largura do feixe de luz laser.

### 3.5.2 – Gravação por varrimento da máscara de fase

Outro método é *por varrimento*, onde é possível gravar redes mais complexas através do varrimento do feixe ao longo da máscara de fase. Pode ser definido a largura da *slit*, e aqui não há também a movimentação da máscara de fase em relação à fibra óptica, no entanto, há movimentação do sistema estágio de translação *ILS-PP* que suporta um dos espelhos de redireccionamento do feixe de luz *UV*, a *slit* e a lente de focagem. Este movimento varre a largura da máscara fase que se encontra estática em relação à fibra. A duração deste movimento é definida pelas características da rede de Bragg que se pretende, em que se define a velocidade de movimento do estágio *ILS-PP*. O comprimento da rede está limitado ao comprimento da máscara de fase.

### 3.5.3 – Gravação por método *Stitching*

Por fim, o método mais complexo e mais usado para gravação da grande parte das redes de Bragg, o método *Stitching*. Experimentalmente, neste método há a movimentação do estágio de translação *ABL20100*, ou seja, é movimentada toda a plataforma que contém o estágio de translação *ILS-PP*, um dos espelhos de redireccionamento do feixe de luz *UV*, a *slit*, a lente de focagem e a máscara de fase em relação à fibra, que se encontra estática, e posterior exposição da luz laser. Este método de gravação depende, em grande parte, do  $L_{exp}$  que o utilizador pretender utilizar. Quanto menor o  $L_{exp}$ , maior a precisão, à custa de uma gravação mais lenta. As etapas evoluem de acordo com um ficheiro que indica os *steps*, que correspondem aos valores de deslocamento do estágio de translação, a serem considerados para gravar a rede com uma determinada visibilidade ( $v(z)$ ), tamanho ( $L$ ) e variação do índice de refração.

As simulações apresentadas neste trabalho foram efectuadas recorrendo a um simulador baseado em MatLab, denominado *GOSiP* [2] que tem como base o método da matriz de função transferência [6]. Através deste simulador é possível obter simulações das redes de Bragg referidas atrás, podendo-se manipular vários parâmetros, tais como, comprimento da rede, visibilidade, variação do índice de refração efectivo,  $L_{exp}$  a utilizar, valor do deslocamento de fase e respectiva posição, entre outros. Também algumas das simulações apresentadas foram efectuadas recorrendo a um software comercial designado *OptiGrating*.

## 3.6 – Processo de escrita

Nesta secção será efectuada a descrição pormenorizada de todo o processo de escrita de redes de Bragg em fibra óptica. São contempladas todas as etapas desde a preparação do material até à caracterização final da rede de Bragg.

São accionados todos os equipamentos utilizados no sistema. É ligado o computador, amplificador DR500, sistema de ar comprimido que alimenta a mesa óptica,

bem como o estágio ABL20100, controlador XPS, o sistema de refrigeração do laser, sistema de purga e o laser, sendo este último colocado depois em estado 'emission start'.

É verificado qual o tipo de rede de Bragg a gravar, se uma rede utilizando o *método por máscara de fase*, o *método por varrimento* ou o *método Stitching*, para se definir a largura da *slit* de acordo com o *step* dado pelo ficheiro, no caso do método *Stitching*.

É verificado qual o comprimento de onda central desejado para a escrita da rede de Bragg para, em caso necessário, mudar a máscara de fase.

É retirada uma porção do revestimento da fibra óptica fotossensível de forma a permitir a posterior escrita da rede de Bragg. A fibra óptica está previamente conectorizada de forma a observar o espectro, em reflexão e/ou transmissão, em tempo real através do ONA. A fibra é, então, colocada nas garras magnéticas com alguma tensão, de forma a garantir que a fibra esteja esticada.

O operador executa o software de controlo e realiza a inicialização do sistema permitindo a preparação e posicionamento inicial de todos os estágios motorizados.

O sistema de imagem em tempo real é accionado colocando a distância pretendida da máscara à fibra, em pixéis, permitindo a aproximação automática da máscara de fase à distância pretendida, uma distância de cerca de 14 pixéis (~70µm).

No controlo dos parâmetros do laser é colocado os valores requeridos para a escrita, tais como a frequência, o tipo de disparo, contínuo ou por *burst*, e no caso de disparo por *burst*, colocar o número de *burst*, o *delay* entre *bursts*, o número de pulsos por *burst*, bem como a energia de cada pulso. O tipo de disparo dependerá do tipo de método adoptado para a escrita da rede de Bragg.

De seguida, no controlo de movimentos de posição será escolhido, de acordo com o método adoptado para a escrita da rede de Bragg, o tipo de movimento. Se o método escolhido for *por máscara de fase*, será focada a janela *Movimento Simples*, escolhendo de acordo com o deslocamento pretendido, *baixa precisão*, *média precisão* ou *alta precisão* e colocando o valor do movimento, sendo que a velocidade está predefinida de acordo com a resolução escolhida. Neste caso, depois de dada a instrução para o movimento, é necessário dar a instrução de disparo do laser. Se o método escolhido for *por varrimento*, será focada a janela *Movimento varrimento ILS*, colocando apenas a distância a varrer e a velocidade. Por fim, se o método escolhido for *por Stitching*, será focada a janela *Movimento por ficheiro*, tendo apenas que ser escolhido o ficheiro de dados a gravar, uma vez que a velocidade já está predefinida. Neste dois últimos métodos, o disparo é efectuado automaticamente, pois está programado ciclicamente o processo movimento – disparo.

Após o término automático da escrita da rede de Bragg, a etapa seguinte será efectuar na parte do sistema de imagem, o afastamento da máscara de fase em relação à fibra óptica, para quando for retirada a fibra das garras magnéticas, evitar qualquer contacto entre eles (máscara de fase e fibra óptica) de forma a não danificar.

Para terminar será guardado o espectro, em reflexão e/ou transmissão, da rede de Bragg produzida. Na Figura 3.9, observa-se um fluxograma explicativo da sequência relativa para a escrita das redes de Bragg.

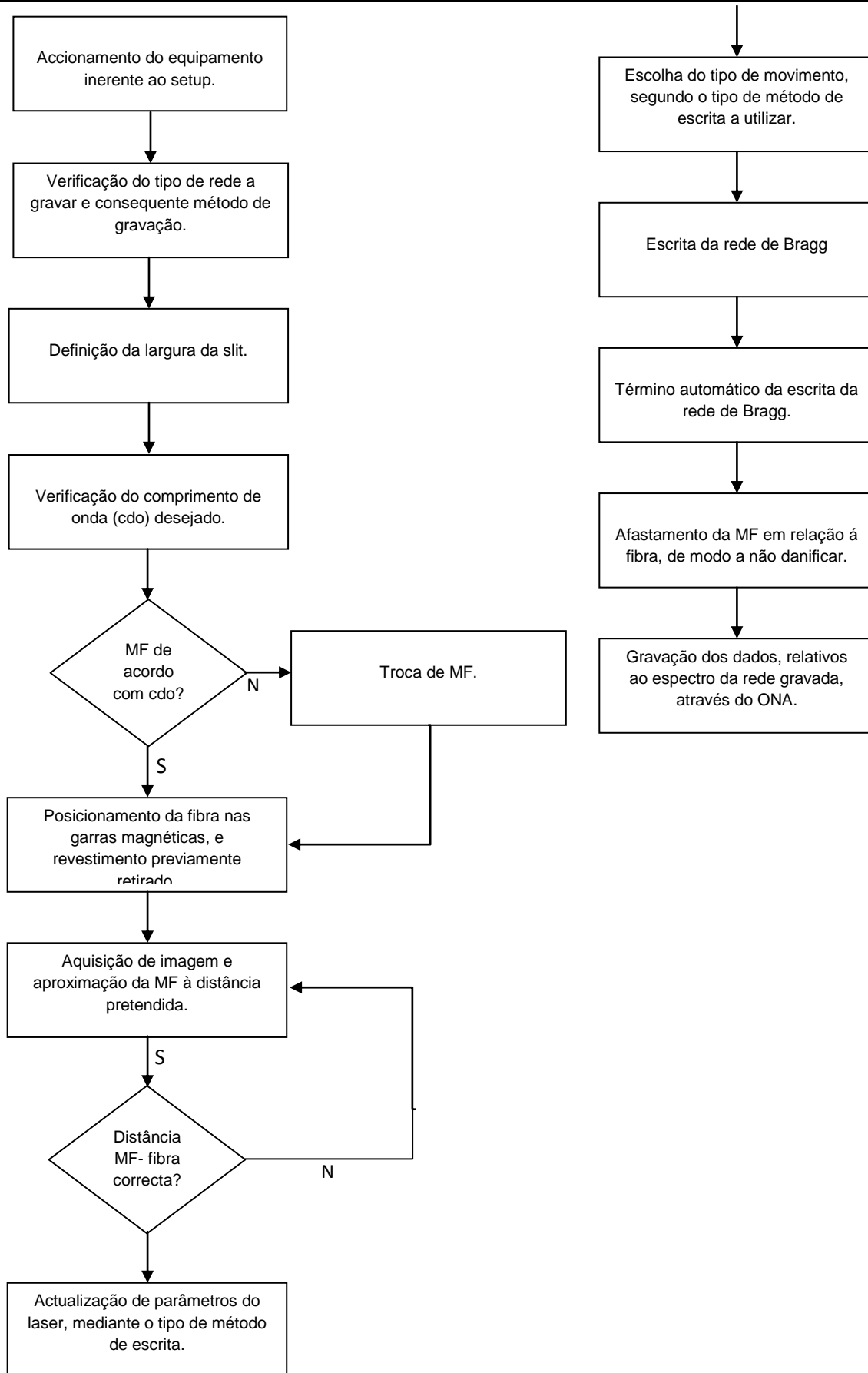


Figura 3.9 – Fluxograma da seqüência relativa para a escrita das redes de Bragg.

## Capítulo 4

### Caracterização das redes de Bragg gravadas

#### 4.1 – Introdução

Uma vez que o sistema foi concebido com o propósito de fabricar redes de Bragg, a sua caracterização em termos de reprodutibilidade, em comparação ao que se obtém por simuladores, mostra particular interesse.

#### 4.2 – Estudo da variação do índice de refração com a energia acumulada

Foram efectuados testes de modo a conhecer o comportamento da variação do índice de refração com a energia acumulada. Para tal, mediu-se a energia média dos pulsos  $UV (E_{Pulso})$ , imediatamente antes da máscara de fase, através de um medidor de potência, sendo feitas exposições sucessivas, aumentando progressivamente o número total de pulsos por exposição. Registou-se para cada exposição a variação do comprimento de onda e calculou-se a partir daqui a variação do índice de refração, através da relação:

$$\Delta n_{eff} = \frac{\Delta \lambda}{\Lambda_{MF}} \quad (4.1)$$

Calculou-se a energia acumulada,  $E_a$ , de cada exposição, de acordo com:

$$E_a = n_{pulsos} * E_{Pulso} \quad (4.2)$$

com  $n_{pulsos}$ , o número de pulsos. O número de pulsos é dado por:

$$n_{pulsos} = F_{Laser} * t_{exp} \quad (4.3)$$

onde  $F_{Laser}$  é a frequência do laser e  $t_{exp}$  o tempo de exposição. A relação pode ser então observada pelo gráfico da Figura 4.1.

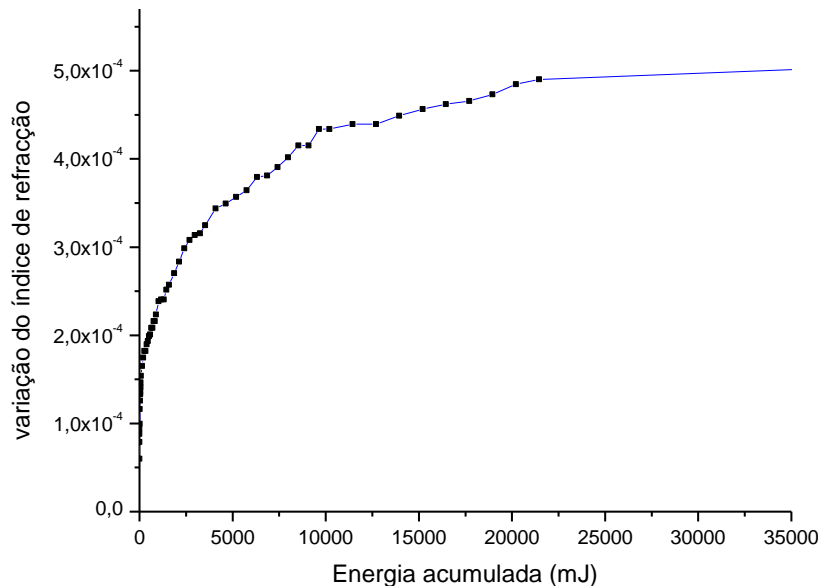


Figura 4.1 - Representação da variação do índice de refração em função da energia acumulada.

Pode-se aproximar até a uma variação do índice de refração de  $2 \times 10^{-4}$  uma relação linear entre a variação do índice de refração e a energia acumulada. Para valores superiores a esse valor, já se está numa relação não linear.

### 4.3 – Caracterização e comparação de redes Uniformes

As redes Uniformes, como já referido, são as redes de Bragg mais simples de se obter, daí ter sido efectuado testes com vista a se obter redes uniformes semelhantes às simuladas. Deste modo, será possível calibrar o sistema.

Foi realizado um primeiro teste com o objectivo de se verificar a reprodutibilidade da escrita de redes de Bragg. Daí, foram gravadas quatro redes, cada uma com  $L = 1\text{mm}$ , abertura da slit de  $1\text{mm}$  e foram expostas às mesmas condições em termos de luz UV.

Observando a Figura 4.2 verifica-se que as quatro redes apresentam uma resposta em termos de amplitude muito semelhante, com ligeiro desvio na amplitude máxima. Uma das redes apresenta um espectro desfasado de  $100\text{pm}$ , facto que é justificado pela forma como é colocada a fibra nas garras magnéticas, pois a tensão que é aplicada não é ainda controlada. No entanto, este facto não produz alterações significativas em termos da resposta da rede de Bragg.



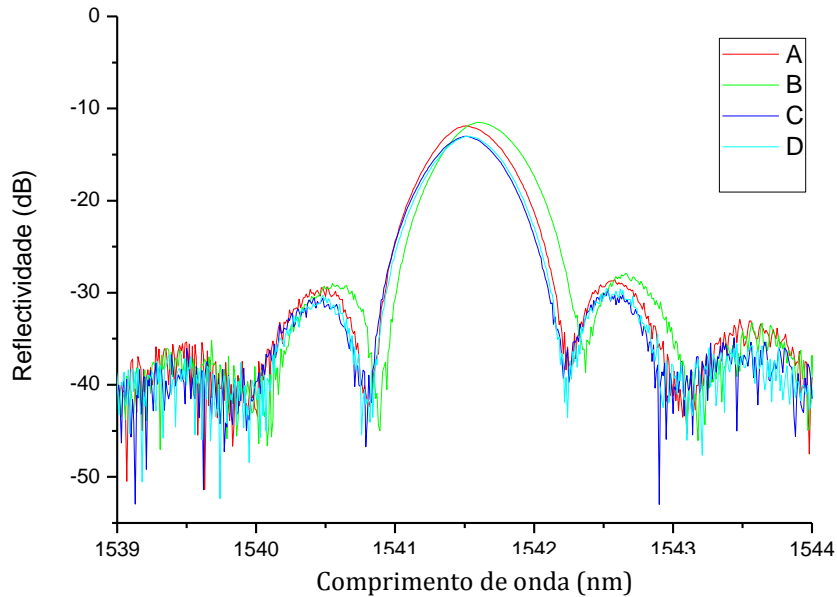


Figura 4.2 – Resposta em termos de reflectividade de quatro redes de Bragg uniformes gravadas nas mesmas condições.

Outro teste realizado foi tentar reproduzir uma rede de Bragg uniforme de comprimento  $L = 1\text{mm}$  utilizando os métodos *por máscara de fase* e *Stitching*. Para o método *por máscara de fase* colocou-se a *slit* com uma abertura de  $1\text{mm}$  e fez-se uma exposição de energia  $E_a$ . Para o método *Stitching* colocou-se a *slit* com uma abertura de  $100\mu\text{m}$ , dado que o *step* de deslocamento calculado (pelo método *Stitching*) foi de um valor arredondado ao valor mais próximo de  $100\mu\text{m}$ , múltiplo do período. Foi então calculado um ficheiro com 10 *steps* e fez-se para cada *step* uma exposição de igual energia,  $E_a$ , ao efectuado para o caso do método máscara de fase. A Figura 4.3 ilustra as respostas em amplitude para os dois casos, bem como a resposta da simulação.

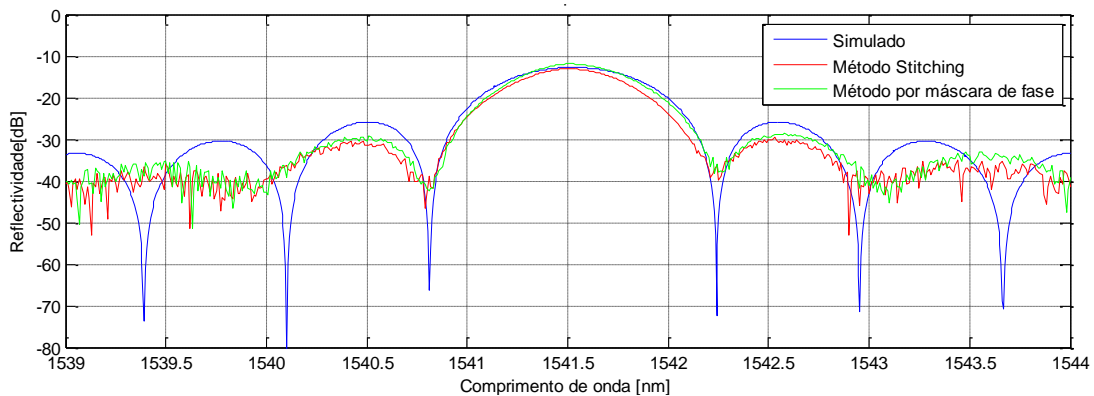


Figura 4.3 – Resposta em termos de reflectividade da rede uniforme gravada pelo método por máscara de fase, pelo método *Stitching* e respectiva rede simulada.

Para isso os parâmetros utilizados para a rede simulada foram:  $\Delta n_{eff} = 1 \times 10^{-4}$ ,  $L = 1.1 \times 10^{-3}\text{m}$ ,  $v = 1$ .

Pode-se verificar que existe em termos de amplitude uma boa aproximação, do pico central das redes gravadas pelos dois métodos, à rede simulada. No entanto, verifica-se uma certa diferença em amplitude e período dos lóbulos laterais das redes

gravadas em relação à rede simulada. Essa diferença poderá ter justificação na não homogeneidade do perfil do feixe laser, induzindo uma ligeira apodização.

#### 4.4 – Caracterização e comparação de redes com deslocamento de fase

Este tipo de redes é caracterizado pela introdução de um desvio de fase na modulação do índice de refração. Este desvio origina uma divisão que resulta na formação de duas redes de Bragg desfasadas entre si que actuam como uma cavidade ressonante.

Foi usado o método *Stitching* para se obter um ficheiro de *steps* para a escrita deste tipo de rede com um deslocamento de fase  $\pi$  na posição  $L = 2mm$ . O comprimento total da rede tem um comprimento de  $L = 4mm$ .

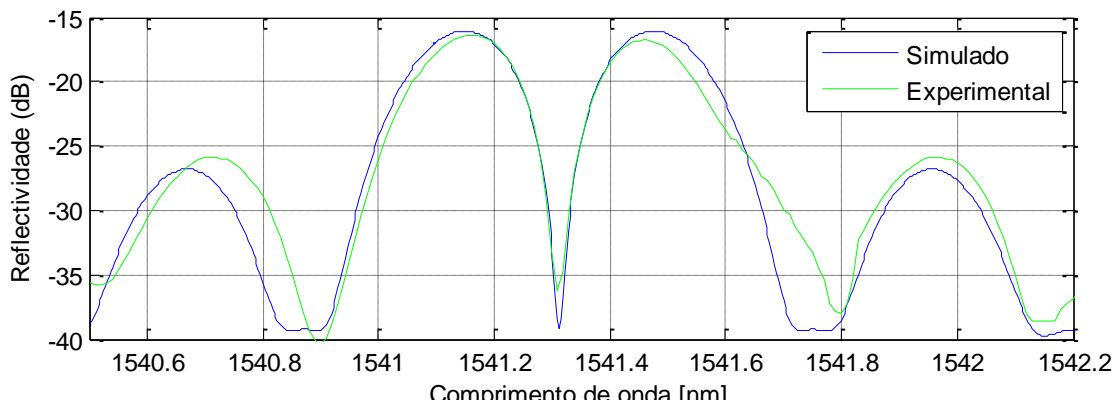


Figura 4.4 – Resposta em termos de reflectividade da rede com deslocamento de fase gravada pelo método *Stitching* e respectiva simulação.

Os parâmetros utilizados para a rede simulada foram:  $\Delta n_{eff} = 1.2 \times 10^{-4}$ ,  $L = 3.83 \times 10^{-3} m$ . Obteve-se uma rede aproximada à simulada, quer em termos de amplitude, quer em termos dos dois picos principais.

#### 4.5 – Caracterização e comparação de redes *Chirped*

As redes aperiódicas, ou também conhecidas na literatura internacional por *chirped*, consistem, na sua forma mais comum, em redes com período de modulação variável ao longo da sua extensão longitudinal. Uma das consequências desta variação linear do período é uma largura de banda maior em comparação com uma rede uniforme.

Este tipo de rede foi também gravado através do método *Stitching*. O comprimento da rede é  $L = 10mm$ , o  $L_{exp}$  utilizado foi de  $150 \mu m$  e o *step* de deslocamento de acordo com  $L_{exp}$ .

Desenhou-se uma rede *chirped* em que se avaliou parâmetros tais como a reflectividade, a largura de banda e o atraso de grupo. A Figura 4.5 ilustra a comparação da rede gravada em termos de reflexão e a Figura 4.6 em atraso de grupo.

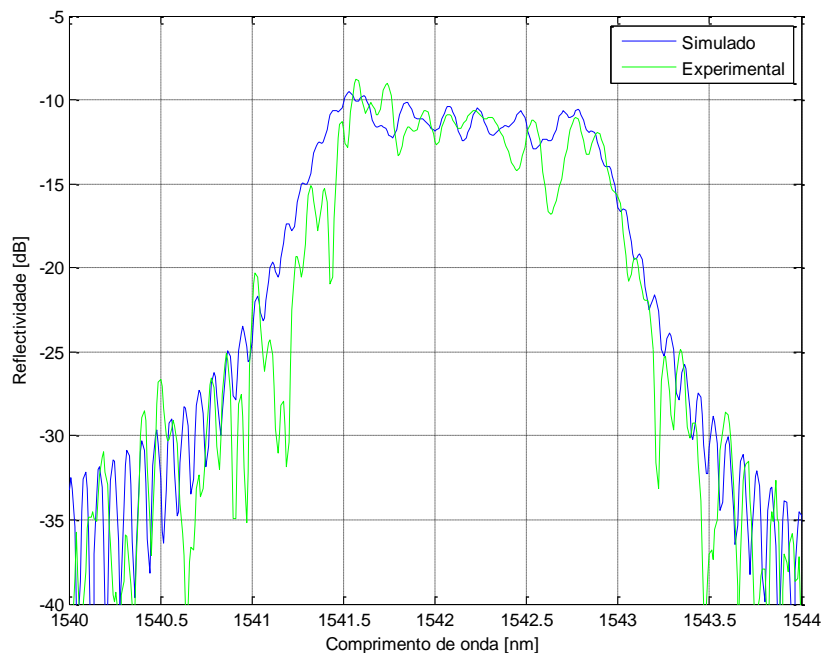


Figura 4.5 – Resposta em reflectividade da rede chirped gravada pelo método Stitching e respectiva simulação.

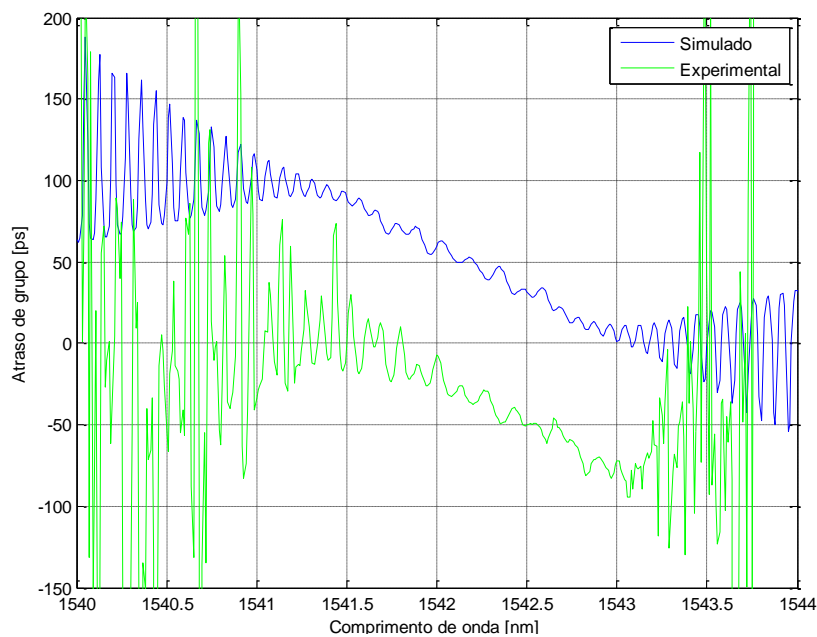


Figura 4.6 – Resposta em atraso de grupo da rede chirped gravada pelo método Stitching e respectiva simulação.

A Tabela 1 mostra os resultados teóricos e experimentais obtidos.

	Reflectividade (dB)	Largura de banda (nm)	Dispersão (ps/nm)
Teórico	28.48	1.63	-55.27
Experimental	28.48	1.49	-56.33

Tabela 1 – Comparação entre dados relativos à rede chirped simulada e gravada.

A dispersão,  $D$ , é calculada a partir do atraso de grupo pela relação:

$$D = \frac{\tau}{\zeta} \quad (4.4)$$

Onde  $\tau$  é a diferença de atraso de grupo entre dois comprimentos de onda espaçados de  $\zeta$ , onde  $\zeta$  é a largura de banda da rede. Pode-se verificar que em termos de reflectividade obteve-se uma rede muito semelhante à simulada. Quanto a largura de banda a diferença entre a rede gravada e a simulada é de  $140\text{pm}$ . Por fim, em relação ao atraso de grupo observa-se pela Figura 4.6 que possui um declive semelhante ao da simulada e como é verificado pelos valores da dispersão.

## 4.6 – Caracterização de arrays de redes de Bragg

As redes OCDMA (Optical Code Division Multiple Access) são um bom candidato para a implementação da próxima geração de LANs (Local Area Networks) e redes de acesso porque permitem ligação de alta velocidade, operação assíncrona e simplificação no controlo de acesso ao meio de transmissão.

Numa rede OCDMA é atribuída uma palavra-chave a cada utilizador (neste caso caracterizada por uma matriz de tempo e comprimento de onda). Quando um outro utilizador quer transmitir informação, este envia a sequência do seu destinatário para bits de informação '1' e nada para bits de informação '0'. O destinatário deve ser capaz de identificar que está a receber a sua sequência e ignorar todas as outras. Cada elemento da palavra-chave é chamado de *chip* (pode ser 0 ou 1).

Os arrays de redes de Bragg são utilizados como codificadores OCDMA porque é possível reflectir vários comprimentos de onda com atrasos diferentes na mesma fibra. Se enviarmos um impulso estreito com vários comprimentos de onda estes são reflectidos nas redes de Bragg e atrasados de acordo com as distâncias entre fibras de Bragg.

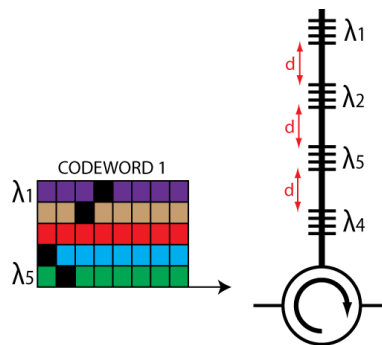


Figura 4.7 – Código de um utilizador e disposição correspondente da codificação no array de redes de Bragg.

comprimentos de onda inversa; isto vai fazer com que o impulso inicial seja reconstruído, ou seja, os impulsos dos vários comprimentos de onda coincidem no tempo. A Figura 4.7 mostra uma palavra-chave de um utilizador e a disposição correspondente da codificação do array de redes de Bragg.

Um array de redes de Bragg consiste na escrita de redes de Bragg ao longo de uma fibra óptica, sendo elas espaçadas de uma distância  $d$ . Essa distância pode ser calculado através de:

$$d = \frac{c.T_{chip}}{2.\eta_f} \quad (4.4)$$

onde  $\eta_f$  é o índice de refração da fibra,  $T_{chip}$  é o atraso de grupo e  $c$  a velocidade da luz.

O objectivo era gravar um array constituído por quatro redes de Bragg que apresentem entre elas um atraso de grupo de  $50ps$ , ou seja, em termos de escrita das redes de Bragg na fibra é necessário que estejam espaçadas entre si de  $d$  como sugere a expressão:

$$d = \frac{c.T_{chip}}{2.\eta_f} = \frac{2.998 \times 10^8 \times 50 \times 10^{-12}}{2 \times 1.4475} = 5.17789mm \quad (4.5)$$

Dado que os comprimentos de onda requeridos para o sistema ODCMA eram na gama de  $1548.20nm$  a  $1554.60nm$  espaçados de  $1.6nm$ , e devido ao facto de não se ter um processo de controlo da tensão na fibra, tentou-se aproximar o mais possível ao desejado, de forma a se obter, para além do referido, o seguinte: as quatro redes com reflectividades semelhantes, com diferença de  $50ps$  em termos de atraso de grupo entre redes adjacentes e o espaçamento relativo entre comprimentos de onda de redes adjacentes de  $1.6nm$ ., como já referido.

Para se gravar este array de quatro redes de Bragg, é necessário após a escrita da primeira rede, mover o estágio de translação  $d = 5.17789mm$  e de seguida trocar a máscara de fase, correspondente ao comprimento de onda central, para a escrita da rede de Bragg seguinte e, assim sucessivamente. A troca da máscara de fase é um processo delicado, uma vez que durante o processo de retirar e colocar máscara de fase não pode haver contacto com a fibra óptica para não danificar a máscara de fase e não haver movimentos da fibra óptica.

Uma vez que é possível observar em tempo real, através do ONA, o progresso da escrita de cada rede, quer em reflexão, quer em atraso de grupo, é factível conseguir-se a escrita deste array de acordo com os parâmetros exigidos.

Na Figura 4.8 observa-se um dos arrays de redes de Bragg gravados.

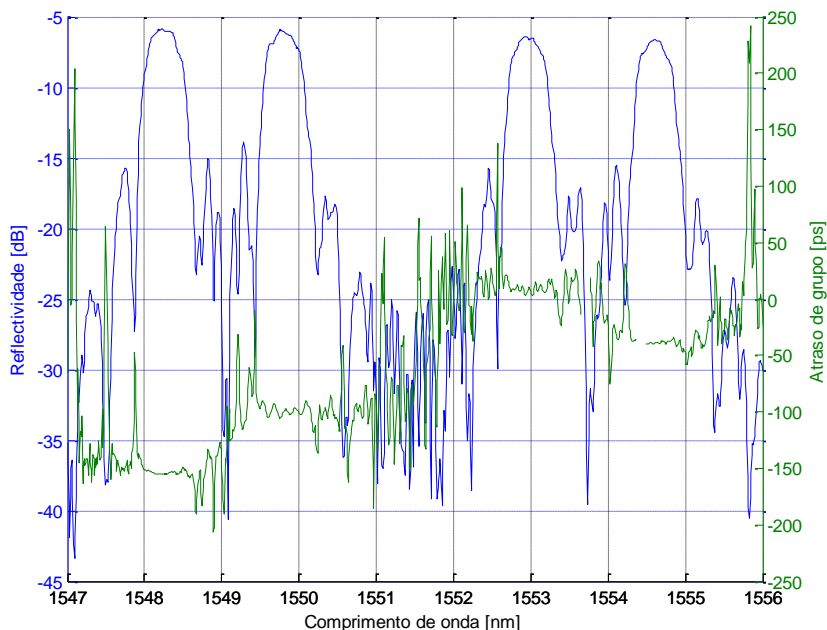


Figura 4.8 – Espectro do array de redes de Bragg em termos de amplitude e atraso de grupo.

As redes de Bragg estão muito próximas das projectadas, quer em termos de espaçamento relativo entre comprimentos de onda (Tabela 2), quer em termos de atraso de propagação entre redes de Bragg (Tabela 3). Observa-se pela Figura 4.8 que em termos de reflectividade as quatro redes de Bragg estão semelhantes. O único aspecto em que existem algumas divergências mais significativas foi nos valores absolutos do comprimento de onda (Tabela 4), isto pelo facto, como já foi referido, de não se ter ainda um processo de controlo da tensão na fibra. Porém, é possível aproximar os comprimentos de onda centrais obtidos aos requeridos por via da aplicação de uma tensão na fibra que contém as redes de Bragg.

	1ªFBG  Espaçamento  (nm)	2ªFBG  Espaçamento  (nm)	3ªFBG  Espaçamento  (nm)	4ªFBG  Espaçamento  (nm)
Teórico	--	1.6	4.80	1.6
Experimental	--	1.61	4.79	1.58
Desvio	--	0.01	0.01	0.02

Tabela 2 – Comparação entre as redes de Bragg gravadas em termos de espaçamento.

	1ªFBG Atraso grupo(ps)	2ªFBG Atraso grupo(ps)	3ªFBG Atraso grupo(ps)	4ªFBG Atraso grupo(ps)
Teórico	--	50	50	50
Experimental	--	50.11	50.17	50.09
Desvio	--	0.11	0.17	0.09

Tabela 3 – Comparação entre as redes de Bragg gravadas em termos de atraso de grupo.

	1ªFBG $\lambda_{central}$ (nm)	2ªFBG $\lambda_{central}$ (nm)	3ªFBG $\lambda_{central}$ (nm)	4ªFBG $\lambda_{central}$ (nm)
Teórico	1553.00	1554.60	1549.80	1548.20
Experimental	1552.86	1554.47	1549.68	1548.10
Desvio	0.14	0.13	0.12	0.10

Tabela 4 – Comparação entre as redes de Bragg gravadas em termos de comprimento de onda central.

## 4.7 – Caracterização de redes de Bragg em transmissão

Para implementação de um sistema UMTS foi gravada uma rede de Bragg em transmissão. A finalidade é conseguir uma rede com uma largura de banda reduzida e com uma transmissividade elevada. A utilidade de filtros estreitos é filtrar sinais com largura de banda reduzida, como sinais RF.

O objectivo é gravar uma rede com uma largura de banda a  $-30dB$  de  $40.7pm$  e centrada em  $1549.744nm$ . Para isso foi gravada uma rede uniforme com  $L = 2.5cm$  e  $L_{exp} = 200\mu m$  pelo método de *Stitching*. A Figura 4.9 ilustra a comparação entre a rede gravada e a rede simulada.

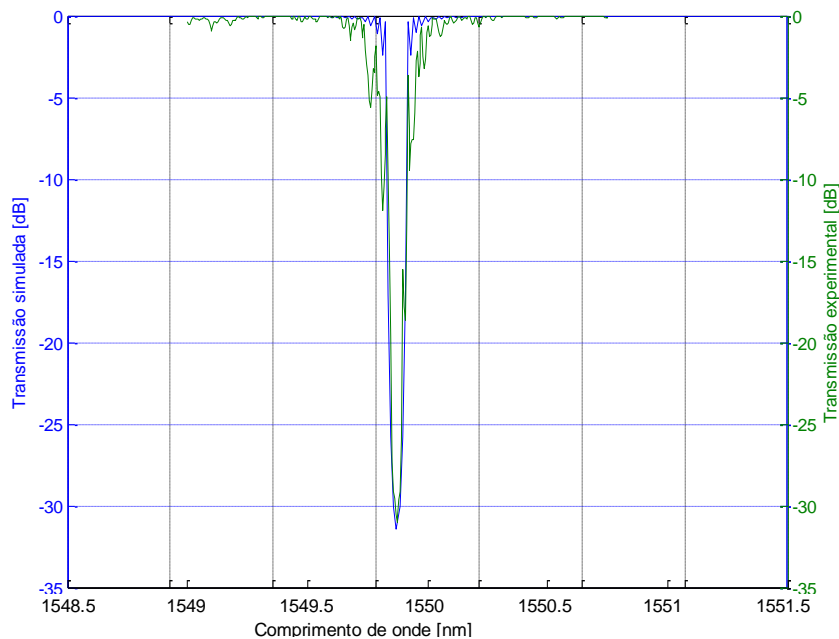


Figura 4.9 – Transmissão da rede gravada e simulada.

	$\lambda_{central}$ (nm)	Largura de banda(pm)	Transmissão (dB)
Teórico	1549.744	40.7	-32.1
Experimental	1549.882	44.3	-31.01
Erro	0.138	3.6	-1.09

Tabela 5 – Comparação entre os parâmetros da rede de Bragg gravada com os da rede simulada.

Pela Tabela 5 pode-se dizer que, em termos de comprimento de onda central a rede gravada está deslocada  $138\text{pm}$  da rede pretendida, devido a factores já referidos neste capítulo. A largura de banda a  $-30\text{dB}$  ficou próximo do esperado e em termos e transmissividade obteve-se na gama de valores pretendida.



## Capítulo 5

### Conclusões e trabalho futuro

No que diz respeito à produção de FBGs foi implementada uma máquina que permite a escrita de redes de Bragg avançadas de uma forma simples e eficiente. O sistema permite a um utilizador executar o processo de um modo automático.

O sistema desenvolvido apresenta uma boa reprodutibilidade no que diz respeito à obtenção de redes. Apresentam uma resposta em termos de amplitude muito semelhante ao desejado.

Conclui-se que existe em termos de amplitude uma boa aproximação, do pico central das redes uniformes gravadas pelos dois métodos utilizados (por máscara de fase e Stitching). No entanto, verifica-se uma certa diferença em amplitude e período dos lóbulos laterais das redes gravadas em relação à rede simulada. Essa diferença poderá ter justificação na não homogeneidade do perfil do feixe laser, induzindo uma ligeira apodização ou mesmo por alguma instabilidade no sistema de posicionamento.

Para o caso de redes com deslocamento de fase, obteve-se uma rede aproximada à simulada, quer em termos de amplitude, quer em termos dos dois picos principais.

Para redes aperiódicas, obteve-se em termos de reflectividade uma rede muito semelhante à simulada. Quanto a largura de banda a diferença entre a rede gravada e a simulada é de  $140\text{pm}$ . Em relação ao atraso de grupo obteve-se um declive semelhante ao da simulada e como foi verificado pelos valores da dispersão.

Por fim, quanto ao array de redes de Bragg, obteve-se redes muito próximas das projectadas, quer em termos de espaçamento relativo entre comprimentos de onda, quer em termos de atraso de propagação entre redes de Bragg, quer em termos de reflectividade. O único aspecto em que existem algumas divergências mais significativas foi nos valores absolutos do comprimento de onda, isto pelo facto, como já foi referido, de não se ter ainda um processo de controlo da tensão na fibra.

Quanto aos desenvolvimentos futuros existem alguns pontos de melhoramento, nomeadamente, a colocação de uma célula de carga de forma a ter-se um processo de controlo da tensão na fibra eficaz e automático. Outro melhoramento será a colocação de um suporte monitorizado do espelho colocado antes do feixe chegar ao meio que se tem o estágio de translação de forma a ter um controlo mais automatizado e regular do alinhamento do feixe. Estes desenvolvimentos irão ajudar a obter melhores resultados para a escrita de redes de Bragg avançadas em fibra óptica.

Em breve será também testado a gravação de redes de Bragg de período longo, uma vez que no software desenvolvido já consta a programação necessária para tal.

## Bibliografia

- [1] Mário J. N.Lima, António L. J. Teixeira, O. Frazão, Paulo S. B. André, J. R. Ferreira da Rocha. *Redes de Bragg para Telecomunicações*. Instituto de Telecomunicações, Universidade de Aveiro; Departamento de Electrónica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro; Departamento de Física, Universidade de Aveiro, INESC Porto, Porto. 2001.
- [2] Miguel Vidal Drummond. *Geração de sinais em banda lateral única por filtragem óptica*. Projecto de final de curso, Universidade de Aveiro, 2007.
- [3] Rogério Nunes Nogueira. *Redes de Bragg em Fibra óptica*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 2005.
- [4] M. Ibsen, M. K. Durkin, M. J. Cole and R. I. Laming. *Optimised square passband fiber Bragg grating filter with in-band flat group delay response*. *Electron. Lett.* 34, 800-802, April 1998.
- [5] M. V. Drummond. *Implementation of the Stitching method for a FBG writing system*. August 2008.
- [6] T. Erdogan. *Fiber grating spectra*. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1277-1294, August 1997.
- [7] G.P. Agrawal, and S. Radic. *Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing*. *IEEE Photon. Techno. Lett.*, 6, 995-997, 1994.
- [8] J. Canning, and M.G. Sceats.  *$\pi$ -phase-shifted periodic distributed structures in optical fibres by UV post-processing*. *Electron. Lett.*, 30, 1244-1245, 1994.
- [9] R. Kashyap, R. Wyatt, and R.J Campbell. *Wideband gain flattened erbium fibre amplifier using a photosensitive fibre blazed grating*. *Electron. Lett*, 29, 154-156, 1993.
- [10] L.M. Pereira Marques. *Optimização de Processos de Produção de Sensores de Bragg em Fibra Óptica*. Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [11] K.O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D.C Jonhson, and J. Albert. *Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask*. *Appl. Phys. Lett.*, 62, 1035-1037, 1993.
- [12] V. Mizrahi, T. Erdogan, D.J. DiGiovanni, P.J. Lemaire, W.M. MacDonald, S.G. Kosinski, S. Cabot, E. Sipe. *Four channel fiber grating demultiplexer*. *Electron. Lett.*, 30, 780-781, 1994.

# Apêndice A - Comandos fundamentais do setup

## I. Comunicação do estágio ABL20100

Para se ter um controlo completo via LabView do posicionador principal foi implementado o código seguinte. Em primeiro lugar é necessário carregar os ficheiros de firmware, parâmetros, etc.

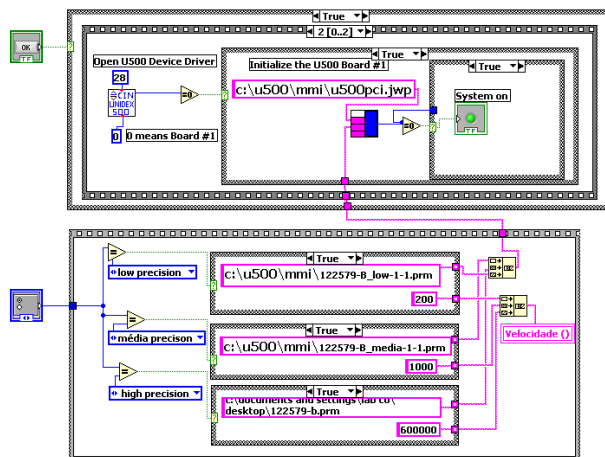


Figura A.1 – Trecho de código LabView para carregamento de ficheiros essenciais à comunicação com o estágio ABL20100.

Como já foi referido anteriormente, a placa Unidex 500, vai controlar o amplificador que alimenta o posicionador principal. Desta forma, fazendo uso das bibliotecas de drivers fornecidas pelos fabricantes da placa Unidex 500, são carregados na placa os ficheiros necessários através do código LabView anterior. Sempre que se alterarem alguns elementos do ficheiro de parâmetros da placa Unidex 500, o software construído poderá mais tarde não trabalhar correctamente, desta forma é aconselhada a cópia do ficheiro actual caso se queiram fazer alterações no modo de operação da placa Unidex 500. O trecho de código da Figura A.2, permite receber no PC uma leitura em tempo real do feedback proveniente da posição do estágio principal. Isto é possível tendo como base as bibliotecas de funções fornecidas pelo fabricante da placa Unidex 500. Os blocos usados, para obter esta funcionalidade foram o bloco “read position”, “read stat”, e “axis led”. Tendo isto, basta apenas associar botões e variáveis aos dados recebidos por estes blocos para obter o efeito desejado. É preciso ter em conta que o feedback recebido foi configurado em  $1/10000000$  ( $1 \times 10^{-8}(m)$ ) da unidade de medida de comprimento no Sistema Internacional de Unidades (SI) no ficheiro dos parâmetros da placa Unidex 500.

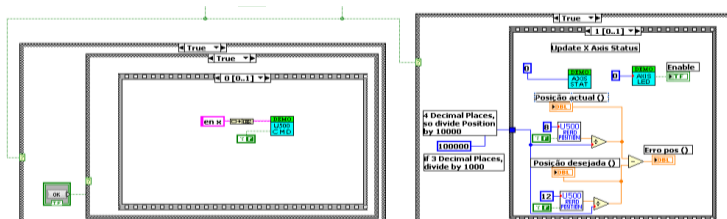


Figura A.2 – Código LabView para posicionamento, leitura em tempo real de parâmetros, do estágio ABL20100.

## II. Comunicação dos estágios da Newport

O XPS da Newport é um controlador de movimentos integrado, fácil de usar e com elevada e eficaz performance oferecendo uma comunicação high-speed em 10/100 Base-T Ethernet. Os dispositivos a eles ligados, podem ser manipulados via interface Web com funções avançadas de trajectórias e sincronização para um controlo de elevada precisão desde as sequências de movimento mais básicas até às mais complexas. Este controlador permite manipular até 8 actuadores da Newport, um vez que possui oito slots para conectar eixos, sendo também possível usar módulos adaptadores para outro tipo de actuadores de outras marcas. No software desenvolvido além de se tornarem as acções de configuração automáticas, também se tornou automático o movimento em si. De seguida, faz-se referência a algumas partes importantes do código LabView implementado relativo ao movimento dos posicionadores. Neste trecho de código apresentado, pode-se observar que é estabelecida uma conexão TCP entre o controlador e o PC. De seguida são, eliminados todos os grupos existentes, é iniciado um novo grupo e finalmente é feito o “homing” do grupo criado. O sistema do controlador vai gerar novos ficheiros de configuração e vai reiniciar. Desta forma, são automatizadas todas as acções necessárias para colocar os posicionadores no estado “Ready”, sendo que este código é executado cada vez que se inicia um processo de gravação. Posteriormente, faz-se o movimento do estágio de translação.

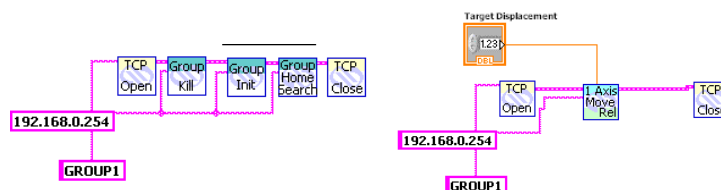


Figura A.3 – Trecho de código LabView para comunicação com controlador e estágios da Newport.

## III. Comunicação da câmara EO

No ponto anterior faz-se referência à programação criada para controlo dos estágios da Newport. Uma vez que o alinhamento da máscara de fase com a fibra óptica é comandado por um estágio da Newport com a aquisição da imagem em tempo real dessa mesma aquisição, a comunicação da câmara de alta resolução monocromática é conjugada com o código do estágio utilizado. De notar que a comunicação da câmara é feita por USB.

De forma a movimentar os posicionadores para a posição desejada de alinhamento, há uma relação directa entre o comando de movimento e aquisição de imagem. Desta forma procede-se á aquisição contínua de frames, como se pode observar na Figura A.4. O bloco IMAQ, reconhece a câmara conectada ao PC e o bloco seguinte configura a câmara. Após estas acções os restantes blocos encontram-se dentro de um ciclo While permitindo uma permanente aquisição de frames. É calculada a distância entre a fibra e a máscara de fase em cada frame permitindo um efeito de cálculo em tempo real.

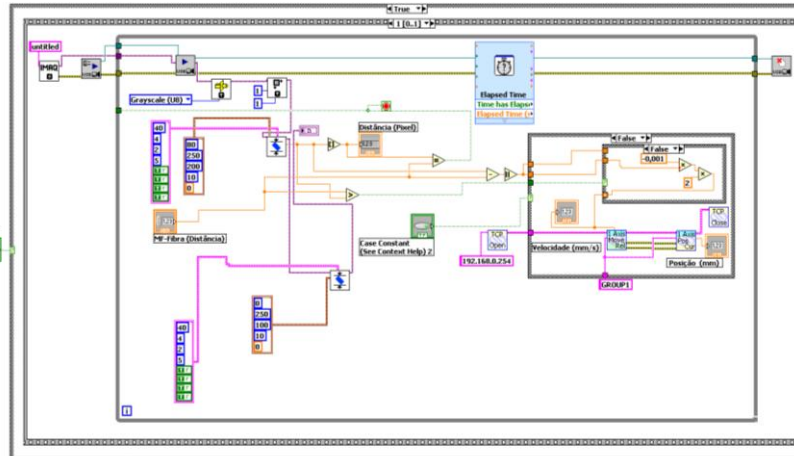


Figura A.4 – Código LabView para processamento de imagem em tempo real e controlo da distância da máscara de fase à fibra óptica.

Após o cálculo de cada distância, é enviada uma ordem de movimento aos posicionadores, a uma velocidade que se adapta conforme a distância actual esteja mais longe ou mais perto da distância pretendida. O bloco de código da figura anterior, está inserido no ciclo While da aquisição de frames, desta forma, o processo repete-se diversas vezes até ser atingida a distância pretendida. Basicamente, adquire-se uma frame, calcula-se a distância actual, e é actualizada a velocidade de movimento do estágio MCA-FF. Tendo isto, obtém-se um processo de alinhamento em tempo real com regulação de velocidade e precisão de movimentos da ordem dos micrómetros.

#### IV. Comandos fundamentais do Laser

Para configurar uma comunicação série entre o laser e o computador embutido no sistema, é necessário usar um Baud Rate de 9600, 8 data bits, 1 stop bit e anular a paridade bem como o handshaking. A comunicação série fica pronta a usar sempre que o Laser se encontra no estado “online”.

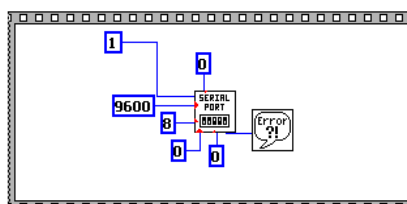


Figura A.5 – Código para comunicação série com o laser.

Para evitar conflitos, é necessário definir antes de qualquer comunicação, que se vai usar o PC para comunicar ou o touch panel. Para seleccionar o PC como fonte de comunicação, basta enviar o comando “lock operation”. O laser aceita tanto, mensagens de comandos, como mensagens de pedido de informação. Enviando um comando ou um pedido de informação, para o laser via PC, o utilizador deve esperar pela resposta antes de enviar um novo comando, visto que o laser responde sempre, mesmo que seja com uma mensagem de erro. Os comandos começam sempre pelo ASCII <ESC> e os pedidos de informação pelo ASCII <?>, sendo que ambos terminam com uma mudança

de linha (carriage return). Antes de enviar qualquer tipo de mensagens para o laser é necessário converter essas mensagens para o formato exigido pelo laser.

Depois de colocar o laser no estado "online", antes de enviar qualquer tipo de mensagens para o laser é preciso primeiro inicializar a interface série. O primeiro passo é limpar o buffer de recepção de dados do laser através do ASCII <10>. De seguida é necessário enviar o comando "Lock operation" para determinar que o PC é quem vai comunicar. Posto isto, a comunicação série está pronta a ser usada. Para evitar conflitos, é recomendado que se faça sempre antes do envio de qualquer mensagem, a limpeza do buffer de recepção de dados do laser. Por outro lado, se o checksum de um comando for superior a 1 byte (> FF), deve ser enviado apenas o byte menos significativo do checksum, caso contrário é recebida uma mensagem de erro por parte do laser.

O comando Lock Operation, tem a função de determinar o PC como fonte de comunicação com o laser. O comando em formato string corresponde a "<ESC>L1" seguido de mudança de linha, tendo o utilizador que ter em atenção em não usar espaços entre todos os elementos. O processo de envio é o seguinte:

- 1- Passar os caracteres do comando para bytes: <ESC>L1 - 27 76 49.
- 2- Calcular o check sum correspondente em decimal:  $27+76+49 = 152$ .
- 3- Converter o check sum para hexadecimal e separar os dígitos, passando cada um deles para byte: 152 - 98 - 9 8 - 57 56.
- 4- Adicionar a mudança de linha e escrever tudo junto em formato byte (carriage return <CR>): 27 76 49 57 56 13.
- 5- Outra possibilidade será enviar o comando em formato string: <27>L198<13>.

O laser poderá responder de 3 maneiras enviando 1 byte. Se enviar o byte \*, significa que a transmissão foi correcta, o comando foi executado com sucesso, mas o laser tem um erro. Se enviar o byte #, significa que tudo correu bem. Se enviar o byte }, significa que houve um erro na transmissão e o comando nem sequer foi executado no laser. De seguida, é explicado o procedimento para se executar a escrita de parâmetros no laser. O caso do comando Burst shots, define o número de pulsos por burst, quando a opção de operação é o burst mode. Como exemplo vai ser colocado a 1000 pulsos por burst. O comando base em formato string sem checksum é <ESC>BS com mudança de linha no final (<CR>).

- 1- Passar o número decimal 1000 para hexadecimal: 1000 - 03E8.
- 2- Adicionar o novo valor pretendido ao comando básico: <ESC>BS - <ESC>BS03E8.
- 3- Passar os caracteres para bytes: <ESC>BS03E8 - 27 66 83 48 51 69 56.
- 4- Somar todos os valores anteriores para obter o checksum (número decimal) e converter para hexadecimal:  $27+66+83+48+51+69+56 = 400 - 190$ .
- 5 - Separar o resultado do checksum, mas como o número é demasiado grande é usado apenas o byte menos significativo, e passar para decimal: 190 - 9 0 - 57 48.
- 6- Concatenar o resultado de 5 com 3 e adicionar mudança de linha (<13>): 27 66 83 48 51 69 56 57 48 13.
- 7- O comando fica pronto a enviar, embora possa ser enviado em formato string: <27>BS03E890<13>.

O bloco LabView seguinte, serve para enviar qualquer comando para o laser e receber a respectiva resposta. Este bloco foi usado diversas vezes dentro do código principal para fazer um refresh em tempo real de várias informações úteis, tais como

informações acerca dos pulsos por burst. Este bloco serve também para executar ordens no laser tal como disparar o feixe ou colocar no estado ready simplesmente e alterar parâmetros tais como os parâmetros dos pulsos por burst. Basicamente pode ser usado para em qualquer acção que se queira em relação ao laser, bastando alterar no bloco o comando a enviar e colocar dentro de ciclos para fazer repetição do comando quando se queira (actualização de informações), ou executar uma acção.

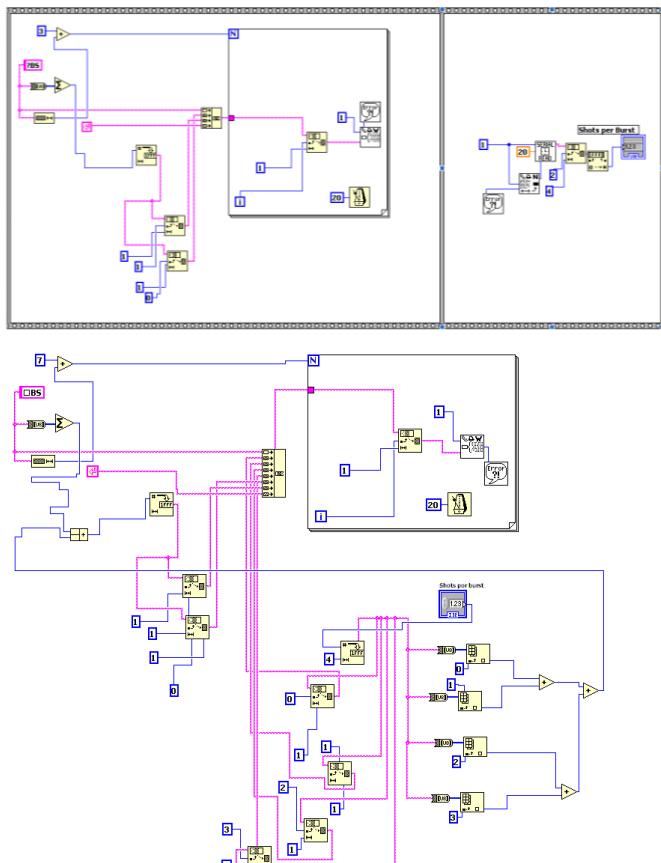


Figura A.6 – Código para escrita e leitura de informação de um comando que se queira receber ou ordenar.

Como se pode observar pela Figura A.6, dentro do bloco existe um ciclo de eventos, o qual começa com a configuração da comunicação série que deve ser feita segundo as informações da secção anterior (baud rate ... stop bits), seguido da escrita dos elementos de um qualquer comando que se queira enviar, que são convertidos para hexadecimal antes de serem enviados um a um. Basicamente é feito o equivalente ao apresentado no exemplo anterior mas em LabView. No final (evento 7 neste caso), é feita a leitura da resposta enviada pelo laser. No final do envio de cada elemento do comando, é calculado o checksum automaticamente e enviado da mesma forma para o laser, terminado o processo com o envio de uma mudança de linha (carriage return).