



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

FIBRAS ÓPTICAS CON REJILLAS DE BRAGG  
EN EL MONITOREO DE ESTRUCTURAS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

RAMÍREZ SOLANO IRVING

DIRECTOR DE TESIS:

SERGIY KHOTYAINITSEV



CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2014

# CONTENIDO

## Resumen

<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivo.....	2
1.4 Metas.....	2
1.5 Metodología.....	3
<b>Capítulo 2. Antecedentes teóricos de Rejillas de Bragg en fibra óptica.....</b>	<b>4</b>
2.1 Rejillas en fibras ópticas.....	4
2.1.1 Principio de funcionamiento de FBG en fibra óptica.....	4
2.1.2 Fotosensibilidad de las fibras ópticas.....	6
2.1.3 Tipos de FBG en fibra óptica.....	6
2.2 Métodos de fabricación de FBG en fibras ópticas.....	8
2.2.1 Técnica de interferometría.....	8
2.2.2 Técnica punto a punto.....	10
2.2.3 Técnica de máscara de fase.....	10
2.2.4 Cuadro comparativo de los métodos de fabricación.....	11
2.3 Sensores ópticos basados en FBG.....	12
2.4 Métodos de análisis de FBG.....	13
2.4.1 Teoría de modos acoplados.....	14
2.4.2 Método de Matriz de Transferencia (TMM).....	28
2.5 Respuesta de las FBG a factores externos.....	21
2.5.1 Descripción del efecto de la temperatura sobre las FBG.....	22
2.5.2 Descripción del efecto de la tensión sobre las FBG.....	23
2.6 Conclusiones.....	26
<b>Capítulo 3. Estudio teórico de la respuesta de las FBG a tensión.....</b>	<b>27</b>
3.1 Desarrollo de software de simulación.....	27
3.2 Verificación de software de simulación. Comparación de resultados de simulaciones con datos existentes de la respuesta espectral de FBG.....	27
3.3 Estudio de efecto de algunos parámetros de las FBG no uniformes sobre su respuesta espectral.....	34
3.4 Análisis de la respuesta espectral de las FBG consideradas en la parte experimental de este trabajo.....	35
3.5 Conclusiones.....	37

<b>Capítulo 4. Estudio experimental de la respuesta de las FBG a tensión.....</b>	<b>39</b>
4.1 Metodología experimental.....	39
4.2 Descripción de la instalación experimental.....	39
4.3 Resultados.....	44
4.4 Comparación de las predicciones teóricas con resultados experimentales.....	46
4.5 Conclusiones.....	48
<b>Capítulo 5. Estudio experimental de elemento estructural de concreto     instrumentado con FBG.....</b>	<b>49</b>
5.1 Características del concreto.....	49
5.2 Metodología experimental.....	49
5.3 Descripción de la instalación experimental .....	50
5.4 Resultados.....	53
5.5 Conclusiones.....	55
<b>Conclusiones generales.....</b>	<b>56</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>59</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>63</b>

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi madre, que con su demostración de una madre ejemplar me ha enseñado a no rendirme ante nada y siempre perseverar a través de sus sabios consejos. Además de ser la persona que me ha acompañado durante todo mi trayecto estudiantil y de vida.

A mi hermano que siempre ha estado junto a mí y brindándome su apoyo, muchas veces poniéndose en el papel de padre.

A mi Director de Tesis el Dr. Sergiy Khotyaintsev, Profesor del Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, UNAM, por su valiosa guía y asesoramiento a la realización de la misma.

A mi compañero y amigo Jonathan Rendón Pérez por haber trabajado complementariamente sobre el tema de las FBG presentando su tesis “Rejillas de Bragg en fibras ópticas como sensores de temperatura y tensión” obteniendo resultados como equipo.

Al Ing. Héctor Guzmán Olgún, Profesor del Departamento de Estructuras de la División de Ingenierías Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, UNAM, por haber facilitado el material para la realización de la tesis.

La DGAPA-PAPIIT de la UNAM por el apoyo en forma de Proyecto de investigación científica “Nuevas técnicas de monitoreo del estado físico e integridad de elementos y estructuras de diversos materiales mediante arreglos de fibras ópticas” con número de referencia IN117512.

La DGAPA-PAPIME de la UNAM por el apoyo en forma de Proyecto “Diseño de prácticas virtuales y presenciales para el mejoramiento de la enseñanza en algunas asignaturas de Ingeniería en Telecomunicaciones” con número de referencia PE104811.

La Facultad de Ingeniería y el Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo en forma de Proyecto “Implementación de Fibra Óptica para la Detección de Daño en Estructuras de Concreto” patrocinado por el Fondo de Colaboración del Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

## **RESUMEN**

En este trabajo se presentan los resultados de estudios teóricos y experimentales de la respuesta espectral de las Rejillas de Bragg utilizadas como sensores ópticos de tensión.

Con base en los modelos matemáticos existentes se desarrolló un propio programa de cálculo en Matlab, de las Rejillas de Bragg y se realizaron simulaciones de algunas variantes particulares de estas rejillas.

Teórica y experimentalmente, se obtuvieron datos cuantitativos sobre el comportamiento de algunos tipos particulares de las Rejillas de Bragg bajo efectos de tensión.

Se desarrolló una aplicación de Rejillas de Bragg en fibras ópticas en la instrumentación de elementos estructurales de concreto con dichas rejillas como sensores de tensión.

# CAPÍTULO 1

## Introducción

### 1.1 Antecedentes

El avance en las investigaciones de las fibras ópticas llevó al desarrollo de una nueva clase de elemento de fibra óptica llamado Rejillas de Bragg (FBG - Fiber Bragg Grating) [1].

El desarrollo de las FBG generó un cambio revolucionario en los sistemas de comunicaciones ópticas porque son capaces de realizar el filtrado de señales ópticas. Las FBG forman parte fundamental de sistemas de Multiplexión por División de Longitud de Onda (WDM). Los sistemas WDM utilizan múltiples portadoras ópticas que viajan a través de una sola fibra. Esta técnica requiere de filtros de alta selectividad de señales de banda estrecha para la separación de los canales y otras funciones de multiplexado [2].

Además el filtrado ha permitido que las FBG sean utilizadas como sensores ópticos.

El Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM desarrolla desde hace varios años investigación científica sobre sensores de fibra óptica y aplicaciones de FBG en el monitoreo de estructuras. Sin embargo en el momento de iniciar este trabajo el grupo no contaba con datos cuantitativos sobre algunos tipos particulares de FBG: el comportamiento (la respuesta espectral) bajo efectos de tensión. De las necesidades prácticas de este grupo de conocer características cuantitativas de las FBG surgió el presente tema, el cual fue desarrollado en conjunto con Jonathan Rendón Pérez quien hizo un estudio complementario presentando su tesis “Rejillas de Bragg en fibras ópticas como sensores de temperatura y tensión”

## **1.2 Justificación**

Los sensores con FBG tienen una gran promesa, pero su aplicación práctica requiere de datos cuantitativos de estas, en particular es importante la respuesta espectral bajo efectos de tensión.

Al contar con datos teóricos y experimentales confiables sobre algunos tipos particulares de las FBG, se facilitarán varios proyectos de investigación científica y desarrollo tecnológico del Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

La investigación realizada aporta los estudios teóricos y experimentales con las bases suficientes para comprender el funcionamiento de las FBG y utilizarles como sensores de tensión.

## **1.3 Objetivo**

La obtención de nuevos conocimientos sobre la respuesta espectral de algunos tipos particulares de FBG bajo efectos de tensión considerando su aplicación en el monitoreo de estado físico de elementos estructurales para materiales de concreto.

## **1.4 Metas**

- I. Identificar las bases teóricas del análisis de FBG.
- II. Implementar algunos modelos matemáticos y simular el comportamiento de FBG en función de tensión.
- III. Comprobar experimentalmente las predicciones teóricas.
- IV. Implementar sensores con FBG en la medición de tensiones y compresiones en elementos estructurales de concreto.



## **1.5 Metodología**

La metodología incluye tanto métodos teóricos como experimentales.

En la parte teórica se planea el uso de métodos numéricos para investigar la característica de la respuesta espectral de FBG.

En la parte experimental se realizarán experimentos con FBG bajo efectos de tensión, analizando el cambio de la respuesta espectral. La caracterización de la respuesta se realizará utilizando los instrumentos de medición comerciales, con los sensores mencionados.

## **CAPÍTULO 2**

# **Antecedentes teóricos de Rejillas de Bragg en fibra óptica**

### **2.1 Rejillas en fibras ópticas**

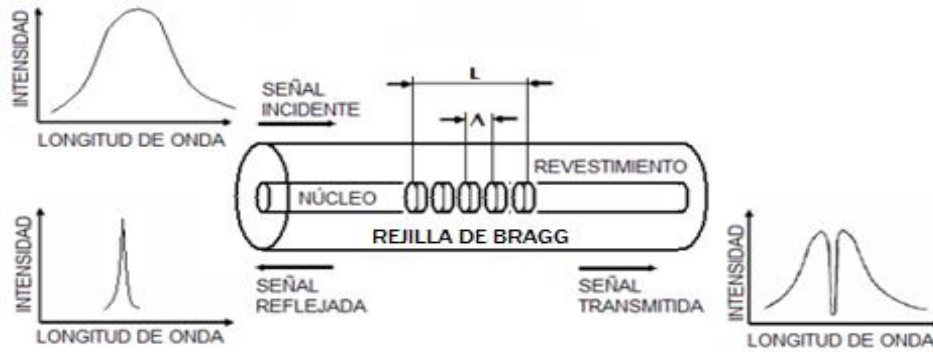
Una rejilla en términos generales consiste en la variación periódica del índice de refracción efectivo a lo largo de una determinada longitud de la fibra óptica.

Las rejillas en fibra óptica se clasifican en dos tipos: FBG y Rejillas de Periodo Largo. Las Rejillas de Periodo Largo tienen un periodo de centenas de veces mayor que la longitud de onda de la señal incidente. Debido a que el tema a desarrollar en esta tesis son las FBG, éstas serán estudiadas en detalle en las secciones siguientes.

En el área de instrumentación, el uso de rejillas en fibra óptica se concentra en sensores de temperatura y tensión.

#### **2.1.1 Principio de funcionamiento de FBG en fibra óptica**

Una FBG es aquella donde el periodo de la variación del índice de refracción es aproximadamente igual a la mitad de la longitud de onda de la luz incidente en la fibra óptica, se muestra en Fig. 2.1. La variación del índice de refracción se obtiene gracias a la fotosensibilidad (que se describe al final de esta sección), al exponer la fibra óptica a radiación UV.



**Figura 2.1** Ilustración de una FBG en fibra óptica [3].

La variación del índice de refracción que forma la rejilla es perpendicular al eje longitudinal de la fibra. La condición de Bragg está dada por:

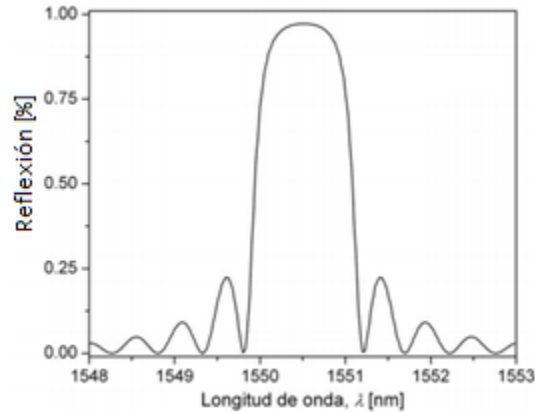
$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1.1)$$

Donde  $\lambda_B$  es la longitud de onda reflejada por la FBG (pico del espectro reflejado),  $n_{\text{eff}}$  es el índice efectivo de refracción del núcleo de la fibra óptica y  $\Lambda$  es el periodo de variación del índice de refracción. Al transmitir luz experimentará una reflexión en cada variación del índice de refracción sumándose constructivamente a lo largo de la fibra hasta formar el pico de reflexión de salida.

La reflectividad de una FBG es:

$$R(l, \lambda) = \tanh^2(\Omega l), \quad (1.2)$$

Donde  $\Omega$  representa el coeficiente de acoplamiento y  $l$  es la longitud de la rejilla. La ecuación anterior representa la reflectividad de una rejilla que es dependiente de la longitud de la rejilla y el coeficiente de acoplamiento entre la longitud de onda que se propaga en la fibra con la longitud de onda que se refleja, cualquier cambio en estos factores afecta la reflectividad de la rejilla. En Fig. 2.2 se muestra el espectro de una FBG dependiente de la longitud de onda reflejada.



**Figura 2.2** Espectro de una FBG uniforme con longitud de onda reflejada en 1550.50 [nm] [4].

### 2.1.2 Fotosensibilidad de las fibras ópticas

La fotosensibilidad es el cambio permanente del índice de refracción de una fibra óptica, cuando ésta se expone a luz con cierta longitud de onda e intensidad, que depende del material con que es dopada la fibra óptica.

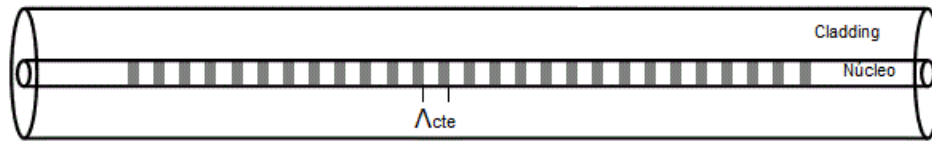
La fotosensibilidad fue descubierta mientras se realizaban experimentos con fibra de sílice dopada con germanio [5]; Kenneth O. Hill y colaboradores del Centro de Investigación Canadiense se percataron que al exponer prolongadamente en el núcleo de una fibra óptica a radiación UV de un láser de Argón después de algunos minutos observaron un incremento en la intensidad de la luz reflejada, la cual aumentó hasta que casi toda la luz fue reflejada por la fibra.

### 2.1.3 Tipos de FBG en fibra óptica

A continuación se describen los tipos de FBG más importantes:

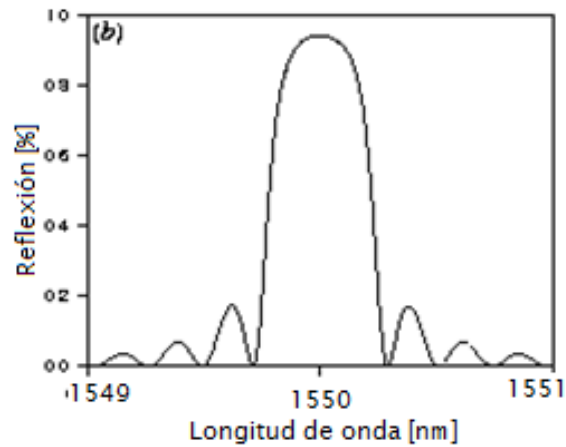
#### **FBG uniforme**

La característica principal de este tipo de rejillas es una distribución uniforme a lo largo de la fibra, la variación del índice de refracción y el periodo de la rejilla permanecen constantes como se muestra en la Fig. 2.3.



**Figura 2.3** Ilustración de una FBG uniforme.

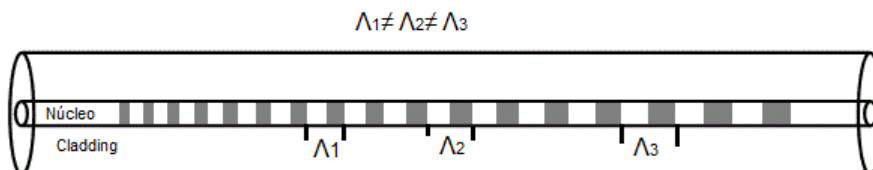
El espectro de reflexión de una rejilla uniforme se muestra en Fig. 2.4.



**Figura 2.4** Respuesta espectral de una FBG uniforme [4].

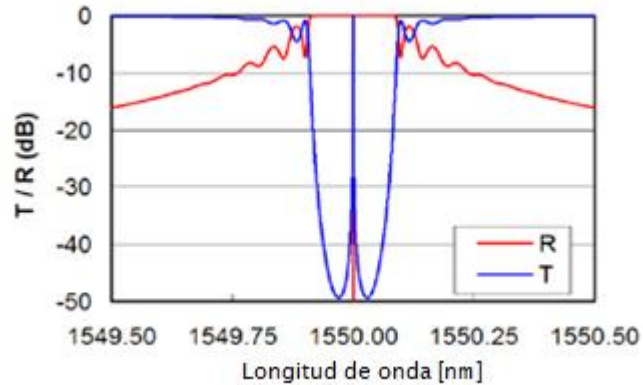
### FBG no uniforme

La característica de este tipo de rejilla es una variación del índice de refracción no uniforme a lo largo de la fibra, de igual forma el periodo y fase varían, como se muestra en la Fig. 2.5, de tal manera que se obtiene una respuesta espectral rectangular de un deseado ancho de banda.



**Figura 2.5** Ilustración de una FBG no uniforme.

El espectro de reflexión de una rejilla no uniforme se muestra en Fig. 2.6.



**Figura 2.6** Respuesta espectral de una FBG no uniforme: T transmisión y R reflexión no uniforme en función de longitud de onda [3].

## 2.2 Métodos de fabricación de FBG en fibras ópticas

Los métodos de fabricación de FBG en fibras ópticas se basan principalmente en la exposición de la fibra óptica con un haz de un láser de alta potencia típicamente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y UV, cambiando el índice efectivo de refracción y formando la rejilla [6]. La fabricación de FBG se hace después de la fabricación de fibra óptica. Los tres métodos principales son:

- Técnica de interferometría.
- Técnica punto a punto.
- Técnica de máscara de fase.

La elección del método de fabricación depende de la longitud de la rejilla y el perfil deseado.

### 2.2.1 Técnica de interferometría.

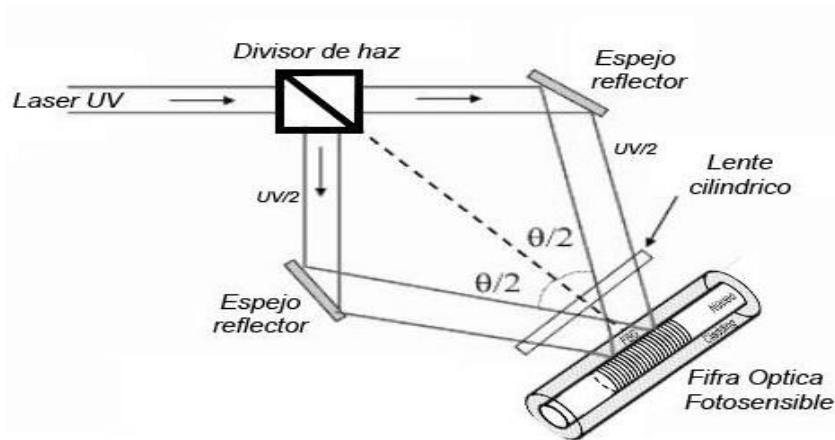
Esta técnica se basa en la interferencia de dos haces que provienen de una fuente de luz coherente. Cada haz viaja por caminos diferentes para luego recombinarse y formar un determinado patrón de interferencia:

El patrón de interferencia corresponde a la intensidad variable de la luz en la dirección longitudinal tal que produce una variación del índice de refracción [7]. El índice de refracción cambia de acuerdo a la intensidad de la luz a la que se expone el núcleo.

El patrón de interferencia ( $\Lambda$ ):

$$\Lambda = \frac{\lambda_w}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)}, \quad (1.3)$$

Donde  $\lambda_w$  es la longitud de onda de Bragg y  $\theta$  es el ángulo entre los haces que interfieren mostrado en Fig. 2.7. Cambiando el ángulo de intersección  $\theta$  entre cada haz se obtiene el periodo deseado de la rejilla.



**Figura 2.7** Ilustración de fabricación de FBG con el método de interferometría [8].

La técnica de interferometría es usada en la fabricación de rejillas uniformes. También se puede lograr algunos perfiles no uniformes agregando lentes en los brazos del interferómetro [9].

La desventaja de la interferometría es la vibración o corriente de aire a través del camino del láser sobre el interferómetro que puede afectar el patrón de interferencia, afectando la visibilidad de la rejilla.

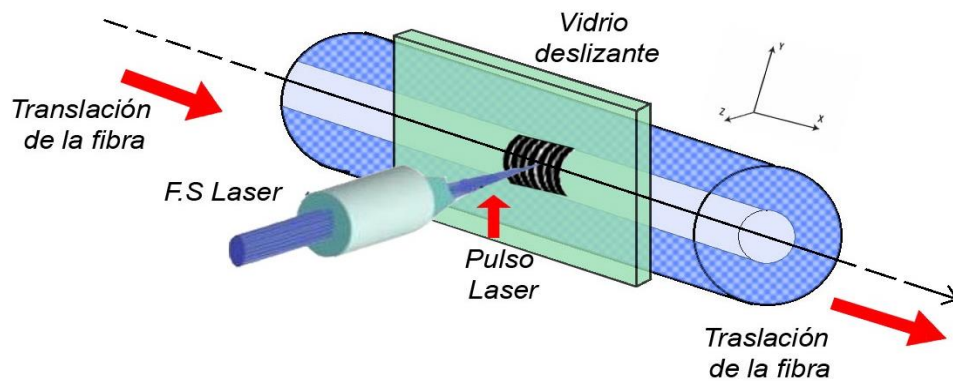
### 2.2.2 Técnica punto a punto

Esta técnica consiste en inducir cambios en el índice de refracción, correspondientes en la rejilla, uno tras otro, a lo largo de la fibra usando láseres de pulsos.

En el procedimiento, debe moverse el enfoque (fibra o láser) la distancia correspondiente al periodo de la rejilla en dirección paralela al eje de la fibra. El proceso se repite hasta que se ha fabricado la estructura completa de la rejilla.

Es indispensable que el sistema de traslación sea altamente estable y preciso.

La técnica permite la fabricación de cualquier longitud de la rejilla, así como cualquier periodo dependiendo de la precisión de las unidades de traslado y el enfoque, por lo que esta técnica es más flexible que la técnica anterior [10]. La técnica punto a punto se muestra en Fig. 2.8.



**Figura 2.8** Ilustración de fabricación de FBG con el método de punto a punto [10].

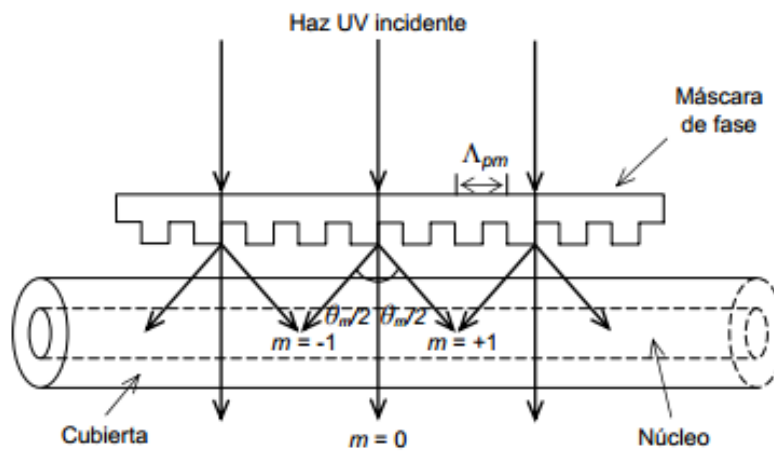
### 2.2.3 Técnica de máscara de fase

La técnica de máscara de fase es usada para fabricar una rejilla en fibra óptica. Un haz de luz UV se incide sobre una máscara de fase produciendo una difracción de varios ordenes,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Los órdenes de incidencia y difractados deben satisfacer la siguiente ecuación:



$$\Lambda_{pm} = \frac{m\lambda_{uv}}{\left( \text{sen} \frac{\theta_m}{2} - \text{sen}\theta_i \right)}, \quad (1.4)$$

Donde  $\Lambda_{pm}$  es el periodo de la máscara de fase,  $\theta_m/2$  es el ángulo del orden difractado,  $\lambda_{uv}$  longitud de onda y  $\theta_i$  el ángulo del haz UV incidente. Si  $\theta_i = 0$ , el haz UV incidente produce una difracción con orden  $m = 0$  y  $m = \pm 1$ . Los ordenes  $m = \pm 1$  producen un patrón de interferencia en la fibra, se muestra en Fig. 2.9.



**Figura 2.9** Ilustración de fabricación de FBG con el método de máscara de fase [7].

Esta es la técnica más utilizada para la fabricación de FBG debido a la necesidad de producir en masa. La principal desventaja de la técnica de máscara de fase es la necesidad de una máscara para cada variante de la rejilla deseada.

## 2.2.4 Cuadro comparativo de las técnicas de fabricación

La siguiente tabla presenta ventajas y desventajas de las principales técnicas de fabricación de las FBG que ayuda en la selección de la técnica adecuada de acuerdo a las necesidades de los usuarios.

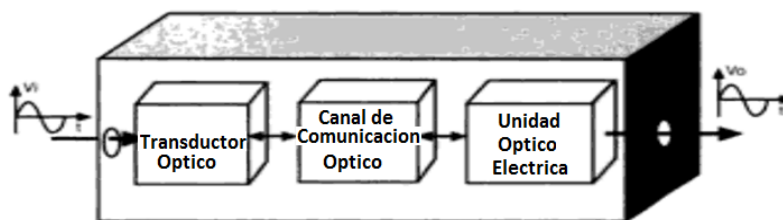
**Tabla 1** Comparación de técnicas de fabricación en FBG.

Técnica de fabricación	Ventajas	Desventajas
Interferométrica	Gran flexibilidad para fabricar FBG a distintas longitudes de onda.	Susceptible a vibraciones mecánicas.
Punto a punto	La posibilidad de modificar el periodo, así como rejillas largas.	Proceso de tiempo prolongado.
Máscara de fase	Fácil inscripción del haz UV. Producción en masa de rejillas. Baja sensibilidad a las vibraciones mecánicas.	Se necesita una máscara de fase para cada variante deseada.

### 2.3 Sensores basados en FBG

Un sensor genérico está constituido por un dispositivo transductor, un canal de comunicación y un subsistema para la detección, tratamiento, procesamiento, y acondicionamiento de la señal, estos elementos pueden estar agregados de una u otra forma.

En términos generales un sensor óptico es un sistema fotónico en el cual la cantidad física medida o señal de entrada ( $v_i$ ), introduce modificaciones en algunas de las características (transmisión, reflexión, dispersión, absorción, etc.) de la luz en el sistema óptico, y después de ser detectada, procesada y acondicionada, el sistema entregará una señal de salida ( $v_o$ ) usualmente eléctrica, se muestra en Fig. 2.10.



**Figura 2.10** Ilustración general de un sensor óptico.

Los sensores basados en FBG tienen algunas ventajas sobre sensores convencionales, algunas de estas ventajas son:

- Capacidad de Multiplexación.
- Soportan un gran rango de temperatura.
- Posibilidad de lograr largas distancias entre los sensores y los dispositivos de adquisición de datos.
- La fibra óptica es un material dieléctricamente aislante, estos sensores no requieren ninguna conexión eléctrica y por lo tanto pueden ser usados en entornos de alta tensión eléctrica.
- Son naturalmente inmunes a interferencias electromagnéticas (EMI), y no las producen.
- Son inmunes a la corrosión.

Los sensores basados en FBG sirven para mediciones de distintos factores externos (temperatura, presión, tensiones, etc.). La mayoría de los trabajos sobre sensores basados en FBG se han centrado en su uso como filtros para medir tensión o temperatura.

#### **2.4 Métodos de análisis de FBG.**

Existen diversos métodos de análisis de las FBG [11 - 13]. Los principales métodos son:

- Teoría de modos acoplados [11]
- Método de Matriz de Transferencia (TMM) [12]

### 2.4.1 Teoría de Modos Acoplados

El método más popular que permite representar el comportamiento, así como las propiedades ópticas de las FBG es la Teoría de Modos Acoplados, esto debido a su relativa simplicidad y efectividad en el modelado matemático de las rejillas.

La teoría de modos acoplados inicialmente fue aplicada para rejillas uniformes, sin embargo se desarrolló una extensión para rejillas no uniformes [13]. El cambio del índice de refracción en la fibra formando la rejilla provoca un intercambio de energía entre los modos, este fenómeno es llamado acoplamiento de modos.

En las FBG el acoplamiento o intercambio de energía ocurre entre modos en contra propagación, esto significa que la energía de los modos incidentes en la fibra experimentara un cambio de energía con modos idénticos de sentido contrario. El modelado de las rejillas es establecido con la solución analítica de sistemas de ecuaciones diferenciales.

Este análisis inicia estableciendo la componente transversal del campo eléctrico suponiendo una guía de onda sin perturbaciones. El campo eléctrico donde los modos de transmisión son establecidos por el índice  $m$  está dado por la ecuación:

$$E^t(x, y, z, t) = \sum_m A_m(z) \exp(i\beta_m z) + B_m(z) \exp(-i\beta_m z) e_m^t(x, y) \exp(-i\omega t), \quad (1.5)$$

Donde los coeficientes  $A_m(z)$  y  $B_m(z)$  describen las variaciones lentas de las amplitudes del  $m$ -enésimo modo en dirección  $+z$  y  $-z$ , respectivamente. La constante de propagación  $\beta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) n_{eff}$ . El campo transversal  $e_m^t(x, y)$  describe los modos de transmisión.

Los modos de propagación son perpendiculares en una fibra óptica y no intercambian energía, sin embargo al realizar un cambio sobre el medio dieléctrico los modos se acoplarán teniendo como resultado el cambio de las amplitudes  $A_m(z)$  y  $B_m(z)$  a lo largo del eje  $z$  y están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dA_m}{dz} = i \sum_q A_q (C_{qm}^T + C_{qm}^L) \exp[i(\beta_q - \beta_m)z] + i \sum_q B_q (C_{qm}^T + C_{qm}^L) \exp[-i(\beta_q - \beta_m)z], \quad (1.6)$$

$$\frac{dB_m}{dz} = -i \sum_q A_q (C_{qm}^T - C_{qm}^L) \exp[i(\beta_q + \beta_m)z] - i \sum_q B_q (C_{qm}^T + C_{qm}^L) \exp[-i(\beta_q - \beta_m)z], \quad (1.7)$$

El coeficiente de acoplamiento transversal entre los modos de propagación  $m$  y  $q$ , está definido con la ecuación:

$$C_{qm}^T(z) = \frac{W}{4} \iint_{\infty} \Delta\varepsilon(x, y, z) e_q^T(x, y) \bullet e_m^{T*}(x, y) dx dy, \quad (1.8)$$

Donde  $\Delta\varepsilon(x, y, z) \cong 2n\delta n$  cuando  $\delta n \ll n$  llamado cambio de la permitividad. El coeficiente de acoplamiento longitudinal  $C_{qm}^L(z)$  tiene una expresión muy similar a la transversal, pero generalmente se cumple  $C_{qm}^L(z) \ll C_{qm}^T(z)$ , por lo tanto se desprecia. En la mayoría de las fibras, el cambio en el índice de refracción inducido por el haz UV ( $\delta n$ ) es aproximadamente uniforme y se presenta únicamente en el núcleo. Por lo tanto  $\delta n$  se puede reemplazar por  $\delta n_{core}$  en (1.8), definiendo dos nuevos coeficientes.

$$\zeta_{qm}(z) = \frac{\omega n_{core}}{2} \delta n_{core}(z) \iint_{core} e_q^T(x, y) \bullet e_m^{T*}(x, y) dx dy, \quad (1.9)$$

$$\kappa_{qm}(z) = \frac{S}{2} \zeta_{qm}(z), \quad (1.10)$$

Donde  $\zeta_{qm}(z)$  es el coeficiente de acoplamiento incidente y  $\kappa_{qm}(z)$  es el coeficiente de acoplamiento reflejado entre los modos  $q$  y  $m$ . De tal manera se puede reescribir el coeficiente de acoplamiento transversal como:

$$C_{qm}^T = \zeta_{qm}(z) + 2\kappa_{qm}(z) \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \varphi(z)\right], \quad (1.11)$$

Puesto que en la FBG predomina el acoplamiento entre modos fundamentales que se propagan en sentidos contrarios con amplitudes  $A(z)$  y  $B(z)$ , se puede simplificar dando énfasis solo a los términos referentes a estos modos. En estas condiciones se obtienen las variaciones en las amplitudes definidas en (1.6) y (1.7) como:

$$\frac{dA^+}{dz} = i\zeta^+ A^+(z) + i\kappa B^+(z), \quad (1.12)$$

$$\frac{dB^+}{dz} = -i\zeta^+ B^+(z) - i\kappa^* A^+(z), \quad (1.13)$$

Donde las amplitudes  $A^+(z)$  y  $B^+(z)$  están definidas como:

$$A^+(z) = A(z) \exp(i\delta_d z - \varphi/2), \quad (1.14)$$

$$B^+(z) = B(z) \exp(-i\delta_d z + \varphi/2), \quad (1.15)$$

El coeficiente general de auto acoplamiento  $\zeta^+$  está definido por:

$$\zeta^+ = \delta_d + \zeta - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}, \quad (1.16)$$

El término  $\frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}$  define el posible “*chirp*” en la rejilla  $\delta$ , refiriéndose a la variación de la frecuencia dentro de un pulso. Definido  $\delta_n$  como el desfase entre los modos que se acoplan está dado por:

$$\delta_d = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n_{eff} \left[ \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_d} \right] \quad (1.17)$$

Donde el subíndice “ $\lambda_d$ ” indica la longitud de onda de reflexión de diseño para la rejilla. Por lo tanto:  $\lambda_d = 2n_{eff}\Lambda$  cuando el cambio del índice de refracción es infinitesimalmente pequeño, es decir,  $\delta = 0$  cumpliendo la condición de Bragg.

Considerando una FBG uniforme, se pueden obtener nuevas ecuaciones. Un coeficiente  $\zeta$  puede representar las pérdidas por absorción en la rejilla, donde el coeficiente de las pérdidas de potencia está dado por:  $a = 2\text{Im}(\zeta)$ . Las ecuaciones están dadas por:

$$\zeta = \frac{2\pi}{\lambda} \delta n_{eff}, \quad (1.18)$$

$$\kappa = \kappa^* = \frac{\pi}{\lambda} S \delta n_{eff}, \quad (1.19)$$

Cuando la rejilla es uniforme a lo largo del eje  $z$ , implica  $\delta n_{eff}$  constante y  $\frac{d\varphi}{dz} = 0$

(considerando que no hay “*chirp*”). Por tanto  $\kappa$ ,  $\zeta$  y  $\zeta^+$  son constantes. Donde  $S$  es la apodización que reduce el ruido, es decir, disminución de lóbulos secundarios. Así (1.14) y (1.15) constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden con coeficientes constantes, para las cuales se tienen soluciones analíticas definiendo las condiciones de frontera apropiadas.

Considerando una FBG uniforme de longitud  $L$ , y asumiendo que la onda incidente va desde  $z = -\infty$ , es decir,  $A^+(-L/2) = 1$  requiriendo que no haya una onda de

regreso para  $z \geq L/2$  o  $B^+(-L/2)=0$ . El coeficiente de reflexión está dado por

$\rho = \frac{B^+(-L/2)}{A^+(-L/2)}$  y la reflexión de la señal incidente  $R = |\rho|^2$  tienen la forma:

$$\rho = \frac{-\kappa \sinh \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}}{\zeta^+ \sinh \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2} + i \sqrt{\kappa^2 - \zeta^{+2}} \cosh \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}}, \quad (1.20)$$

$$R = \frac{\sinh^2 \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}}{-\frac{\zeta^{+2}}{\kappa^2} + \cosh^2 \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}}, \quad (1.21)$$

De (1.21) la máxima reflexión estará dada por:

$$R_{\max} = \tanh^2(\kappa L), \quad (1.22)$$

Cuando  $\zeta^+ = 0$  y a la longitud de onda máxima:

$$\lambda_{\max} = \left( 1 + \frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} \right) \lambda_d, \quad (1.23)$$

## 2.4.2 Método de Matriz de Transferencia (TMM)

En rejillas no uniformes las ecuaciones de modos acoplados son resueltas a través de métodos numéricos. Existen dos aproximaciones para calcular el espectro de la rejilla. La primera aproximación es a través de la integración numérica directa de las ecuaciones de los modos acoplados. Para una rejilla de longitud  $L$  que toma generalmente  $A^+(L)=1$  y  $B^+(L)=0$  e integrándola hacia atrás desde  $z=L$  hasta  $z=0$ . Otra aproximación es mediante secciones uniformes, en el que la rejilla es dividida en un cierto número de secciones [14].



La solución de forma cerrada para cada sección uniforme son combinadas mediante la multiplicación de un arreglo de matrices de 2x2 [12]. La rejilla puede ser dividida en  $M$  secciones uniformes, de tal manera que se obtiene la siguiente expresión:

$$L = \sum_{j=1}^n \delta l_j, \quad (1.24)$$

Donde los parámetros de longitud, acoplamiento y periodos son constantes; ya que generalmente dependen de  $z$  y en conjunto tendrán un efecto. Cada segmento  $\delta l$  posee una única dependencia funcional de  $z$ , por lo tanto cada sección tendrá una solución analítica distinta para el coeficiente de transmisión, reflexión y fase. Así cada parámetro de la sección anterior será la entrada de la siguiente sección adyacente.

Se definen  $A_k^+$  y  $B_k^+$  como las amplitudes de los campos después de atravesar la sección  $k$ . Entonces para la FBG se tienen las siguientes condiciones de frontera  $A_0^+ = A^+(L/2) = 1$  y  $B_0^+ = B^+(L/2) = 0$  calculando la componente final  $M$  de la matriz  $A_M^+ = A^+(-L/2)$  y  $B_M^+ = B^+(-L/2)$ . Donde  $A$  es la entrada y  $B$  es la salida. Así la propagación a través de cada sección uniforme  $k$  está representada por la matriz  $T_k$ .

$$\begin{pmatrix} A_k^+ \\ B_k^+ \end{pmatrix} = T_k \begin{pmatrix} A_{k-1}^+ \\ B_{k-1}^+ \end{pmatrix}, \quad (1.25)$$

Donde:

$$T_k = \begin{pmatrix} \cosh(\Omega dz) - i \frac{\zeta^+}{\Omega} \sinh(\Omega dz) & -i \frac{\kappa}{\Omega} \sinh(\Omega dz) \\ i \frac{\kappa}{\Omega} \sinh(\Omega dz) & \cosh(\Omega dz) + i \frac{\zeta^+}{\Omega} \sinh(\Omega dz) \end{pmatrix}, \quad (1.26)$$

Además  $dz$  es la longitud de la  $k$ th sección uniforme, los coeficientes de acoplamiento local son  $\zeta^+$  y  $\kappa$  para la  $k$ th sección y:

$$\Omega = \sqrt{\kappa^2 - \zeta^{+2}}, \quad (1.27)$$

Una vez que todas las matrices de cada una de las secciones individuales son conocidas, las amplitudes de salida pueden ser conocidas también:

$$\begin{pmatrix} A_M^+ \\ B_M^+ \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} A_0^+ \\ B_0^+ \end{pmatrix}, \quad (1.28)$$

Donde:

$$T = T_M \cdot T_{M-1} \cdot \dots \cdot T_k \cdot \dots \cdot T_1, \quad (1.29)$$

$$T = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix}, \quad (1.30)$$

Podemos determinar que la amplitud transmitida está dada por:

$$A_0^+ = \frac{1}{T_{11}}, \quad (1.31)$$

Y la amplitud reflejada:

$$B_M^+ = \frac{T_{21}}{T_{11}}, \quad (1.32)$$

Conociendo la aproximación dada por (1.26) podemos sustituir los valores obteniendo una nueva expresión:

$$\rho = \frac{B_M^+}{A_M^+} = \frac{T_{21}}{T_{11}}, \quad (1.33)$$

$$\tau = 1 - \rho = \frac{A_0^+}{A_M^+} = \frac{1}{T_{11}}, \quad (1.34)$$

Donde  $\rho$  es la reflexión y  $\tau$  es la transmisión.

El número de secciones  $M$  que se necesitan para calcular esta aproximación es determinado por la precisión requerida.  $M$  no debe ser larga, ya que las aproximaciones de la teoría de modos acoplados que conducen a (1.14) y (1.15)

no son válidos cuando una sección de la rejilla uniforme es solo una rejilla de periodo largo. Por se establece la siguiente condición:

$$L \gg dz \gg \Lambda, \quad (1.35)$$

Para implementar esta aproximación simplemente se asignan valores constantes  $\zeta$ ,  $\kappa$  y  $\frac{0.5 d\varphi}{dz}$  que se evalúan en el centro de cada una de las secciones. Para el cambio de fase y muestreo de rejillas, se debe anexar una matriz de cambio de fase  $\bar{T}_k$  y es insertada entre las matrices  $T_k$  y  $T_{k+1}$  en (1.28), lo que representa un cambio de fase después de  $kth$  sección. Finalmente la expresión que representa el cambio de fase entre rejillas está establecida por la siguiente matriz:

$$\bar{T}_k = \begin{pmatrix} \exp\left(-\frac{i\varphi_k}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{i\varphi_k}{2}\right) \end{pmatrix}, \quad (1.36)$$

Donde  $\varphi_k$  es el cambio de fase en la rejilla.

## 2.5 Respuesta de las FBG a factores externos

Bajo factores externos: temperatura y tensión, la estructura de las FBG experimenta un cambio físico que afecta el periodo y el índice de refracción efectivo, así resulta un cambio de la longitud de onda de reflexión de la rejilla. Este cambio es la base de operación de los sensores basados en FBG.

La respuesta a la tensión es inducida tanto por el cambio parcial del periodo de la rejilla debido a la elongación física de la fibra óptica y el cambio en el índice de refracción de la fibra debido a los efectos foto-elásticos.

La respuesta térmica es inducida tanto por la expansión térmica inherente del material de fibra y la dependencia de la temperatura del índice de refracción, por lo tanto cualquier cambio en la longitud de onda de reflexión es la suma de los factores de tensión y de temperatura.

### 2.5.1 Descripción del efecto de la temperatura sobre las FBG

La sensibilidad de las FBG es la razón del desplazamiento de la longitud de onda de reflexión con la temperatura aplicada [15]. El cambio de la longitud de onda de reflexión es provocado por la expansión de la fibra óptica y el cambio en el índice efectivo de refracción por el efecto termo-óptico del aumento de temperatura. La relación del efecto de la temperatura es expresada partiendo de la condición de Bragg establecida por (1.1), el cambio de la longitud de onda de reflexión debido a factores externos es descrito por la siguiente ecuación:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff} \Delta\Lambda + 2\Delta n_{eff} \Lambda \quad (1.37)$$

De (1.37) la temperatura es expresada de la siguiente forma:

$$d\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{dn_{eff}}{dT} + n_{eff} \frac{d\Lambda}{dT} \right) dT \quad (1.38)$$

Dividiendo (1.38) entre (1.1) se obtiene:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \left( \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \right) dT \quad (1.39)$$

De la ecuación anterior se tiene que el factor  $\alpha_n = \frac{dn_{eff}}{n_{eff}dT}$  representa el coeficiente

termo-óptico de la fibra y el factor  $\alpha_\Lambda = \frac{d\Lambda}{\Lambda dT}$  es el coeficiente de expansión

térmica de la fibra. De esta forma el cambio en la longitud de onda de reflexión debido al cambio de temperatura está dado por:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_n + \alpha_\Lambda)\Delta T \quad (1.40)$$

De acuerdo a la ecuación anterior la sensibilidad de la temperatura de una FBG tiene una relación prácticamente lineal respecto al cambio de la longitud de onda de reflexión, es decir el cambio de la longitud de onda de reflexión de temperatura es directamente proporcional a la longitud de onda de operación de las FBG, se muestra en Fig. 2.11. Los recientes estudios muestran que la respuesta a los efectos de la temperatura tiene una pequeña no linealidad [16].

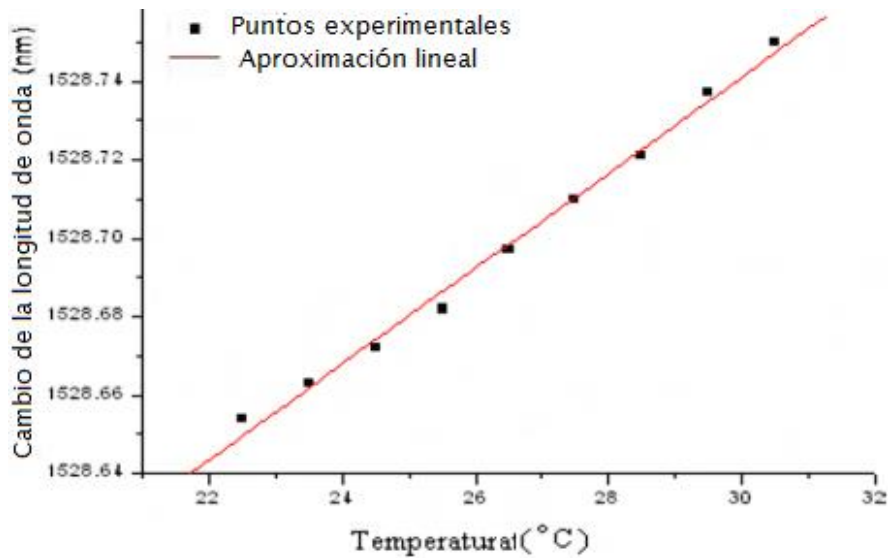
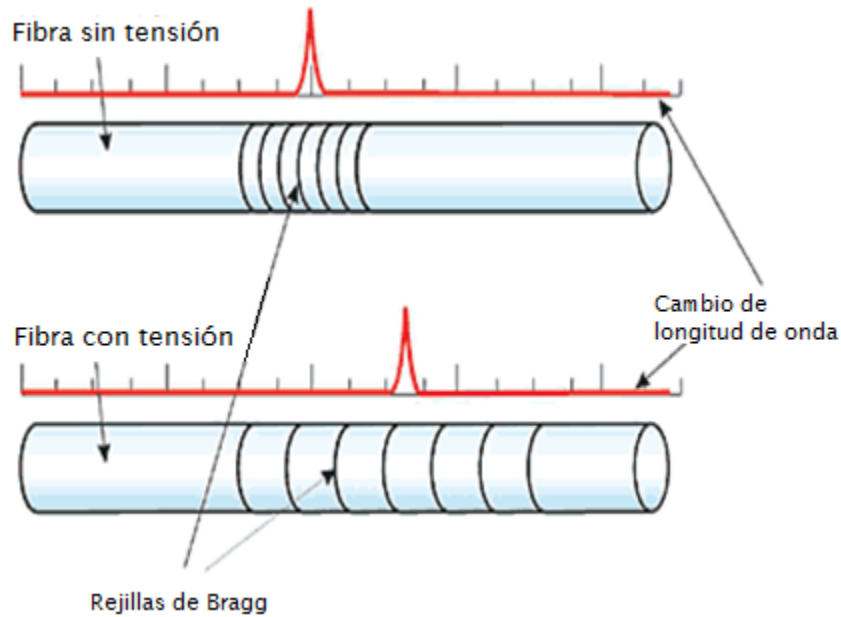


Figura 2.11 Gráfica del comportamiento de las FBG bajo efecto de temperatura [16].

### 2.5.2 Descripción del efecto de la tensión sobre las FBG

La sensibilidad de las FBG es el cambio de longitud de onda reflejada de Bragg con respecto a la tensión aplicada sobre las FBG debido al cambio del índice de refracción modificado por la fuerza mecánica aplicada sobre la rejilla [17,18]. Tal efecto se muestra en Fig. 2.12, mostrando el cambio de la longitud de onda de reflexión de la rejilla.



**Figura 2.12** Ilustración del comportamiento espectral de la FBG bajo efecto de tensión [19].

Partiendo la ecuación (1.1), la forma diferencial es:

$$d\lambda_B = 2\Lambda dn_{eff} + 2n_{eff}d\Lambda, \quad (1.41)$$

Dividiendo (1.41) entre (1.1) se obtiene:

$$\frac{d\lambda_{B\lambda}}{\lambda_B} = \frac{dn_{eff}}{n_{eff}} + \frac{d\Lambda}{\Lambda}, \quad (1.42)$$

Por otra parte el cambio en  $n_{eff}$  debido a la tensión ( $\varepsilon$ ) está dado por:

$$P = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (1.42)$$

$p_{11} \approx 0.113$  y  $p_{12} \approx 0.235$  son coeficientes tenso-ópticos y  $\nu = 0.16$  es el coeficiente de Poisson para fibras de sílice dopadas con germanio. Simplificando (1.42) se obtiene:

$$P = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (1.43)$$

Donde  $P=0.22 \frac{\mu m}{\mu \varepsilon}$  es el coeficiente foto-elástico efectivo para fibras de sílice. De esta forma el cambio de la longitud de onda de reflexión en función de la tensión aplicada en la fibra está dado por la ecuación:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P)\varepsilon, \quad (1.44)$$

La tensión longitudinal sufrida por la fibra ( $\varepsilon$ ) se representa de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \left[ \frac{\left( \frac{d\lambda_B}{\lambda_B} \right)}{F_G} \right]_{strain}, \quad (1.45)$$

Donde  $d\lambda_B$  y  $\lambda_B$  representan la variación de longitud de onda reflejada de la FBG y la longitud de onda reflejada de la FBG sin tensión respectivamente,  $F_G$  el factor estimado de tensión.

Finalmente (1.44) representa el cambio de longitud de onda de Bragg debido a la tensión aplicada a la fibra sin considerar la temperatura. La sensibilidad de la tensión de una FBG se obtiene por la siguiente expresión:

$$\frac{d\lambda_B}{\varepsilon} = (1-P)\lambda_B, \quad (1.46)$$

$$\frac{d\lambda_B}{\varepsilon} = (1-0.22)\lambda_B, \quad (1.47)$$

## 2.6 Conclusiones

Las ventajas y desventajas de los métodos de fabricación son determinadas de acuerdo a las necesidades de los usuarios.

Actualmente los métodos de Matriz de Transferencia y Modos Acoplados son los más utilizados para el análisis de las FBG.

La ventaja del primer método, Teoría de Modos Acoplados es la facilidad de obtener el comportamiento de la FBG uniforme (índice de refracción, periodo y fase de cada sección iguales).

La ventaja del segundo método, Matriz de Transferencia es la facilidad de obtener el comportamiento de la FBG no uniforme (índice de refracción, periodo y fase de cada sección diferentes).

Como se prevé que las rejillas a utilizar en este trabajo son uniformes, a continuación se utiliza el método de Teoría de Modos Acoplados para FBG; el respectivo formalismo no es complejo de programar realizando propios códigos de simulación.

El siguiente capítulo presenta los procedimientos y resultados de las simulaciones de algunas FBG consideradas en este trabajo.



## CAPÍTULO 3

# Estudio teórico de la respuesta de las FBG a tensión

### 3.1 Desarrollo de software de simulación

En este capítulo se presenta la simulación de algunos tipos particulares de FBG. Para FBG uniformes y no uniformes, se consideró el índice de refracción, periodo y fase.

El análisis teórico se llevó a cabo aprovechando de modelos matemáticos y ecuaciones descritas en el capítulo anterior, se desarrolló un propio programa de cálculo en Matlab realizando variantes en el índice de refracción, periodo y fase.

Una de las finalidades de la simulación es determinar qué parámetros tienen mayor influencia sobre el espectro de reflexión. Para los respectivos códigos ver la sección de *Anexos*.

### 3.2 Verificación de software de simulación. Comparación de resultados de simulaciones con datos existentes de la respuesta espectral de FBG.

Se realizó una comparación de los resultados existentes en la bibliografía sobre el comportamiento de algunos tipos particulares de FBG con los resultados obtenidos con nuestros códigos de simulación, esto con el fin de verificar el funcionamiento correcto de nuestro código (programa de cálculo).

#### FBG uniformes

La comparación de las características de las rejillas uniformes obtenidas mediante simulaciones con nuestro programa de cálculo y los datos existentes [20] fue realizada para los siguientes casos:

1. Una FBG con  $n_{nucleo} = 1.47, n_{cladding} = 1.457, \lambda_B = 1550[nm], \delta n_{eff} = 1 \times 10^{-4}, \Lambda = 5.3 \times 10^{-7}$ . consideramos cinco FBG de longitud diferente:

$L1=5 \text{ mm}, L2=7 \text{ mm}, L3=10 \text{ mm}, L4=15 \text{ mm}, L5=25 \text{ mm}.$

En Fig. 3.1 se muestra el espectro de reflexión en datos existentes [20] y en Fig. 3.2 se presenta el espectro de reflexión obtenido con nuestro programa de cálculo; para una FBG de longitud  $L=5 \text{ mm}$ .

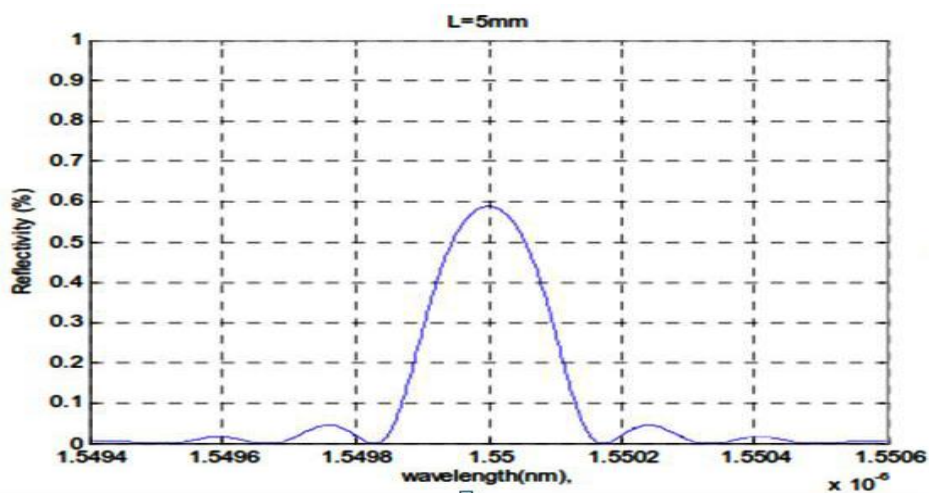


Figura 3.1 Espectro de reflexión para  $L=5 \text{ mm}$  [20].

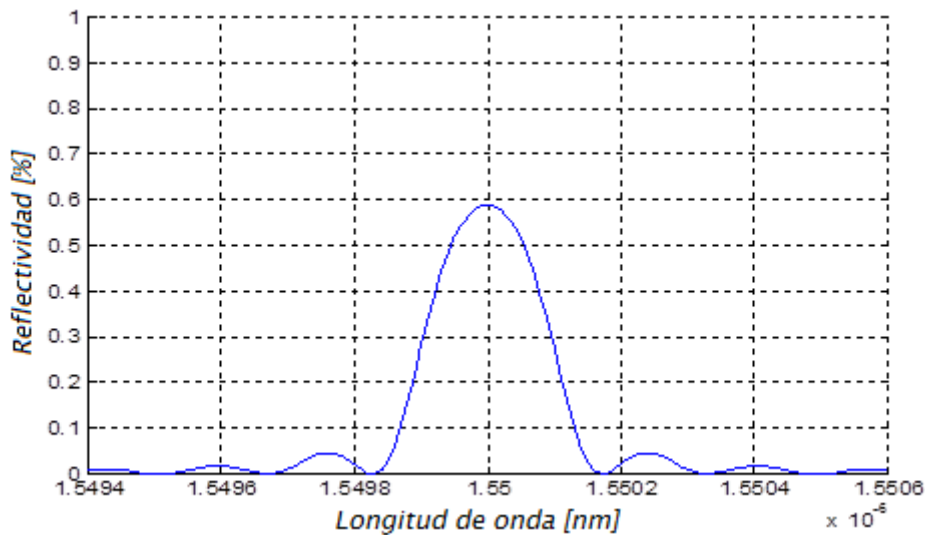
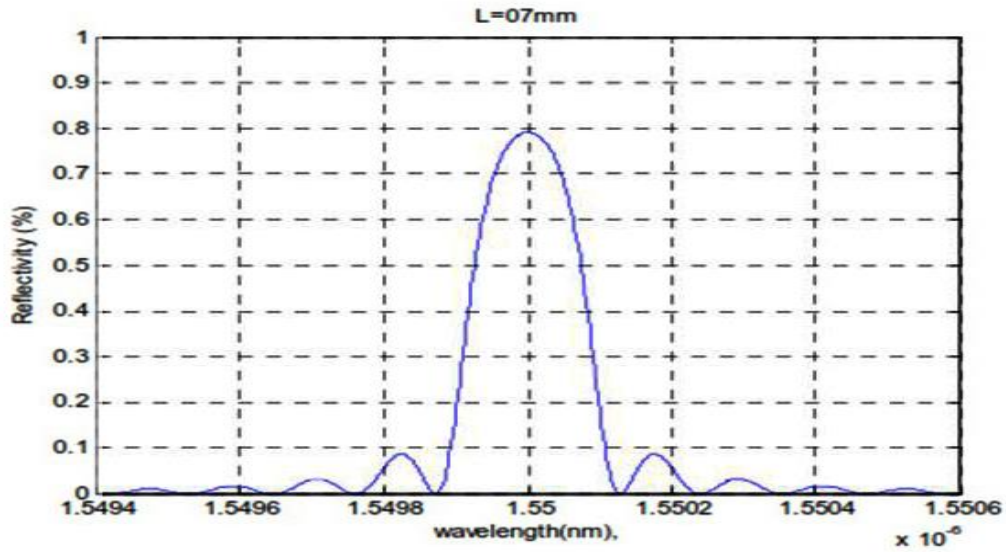
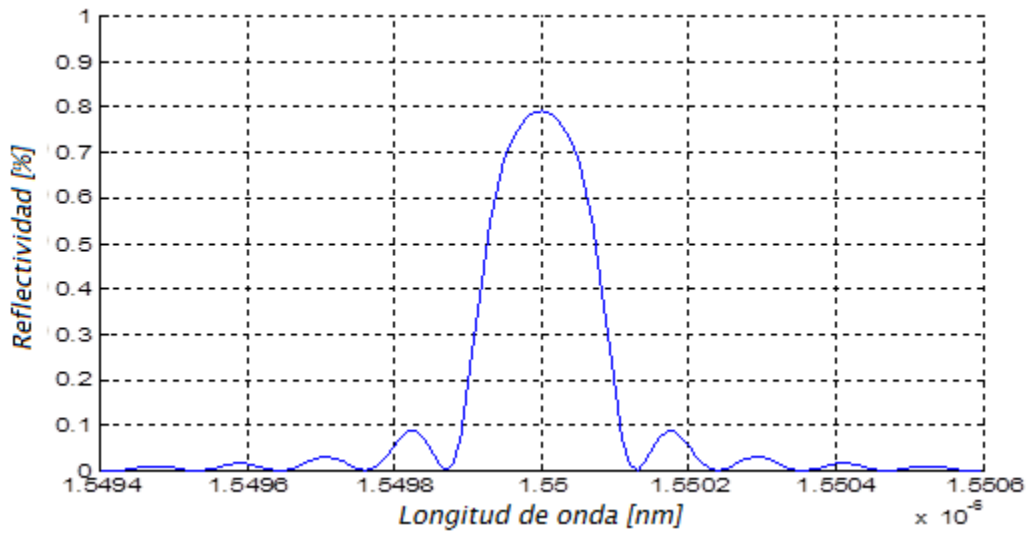


Figura 3.2 Espectro de reflexión para  $L=5 \text{ mm}$  y  $n_{nucleo} = 1.47, n_{cladding} = 1.457, \lambda_B = 1550[nm], \delta n_{eff} = 1 \times 10^{-4}, \Lambda = 5.3 \times 10^{-7}$  obtenido con nuestro programa de cálculo en Matlab.

En Fig. 3.3 se muestra el espectro de reflexión en datos existentes [20] y en Fig. 3.4 se presenta el espectro de reflexión obtenido con nuestro programa de cálculo; para una FBG de longitud  $L=7\text{ mm}$ .

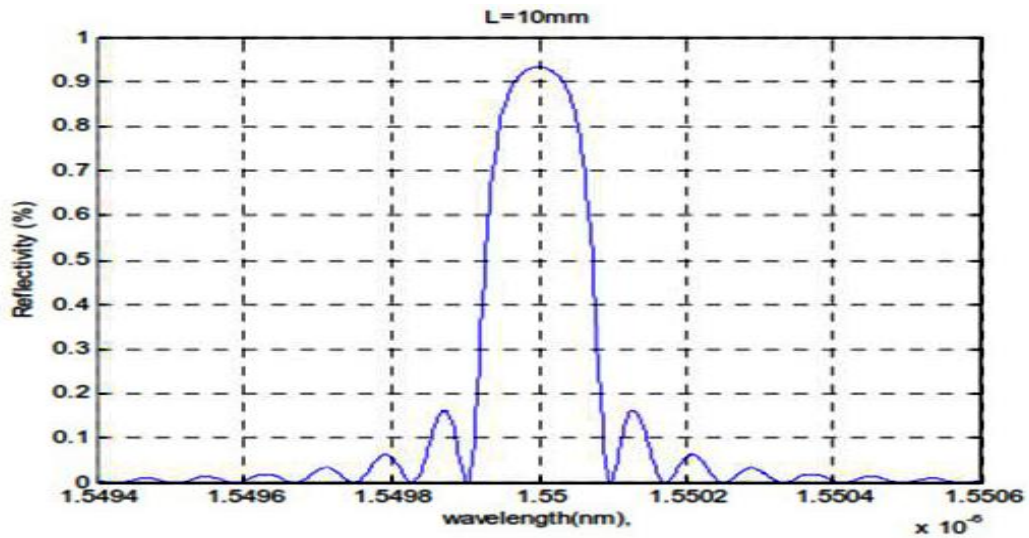


**Figura 3.3** Espectro de reflexión para  $L=7\text{ mm}$  [20].

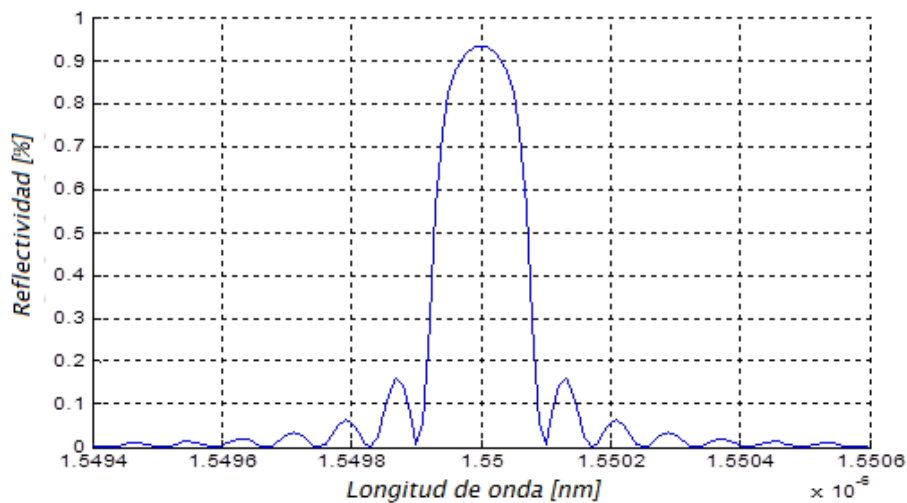


**Figura 3.4** Espectro de reflexión para  $L=7\text{ mm}$  y  $n_{\text{nucleo}}=1.47, n_{\text{cladding}}=1.457, \lambda_B=1550[\text{nm}]$ ,  $\delta n_{\text{eff}}=1 \times 10^{-4}, \Lambda=5.3 \times 10^{-7}$  obtenido con nuestro programa de cálculo en Matlab.

En Fig. 3.5 se muestra el espectro de reflexión en datos existentes [20] y en Fig. 3.4 se presenta el espectro de reflexión obtenido con nuestro programa de cálculo; para una FBG de longitud  $L=10\text{ mm}$ .



**Figura 3.5** Espectro de reflexión para  $L=10\text{ mm}$  [20].



**Figura 3.6** Espectro de reflexión para  $L=10\text{ mm}$  y  $n_{\text{nucleo}}=1.47, n_{\text{cladding}}=1.457, \lambda_B=1550[\text{nm}], \delta n_{\text{eff}}=1 \times 10^{-4}, \Lambda=5.3 \times 10^{-7}$  obtenido con nuestro programa de cálculo en Matlab.

En Fig. 3.7 se muestra el espectro de reflexión en datos existentes [20] y en Fig. 3.8 el espectro de reflexión obtenido con nuestro programa de cálculo; para una FBG de longitud  $L=15 \text{ mm}$ .

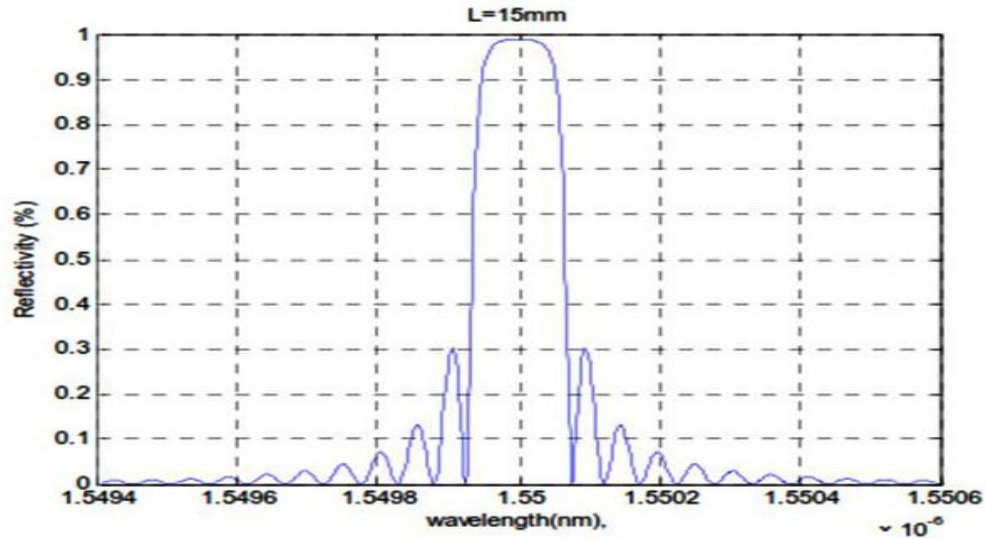


Figura 3.7 Espectro de reflexión para  $L=15 \text{ mm}$  [20].

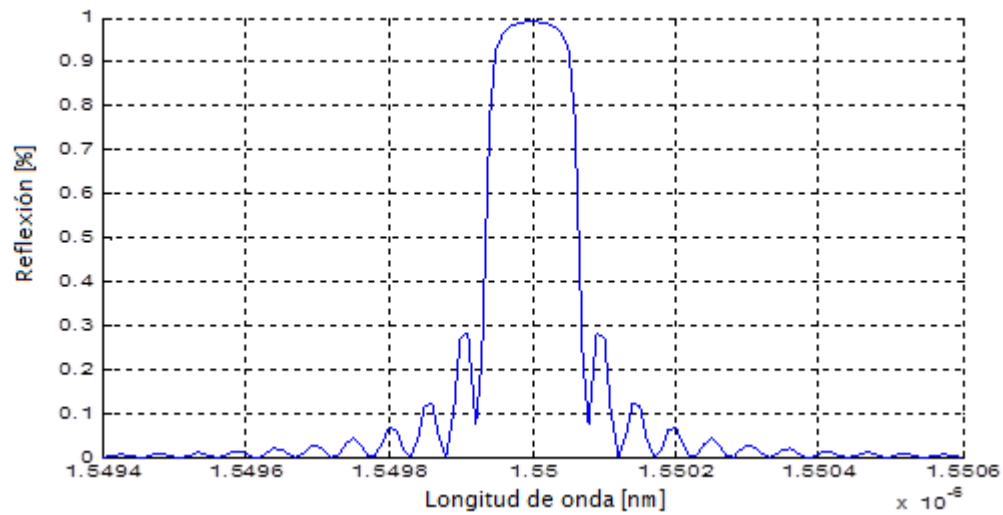
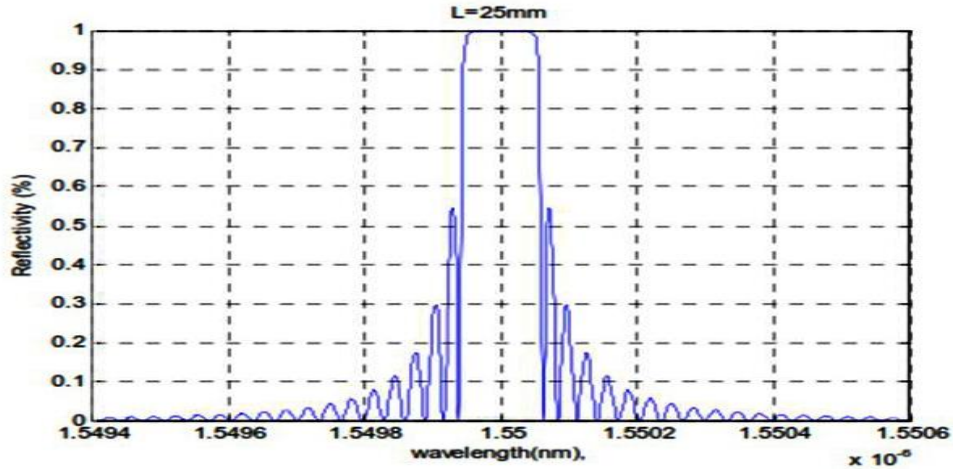
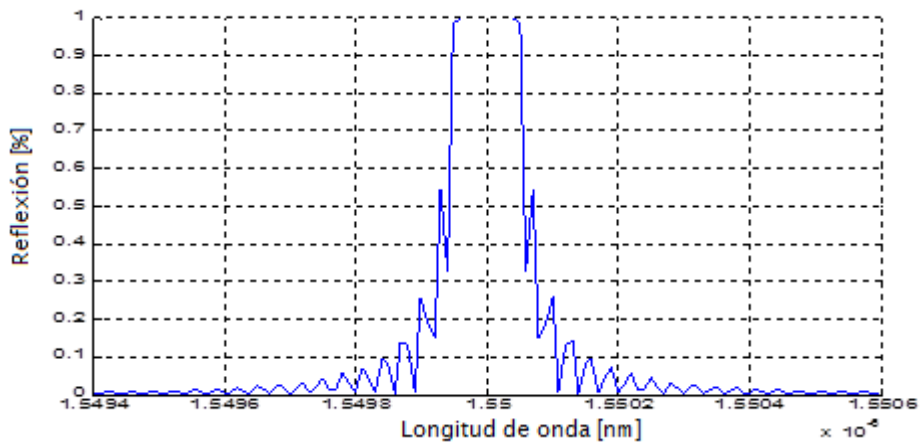


Figura 3.8 Espectro de reflexión para  $L=15 \text{ mm}$  y  $n_{nucleo}=1.47, n_{cladding}=1.457, \lambda_B=1550[\text{nm}], \delta n_{eff}=1 \times 10^{-4}, \Lambda=5.3 \times 10^{-7}$  obtenido con nuestro programa de cálculo en Matlab.

En Fig. 3.9 se muestra el espectro de reflexión en datos existentes [20] y en Fig. 3.10 el espectro de reflexión obtenido con nuestro programa de cálculo; para una FBG de longitud  $L=25\text{ mm}$ . Se observa que el espectro de reflexión está saturado.



**Figura 3.9** Espectro de reflexión para  $L=25\text{ mm}$  [20].



**Figura 3.10** Espectro de reflexión para  $L=25\text{ mm}$  y  $n_{\text{nucleo}}=1.47, n_{\text{cladding}}=1.457$ ,  $\lambda_B=1550[\text{nm}]$ ,  $\delta n_{\text{eff}}=1 \times 10^{-4}$ ,  $\Lambda=5.3 \times 10^{-7}$  obtenido con nuestro programa de cálculo en Matlab.

La diferencia porcentual obtenida de acuerdo a la máxima reflexión y al FWHM (anchura a media altura) es 0 % entre datos existentes y resultados obtenidos con nuestro programa de cálculo en todos los casos que se muestran en Fig. 3.1 - Fig. 3.6.

En los casos que se muestran en Fig. 3.7 - Fig. 3.10 la diferencia porcentual es del 1 % de acuerdo a la máxima reflexión y al FWHM, éstas diferencias estamos atribuyendo a los factores como la cantidad de decimales significativos, en la asignación de parámetros.

### FBG no uniformes

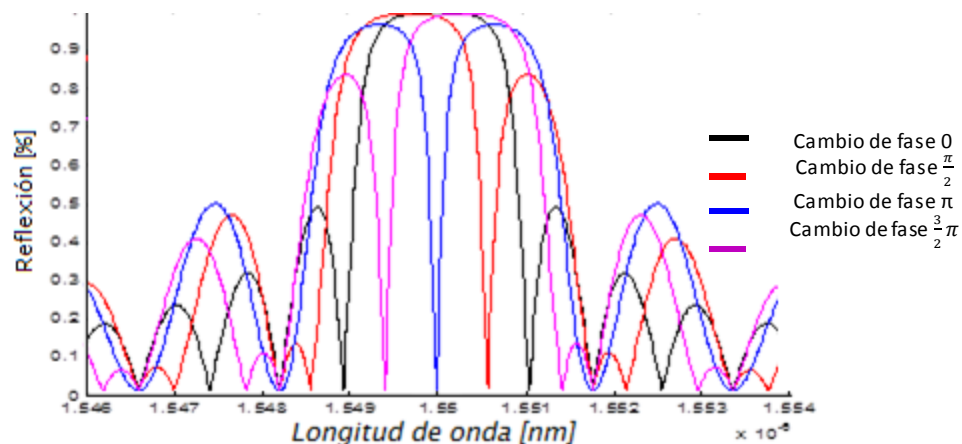
La comparación de las características de las rejillas no uniformes obtenidas mediante simulaciones con nuestro programa de cálculo y los datos existentes [21] fue realizada para los siguientes casos:

- Una FBG con  $\Lambda = 534.48 \text{ nm}$ ,  $n_{\text{nucleo}} = n_{\text{cladding}} = 1.45$ ,  $L = 10 \text{ mm}$ ,  $\delta n_{\text{eff}} = 1 \times 10^{-7}$  y  $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$

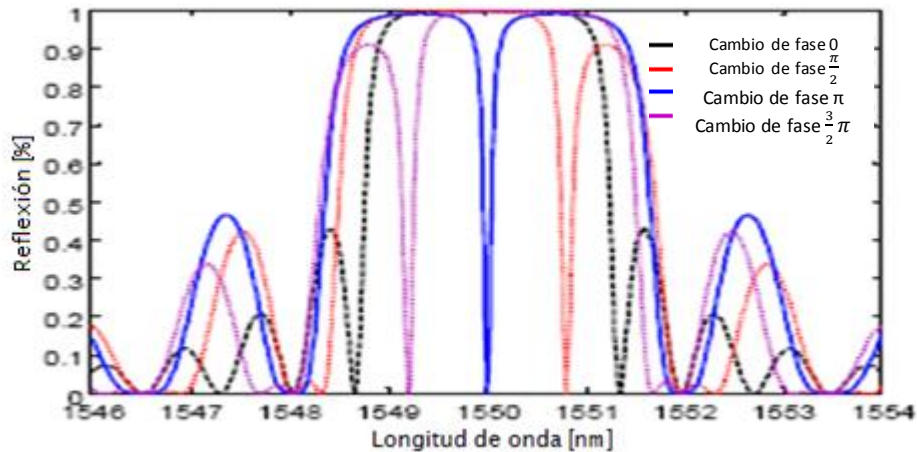
Consideramos cuatro FBG de fase diferente:  $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ .

En Fig. 3.11 se muestra el espectro de reflexión obtenido con nuestro programa de cálculo y en Fig. 3.12 se presenta el espectro de reflexión en datos existentes [20]

para las FBG con fases  $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ .



**Figura 3.11** Espectro de reflexión para cambios de fase de  $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$  obtenido con nuestro programa de cálculo en Matlab.



**Figura 3.12** Espectro de reflexión para cambios de fase  $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$  [21]

Los datos de las Fig. 3.11 y Fig. 3.12 demuestran que en el caso de las FBG no uniformes se tiene una diferencia porcentual del 10 % entre datos existentes y resultados obtenidos con nuestro software de simulación, esta diferencia se atribuye a la omisión de parámetros en datos existentes, estableciendo aproximaciones.

### 3.3 Estudio de efecto de algunos parámetros de las FBG no uniformes sobre su respuesta espectral.

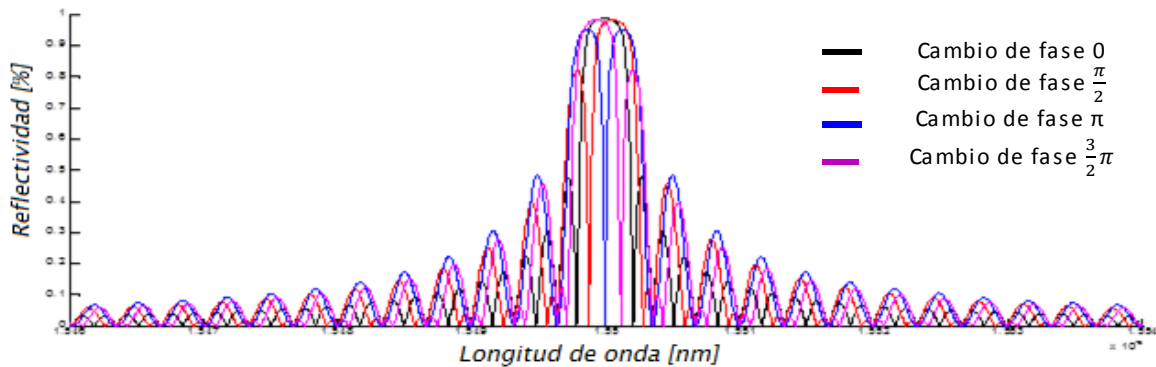
Con la finalidad de encontrar el efecto de distintos parámetros de una FBG no uniforme sobre su respuesta espectral, se realizaron respectivas investigaciones teóricas con nuestro software de simulación.

Para el modelado matemático numérico de las FBG no uniformes es necesario contar con los siguientes parámetros de las ecuaciones (1.26 – 1.36): índice de refracción efectivo ( $n_{co} = n_{cl} = 1.45$ ) del núcleo, periodo ( $\Lambda = 534.48$  nm), longitud de la rejilla ( $L = 10$  mm), fase ( $\varphi = 0, \frac{\pi}{2}, \pi$  y  $\frac{3\pi}{2}$ ), coeficiente de acoplamiento total ( $k = 500$ ), longitud de onda de reflexión de ( $\lambda_B = 1550$  nm) y cambio del índice de refracción ( $\delta n_{eff} = 1 \times 10^{-7}$ ).



A continuación se presentan los resultados de las simulaciones de las FBG no uniformes bajo diferentes combinaciones de parámetros de estas:

La Fig. 3.13 muestra el espectro de una FBG no uniforme para diversos cambios de fase  $\varphi$ : 0 (curva 1),  $\frac{\pi}{2}$  (curva 2),  $\pi$  (curva 3) y  $\frac{3}{2}\pi$  (curva 4).



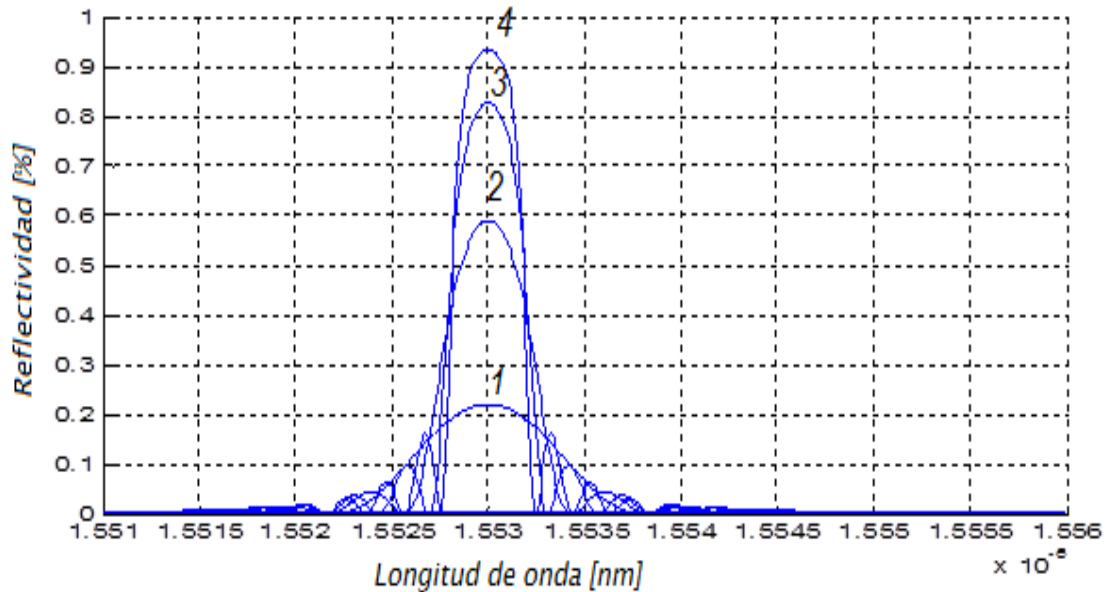
**Figura 3.13** Espectro de reflexión para una FBG no uniforme  $\Lambda = 534.48$  nm,  $K = 500$ ,  $n_{co} = n_{cl} = 1.45$ ,  $\delta n_{eff} = 1 \times 10^{-7}$ ,  $L = 10$  mm,  $\lambda_B = 1550$  nm, con cambios de fase de 0,  $\frac{\pi}{2}$ ,  $\pi$  y  $\frac{3}{2}\pi$  obtenido con nuestro programa de cálculo en Matlab.

Se observa que el cambio de fase  $\varphi$  es el factor que implica la división del lóbulo principal de la reflexión  $R$ .

### 3.4 Análisis de la respuesta espectral de las FBG consideradas en la parte experimental de este trabajo

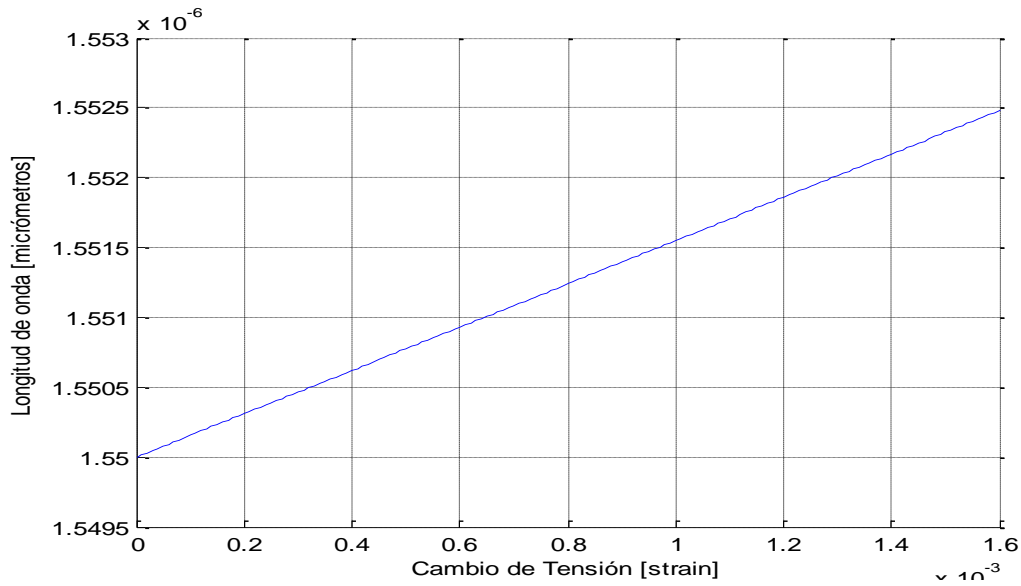
Para la parte experimental del presente trabajo consideramos las FBG disponibles en el Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la DIE-FI de la UNAM. Para el modelado matemático numérico de las FBG uniformes es necesario contar con los siguientes parámetros de la ecuación (1.21): el índice de refracción efectivo ( $n_{co} = n_{cl} = 1.4449$ ) del núcleo, el periodo ( $\Lambda = 530.4827$  nm), la longitud de la rejilla ( $L = 10$  mm), la fase ( $\varphi = 0$ ), coeficiente de acoplamiento total ( $k = 506$ ), longitud de onda de reflexión de ( $\lambda_B = 1553$  nm) y cambio del índice de refracción ( $\delta n_{eff} = 1 \times 10^{-7}$ ).

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones de las FBG uniformes bajo diferentes combinaciones de parámetros de estas: La Fig. 3.14 muestra el espectro de una FBG uniforme para diversas longitudes  $L$  de la rejilla: 10 mm (curva 1), 11 mm (curva 2), 12 mm (curva 3), 13 mm (curva 4) y 14 mm (curva 5).



**Figura 3.14** Espectro de reflexión para una FBG uniforme  $\Lambda = 530.4827$  nm,  $\mathcal{K} = 506$ ,  $n_{co} = n_{cl} = 1.4449$ ,  $\delta n_{eff} = 1 \times 10^{-7}$ ,  $M = 100$  y  $\lambda_B = 1553$  nm obtenido con nuestro programa de cálculo en Matlab.

Se puede observar que la reflectividad de la rejilla  $R$  es proporcional a la longitud  $L$  de la misma, entre más corta es la rejilla, menor es la reflexión  $R$  de la misma. Conforme a la descripción en la sección 3.2 se realizó la programación de códigos para efectos de tensión, considerando una FBG uniforme. El comportamiento se observa en Fig. 3.15.



**Figura 3.15** Respuesta de las FBG bajo efectos de tensión con  $\lambda_B = 1550nm$  , constante efectiva tenso-óptica  $P = 0.22 \times 10^{-6} [\mu\epsilon^{-1}]$ , y  $L = 10mm$  obtenido con nuestro programa de cálculo en Matlab.

Se ingresaron los datos del coeficiente tenso-óptico, la longitud de la rejilla y longitud de onda de Bragg a 1550 nm en el espectro de tensión. Observando cambios prácticamente lineales de la longitud de onda de reflexión bajo efectos externos.

De acuerdo a datos existentes [19] el coeficiente de tensión-óptica de vidrio de sílice no demuestra una dependencia significativa de la temperatura.

### **3.5 Conclusiones**

Con base en los modelos matemáticos y ecuaciones descritas en el capítulo anterior, se desarrolló un propio programa de cálculo en Matlab, de las FBG uniformes y no uniformes.

La comparación de datos existentes bibliográficas sobre el comportamiento de algunas FBG particulares y nuestros propios resultados sobre la respuesta de estas mismas FBG demostró una casi perfecta coincidencia, lo que comprueba el diseño y funcionamiento correcto de nuestro software de simulación.

Con la finalidad de encontrar el efecto de distintos parámetros de una FBG no uniforme sobre su respuesta espectral, se realizaron respectivas investigaciones teóricas con nuestro software de simulación.

Los resultados obtenidos muestran que los distintos parámetros de una FBG no uniforme afectan directamente a la forma del lóbulo principal de la respuesta espectral.

Los datos cuantitativos obtenidos son de utilidad para el diseño del respectivo experimento y desarrollo de una aplicación de las FBG los cuales están descritos en dos capítulos siguientes.

# **CAPÍTULO 4**

## **Estudio experimental de la respuesta de las FBG a tensión**

### **4.1 Metodología experimental**

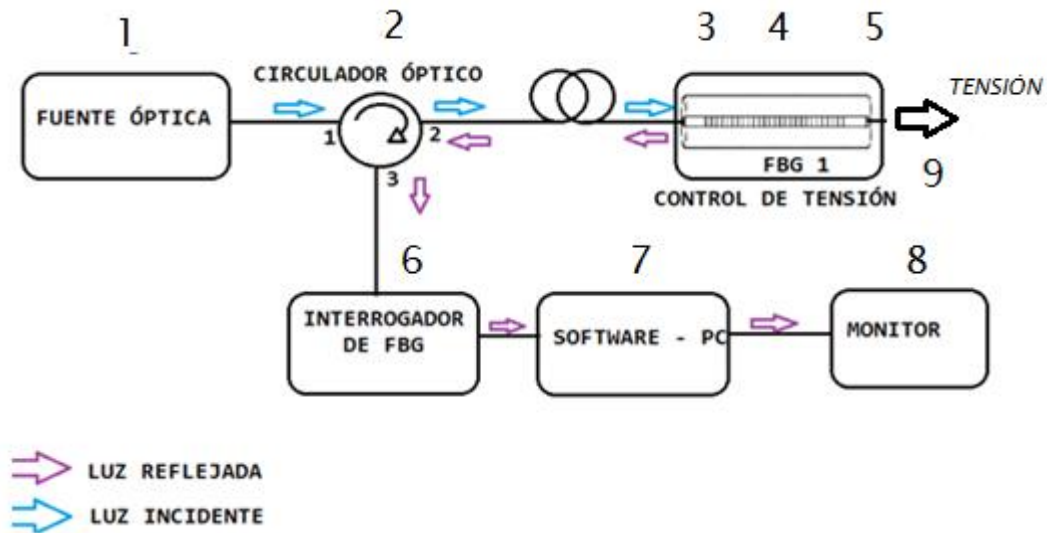
Para el estudio experimental de una FBG bajo efectos de tensión se utilizaron equipos e instrumentos de medición que proporcionan la longitud de onda de reflexión de la FBG. El instrumento principal es un interrogador de FBG. El interrogador de FBG mide la señal óptica de entrada y la traduce a una señal eléctrica enviada a una computadora que contiene un software llamado “IMON-512E” registrando y almacenando los datos.

La tensión se mide indirectamente por la fuerza o peso que se ejerce a la fibra de forma longitudinal [22]. El control de la tensión se realiza mediante el aumento o disminución de la fuerza aplicada en ambos extremos.

La confiabilidad de los datos es importante en cualquier estudio experimental. La forma de obtener datos confiables es mediante la replicación del experimento. Los datos obtenidos del estudio experimental son almacenados y comparados con las predicciones teóricas.

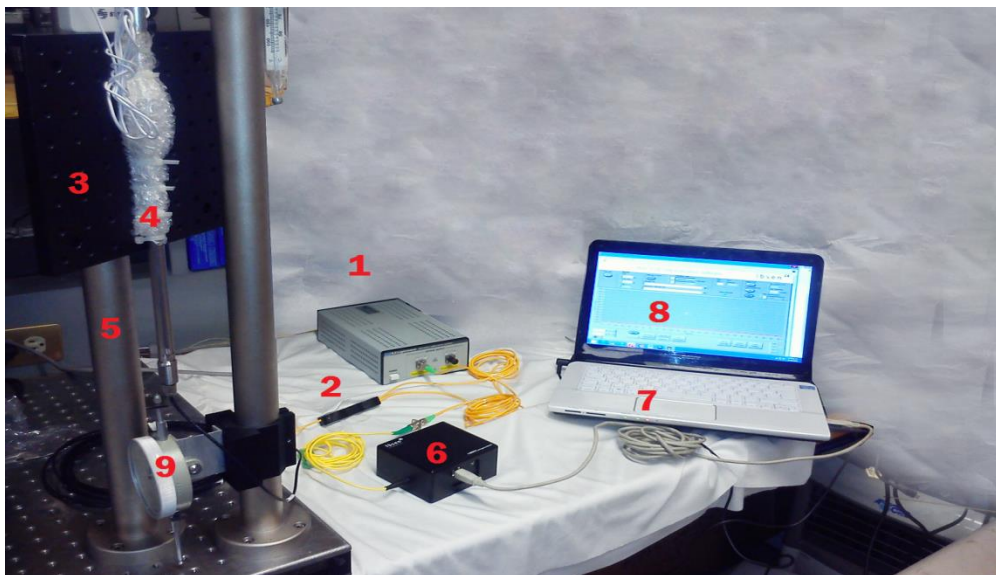
### **4.2 Descripción de la instalación experimental**

El diagrama del arreglo experimental está presentado en la Fig. 4.1.:



**Figura 4.1** Esquema de conexiones para el sensado de tensión.

Los materiales utilizados se muestran en Fig. 4.2:



**Figura 4.2** Arreglo experimental para el sensado de tensión (fotografía).

1. Fuente óptica: Marca Lightwave, modelo MPS8024
2. Circulador óptico 3 puertos: Número de serie 906221
3. Base: Marca ThorLabs
4. Sensor de tensión: Marca Micron Optics os3610, número de serie: C167197
5. Soporte universal: Marca ThorLabs
6. Interrogador FBG: Marca Ibsen, modelo IMON-512E

7. Software
8. Monitor
9. Reloj comparador

El sensor de tensión fue sujetado a una base y un soporte universal para mantener estabilidad mecánica del sensor, añadiendo protección. Se muestra el sensor de tensión en Fig. 4.3.



**Figura 4.3** Sensor de tensión Micron Optics os3610 (fotografía).

Se sujetó un medidor del desplazamiento (“reloj comparador”) que cuenta con una punta de contacto esférica, graduado de manera que al posicionarse en cero se calibra. Se ejerció tensión en un extremo de la FBG que contiene el sensor.

El reloj comparador se muestra en Fig. 4.4 y el acercamiento al contacto que tiene el reloj con el extremo del sensor se muestra en Fig. 4.5.



**Figura 4.4** Reloj comparador (fotografía).



**Figura 4.5** Contacto entre reloj comparador y extremo del sensor (fotografía).

La instalación de los materiales para el sensado de tensión se muestra en Fig. 4.6.



**Figura 4.6** Instalación de FBG para sensado de tensión (fotografía).

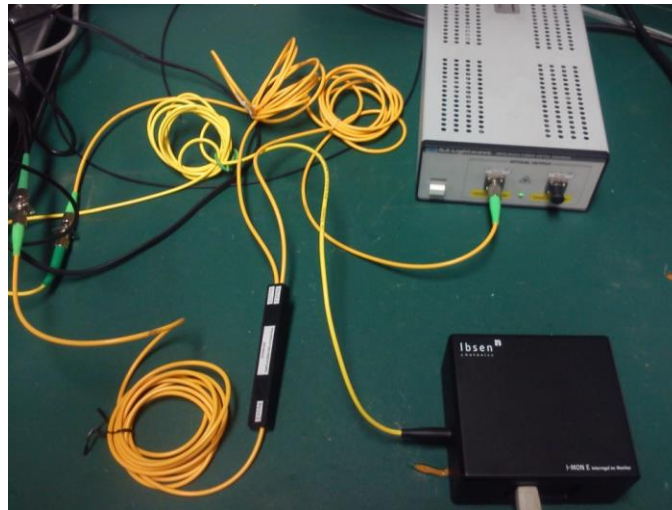
El circulador óptico utilizado se muestra en Fig. 4.7.





**Figura 4.7** Circulador óptico (fotografía).

El sensor fue conectado al circulador óptico en el puerto 2. En el puerto 1 se conectó la fuente óptica con luz LED a  $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$  con potencia de  $500 \mu\text{W}$ . El puerto 3 fue conectado al interrogador de FBG con rango de medición de  $1510 \text{ nm}$  a  $1595 \text{ nm}$ , es mostrado en Fig. 4.8.



**Figura 4.8** Arreglo de conexiones en circulador óptico (fotografía).

Se reflejó la luz en la FBG del sensor por el puerto 2 y salió por el puerto 3, obtenida la longitud de onda de reflexión en el interrogador de FBG conectado a una computadora que contiene el software que proporciona en pantalla el espectro de reflexión de las FBG.

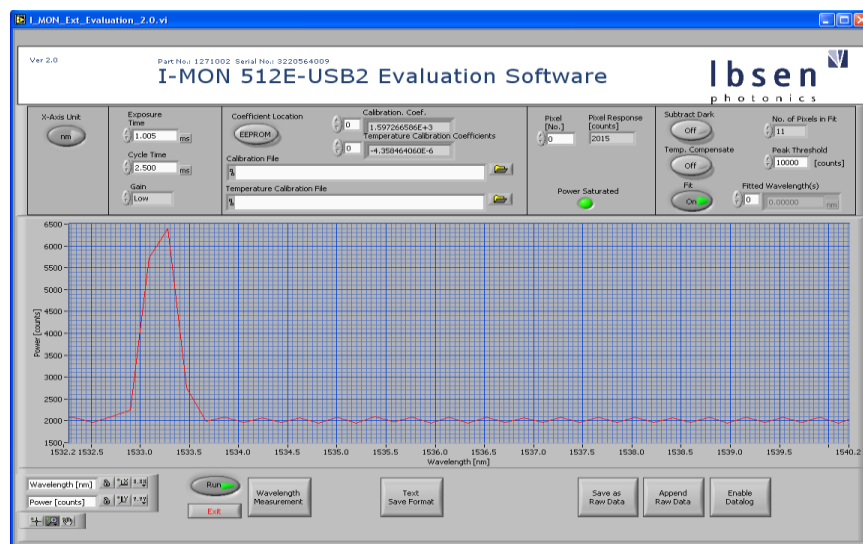
### 4.3 Resultados

Los datos obtenidos del sensado de tensión corresponden al estiramiento de la rejilla cada 0.5 mm (500  $\mu\text{m}$ ), mostrando los espectros de reflexión correspondientes. El sensor os3610 contiene una FBG para el sensado de tensión. La longitud de onda de reflexión inicial es 1533.28 nm.

La longitud de onda de reflexión de la FBG correspondiente a tensión se muestra a continuación:

**Estiramiento: 0 mm**

Longitud de onda de reflexión: 1533.28 nm



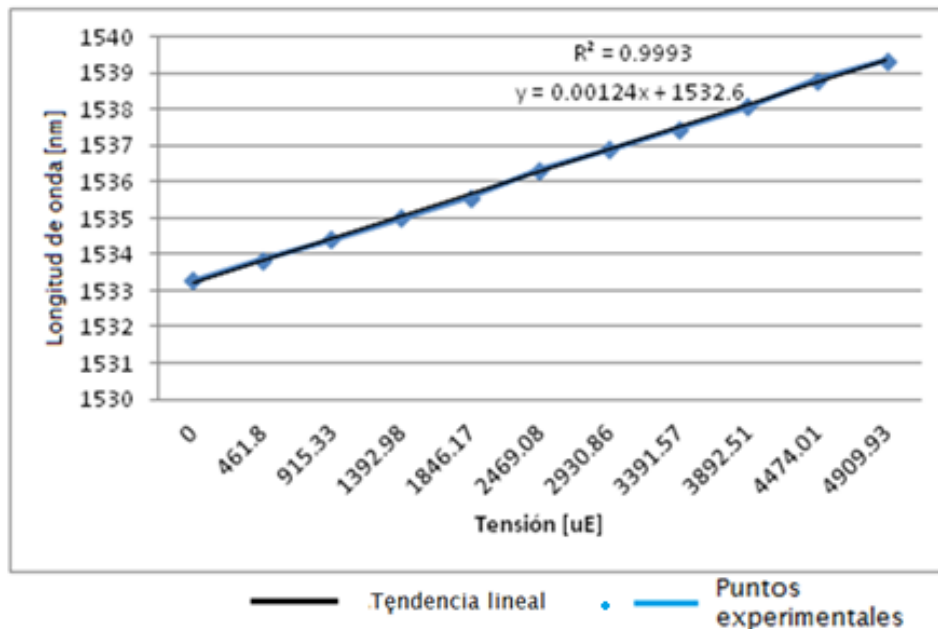
**Figura 4.9** Espectro de reflexión obtenido de FBG (estiramiento 0 mm).

Los datos obtenidos de la longitud de onda de reflexión del sensado de tensión se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 2** Datos obtenidos para sensado de tensión.

Estiramiento [mm]	Tensión obtenida [ $\mu\epsilon$ ]	Tensión total [ $\mu\epsilon$ ]	Longitud de onda de reflexión [nm]		
			Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
0	0	0	1533.28	1533.28	1533.28
0.5	461.8	461.8	1533.85	1533.86	1533.86
1	453.53	915.33	1534.37	1534.43	1534.43
1.5	477.65	1392.98	1535.01	1535.01	1535.00
2	453.19	1846.17	1535.57	1535.58	1535.55
2.5	622.91	2469.08	1536.33	1536.33	1536.34
3	461.78	2930.86	1536.90	1536.90	1536.90
3.5	460.71	3391.57	1537.47	1537.48	1537.48
4	500.94	3892.51	1538.03	1538.04	1538.22
4.5	581.5	4474.01	1538.85	1538.79	1538.79
5	435.92	4909.93	1539.35	1539.35	1539.35

La gráfica del comportamiento de la FBG en función de la tensión promedio de los tres experimentos realizados se muestra a continuación:



**Figura 4.10** Longitud de onda de reflexión de FBG2 en función de tensión.

La tensión longitudinal sufrida por la fibra respecto al cambio de la longitud de onda de reflexión está dada por:

$$\varepsilon = \left[ \frac{\left( \frac{d\lambda_B}{\lambda_B} \right)}{F_G} \right]_{strain} \quad (1.48)$$

Donde:

$d\lambda_B$ : Variación de longitud de onda de reflexión de la FBG al aplicar tensión.

$\lambda_B$ : Longitud de onda de reflexión de la FBG sin tensión respectivamente

$F_G$ : Factor de calibración de tensión.

#### 4.4 Comparación de las predicciones teóricas con resultados experimentales

El comportamiento de las FBG bajo efectos de tensión se traduce en el aumento o disminución de la longitud de onda de reflexión, resultando una relación lineal de  $R=0.9993$  de la longitud de onda de reflexión en función del cambio de tensión. Indicando buena linealidad experimental de la FBG mostrada en Fig. 4.11.

La sensibilidad experimental de la FBG a tensión es  $1.24 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , la sensibilidad teórica [18] es  $1.1 \text{ pm}/\mu\epsilon$  y la obtenida con nuestro programa de cálculo en Matlab es  $1.5 \text{ pm}/\mu\epsilon$ .

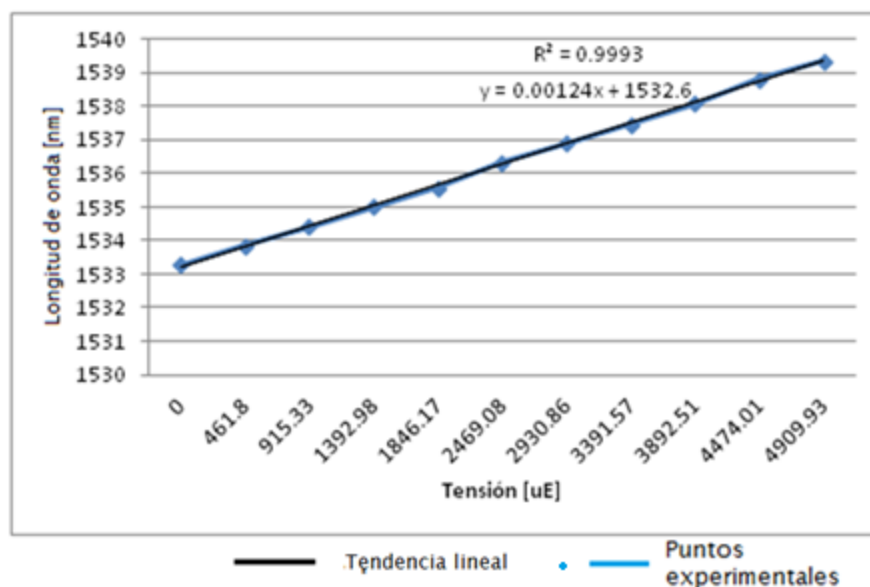
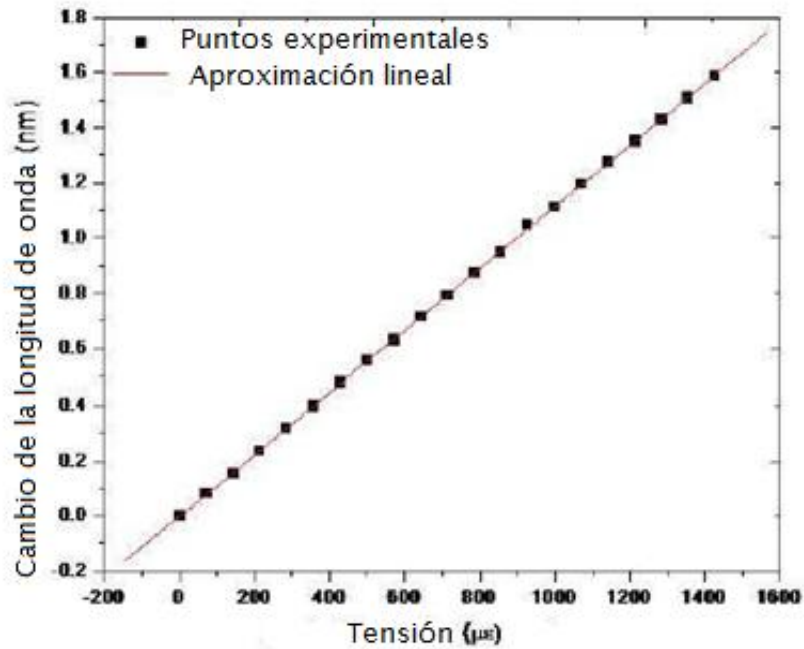
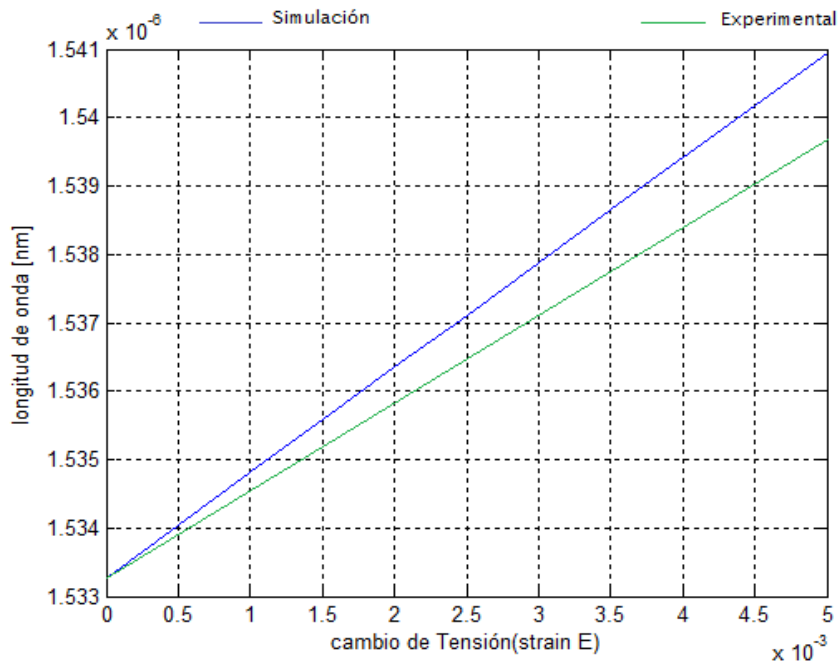


Figura 4.11 Longitud de onda de reflexión de FBG2 en función de la tensión.



**Figura 4.12** Longitud de onda de reflexión de FBG2 en función de la tensión [18].



**Figura 4.13** Longitud de onda de reflexión de FBG2 en función de la tensión obtenido con nuestro programa de cálculo en Matlab.

La diferencia porcentual obtenida entre la sensibilidad experimental y la sensibilidad en nuestro programa de cálculo es 17.33 %. Además la diferencia

porcentual obtenida entre la sensibilidad experimental y en datos existentes es 11.3 %, la diferencia entre estas sensibilidades a tensión se puede atribuir a las diferencias en materiales utilizados, coeficiente foto-elástico y la estructura de la FBG. También las condiciones ambientales y la forma particular del arreglo experimental son factores que influyen en la diferencia de estas sensibilidades.

#### **4.5 Conclusiones**

Se obtuvo experimentalmente el comportamiento cuantitativo de las FBG bajo efectos de tensión.

Se encontró que la tensión aumenta la longitud de onda de reflexión de las FBG.

Se obtuvo la sensibilidad del sensor de tensión, encontrando que existe una relación lineal de la longitud de onda de reflexión en función del cambio de tensión.

Los datos cuantitativos obtenidos son de utilidad para el desarrollo de la aplicación de las FBG: monitoreo de tensiones en elementos estructurales de concreto, el cual está descrito en el capítulo siguiente.

# CAPÍTULO 5

## Estudio experimental de elementos estructurales de concreto instrumentados con las FBG

### 5.1 Características del concreto

El concreto es un material pétreo, artificial, obtenido de la mezcla, en proporciones determinadas de cemento, agregados y agua. El concreto se hace de una mezcla de tres cuartas partes de arena y grava y la otra cuarta parte de agua y cemento (75% de arena y grava y 25% cemento y agua). El concreto simple, sin refuerzo, es resistente a la compresión, pero es débil en tensión, lo que limita su aplicación como elemento estructural [23].

Para resistir tensiones se emplea un refuerzo de acero, en forma de barras de acero, por ejemplo varillas. Son colocadas en zonas donde se prevé que se desarrollarán tensiones. La función del acero es restringir el desarrollo de las grietas originadas por la poca resistencia a la tensión del concreto.

Así también, la resistencia del concreto depende de otros factores como el tipo de cemento utilizado, la relación  $R=\text{agua/cemento}$  con la que se fabricó y la velocidad de carga, así como el tiempo de secado. En el caso de los materiales se tiene que a mayor relación  $R=\text{agua/cemento}$ , menor es la resistencia del concreto. Cuando la velocidad de carga es rápida el concreto presenta mayor resistencia que cuando se tienen velocidades bajas. La resistencia aumenta con el paso del tiempo de secado.

### 5.2 Metodología experimental

El monitoreo de estructuras de concreto es una de las aplicaciones más importantes de FBG que consiste en el sensado de la tensión y compresión. Esta aplicación se realizó en el Laboratorio de Estructuras supervisado por el Ing.

Héctor Guzmán Olgún, Profesor del Departamento de Estructuras de la División de Ingenierías Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, UNAM.

El experimento se realizó mediante el aumento de la carga aplicada en el elemento estructural de concreto instrumentado con FBG (cilindro). La fuerza aplicada a la estructura de concreto se incrementa hasta un máximo valor que es determinado o por la ruptura de esta estructura. El interrogador de FBG procesa la señal y muestra en monitor con el software IMON-512E el espectro de reflexión.

### 5.3 Descripción de la instalación experimental

El diagrama del arreglo experimental está presentado en la Fig. 5.1.:

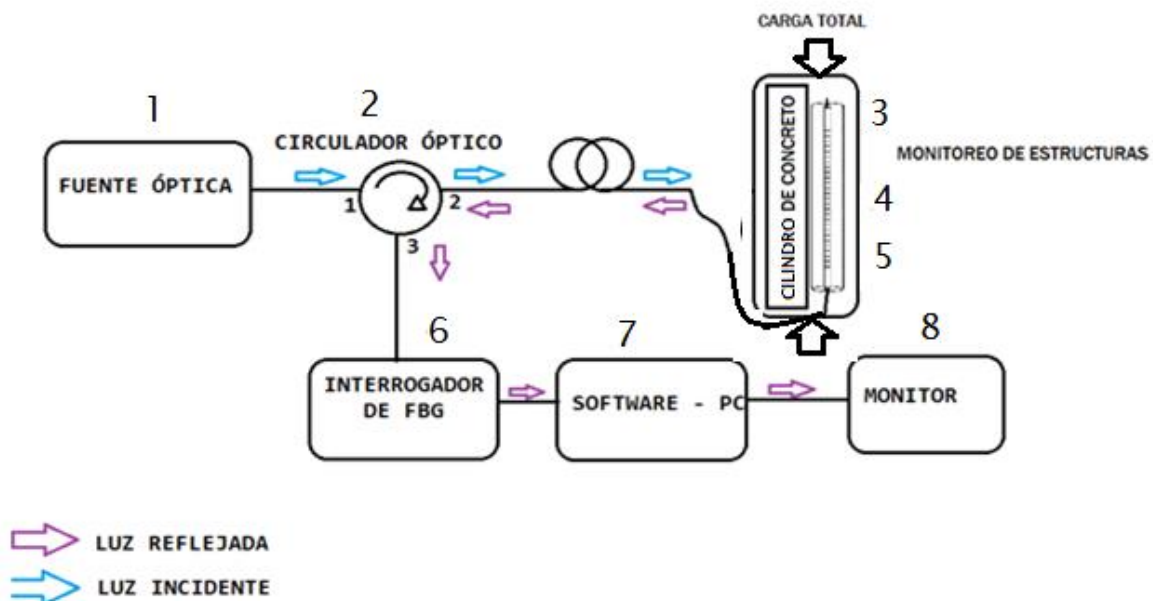


Figura 5.1 Esquema de conexiones para el monitoreo de estructuras.

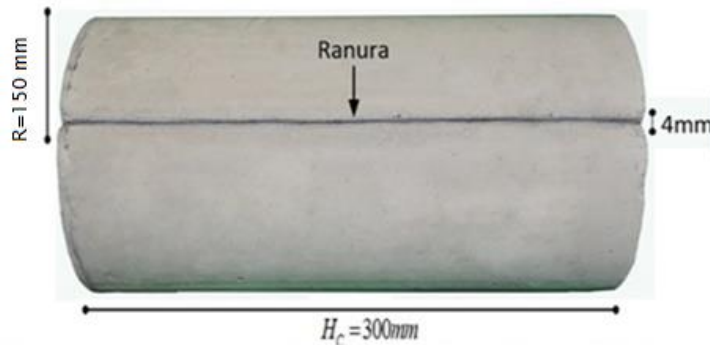
1. Fuente óptica: Marca Lightwave modelo MPS8024
2. Circulador óptico: Número de serie 906221
3. Prensa universal
4. Cilindro de concreto
5. FBG
6. Interrogador de FBG: Marca Ibsen modelo IMON 512E



7. Software-PC

8. Monitor

La FBG se instaló en la estructura de concreto (cilindro). Las medidas del cilindro de concreto son 30 cm de largo y 15 cm de diámetro. En el cilindro se hizo una ranura lateralmente que tiene una profundidad de 12 mm y 4 mm de ancho. se muestra en Fig. 5.2.



**Figura 5.2** Instrumentación del cilindro de concreto con FBG (fotografía).

En el cilindro de concreto se pegó la FBG con pegamento epoxílico marca Resistol en el fondo de la ranura hecha lateralmente. Las medidas de la distribución del pegamento son 100 mm al centro cubriendo la FBG que mide 10 mm y en los extremos 15 mm para asegurar la estabilidad y protección de la fibra que contiene la FBG, se muestra en Fig. 5.3. El cilindro de concreto fue colocado en la prensa universal para aplicar la carga en la cara superior e inferior.



**Figura 5.3** Instrumentación del cilindro de concreto con FBG (fotografía).

La instalación de la estructura cilíndrica para aplicar la carga se muestra en Fig. 5.4.:



**Figura 5.4** Imagen de instalación de la estructura de concreto instrumentada con FBG en máquina de compresión.

Para determinar el estado estructural se monitorea la longitud de onda de reflexión de la FBG conectando en el circulador óptico, el puerto 1 con la fuente óptica a  $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$ , en el puerto 2 la FBG que fue pegada en el fondo de la ranura de la estructura de concreto y en el puerto 3 el interrogador de FBG conectado a una computadora que muestra en pantalla el espectro de reflexión. Se muestran las conexiones a continuación:



**Figura 5.5** Arreglo de conexiones para el monitoreo de la FBG (fotografía).

## 5.4 Resultados

Los datos obtenidos en el experimento cuando se aplicó carga para producir compresión en el cilindro de concreto instrumentado con FBG se presentan en esta sección.

La longitud de onda de reflexión cuando no se aplica carga está en 1549.985 nm.

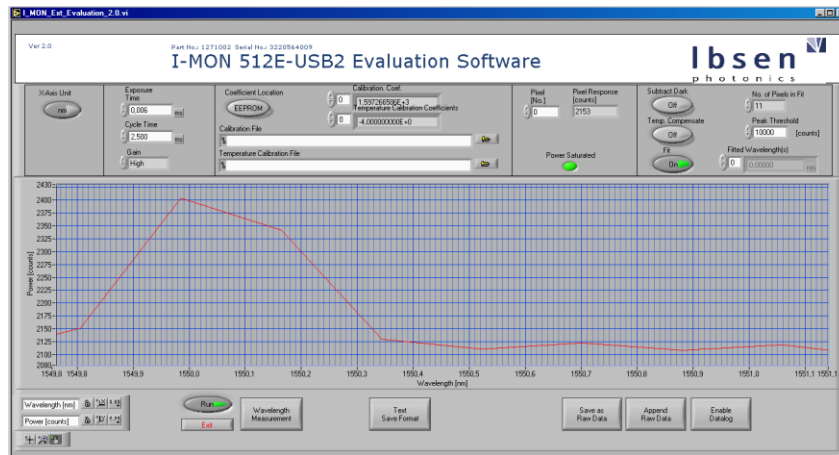


Figura 5.6 Espectro obtenido de FBG en cilindro de concreto sin carga aplicada.

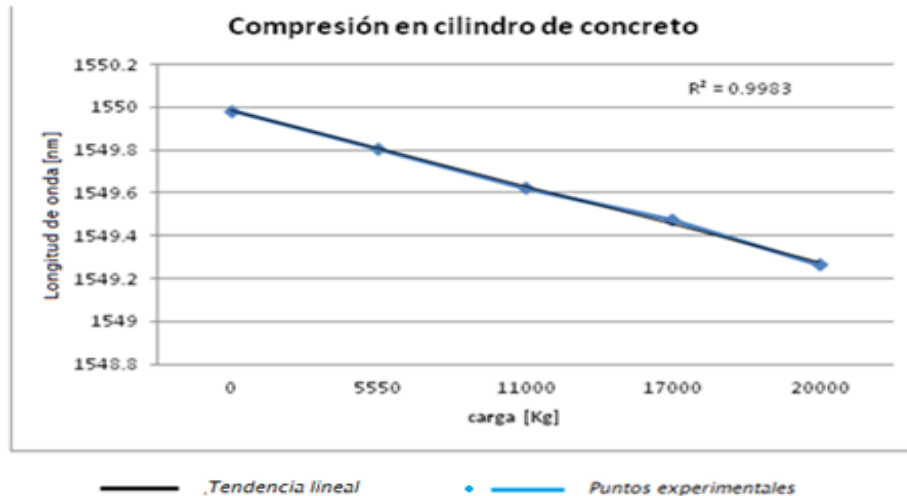
En este experimento la carga aplicada fue en un rango de 0 a 20000 Kg debido a que no se deseaba dañar la estructura de concreto y la FBG, sólo observar su comportamiento:

Los datos obtenidos de la longitud de onda de reflexión en función de la carga, resultando compresión en la FBG se muestran a continuación:

Tabla 3 Datos obtenidos para sensado de compresión en cilindro de concreto instrumentado con FBG.

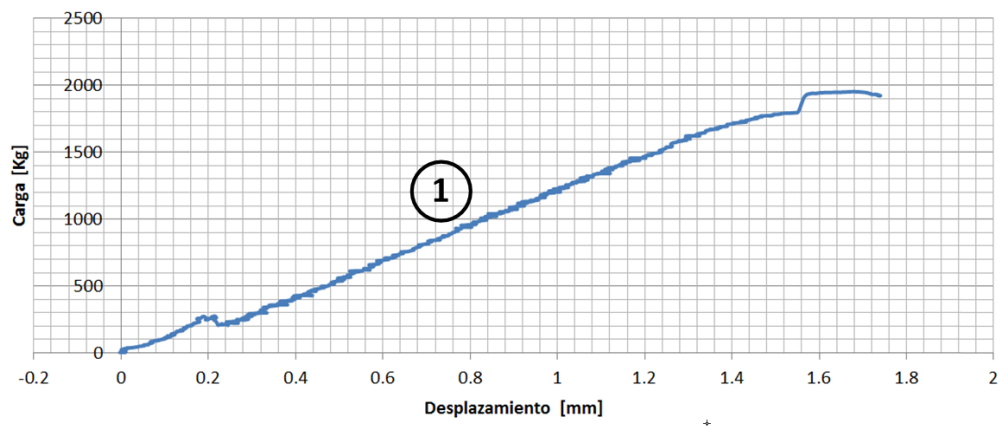
Carga [Kg]	Longitud de onda de reflexión [nm]
0	1549.985
5550	1549.805
11000	1549.625
17000	1549.473
20000	1549.265

El comportamiento de las FBG bajo efectos de compresión se obtiene de la disminución de la longitud de onda de reflexión, resultando una relación lineal de  $R=0.9983$  de la longitud de onda de reflexión en función de la compresión. Indicando buena linealidad experimental de la FBG. La sensibilidad experimental de la FBG a compresión es  $-0.03 \text{ nm/kg}$ . La gráfica del comportamiento de la FBG en función de la carga en cilindro de concreto se muestra en Fig. 5.7.



**Figura 5.7** Longitud de onda de reflexión de FBG en función de la carga en cilindro de concreto.

La curva carga-desplazamiento del experimento de compresión axial del cilindro de concreto se muestra en Fig. 5.8, donde el desplazamiento es cuánto se comprimió el cilindro.



**Figura 5.8** Curva Carga-desplazamiento de las pruebas de compresión axial del cilindro de concreto.

## 5.5 Conclusiones

Se comprobó el comportamiento lineal de las FBG en función de la compresión (Fig. 5.8, número 1).

La disminución de la longitud de onda de reflexión representa la compresión de la FBG y el aumento de la longitud de onda de reflexión representa el aumento de la tensión en la FBG.

Se encontró que la relación lineal del comportamiento de la FBG en función de la compresión permite relacionar la carga aplicada con la compresión.

El cambio de la longitud de onda reflejada de la FBG en solo 0.7 nm es atribuida a que se aplicó la carga con rapidez y tuvo como resultado mayor resistencia de la estructura de concreto. También a las propiedades del concreto de la estructura.

Los datos obtenidos experimentalmente se comparan con los datos existentes sobre el comportamiento de las FBG en el siguiente capítulo.

# CONCLUSIONES GENERALES

Se realizó un estudio teórico y experimental de las FBG en fibra óptica como sensores de tensión.

La parte teórica fue realizada considerando los tipos de FBG más importantes: uniforme y no uniforme, los modelos matemáticos y ecuaciones que representan su comportamiento.

El funcionamiento correcto y la eficiencia de nuestra herramienta teórica fue verificada comparando los datos existentes bibliográficos sobre el comportamiento de algunas FBG particulares y nuestras propias simulaciones, demostrando una casi perfecta coincidencia.

Con dicha herramienta, se obtuvo el efecto de algunos parámetros: índice de refracción efectivo del núcleo ( $n_{eff}$ ), periodo ( $\Lambda$ ), longitud de la rejilla ( $L$ ), fase ( $\varphi$ ), coeficiente de acoplamiento ( $k$ ), longitud de onda de reflexión de ( $\lambda_B$ ) y cambio del índice de refracción ( $\delta n_{eff}$ ) sobre la respuesta de una FBG no uniforme.

Para una FBG uniforme utilizada tanto en la parte experimental como en la aplicación práctica en pruebas de elementos de concreto, se obtuvo su respuesta teórica a tensión y compresión.

Se desarrolló una metodología experimental para el estudio de las FBG así como el diseño de una instalación experimental. Dicha instalación fue implementada en condiciones de laboratorio y fue utilizada en el desarrollo de la parte experimental del presente trabajo.

Experimentalmente, se demostró un comportamiento lineal de las FBG en función de la tensión.

Resumiendo, la alta sensibilidad y linealidad de las FBG es de gran utilidad en el monitoreo de estructuras de concreto como edificios y puentes.

Los resultados de este trabajo fueron empleados en el desarrollo del Proyecto “Implementación de Fibra Óptica para la Detección de Daño en Estructuras de Concreto” patrocinado por el Fondo de Colaboración del Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Proyecto de investigación científica de la DGAPA-PAPIIT de la UNAM “Nuevas técnicas de monitoreo del estado físico e integridad de elementos y estructuras de diversos materiales mediante arreglos de fibras ópticas” con número de referencia IN117512, y Proyecto de la DGAPA-PAPIME de la UNAM “Diseño de prácticas virtuales y presenciales para el mejoramiento de la enseñanza en algunas asignaturas de Ingeniería en Telecomunicaciones” con número de referencia PE104811.



## REFERENCIAS

- [1] Raman Kashyap, "Photosensitive optical fibers: devices and applications", BT Laboratories, vol. 1, pp. 17 - 34, Optical Fiber Technology, United Kingdom, 1994.
- [2] O. Ozoliņš, Ģ. Ivanovs, "Realization of optimal FBG band-pass filters for high speed HDWDM", Riga Technical University, vol. 4, pp. 41 - 44, Electronics & Electrical Engineering, Letonia, 2009.
- [3] Jean Pierre Jiménez Herrera, "Interrogador de sensores ópticos basados en redes de Bragg usando las propiedades foto-elásticas de una fibra", Tesis, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2010.
- [4] Flores Llamas Ignacio, "Síntesis de las rejillas de periodo largo en fibra óptica por medio de un algoritmo genético", Tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2007.
- [5] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication", Communications Research Centre, Department of Communications, vol. 32, pp. 647 – 649, Applied Physic Letters, Canada, 1978.
- [6] A. Russo, B. Noriega and R. Duchowicz, "Implementación de sistema óptico para grabado de redes de Bragg en fibra óptica", Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET La Plata – CIC), vol. 22, pp. 121 - 130, Scielo, Chile, 2011.
- [7] R. P. Salathé, Reymond Clavel, Turan Erdogan, Raman Kashyap and H. G. Limberger, "Tunable fiber Bragg grating filters", Thesis, Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laussane, 1999.

[8] S. Legoubin, E. Fertein, M. Douay, P. Bernage, P. Niay, F. Bayon and T. Georges, "Formation of moiré-grating in core of germanosilicate fibre by transverse holographic doublé exposure method", Institution of Engineering and Technology, vol. 27, pp. 1945 – 1947, Electronics Letters, England, 1991.

[9] M. C. Farries, K. Sugden, D. C. J. Reid, I. Bennion, A. Monoly and M. J. Goodwin, "Very broad reflection bandwidth (44 nm) chirped fibre gratings and narrow bandpass filters produced by the use of an amplitude mask", Institution of Engineering and Technology, vol. 30, pp. 891 – 892, Electronics Letters, Stevenage, 1994.

[10] Graham D. Marshall, Robert J. Williams, Nemanja Jovanovic, M. J. Steel, and Michael J. Withford, "Point-by-point written fiber-Bragg gratings and their application in complex grating designs", Centre for Ultrahigh Bandwidth Devices for Optical Systems, Vol. 18, pp. 19844-19859, Optical Society of America, Australia, 2010.

[11] A. Yariv, "Coupled-mode theory for guided-wave optics", California Institute of Technology, Vol. 9, pp. 919 - 933, IEEE Journal of Quantum Electronics, Pasadena, 1973.

[12] A. Othonos and K. Kally, "Fiber Bragg Gratings, Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing", pp. 185 – 204, Artech House, Norwood, 1999.

[13] H. Kogelnik, "Filter response of nonuniform almost-periodic structures" American Telephone and Telegraph Company, Vol. 55, pp. 109 - 126, Bell System Technical Journal, U.S.A., 1976,.

[14] M. Yamada and K. Sakuda, "Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguide via a fundamental matrix approach", Technological University of Nagaoka, Vol. 2, pp. 3474 - 3478, Applied Optics, Japan, 1987.

[15] Zhu Yue-Hong, Qi Hai and Xiang Guang “Temperature Characteristic of Fiber Bragg Grating”, Institute of Opto-Electronics Shijiazhuang University, vol. 12 – 14, pp. 4020 – 4022, IEEE, China, 2011

[16] G. M. H. Flockhart, W.N. MacPherson, J. S. Barton, J. D. C. Jones, L. Zhang, I. Bennion, “Departure from linearity of fibre Bragg grating temperature coefficients”, OFS 2002: 15TH Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, vol. 1, pp. 75 - 78, Publishing LTD, Portland, 2002.

[17] Stephen Mastro, “Optomechanical behavior of Bragg grating strain sensors under transverse load”, IMAC-XXIV: Conference & Exposition on Structural Dynamic, NAVSEA, Philadelphia, 2006.

[18] Patrice Megret, Sebatién Bette, Cathy Crunelle and Christophe Caucheteur “Fiber Bragg gratings: Fundamentals and applications” Course, Université de Mons, Faculté Polytechnique, Belgique, 2007.

[19] William W. Morey, G. Meltz, and Joseph M. Weiss., “High temperature capabilities and limitations of fiber grating sensors”, 10th International Conference on Optical Fibre Sensors Glasgow, vol. 2360, pp. 234 - 237, United Kingdom, 1994

[20] A. Ikhlef, R. Hedara, M. Chikh-Bled, “Uniform fiber Bragg grating modeling and simulation used matrix transfer method”, Laboratoire de Télécommunications, Département de Génie Electrique et d’Electronique, Faculté de Technologie, Université Abou-Bekr Belkaïd -Tlemcen, Vol. 9, pp. 368 - 374, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Algeria, 2012.

[21] Chuan Zhong, Changyu Shen, Ke Li, Xinyong Dong and Yongxin Jin, “Spectral characteristics of multiple and cascaded phase-shifted fiber Bragg grating”, Institute of Optoelectronic Technology, pp. 1 – 4, Photonics and Optoelectronics (SOPO), Wuhan, 2011.

[22] Julián Rodríguez Montes, Lucas Castro Martínez y Juan Carlos del Real Romero, "Procesos Industriales Para Materiales" pp. 18 – 45, Visión Libros, España, 2006.

[23] González Cuevas F. "Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado, Limusa, México, 1974.

[24] L. H. Liu, Y. Q. Jin, H. P. Ma and Y. Ma, "Research on double parameters measurements technology based on optical fiber Bragg grating", Department of Automatic Measurement and Control, pp. 888 – 889, Institute of Physics Publishing, China, 2006.

# ANEXOS

- Código Matlab “FBG no uniformes”

```
close all
clear all
clc
tic

hd=1550;%hd= 1537.3;%%[nm]%(2)*(neff)*(per); longitud de onda de
reflexión; per= periodo
hd1=hd*1e-9;
l1=hd1-4e-9; %Limite Inferior
l2=hd1+4e-9; %Limite Superior
lam=l1:0.001e-9:l2; %Ancho de banda [nm]
%L=5; %[mm] Longitud total de la rejilla
[m,n]=size(lam); %Longitud de la fibra [m]
dneff=1e-7; %dneff=2.5e-4;%Cambio de indice de refraccion
S=1.0; % Visibilidad
neff=1.45; %neff=nco
M=2; %Número de secciones de la rejilla;M<<(2*NEFF*L)/hd
nco=neff; %indice del nucleo nco-core
ncl=1.45; % ncl-cladding index

for w=1:M; %%%%%%%%%%%%%%%FASE
    fase1=fopen('fase.txt','r');
    fase=fscanf(fase1,'%f');
    fclose(fase1);
end

for x=1:M; %%%%%%%%%%%%%%%PERIODO
    per1=fopen('periodo.txt','r');
    per=fscanf(per1,'%f');
    fclose(per1);
end

for z=1:M %%%%%%%%%%%%%%%Longitud
    L2=fopen('longitud.txt','r');
    dz=fscanf(L2,'%f');
    fclose(L2);
end

for y=1:M; %%%%%%%%%%%%%%%Coeficiente de acoplamiento
    kapal=fopen('kapa.txt','r');
    k=fscanf(kapal,'%f');
    fclose(kapal);
end

%%%%% Multiplicación de matrices

for i=1:1:n
    E=[1;0];
```

```

for j=1:1:M

    vd(j)=(2*pi/lam(i))*neff)-(pi/per(j));
    dcgen(j)=vd(j)+dcc+0+0i;
    DCgen(j)=dcgen(j)*dcgen(j);
    K(j)=k(j)*k(j);
    omega(j)=sqrt(K(j)-DCgen(j));

    T1=[cosh(omega(j)*dz(j))-
        1i*(dcgen(j)/omega(j))*sinh(omega(j)*dz(j)), -
        1i*(k(j)/omega(j))*sinh(omega(j)*dz(j));
        1i*(k(j)/omega(j))*sinh(omega(j)*dz(j)),
        cosh(omega(j)*dz(j))+1i*(dcgen(j)/omega(j))*sinh(omega(j)*dz(j))];

    entrada=T1*E;

    P=[exp((-1i*fase(j))/2), 0; 0, exp((1i*fase(j))/2)];

% Matriz de fase
    if j<M
        entrada1=P*entrada;
        E=entrada1;
    else
        E=entrada;
    end
end
    salida=E;
    R(i) = E(2,1)/E(1,1);
    ref(i) = abs(R(i))^2;
end

R=abs(R);
hold on
figure (1)
plot(lam,R,'m')
grid
axis([11 12 0 1])
figure (2)
plot(lam,10*log10(R))
grid
xlabel('lamda')
ylabel('Reflexión')
axis([11 12 -50 0])

```

- Código Matlab “FBG Uniformes”

```

close all
clear all
clc
l1=1551e-9; % Limite inferior [nm]
l2=1556e-9; % Limite superior [nm]
lam= l1:0.01e-9:l2; % Rando del espectro
S=1.0; % Visibilidad
neff=1.449; %neff=nco
per= 530.4827e-9 ; %% Periodo, per=hd /2neff
L=0.00001; %Longitud de la fibra
tic
for i=1:5
    M=100; %M<< (2*NEFF*L) / hd --->%Número de secciones de la rejilla
    nco=neff; % nco-core index
    ncl=1.449; % ncl-cladding index
    fase=0;
    dz=L/M;%dz=longitud de la kth seccion uniforme, long de las
secciones
    dneff=2.5e-4;%CAMBIO DE INDICE DE REFRACCION, induced index change
    k=(pi./lam)*S*dneff;%----> Coeficiente de aCOPLAMIENTO AC
    dcc=0;%((2*pi)./lam)*(dneff); % perdidas por absorcion dcc-----> 0
    hd= 1553e-9;%(2)*(neff)*(per);longitud de onda de reflexión, per=
periodo
    vd=(2*pi*neff).*((1./lam)-(1/hd)); % wave VECTOR DETUNING
    dcgen=vd+dcc; % COEFICIENTE GENERAL DE ACOPLAMIENTO
    DCgen=dcgen.*dcgen; %dcgen ^2
    K=k.*k;%K ^2
    omega=sqrt(K-DCgen);
    R=(sinh(L*sqrt(K-DCgen)).^2)./(cosh(L*sqrt(K-DCgen)).^2-DCgen./K);
    E=[1;0];
    hold on
    figure (1)
    plot(lam,R)
    grid
    axis( [l1, l2, 0, 1]);
    figure (2)
    plot(lam,10*log10(R))
    L=L+0.001;
end
xlabel('lamda')
ylabel('Reflexion')
toc

```

- Código Matlab “FBG bajo efecto de tensión”

```
clc
clear all
close all
pe= 2.2000e-07;          %%%Dato Constante Efectiva Fotoelástica
hb=1550e-9;             %%%Longitud de onda de Bragg de la rejilla
L=0.01;                 %%% Longitud de la Rejilla
Ez=0:10e-6:1600e-6;    %%% Cambio de tensión [strain]
dhb=((1-pe).*Ez.*hb)+hb %%%Ecuación de strain
figure(1)
plot(Ez,dhb);
ylabel('longitud de onda [um]');
xlabel('cambio de tensión [strain]');
%axis([0 2 0 20e-7])
grid
```