



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

**REJILLAS DE BRAGG EN FIBRAS ÓPTICAS
COMO SENSORES DE TENSIÓN Y TEMPERATURA,
EN EL MONITOREO DE ESTRUCTURAS.**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

PRESENTA:

RENDÓN PÉREZ JONATHAN

DIRECTOR DE TESIS:

DR. SERGIY KHOTYAINTEV

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO-2014



Agradecimientos:

Agradecimiento especial para mí asesor de tesis Dr. Sergiy Khotyaintsev, por su paciencia y su constante apoyo durante el desarrollo de esta tesis.

De igual forma agradecimientos al Ing. Héctor Guzmán Olguín, Profesor del Departamento de Estructuras de la División de Ingenierías Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, UNAM, por la asesoría y apoyo en la realización de pruebas estructurales.

Agradecimiento a 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.

Agradecimiento a 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.

Agradecimiento a 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

Esta tesis presenta algunos resultados de un estudio teórico y práctico de las rejillas de Bragg en fibras ópticas como sensores de temperatura y tensión.

La tesis se complementa con el trabajo “Fibras ópticas con Rejillas de Bragg en el monitoreo de estructuras” del autor Irving Ramírez Solano. El trabajo se realizó en forma conjunta.

Primero se presentan los resultados de las investigaciones bibliográficas realizadas para identificar las oportunidades de empleo de los sensores basados en las rejillas de Bragg en fibras ópticas, encontrar las bases teóricas y modelos matemáticos de su funcionamiento, e identificar los problemas no resueltos en esta área.

Luego se presentan algunos resultados de las simulaciones de dichas rejillas, la comparación de resultados con algunos datos existentes, así como nuestras predicciones teóricas de las características de algunos tipos particulares de las rejillas de Bragg en fibras ópticas que fueron consideradas para la parte experimental del presente trabajo.

La parte teórica se complementa con un experimento cuyo objetivo consistió en la obtención de datos cuantitativos sobre la respuesta de las rejillas a variaciones de temperatura y tensión.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de una aplicación de las rejillas de Bragg en fibras ópticas como sensores de tensión en ensayos de un elemento estructural de concreto (viga).

1. Introducción

1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Metodología.....	2

2. Antecedentes Teóricos

2.1. Fibras ópticas en telecomunicaciones.....	4
2.2. Rejillas de Bragg (FBG) en comunicaciones ópticas	5
2.3. Fotosensibilidad de las fibras ópticas.....	6
2.4. Principio de funcionamiento de las FBG.....	6
2.5. Respuesta espectral de las FBG.....	8
2.6. Tipos de FBG en fibras ópticas.....	9
2.6.1. Clasificación de la FBG en función de la fotosensibilidad.....	9
2.6.2. Clasificación de las FBG en función de su geometría	11
2.7. Métodos de análisis de las características de las FBG.....	13
2.7.1. Análisis con base en la teoría de modos acoplados.....	14
2.7.2. Método de matriz de transferencia (TMM).....	15
2.8. Conclusiones.....	17

3. Efectos de temperatura y tensión en las FBG

3.1. FBG como sensores de algunas cantidades físicas.....	18
3.2. Sensado de temperatura y tensión.....	19
3.3. Discriminación de los efectos de temperatura y tensión.....	20
3.4. Simulaciones de prueba y comparación con datos existentes.....	24
3.5. Conclusiones.....	25

4. FBG como sensor de temperatura: Análisis teórico y físico

4.1. Análisis teórico.....	27
4.1.1. Simulación del comportamiento de las FBG bajo temperatura variable.....	27
4.2. Metodología del experimento físico.....	28
4.3. Resultados.....	33

4.4.	Espectro óptico de los sensores de temperatura FBG.....	35
4.5.	Comparación de las predicciones teóricas con el experimento.....	40
4.6.	Conclusiones.....	42
5.	FBG como sensor de tensión: Análisis teórico y físico	
5.1.	Análisis teórico.....	42
5.1.1.	Simulación del comportamiento de las FBG bajo tensión variable.....	42
5.2.	Metodología del experimento físico.....	43
5.3.	Resultados.....	48
5.4.	Espectro óptico de los sensores de tensión FBG.....	55
5.5.	Efecto de la temperatura en los sensores de tensión FBG.....	61
5.6.	Compensación de temperatura del sensor de tensión FBG os3610.....	63
5.7.	Comparación de las predicciones teóricas con el comportamiento experimental.....	64
5.8.	Conclusiones.....	65
6.	Pruebas con elementos de concreto instrumentado con las FBG	
6.1.	Metodología.....	66
6.2.	Resultados.....	70
6.3.	Conclusiones.....	72
7.	Conclusiones Generales.....	73
8.	Referencias.....	76
9.	Apéndices.....	88

Acrónimos

β	Constante de propagación
δ_d	Vector de desintonización
ζ	Coefficiente de acoplamiento “dc” de la Rejilla de Bragg
ζ^+	Coefficiente general de acoplamiento
κ	Coefficiente de acoplamiento de la rejilla de Bragg
λ_B	Longitud de onda de Bragg
Λ	Periodo de la rejilla
<i>FBG</i>	Rejilla de Bragg (<i>Fiber Bragg Grating</i>)
L	Longitud total de la rejilla
M	Número de secciones de la Rejilla de Bragg
n_{eff}	Índice efectivo de refracción del núcleo la fibra óptica
n_0	Índice de refracción promedio
R	Reflectividad
S	Visibilidad
T_K	Matriz de transmisión
UV	Radiación Ultravioleta
V	Frecuencia normalizada
<i>WDM</i>	Multiplexación por división de onda (<i>Wave Division Multiplexing</i>)

Capítulo 1.

Introducción

1.1. Antecedentes

En las últimas décadas las fibras ópticas se han convertido en uno de los principales medios de transmisión de sistemas de telecomunicaciones debido a ventajas sobre otros medios de transmisión como inmunidad electromagnética, mayor ancho de banda y tamaño físico reducido. El desarrollo de las rejillas inscritas en el núcleo de fibra óptica, en particular, las rejillas de Bragg (*Fiber Bragg Grating*, FBG) contribuyó significativamente al mejoramiento de los sistemas de comunicaciones ópticas en recientes años. Básicamente una FBG es un elemento interno a la fibra capaz de realizar funciones de filtrado de señales ópticas de manera eficiente y sin necesidad de elementos externos a la fibra. A partir de su descubrimiento, el interés científico y académico en las FBG trajo consigo diversos estudios en la búsqueda de nuevas aplicaciones para estos dispositivos.

Existe una vasta cantidad de artículos que describen el funcionamiento y las características de las FBG [1, 2, 3] así como libros sobre este tema [4,5]. Sin embargo, la información que proporcionan las fuentes existentes tiene una utilidad limitada en el desarrollo de aplicaciones prácticas de dichas rejillas.

También se han reportado una gran cantidad de datos experimentales de las FBG en una amplia variedad de aplicaciones, en donde las FBG son aplicadas como sensores de temperatura y tensión debido a la sensibilidad térmica y de deformación que presentan [6, 7].

La información de estos artículos no necesariamente es completa, por lo cual es necesario realizar estudios a los sensores FBG para obtener confiabilidad teórica y experimental, además de que se necesitan realizar estudios sobre tipos particulares de FBG con los que se cuenta en el laboratorio de óptica del departamento de telecomunicaciones. Estos estudios establecerán las bases necesarias para trabajos de investigación futuros.

1.2. Objetivos

La obtención de nuevos conocimientos sobre la respuesta de algunos tipos particulares de Rejillas de Bragg en fibras ópticas a la tensión y temperatura, para su aplicación en el monitoreo del estado físico de distintos elementos estructurales (de materiales compuestos de polímeros y concreto) como sensores.

1.3. Metodología

En el desarrollo de la tesis, en primer término, se ubicarán las fuentes de información donde se describen el problema de las FBG como sensores de temperatura y tensión y presenten los avances técnicos y científicos en esta área.

En segundo término, se analizarán los aspectos fundamentales de tecnología objeto del estudio: las características de las FBG, y el margen de características alcanzables en diferentes variantes de las FBG.

Como tercera fase, definirá la estructura del trabajo de tesis propuesto, se identificarán las líneas de investigación y desarrollo y se elaborará la propuesta general sobre el planteamiento de tesis. También, se identificarán los problemas particulares a desarrollar relacionados a este trabajo de tesis.

Como la cuarta fase, con base en la información recabada y problemas identificados en la presente área, se desarrollará la parte teórica y parte experimental de la tesis. En el desarrollo de la tesis, se utilizarán los métodos teóricos de análisis de señales, los métodos teóricos de análisis de sistemas de comunicación, así como la experimentación sobre muestras de elementos estructurales con las FBG.

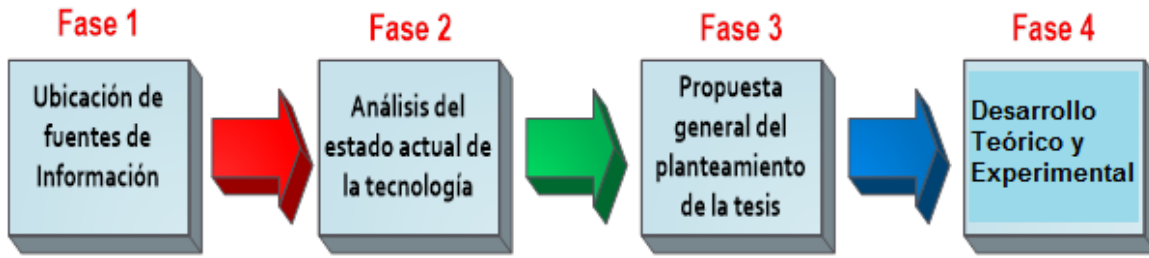


Figura 1 Metodología de la tesis

Capítulo 2.

Antecedentes Teóricos

Este capítulo expone los principios de operación y características de las FBG, seguido por la teoría electromagnética que describe el comportamiento de las señales ópticas en estos elementos.

2.1. Fibras ópticas en telecomunicaciones

Desde que se desarrollaron las primeras aplicaciones prácticas de las fibras ópticas en 1952 por parte del físico Narinder Singh Kapany gracias a estudios previos de Charles Kao y George Hockman, las fibras ópticas han tenido un enorme desarrollo que las ha convertido en parte esencial de las telecomunicaciones modernas. Las propiedades intrínsecas de las fibras ópticas como inmunidad a interferencias electromagnéticas, tamaño y peso reducido, aislamiento eléctrico y grandes capacidades de transmisión, las hacen una herramienta importante para las telecomunicaciones.

Una fibra óptica consiste de un núcleo (core) y un revestimiento (cladding) con menor índice de refracción (n). La diferencia de índices de refracción permite que la luz sea transmitida a través del núcleo a causa del efecto denominado Reflexión Interna Total.

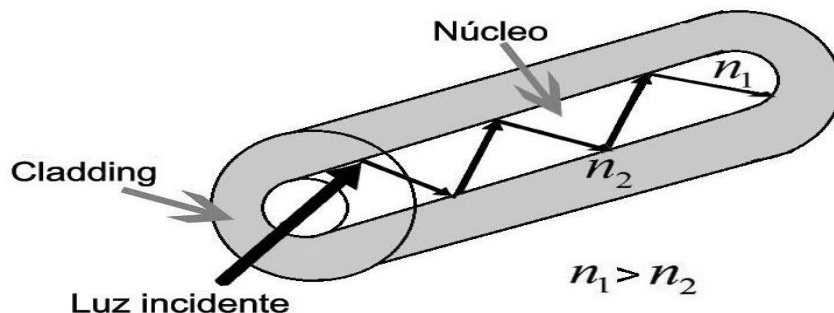


Figura 2. Diagrama de los componentes de una fibra óptica

Las fibras ópticas comunes son fabricadas generalmente de un revestimiento de dióxido de silicio (SiO_2) y un núcleo de silicio dopado con germanio para aumentar el índice de refracción provocando la reflexión total interna de la luz sobre el núcleo.

2.2. Rejillas de Bragg (FBG) en comunicaciones ópticas

Generalizando una FBG es un resonador implementado en el núcleo de una fibra óptica distribuido sobre una cierta longitud L (generalmente en el orden de varios mm). La FBG refleja las señales ópticas con una longitud de onda particular establecida por la denominada condición de Bragg, la luz fuera de esta longitud de onda pasa a través de la FBG sin sufrir cambios.

En su forma más común una FBG consiste en el la variación periódica o aperiódica del índice de refracción efectivo de la fibra óptica (n_{eff}). Este efecto hace posible que las FBG realicen funciones como reflexión, dispersión y filtrado de luz [8]. Las FBG surgieron a partir del avance en las investigaciones de la fotosensibilidad de las fibras ópticas, K. Hill y sus colaboradores reportaron el fenómeno de fotosensibilidad en las fibras ópticas en 1978 [9].

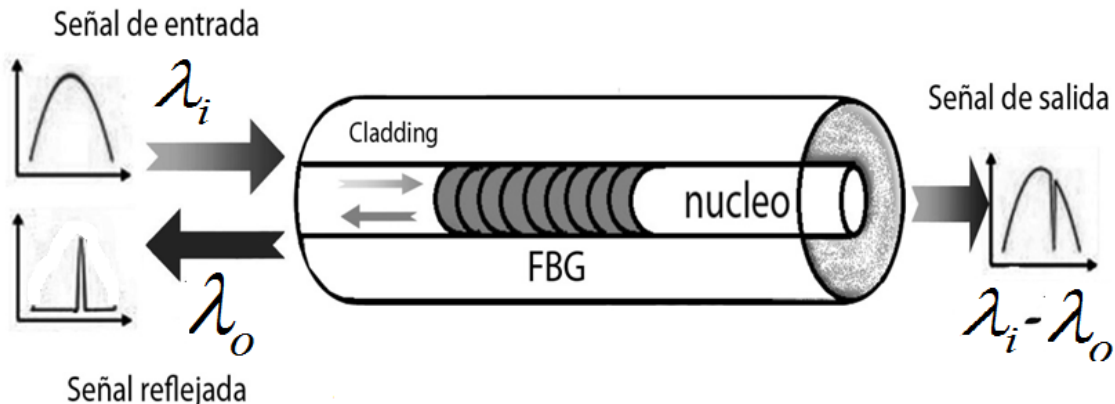


Figura 3 Esquema de una Rejilla de Bragg inscrita en el núcleo de una fibra óptica.

Desde entonces las FBG han sido implementadas en las telecomunicaciones como láseres [10], amplificadores [11], filtros [12], multiplexores [13] y compensadores de dispersión [14]. Por otra parte una de sus aplicaciones más importantes son los sensores, en donde son usados para la medición de parámetros físicos como temperatura, tensión, presión, entre otras [15].

2.3. Fotosensibilidad de las fibras ópticas

La fotosensibilidad fue descubierta mientras se realizaban experimentos con fibra de silicio dopada con germanio [9], experimentos revelaron que al exponer el núcleo de una fibra óptica a luz láser ultravioleta (UV) de Argón, se presentaba el fenómeno de reflexión en la fibra, es decir, la luz que se transmitía hacia el otro extremo de la fibra era cada vez menor.

Se determinó que la reflexión de luz hacia la fuente es una propiedad que se le atribuye principalmente a cambios estructurales de los enlaces de los átomos del germanio, este fenómeno es mejor conocido como fotosensibilidad. Los materiales en los que se encuentra la fotosensibilidad es en los vidrios basados en óxidos de Boro, Germanio y el Erbio [9].

2.4. Principio de funcionamiento de las FBG

La FBG puede ser inscrita en el núcleo de la fibra principalmente por medio de dos distintas técnicas: máscara de fase e interferometría [1], en cada una de estas técnicas el cambio del índice de refracción es logrado con la exposición de la fibra a radiación UV, la fotosensibilidad característica de la fibra, tratada en el inciso anterior, producirá permanentemente la FBG en la fibra óptica.

Las variaciones del índice de refracción de la FBG reflejan la luz que viaja a través de la fibra.

La condición de Bragg consiste en el cumplimiento de las leyes de conservación de momento y energía [16]. El cumplimiento de estas leyes requiere que el vector incidente (v_i), más el vector característico de la rejilla (V), sea igual al vector de la radiación difractada por la FBG (v_f). Matemáticamente se define como:

$$v_i + V = v_f \quad , \quad (1.1)$$

V tiene magnitud $|\frac{2\pi}{\Lambda}|$, Λ es el periodo de la FBG. El vector de radiación difractada (v_f) es igual en magnitud, pero con sentido contrario al vector incidente (v_i), la magnitud de estos vectores está dada por la constante de propagación de la ecuación:

$$\beta = \left(\frac{2\pi}{\lambda_B} \right) n_{eff} \quad (1.2)$$

Sustituyendo (1.2) en (1.1) la condición de conservación de momento será:

$$2 \left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1.3)$$

Por último simplificando (1.3) la condición de Bragg de primer orden estará dada por la ecuación.

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad , \quad (1.4)$$

donde λ_B es la longitud de onda reflejada por FBG (también llamado pico de reflexión), y n_{eff} es el índice efectivo de refracción de la fibra óptica y Λ es el periodo de la FBG.

2.5. Respuesta espectral de las FBG

La respuesta de una Rejilla de Bragg depende de los siguientes factores: el periodo de la rejilla (Λ), el índice de refracción efectivo de la fibra (n_{eff}), la fase de la rejilla (φ) definida por una matriz de 2×2 , y el coeficiente de acoplamiento (κ) dado por ($\kappa = \pi \Delta n_{eff} / \lambda$), Δn_{eff} es el cambio del índice de refracción efectivo. Cualquier cambio en alguno de los parámetros, modifica el espectro reflejado [4]. Cuando una Rejilla de Bragg es sometida a esfuerzos laterales, se produce un fenómeno llamado birrefringencia. Dicho fenómeno consiste en la división del rayo de luz en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí. Todo lo anterior genera un corrimiento del pico de reflexión de la FBG [15]. El espectro característico de las FBG es mostrado en la figura 4, la figura corresponde a la simulación en matlab de la respuesta de una FBG uniforme (apéndice 1).

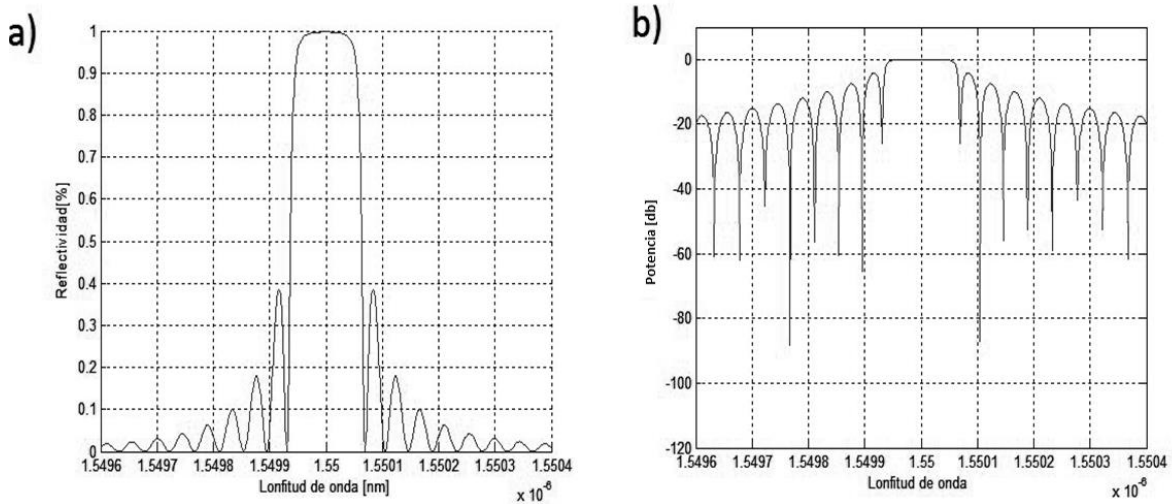


Figura 4 Respuesta espectral de una Rejilla de Bragg uniforme, a) Reflectividad [%], b) Potencia [dB], J. rendón e I. ramírez 2014.

2.6. Tipos de FBG en fibras ópticas

La investigación de las rejillas de Bragg trajo consigo el descubrimiento de distintas clases de FBG's, cada una con características propias. Las rejillas se pueden clasificar de acuerdo a la categoría de fotosensibilidad y a la geometría de esta.

2.6.1. Clasificación de la FBG en función de la fotosensibilidad

La clasificación debido a la fotosensibilidad distingue 3 tipos de FBG: tipo *I*, tipo *IIA* y tipo *II*. Esta clasificación es establecida de acuerdo a las condiciones iniciales de fabricación de la FBG (potencia del láser, longitud de onda y energía de pulso) y a las propiedades de los materiales fibra.

- **Rejillas de Bragg tipo *I***

El tipo *I* corresponde a las FBG formadas bajo exposición a radiación UV moderada. El espectro característico de este tipo de rejillas es mostrado en la fig.5 se observa que el espectro de reflexión es complementario a la señal de transmisión con pequeñas pérdidas debido a la absorción o reflexión de la luz en el cladding de la fibra [18].

Debido al tipo de sensibilidad de FBG tipo *I* estas tienen un rango de operación en temperaturas relativamente bajas (aproximadamente 200°C), por esta razón las FBG tipo *I* son usadas en sistemas de telecomunicaciones y aplicaciones de sensado en donde los rangos de temperatura de operación oscilan entre -40°C a +80°C.

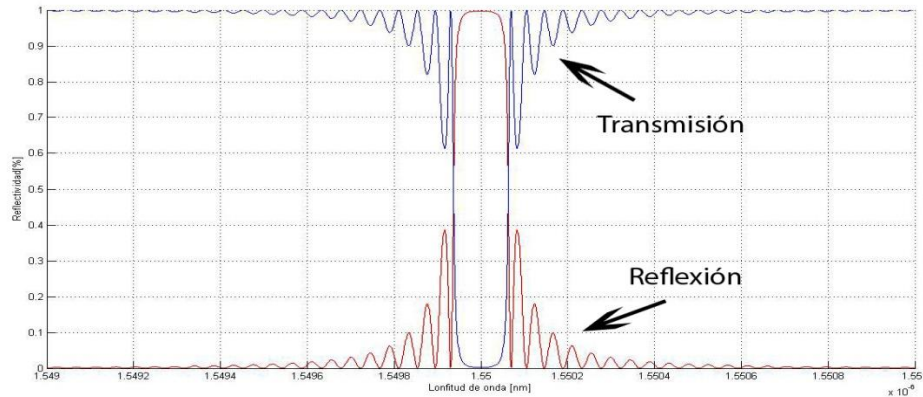


Figura 5. Espectro de reflexión y transmisión de una FBG tipo *I*, J. rendón e I. ramírez 2014. (Código apéndice 1)

- **Rejillas de Bragg tipo *IIA***

Este tipo de FBG tiene las mismas características espectrales que las FBG tipo *I* (fig.5). En una situación estática este tipo de FBG no difiere de las rejillas tipo *I*. La diferencia radica en el proceso de fabricación de las rejillas, las FBG tipo *IIA* son sometidas a un largo proceso de fabricación [19] en donde el mecanismo de cambio de índice de refracción ocurre de una manera más compleja. Este proceso de fabricación le da a las rejillas de Bragg tipo *IIA* una mayor estabilidad térmica (aprox. 500°C) y la capacidad de operación a temperaturas extremas como por ejemplo aplicaciones de sensado en algunos ambientes industriales.

- **Rejillas de Bragg tipo *II***

Las FBG tipo *II* difieren drásticamente de los anteriores. En comparación a las rejillas anteriores son fabricadas bajo impulsos de mayor energía (aprox. $>0.5J/cm^2$) [20]. El espectro de reflexión y transmisión de las FBG tipo *II* tiene una forma de acuerdo a la fig.6. Se observa que las longitudes mayores a la de reflexión de la FBG son transmitidas, mientras que las longitudes de onda menor a la longitud de reflexión son fuertemente acopladas hacia el cladding.

Estudios de estabilidad térmica han demostrado que las FBG tipo *II* son altamente estables a temperaturas elevadas. Se ha demostrado que el espectro de reflexión de las FBG tipo *II* en temperaturas de 800°C no es afectado sobre un periodo de 24 horas, a 1000 °C la mayor parte de la rejilla de Bragg desaparece después de 4 horas [20]. La superior estabilidad térmica sobre otros tipos rejillas las hace útiles en aplicaciones de sensado en ambientes extremos (aeronaves, naves espaciales, plantas nucleares, etc.).

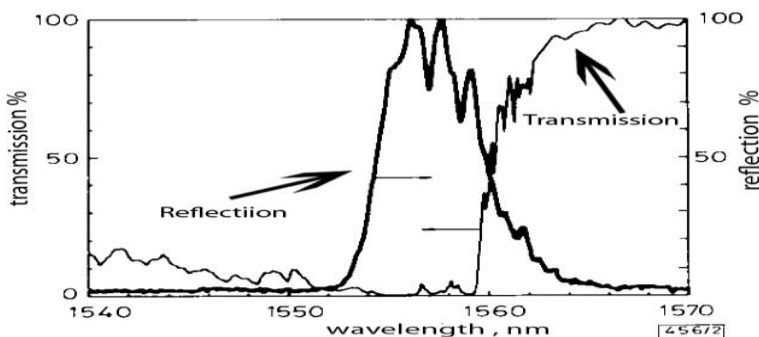


Figura 6. Espectro de transmisión y reflexión de una FBG tipo *II* [20]

2.6.2. Clasificación de las FBG en función de su geometría

Adicionalmente las FBG pueden clasificarse de acuerdo a las características geométricas dentro de la fibra, según la geometría de la FBG se obtiene características únicas para determinadas aplicaciones.

- **Rejillas de Bragg uniformes**

Este tipo de rejillas de Bragg es la forma más simple de rejillas, tiene la característica de tener una distribución uniforme a lo largo de la fibra (figura 7). El índice de refracción y el periodo de la rejilla permanecen constantes. El espectro de transmisión corresponde a la figura 5.

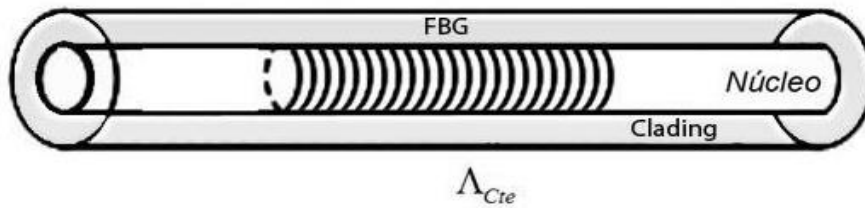


Figura 7. Estructura de una FBG uniforme

- **Rejillas de Bragg no uniformes**

Este tipo de FBG presenta un cambio en el índice de refracción no uniforme, el periodo presenta una variación en la FBG (figura 8). Esta característica permite la fabricación de rejillas con cambio de fase bajo la teoría de Matriz de Transferencia (TMM) [21]. .

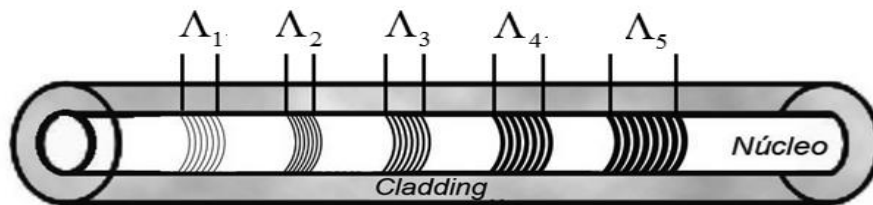


Figura 8. Esquema de una FBG no uniforme

- **Otros tipos**

Existen otros tipos especiales de FBG como las FBG inclinadas (Tilted Fiber Bragg Grating) [22], FBG Superestructuradas [23] y FBG Aleatorias [24]. Estos tipos de FBG tienen estructuras de mayor complejidad y tienen características espectrales únicas, sin embargo para esta tesis no son consideradas para la implementación de las pruebas experimentales de los siguientes capítulos.

2.7. Métodos de análisis de las características de las FBG

La propagación de campos electromagnéticos en las FBG ha sido un tema estudiado desde los inicios del descubrimiento de estos dispositivos. Existen diversos métodos basados en la solución a las ecuaciones de Maxwell con las condiciones de frontera correspondientes al medio de transmisión de la luz [25].

La técnica más utilizada para el análisis de los campos electromagnéticos en las FBG es la “Teoría de modos acoplados” [17]. Este método asume que los campos electromagnéticos son representados o descritos con un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden con solución analítica para perturbaciones uniformes sinusoidales periódicas (FBG uniformes).

Para el análisis de FBG’s más complejas, esta es dividida en pequeñas secciones de periodo constante e índice de refracción único, cada una de estas secciones es concatenada con la siguiente, la concatenación de todas las secciones representa la respuesta completa de la FBG. Esta técnica hace que el modelado de transferencia de las FBG sea relativamente simple y rápido, este método es el denominado “Método de matriz de transferencia” (TMM) [21].

Otra técnica para la solución analítica de la función de transferencia de las FBG es la propuesta por Roudar denominado “Método de dieléctrico de película delgada multicapa” [26]. Este método establece el cálculo de los campos transmitidos y reflejados sobre una interferencia entre dos dieléctricos de índices de refracción distintos. Usando un método matricial, la respuesta de reflexión y fase puede ser evaluada. La desventaja de este método es el largo tiempo computacional que simulación.

Existen otros métodos de análisis de las FBG que no son tan populares o han sido utilizados para aplicaciones específicas, algunos de estos son: método de índice efectivo (EIM) [27], Método de ecuaciones integrales de *Gelfand-Leviatan-Marcjenko* [28], método de Tiempo discreto (DTM) [29], método de matriz generalizada [30] y el método de Variaciones [31].

2.7.1. Análisis con base en la teoría de modos acoplados

En este método la propagación de la luz en la FBG se describe en términos de un conjunto de ondas electromagnéticas llamadas modos de propagación. La perturbación del índice de refracción en la fibra causada por la FBG provoca un intercambio de energía entre los modos en contra propagación.

De acuerdo al trabajo publicado por Erdogan para teoría de modos acoplados [32], el coeficiente de reflexión de una FBG uniforme está dado por ρ y la reflexión de la señal incidente $R = |\rho|^2$ tienen la forma:

$$\rho = \frac{-\kappa \sinh \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}}{\zeta^+ \sinh \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2} + i \sqrt{\kappa^2 - \zeta^{+2}} \cosh \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}} \quad (1.5)$$

$$R = \frac{\sinh^2 \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}}{-\frac{\zeta^{+2}}{\kappa^2} + \cosh^2 \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}} \quad , \quad (1.6)$$

dónde $\kappa = (\pi / \lambda) S \delta n_{eff}$, δn_{eff} representa el cambio de índice de refracción, S es la visibilidad o apodización y representa la intensidad de los lóbulos secundarios de la respuesta espectral de la FBG. A su vez L es la longitud de la FBG y ζ^+ es el coeficiente general de auto acoplamiento. Cuando $\zeta^+ = 0$ se presenta la máxima reflexión de acuerdo a la ecuación:

$$R_{max} = \tanh^2(\kappa L) \quad . \quad (1.7)$$

2.7.2. Método de Matriz de Transferencia (TMM)

Para rejillas que no son uniformes las ecuaciones de modos acoplados son resueltas a través de métodos numéricos. La aproximación para calcular el espectro de la rejilla se realiza mediante secciones uniformes, en el que la rejilla es dividida en un cierto número de secciones [21]. La solución de forma cerrada para cada sección uniforme es combinada mediante la multiplicación de un arreglo de matrices de 2x2. Este método es simple de implementar, además de que es una aproximación generalmente precisa y rápida.

La rejilla puede ser dividida en M secciones uniformes (figura 9), cada segmento posee una única dependencia funcional, 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.

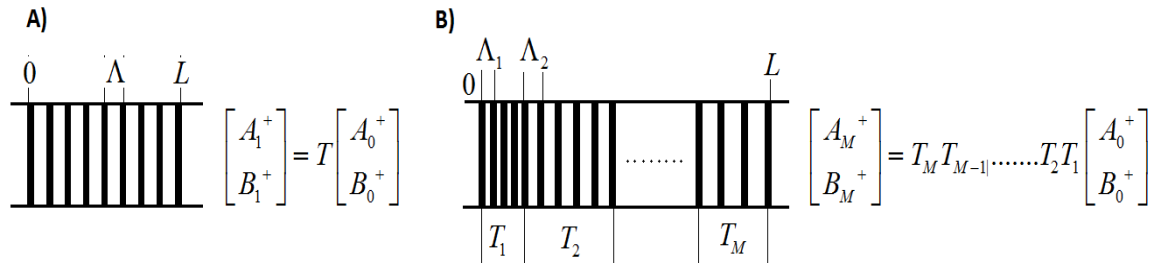


Figura 9 A) FBG uniforme B) FBG no uniforme representada por M matrices, por el método de matriz de transferencia

Así la propagación a través de cada k-ésima sección uniforme está representada por la matriz T_k de la siguiente ecuación

$$\begin{pmatrix} A_k^+ \\ B_k^+ \end{pmatrix} = T_k \begin{pmatrix} A_{k-1}^+ \\ B_{k-1}^+ \end{pmatrix}, \quad (1.8)$$

La matriz T_k está definida como:

$$T_k = \begin{pmatrix} \cosh(\Omega dz) - i \frac{\zeta^+}{\Omega} \sinh(\Omega dz) & -i \frac{\kappa}{\Omega} \sinh(\Omega dz) \\ i \frac{\kappa}{\Omega} \sinh(\Omega dz) & \cosh(\Omega dz) + i \frac{\zeta^+}{\Omega} \sinh(\Omega dz) \end{pmatrix}, \quad (1.9)$$

donde dz es la longitud de la k-ésima sección uniforme y Ω está dado por:

$$\Omega = \sqrt{\kappa^2 - \zeta^{+2}}, \quad (1.10)$$

κ es el coeficiente de acoplamiento dado por $\kappa = \pi \Delta n_{eff} / \lambda$ y ζ^+ es el vector de desintonización dado por $\zeta^+ = (2\pi n_{eff} / \lambda) - \pi / \Lambda$. Una vez que todas las matrices de cada una de las secciones individuales son conocidas, la reflexión y la transmisión pueden ser conocidas a través de las ecuaciones

$$\rho = \frac{T_{k21}}{T_{k11}} \quad (1.11)$$

$$\tau = 1 - \rho = \frac{1}{T_{11}}, \quad (1.12)$$

donde ρ es la reflexión y τ la transmisión.

2.8. Conclusiones

Este capítulo introdujo las bases teóricas de las FBG y las ecuaciones de la respuesta espectral de los distintos tipos de FBG. Las características geométricas y tipo de sensibilidad, influyen en la respuesta espectral de las FBG, estas características definen las posibles aplicaciones para cada uno de los tipos de FBG expuesto en este capítulo.

De acuerdo a la teoría una rejilla FBG de periodo constante de sensibilidad tipo I, es útil para la aplicación de sensado en los experimentos que se realizarán en esta tesis, estas características y un modelo simple como la Teoría de Modos Acoplados nos da los elementos necesarios para obtener la respuesta de las FBG. Los modelos matemáticos son necesarios para la elaboración de programas sobre la plataforma MATLAB para la simulación de la respuesta espectral de las FBG.

En el siguiente capítulo hacemos una revisión de la respuesta de las FBG a la temperatura y tensión, además se establecerán las ecuaciones para la realización de predicciones teóricas para siguientes capítulos.

Capítulo 3.

Efectos de Tensión y Temperatura en las FBG.

Las rejillas de Bragg son elementos sensibles a distintos factores, físicos externos. Las propiedades de los materiales de las FBG tienen un comportamiento que varía en función de la temperatura, tensión, vibración, y la presión. La aplicación de sensores basados en FBG ha tenido mayor interés y desarrollo en el sensado de temperatura y tensión debido a la sensibilidad propia de las FBG hacia factores térmicos y de deformación.

Este capítulo detalla los principios de sensado de temperatura y tensión de las FBG.

3.1. FBG como sensores de algunas cantidades físicas

Una de las principales ventajas de los sensores FBG sobre otro tipo de sensores ópticos y eléctricos se basa en que la información de las mediciones es codificada sobre la propia longitud de onda de resonancia de la rejilla sin necesidad de dispositivos adicionales, esto los hace independientes de factores como fluctuaciones de la fuente, pérdidas de energía en el sistema o pérdidas variables en conectores.

A pesar de las ventajas que ofrece este tipo de sensores, las rejillas de Bragg sufren de un traslape inherente de sensibilidad de los efectos de temperatura y tensión. Este traslape de sensibilidad puede crear problemas en sensores que son diseñados para el monitoreo de un parámetro físico a la vez, por ejemplo tensión, variaciones en la temperatura del sistema inducen cambios en las mediciones de tensión de los sensores debido a la sensibilidad térmica propia de la rejilla. Existen diversas técnicas para la discriminación de la temperatura y la tensión, algunas de las técnicas más comunes son analizadas en este capítulo, ya que posteriormente esta información servirá para sobreponer errores de mediciones en las pruebas experimentales de esta tesis.

3.2. Sensado de temperatura y tensión

La capacidad de sensado de una FBG deriva de la sensibilidad del índice de refracción (n_{eff}) y el periodo de la rejilla a perturbaciones mecánicas o térmicas en la fibra óptica. El pico de reflexión de una FBG es dependiente del índice efectivo de refracción de la fibra y el periodo de la rejilla, la deformación de la fibra óptica que causan los efectos de temperatura y tensión provocan un desplazamiento del pico de reflexión.

Partiendo de la ecuación característica de reflexión de las FBG (1.4) es posible modelar el cambio de longitud de onda reflejada debido a la variación de temperatura y tensión sobre las FBG de acuerdo a la siguiente ecuación [4]

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Delta}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Delta}{\partial T} \right) \Delta T \quad (1.13)$$

El primer término de la ecuación representa la respuesta de la FBG a factores de deformación, mientras que el segundo término establece la respuesta térmica de la FBG.

Tensión

El término correspondiente a la tensión en Ec.1.13 es provocado por el cambio de periodo y el cambio elasto-óptico inducido en el índice de refracción de la FBG. El desplazamiento de la longitud de onda de Bragg en función de la tensión aplicada es entonces expresado de la siguiente forma [4]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) \varepsilon_z, \quad (1.14)$$

donde $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$, ΔL es la variación de la longitud de la rejilla y L es la longitud

libre de tensión. P_e es la constante efectiva elasto-óptica definida como

$$P_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (1.15)$$

De la ecuación anterior p_{11} (≈ 0.113) y p_{12} (≈ 0.235) para fibras de silicio dopadas con germanio, representan los coeficientes elasto-ópticos y ν ($=0.16$) es el cociente de Poisson.

Temperatura

El segundo término de la ecuación (Ec.1.13) representa la respuesta térmica. El desplazamiento del pico de reflexión ocurre debido a la expansión térmica de la fibra que altera el periodo de la rejilla y el efecto termo-óptico inducido en el índice de refracción de esta. El desplazamiento del pico de reflexión en función de la temperatura está dado por [4]

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_n + \alpha_\Lambda)\Delta T \quad (1.16)$$

donde $\alpha_n = \frac{dn_{eff}}{n_{eff}dT}$ representa el cociente termo-óptico de la fibra y $\alpha_\Lambda = \frac{d\Lambda}{\Lambda dT}$ es el cociente de expansión térmica de la fibra.

3.3. Discriminación de los efectos de temperatura y tensión

El estudio de las FBG se basa principalmente en la detección de un cambio del pico de reflexión sobre la FBG. Uno de los principales problemas de las FBG es la discriminación entre temperatura y tensión, debido a que la rejilla es sensible a ambos factores, la distinción entre los efectos de la temperatura y la tensión sobre la FBG es complicada.

Para solucionar este problema diversos métodos de discriminación han sido estudiados, a continuación se presenta una breve explicación de los métodos más representativos de discriminación de sensores de temperatura y tensión [33].

- **Método simple de 2 FBG**

Globalmente es imposible la separación de efectos de temperatura y tensión en la rejilla basándose en una sola medición del cambio en la longitud de onda de la FBG. Un método simple es la separación del efecto de temperatura con una FBG de referencia [34]. Esta FBG tiene que ser idéntica, estar separada, y libre de tensión para ser utilizada como sensor de temperatura para medir directamente la temperatura del sensor de tensión. Esta FBG de referencia debe estar en el mismo ambiente que el sensor de tensión. La utilización de este tipo de configuración causa un error del sensor de tensión debido a la variación de temperatura, sin embargo esta puede ser compensada substrayendo el cambio de longitud de onda inducido por la variación de temperatura de la variación total obtenida por el sensor de tensión. Este método ofrece algunas ventajas como estructura simple y bajo costo de los sensores.

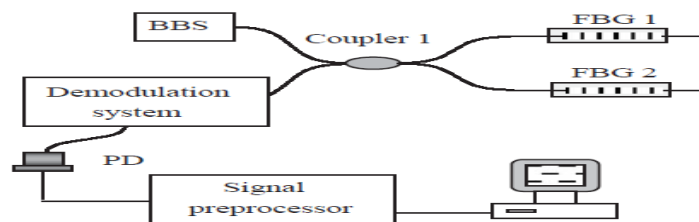


Figura 10. Diagrama del método de discriminación con 2 FBG [34]

- **FBG sobrepuestas con doble longitud de onda**

Este método es caracterizado por el uso de dos conjuntos de datos del cambio de la longitud de onda del pico de reflexión obtenidos a partir de dos rejillas de Bragg con longitud de onda de Bragg distintas sobrepuestas en la misma ubicación en la fibra óptica [35].

Asumiendo que el cambio de temperatura y tensión sobre la rejilla actúa de forma lineal, el cambio de longitud de onda de Bragg ($\Delta\lambda_B$) debido a estos factores está dado por la ecuación

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(K_T\Delta T + K_\varepsilon\Delta\varepsilon) \quad , \quad (1.17)$$

donde K_T y K_ε son la sensibilidad de temperatura y tensión de la FBG respectivamente, ΔT y $\Delta\varepsilon$ son los cambios de temperatura y tensión. Asumiendo que la temperatura y la tensión son esencialmente independientes, para dos FBG sobrepuestas la temperatura y la tensión pueden ser obtenidas simultáneamente con la siguiente matriz

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{\varepsilon1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon2} & K_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad . \quad (1.18)$$

Los números 1 y 2 representan las dos longitudes de onda pico. Los elementos de la matriz de la ecuación (Ec.1.18) pueden ser determinados experimentalmente separando la medición de los cambios de longitud de onda con tensión y temperatura.

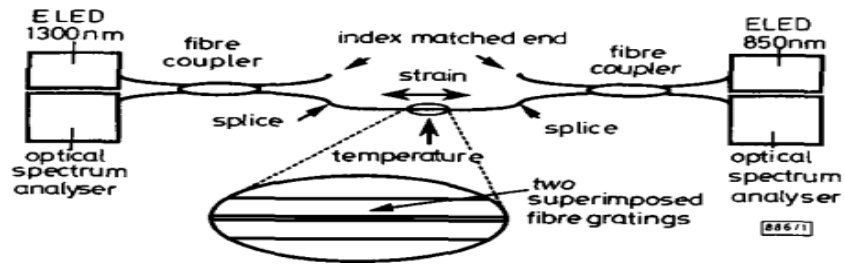


Figura 11. Diagrama de conexiones del método de discriminación de FBG's sobrepuestas con doble longitud de onda [35]

- **Método de variación de diámetro del cladding**

Se han realizado estudios que demuestran que respuesta de la tensión a un cambio de longitud de onda de Bragg y la respuesta de la temperatura al cambio de longitud de onda medido es distinta de dos FBG con diámetro de cladding distinto [36].

Realizando un empalme por fusión de dos FBG con distinto diámetro de cladding, dos conjuntos de datos de cambio relativos de longitud de onda son obtenidos separando temperatura y tensión. La respuesta de las FBG puede ser determinada con la ecuación Ec. (1.18). La longitud de onda de Bragg de ambas FBG debe variar unos pocos nanómetros, lo que permitirá la medición independiente de los parámetros a través de sistemas WDM

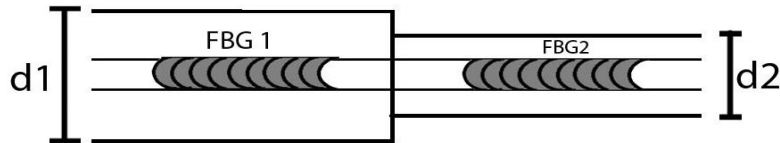


Figura 12. Método de variación de diámetro de cladding [36]

- **Método de una sola FBG inclinada (TFBG)**

En una TFBG los modos de transmisión del núcleo y del cladding tienen sensibilidades térmicas diferentes, mientras que la sensibilidad de tensión es aproximadamente igual. El monitoreo de las resonancias de acoplamiento de los modos núcleo-núcleo y las resonancias de acoplamiento núcleo-cladding del espectro de transmisión de la TFBG permiten la separación de los efectos de la temperatura y la tensión usando una sola TFBG [37]. Al igual que métodos anteriores la respuesta de la TFBG puede ser descrita a través de matrices de la siguiente manera

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{core} \\ \Delta\lambda_{clad} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{core,\varepsilon} & K_{core,T} \\ K_{clad,\varepsilon} & K_{clad,T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon \\ T \end{pmatrix}, \quad \text{Ec. (1.19)}$$

donde $\Delta\lambda_{core}$ y $\Delta\lambda_{clad}$ son los cambios de longitud de onda pico del modo núcleo-núcleo y el modo núcleo-cladding respectivamente. K_{core} y K_{clad} son los coeficientes de sensibilidad del núcleo y del cladding.

La principal limitación de este método es que el sistema debe operar en modo de transmisión lo cual afecta uno de los principales beneficios de la FBG.

3.4. Resultados teóricos del comportamiento de las rejillas bajo efectos de temperatura y tensión

La respuesta de las FBG en función de la temperatura y tensión obtenida en simulaciones de prueba con las ecuaciones 1.14 y 1.16 a través de un software realizado en matlab es mostrada en la figura 13 Y 14. Las simulaciones muestran un comportamiento lineal. Los resultados obtenidos por [38] donde se simuló una FBG con características similares a las que se utilizarán en esta tesis, sirven de referencia para comparar los resultados obtenidos en simulaciones de prueba.

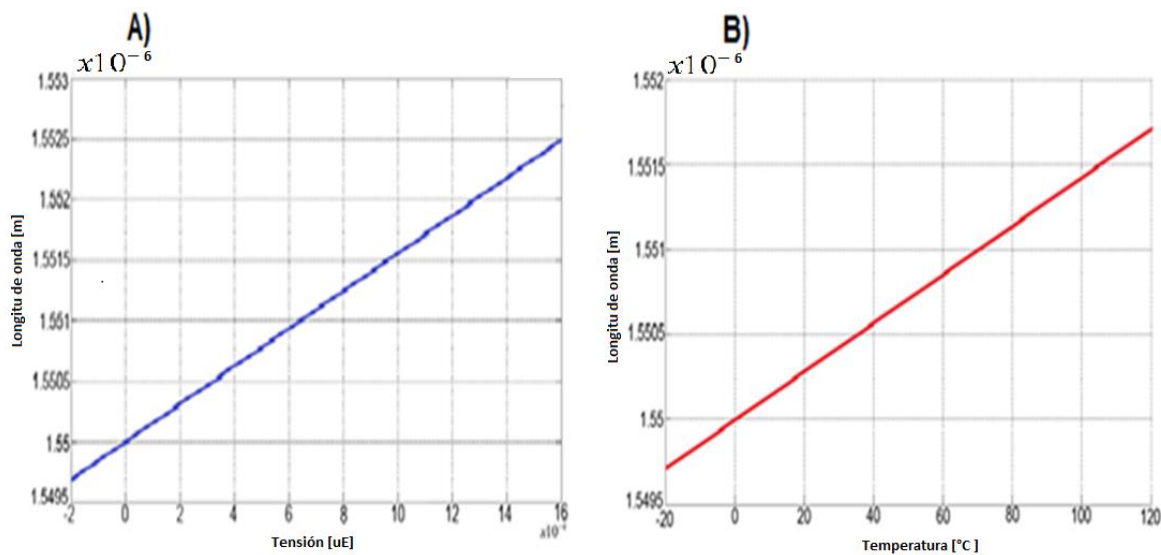


Figura 13. Respuesta de la longitud de onda de reflexión en función de: A) Tensión, B) Temperatura (resultados teóricos)

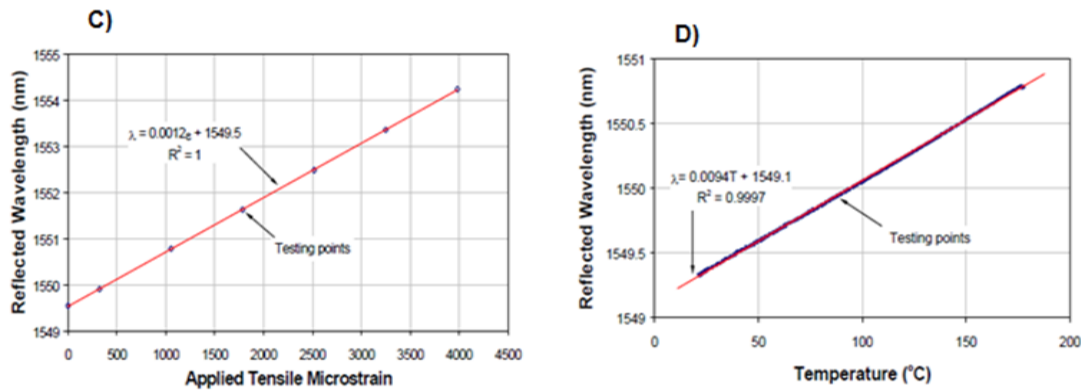


Figura 14. Respuesta de la longitud de onda de reflexión en función de: C) Tensión [38], D) Temperatura [38]

El comportamiento simulado muestra similitudes con los resultados de la referencia [38].

3.5. Conclusiones

La teoría y las ecuaciones matemáticas 1.14 y 1.16 que describen el comportamiento de las FBG bajo temperatura y tensión respectivamente, predicen un cambio lineal de la longitud de onda de reflexión en función de la temperatura y tensión. La programación de estas ecuaciones matemáticas en la plataforma MATLAB es factible.

La teoría también indica la posibilidad de discriminación de efectos de temperatura y la tensión en los sensores FBG.

En los siguientes capítulos de esta tesis, se obtendrán el comportamiento teórico de algunos modelos particulares de sensores FBG y se verificarán experimentalmente las predicciones teóricas mediante respectivo experimento.

Capítulo 4.

FBG como sensor de temperatura: Análisis teórico y experimento físico

La finalidad del análisis teórico y los experimentos físicos que se describen a continuación consiste en la obtención de datos cuantitativos sobre la respuesta de algunos modelos particulares de FBG a la temperatura así como una comparación de las predicciones teóricas con el comportamiento obtenido experimentalmente, de las FBG.

4.1. Análisis Teórico

Partiendo de la teoría expuesta en capítulos anteriores, se realizaron simulaciones numéricas del comportamiento de las FBG expuestas a las variaciones de temperatura, esto con un programa de simulación elaborado en la plataforma MATLAB que puede ser consultado en el Apéndice 2 de esta tesis.

4.1.1. Simulación del comportamiento de las FBG bajo temperatura variable

El pico de reflexión de una FBG en función de temperatura está dado por las ecuaciones (1.13 y 1.16). El resultado de la simulación de una FBG con cociente termo-óptico $\xi = 8.6 \times 10^{-6} [C^{-1}]$ y cociente de expansión térmica $\alpha = 0.55 \times 10^{-6} [C^{-1}]$, sobre temperatura variable es mostrado en la figura 15. Las gráficas de esta figura demuestran la relación teórica entre la temperatura y el desplazamiento de la longitud de onda pico de reflexión de la FBG, en un rango de variación de temperatura de 0 a +120 ° C.

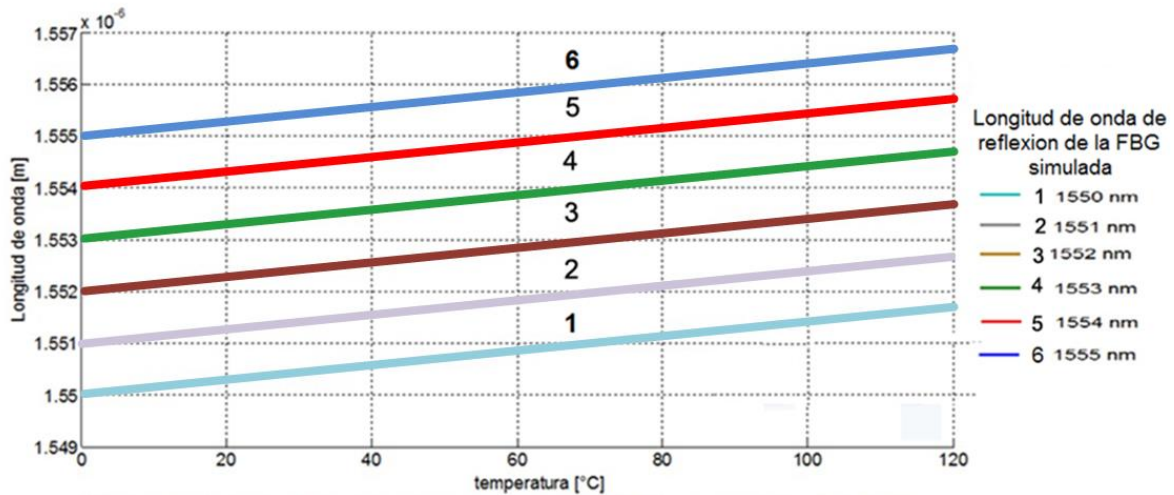


Figura 15. Efecto de temperatura sobre FBG's con distintas longitudes de onda de reflexión λ_B , cociente termo-óptico $\xi = 8.6 \times 10^{-6} [C^{-1}]$ (Sílice) y cociente de expansión térmica $\alpha = 0.55 \times 10^{-6} [C^{-1}]$ (Simulación en MATLAB), J. rendón e I. ramírez 2014.

Se observa que el comportamiento de la FBG es lineal en función de la temperatura. La sensibilidad teórica de la FBG es representada por la pendiente m de la ecuación de la recta de la simulación, la cual resulta ser la siguiente

$$y = mx + P_1 \quad , \quad (1.20)$$

dónde: $m = 1.4182 \times 10^{-11}$ y $P_1 = 1.55 \times 10^{-6}$. De (1.20) la sensibilidad teórica del FBG sobre la temperatura que esperamos es $14.1 pm/^\circ C$.

4.2. Metodología del experimento físico

Para obtener la respuesta de una FBG sobre la temperatura, se requiere de dos FBG idénticas, la primera FBG actúa como sensor de temperatura (FBG_1), mientras que la segunda sirve únicamente de referencia (FBG_2).

Las FBG tienen los siguientes parámetros: Longitud de onda pico de reflexión de 1550nm , longitud total de 10 mm, recubrimiento de acrilato, reflexión de 96% de la luz incidente, tipo de sensibilidad I y periodo uniforme.

La FBG_1 es sometido a cambios de temperatura en forma creciente y decreciente. Se observa el espectro de reflexión que se obtiene por medio de un equipo interrogador de FBG's. Se registra y se almacenan los datos en una computadora, y finalmente los datos obtenidos experimentalmente son analizados y comparados con las predicciones teóricas. El experimento se repite 3 veces para obtener datos estadísticamente significativos.

Descripción del arreglo experimental.

El diagrama de arreglo experimental es mostrado en las figuras 16 y 17.

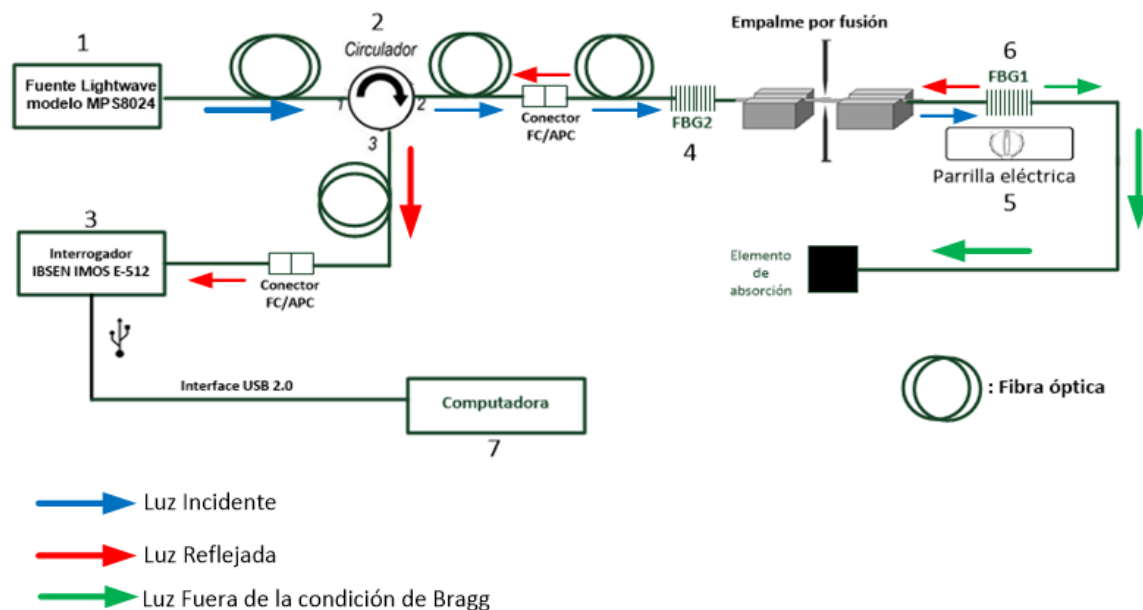


Figura 16. Diagrama esquemático del arreglo experimental para el sensado de temperatura

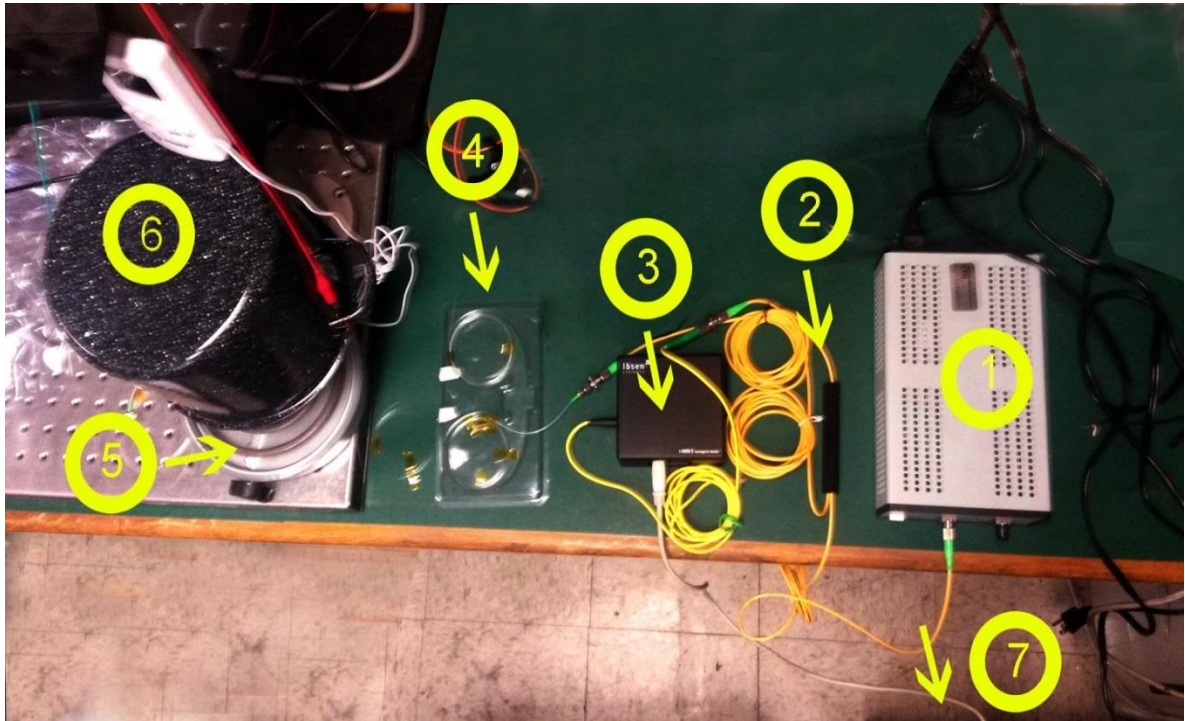


Figura 17. Arreglo experimental para obtener la respuesta de FBG a temperatura (fotografía)

Dónde:

1. Fuente óptica marca Lightwave modelo MPS8024
2. Circulador óptico de 3 puertos PIOC-3-1550-S320-FC/APC
3. Interrogador FBG IMON E-512
4. FBG_2 (Referencia)
5. Parrilla eléctrica con variación de temperatura
6. FBG_1 (Interior)
7. Ordenador

La fibra óptica utilizada para las conexiones es SMF-28 monomodo 9/125 μm de la marca Corning con conectores FC/APC. Las FBG fueron unidas entre sí, esto mediante su fusión con una empalmadora marca Fujikura modelo FSM-45PM-LDF. Las pérdidas aproximadas son de 0.01 dB

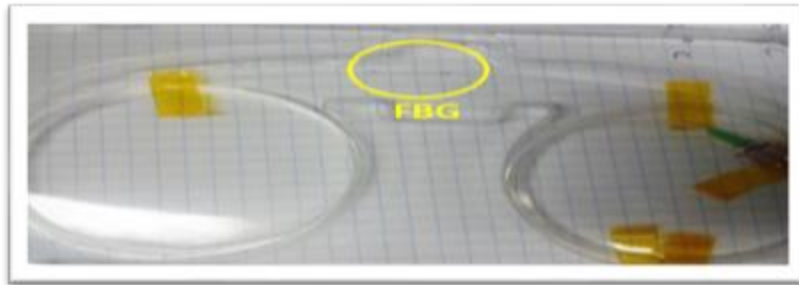


Figura 18. Rejilla de Bragg con longitud de onda de Bragg de 1550nm utilizada como sensor de temperatura en el experimento físico (fotografía).

La fuente óptica de banda ancha marca LIGHTWAVE modelo MPS8024 (1) emite una señal a $1550 \pm 20 \text{ nm}$. La salida de fuente es conectada al puerto 1 del circulador óptico PIOC-3-1550-S320 (2) donde la luz es transmitida hacia el puerto 2 del circulador en el cual están conectadas las rejillas FBG_2 (4) y FBG_1 (6).

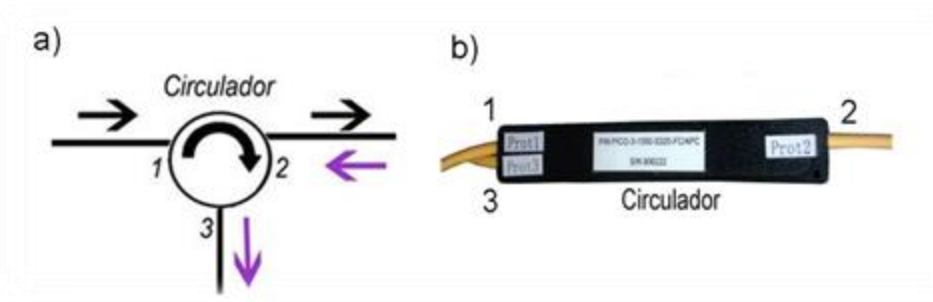


Figura 19. a) Ilustración del funcionamiento de un circulador óptico. b) Circulador óptico PIOC-3-1550-S320-FC/APC

La variación de temperatura de la FBG_1 se logra con una parrilla de resistencia eléctrica (5), el control de temperatura se logra aumentando el voltaje de alimentación con un potenciómetro propio de la parrilla. Para evitar variaciones parasitas de temperatura debido a corrientes de aire en el sistema, la FBG_1 se encuentra en el interior de un contenedor metálico donde la temperatura permanece uniforme (fig. 20)



Figura 20. Arreglo utilizado en la caracterización de la respuesta de la FBG a temperatura.

Las FBG reflejan la luz con longitud de onda de $1550nm$ transmitiendo el resto de lo emitido por el LED hacia un elemento de absorción de plastilina negra, la luz reflejada por las FBG viaja del puerto 2 hacia el puerto 3 del circulador, el aislamiento entre el puerto 2 y 1 del circulador evita la transmisión hacia la fuente LED.

Finalmente en el puerto 3 del circulador, el interrogador de FBG Ibsen modelo IMON E-512 (3) analiza el espectro de reflexión de las FBG enviando la información a través de una interface USB 2.0 hacia un ordenador (7), el espectro óptico de las FBG es mostrado la figura 21.

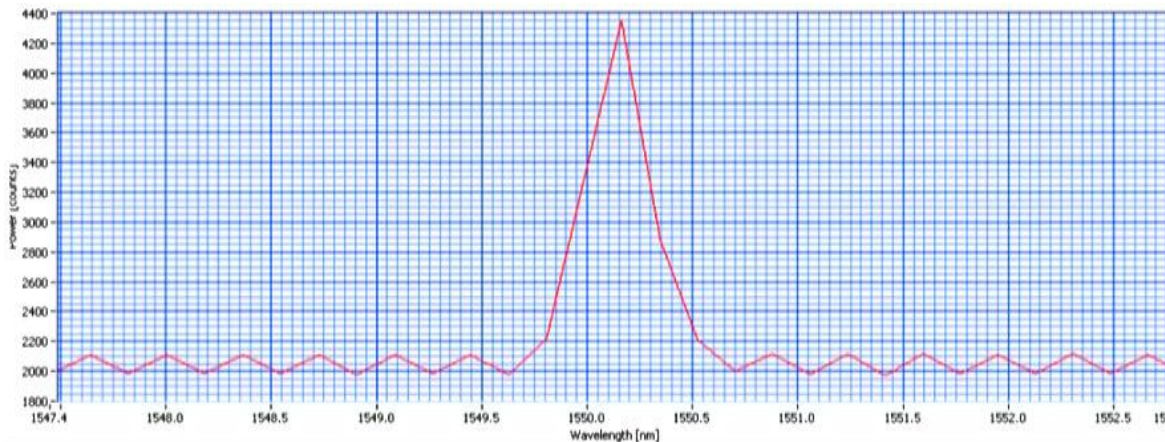


Figura 21. Espectro óptico de una FBG con longitud de onda pico de reflexión de 1550 nm obtenido a través del interrogador IBSEN I-MON 512E con FEHM de 0.4 nm

La resolución del interrogador FBG IMON E-512 es de 0.1 nm con la cual se logra observar perfectamente el espectro del sensor FBG_1 .

Procedimiento experimental

EL sensor FBG_1 es sometido a cambios de temperatura en un rango de 23°C a 83°C, La medición de temperatura se realiza en incrementos/decrementos de 20°C. La variación de temperatura se lleva a cabo de forma ascendente y descendente con el fin de comparar la respuesta en ambos casos. La FBG_1 está libre de tensión en el sistema implementado.

Por otra parte la FBG_2 permanece con parámetros constantes durante las pruebas, a temperatura ambiente y libre de tensión para evitar el desplazamiento de la longitud de onda de reflexión inducido por la deformación durante las pruebas experimentales.

4.3. Resultados

Los datos obtenidos correspondientes a la relación de la temperatura con la longitud de onda pico de la FBG_1 son mostrados en la tabla 3. Se exponen los datos promedio de las pruebas experimentales. La variación de temperatura se llevó a cabo primeramente de forma ascendente.

----	ΔT [°C]	λ_{FBG_2} [nm]	λ_{FBG_1} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
A	80	1550	1550.7	0.7
B	60	1550	1550.52	0.52
C	40	1550	1550.35	0.35
D	20	1550	1550.15	0.15
E	0	1550	1550	0

Tabla 3. Resultado de las pruebas experimentales de la FBG como sensor de temperatura

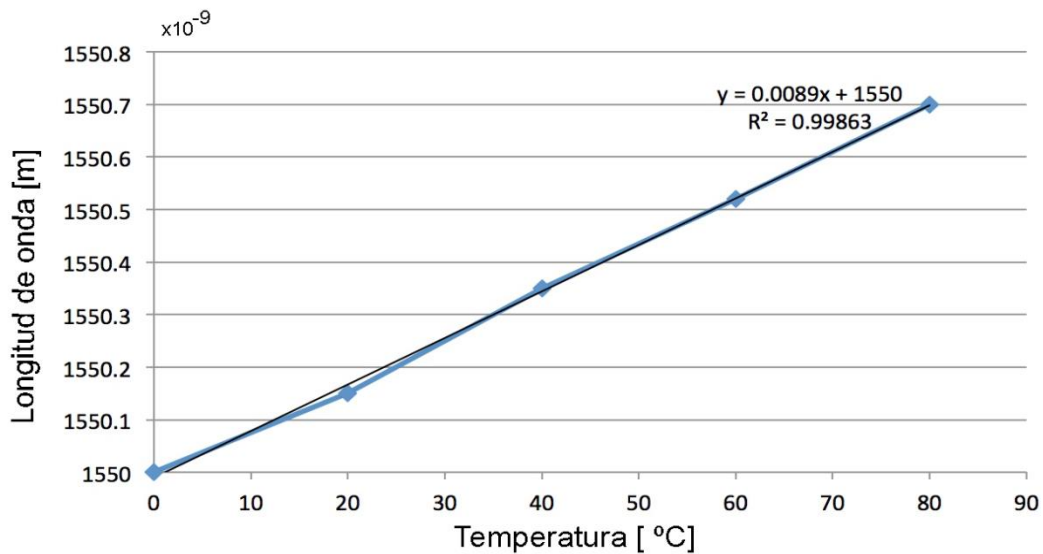


Figura 22. Longitud de onda de reflexión en función de temperatura de forma creciente (experimento)

La figura 22 presenta un comportamiento lineal en función de la variación de temperatura en FBG_1 . El coeficiente de correlación lineal R de los datos obtenidos es 0.9986, lo cual indica una linealidad de 99.86%. De los resultados obtenidos, la pendiente m ecuación de la recta ($\lambda = 0.0089T + 1550$) representa la sensibilidad experimental característica del sensor FBG_1 en función de la variación de temperatura de forma ascendente, la cual resulto $8.9 pm/^\circ C$.

La longitud de onda de reflexión medida en función de temperatura de forma decreciente es mostrada en la figura 23. La sensibilidad experimental obtenida con respecto al decremento de temperatura resulto de $8.7 pm/^\circ C$

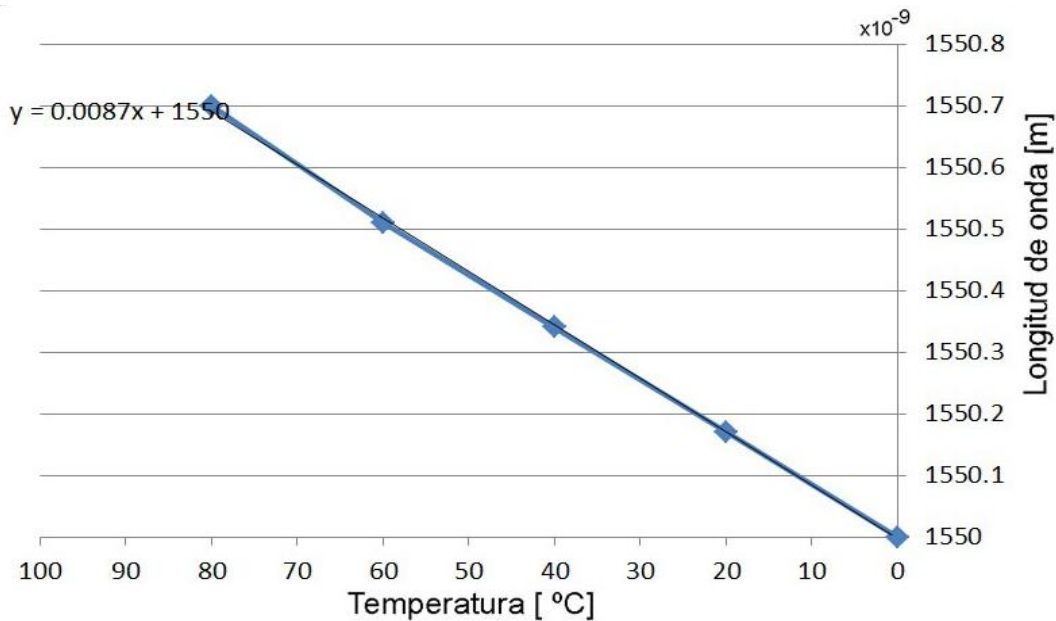


Figura 23. Longitud de onda de Bragg en función de temperatura decreciente (experimento)

4.4. Espectro óptico de los sensores de temperatura FBG

Los espectros ópticos de FBG_1 y FBG_2 de las pruebas experimentales son mostrados a continuación. Las pantallas corresponden a lo obtenido a través del software de interrogación del equipo IMON E-512 utilizado durante el experimento. La temperatura ambiente ($\approx 23^\circ C$) corresponde a la referencia $\Delta T = 0^\circ C$.

A) Variación de temperatura: $23 \pm 0^\circ C$

A temperatura ambiente ($\approx 23^\circ C$) el espectro obtenido solo presenta un pico de reflexión de $1550nm$, el desplazamiento del sensor FBG_1 sobre la referencia FBG_2 es nulo ya que no existe variación de temperatura.

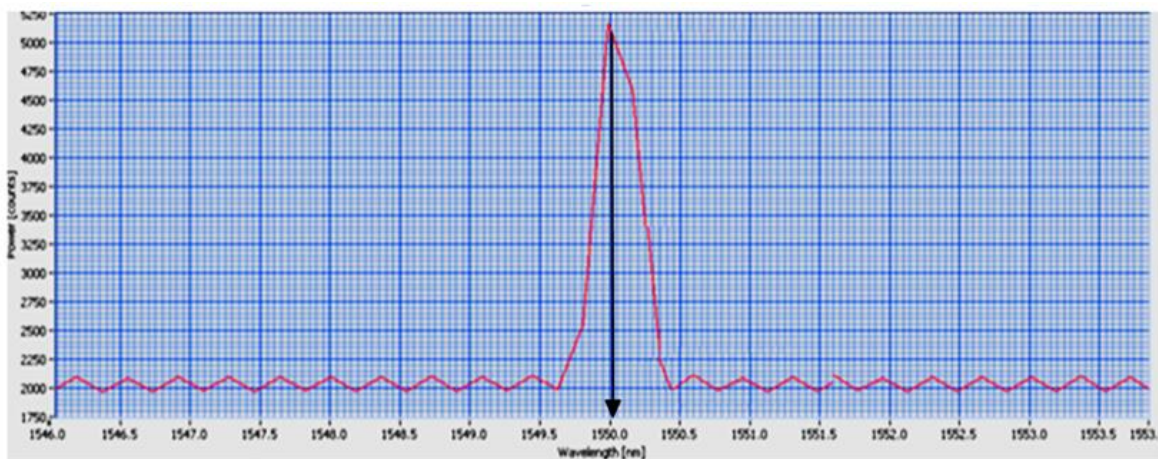


Figura 24. Espectro de reflexión de las rejillas FBG_1 y FBG_2 a la misma temperatura ($\Delta T = 0^\circ C$)

Resultado:

Longitud de onda de $FBG_1 = FBG_2 = 1550nm$

Desplazamiento del espectro $\lambda\Delta = 0nm$

B) Variación de temperatura: $23^{\circ}+20^{\circ}\text{C}$

A una variación de 20°C , el espectro de reflexión empieza a deformarse ligeramente, la máxima reflexión se presenta a una longitud de onda pico de 1550.15nm correspondiente a la longitud de onda de reflexión de FBG_1 , la cual presenta un desplazamiento de 0.15nm debido al cambio de temperatura. La referencia FBG_2 permaneció constante con longitud de onda pico de 1550nm .

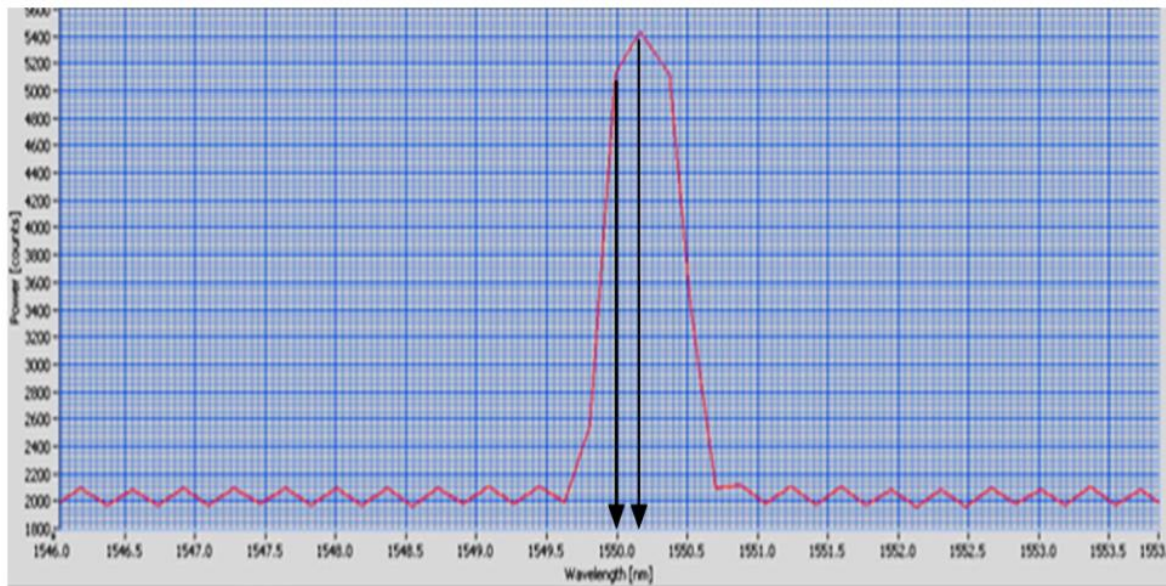


Figura 25. Espectro de reflexión de las rejillas FBG_1 y FBG_2 con variación de temperatura $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$

Resultado:

Longitud de onda de $FBG_1 = 1550.15\text{nm}$

Longitud de onda de $FBG_2 = 1550\text{nm}$

Desplazamiento del espectro $\lambda\Delta = 0.15\text{nm}$

C) Variación de temperatura :23+40°C

El espectro obtenido muestra dos picos correspondientes a la luz reflejada por las dos FBG. La variación de temperatura en 40°C provoca un desplazamiento de la longitud de onda de reflexión de la FBG_1 de 0.35nm sobre la referencia FBG_2 que permaneció constante en 1550nm .

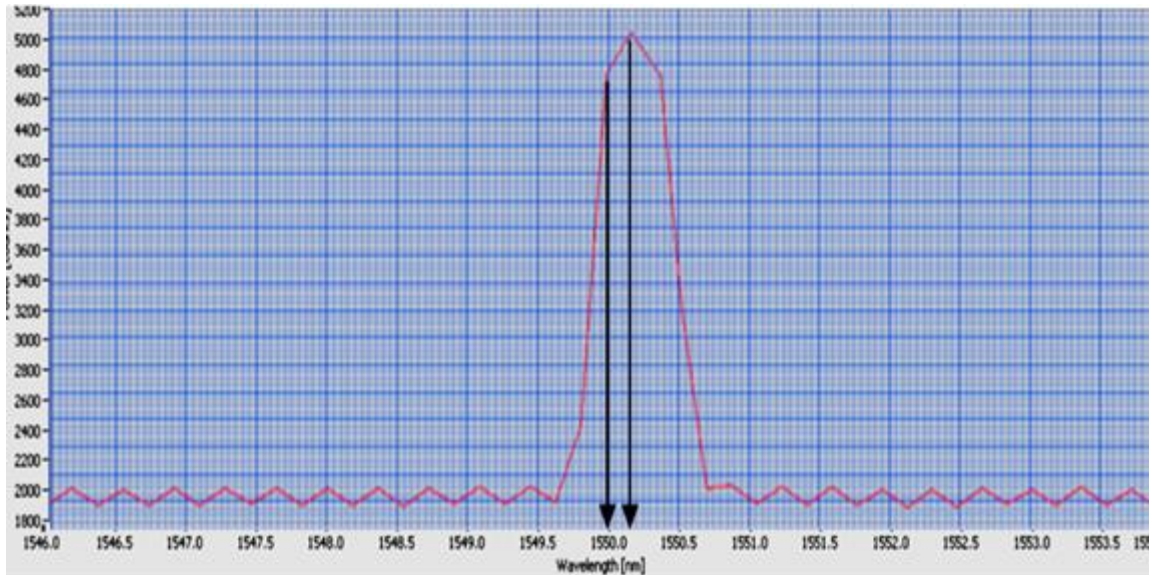


Figura 26. Espectro de reflexión de las rejillas FBG_1 y FBG_2 con variación de temperatura $\Delta T = 40^\circ C$

Resultado:

Longitud de onda de $FBG_1 = 1550.35nm$

Longitud de onda de $FBG_2 = 1550nm$

Desplazamiento del espectro $\lambda\Delta = 0.35nm$

D) Variación de temperatura: 23+60°C

A esta temperatura el desplazamiento de la FBG_1 es evidente ya que existe una separación de los espectros de reflexión de cada una de las rejillas. El desplazamiento de FBG_1 sobre FBG_2 debido al cambio de temperatura fue de $0.52nm$. La referencia FBG_2 permaneció constante a una longitud de onda de Bragg de $1550nm$.

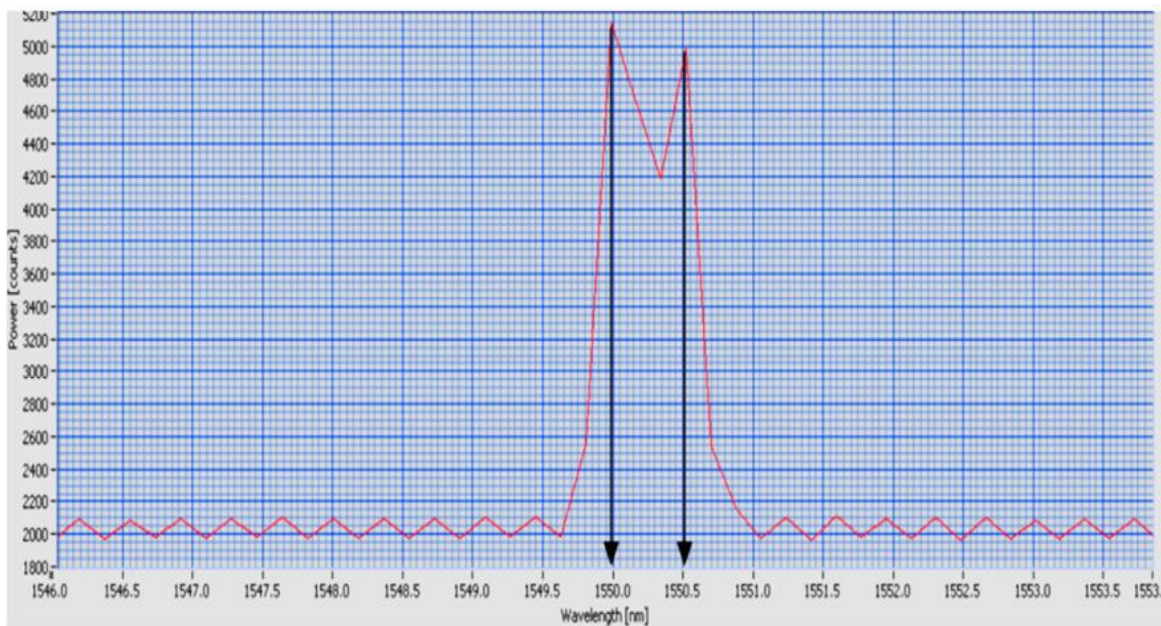


Figura 27. Espectro de reflexión de las rejillas FBG_1 y FBG_2 con variación de temperatura $\Delta T = 60^\circ C$

Resultado:

Longitud de onda de $FBG_1 = 1550.52nm$

Longitud de onda de $FBG_2 = 1550nm$

Desplazamiento del espectro $\lambda\Delta = 0.52nm$

E) Variación de temperatura: 23+80°C

A una variación de 80°C se produce una separación total de los espectros de reflexión de FBG_1 y FBG_2 . El desplazamiento total del pico de reflexión de la rejilla FBG_1 fue de 0.70 nm sobre la referencia FBG_2 .

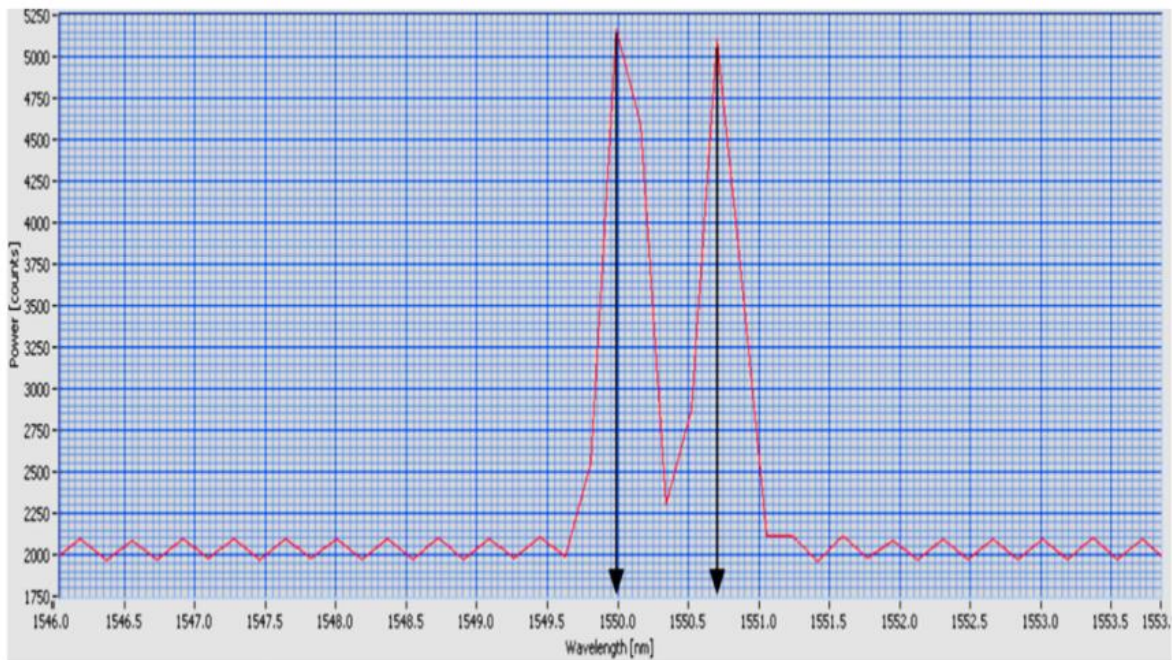


Figura 28. Espectro de reflexión de las rejillas FBG_1 y FBG_2 con variación de temperatura $\Delta T = 80^\circ C$

Resultado:

Longitud de onda de $FBG_1 = 1550.70nm$

Longitud de onda de $FBG_2 = 1550nm$

Desplazamiento del espectro $\lambda\Delta = 0.70nm$

4.5. Comparación de las predicciones teóricas con el experimento

La sensibilidad teórica del sensor FBG_1 a temperatura a través de simulaciones ($14.1\text{pm}/^\circ\text{C}$) es 37 % mayor que la sensibilidad experimental ($8.9\text{pm}/^\circ\text{C}$). En nuestra opinión, la diferencia se debe principalmente a la diferencia en los coeficientes de expansión térmica así como los coeficientes termo-ópticos de los materiales de la FBG simulada y la FBG utilizada en el experimento. Otro factor que pudo haber influido en los resultados son las condiciones del arreglo experimental, que probablemente no tuvo una estabilidad térmica adecuada durante las mediciones. A pesar de la diferencia en la sensibilidad teórica y experimental de la FBG, se obtuvo una muy buena linealidad experimental en la respuesta del sensor FBG_1 al incrementar y disminuir la temperatura (fig. 29).

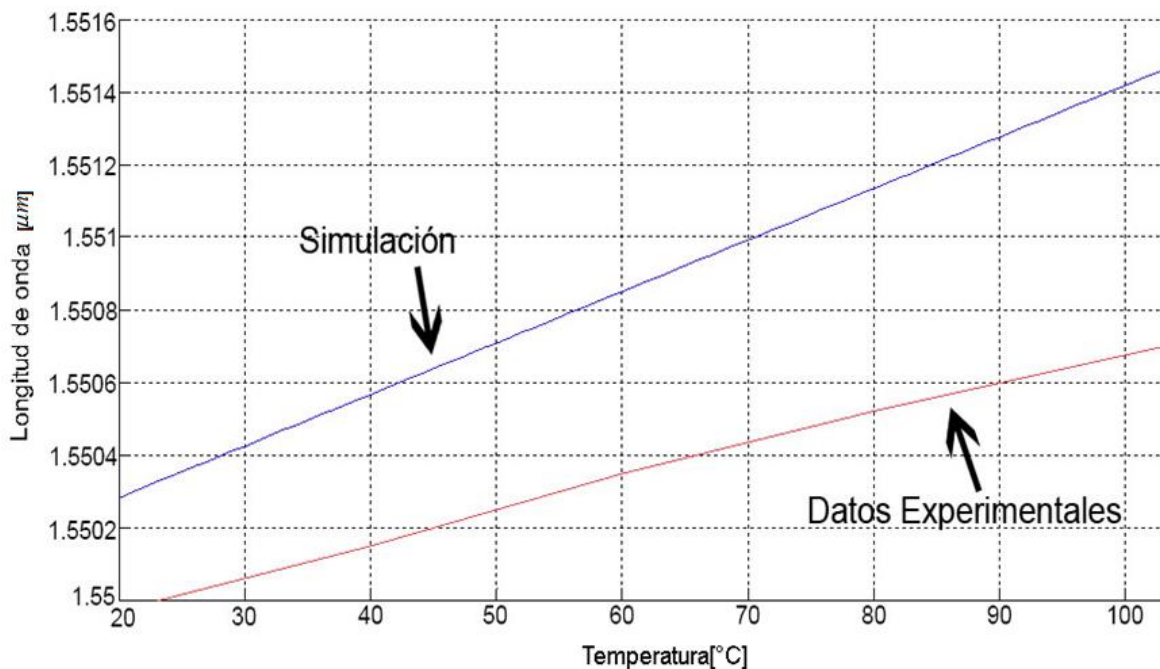


Figura 29. Comparación de los resultados obtenidos teórica y experimentalmente del sensor de temperatura FBG

En general, las predicciones teóricas y los resultados experimentales son bastante similares.

4.6. Conclusiones

Tanto simulaciones numéricas como experimento físico mostraron un cambio casi lineal de la longitud de onda pico de la FBG contra la temperatura, un comportamiento en coherencia a las predicciones teóricas. La alta linealidad se observa tanto en el incremento como decremento de temperatura de la FBG.

La sensibilidad teórica es 37% mayor que la obtenida experimentalmente. Esta diferencia la atribuimos principalmente a la diferencia entre los cocientes de expansión térmica y los cocientes termo-ópticos del material de la FBG simulada y utilizada en el experimento. Además, es probable que no logramos una estabilidad térmica adecuada del arreglo experimental durante las mediciones.

Capítulo 5. FBG como sensor de tensión: Análisis teórico y experimento físico

El presente capítulo plantea la realización de pruebas experimentales de los sensores de tensión basados en FBG con la realización de experimentos realizados en laboratorio bajo condiciones controladas. El departamento de telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería UNAM, cuenta con un sensor de la marca Micron Optics modelo os3610 para su aplicación en futuros proyectos en el monitoreo de estructuras, mismo que será utilizado para las pruebas.

La medición de tensión con este tipo de sensores implica tomar en cuenta factores importantes como los cambios de tensión que puede inducir el cambio de temperatura. Es necesario realizar un análisis de la compensación de temperatura para evitar obtener mediciones erróneas.

5.1. Análisis teórico

Al igual que la temperatura, la respuesta de las FBG en función a la tensión es obtenida teóricamente a través de la simulación de las ecuaciones (1.13 y 1.14).

5.1.1. Simulación del comportamiento de las FBG bajo tensión variable

La tensión a la que es sometida la FBG es de -200 a $1600[\mu\epsilon]$. La figura 30 representa la respuesta de las FBG en función de la tensión. SE observa un comportamiento lineal a cada longitud de onda de reflexión simulada. La sensibilidad teórica obtenida es de $1.5 \text{ pm} / \mu\epsilon$.

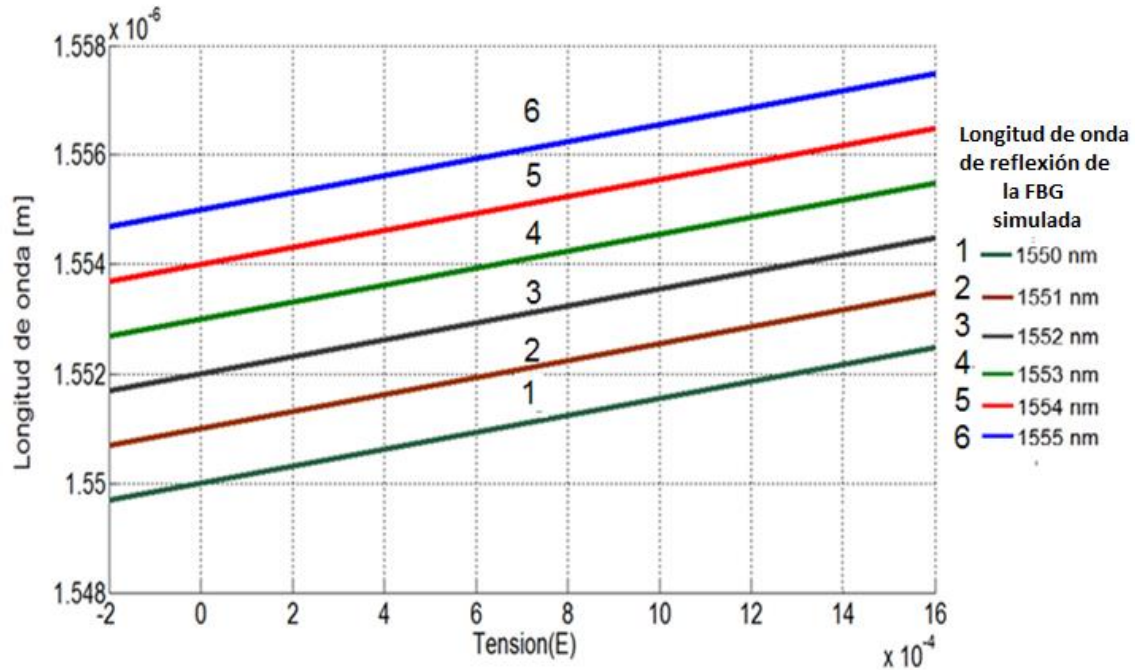


Figura 30. Efecto de tensión variable sobre FBG's con distintas longitudes de onda de reflexión λ_B , constante elasto-óptica $P_e = 0.22 \mu\text{m}$. (Simulación en MATLAB), J. rendón e I. ramírez 2014.

El código de la simulación se encuentra en el Apéndice 3 de esta tesis.

5.2. Metodología del experimento físico

El arreglo experimental para la obtener la respuesta de un sensor de tensión FBG es mostrado en las figuras 31 y 32. Se utilizó el sensor comercial marca Micron Optics modelo os3610. La transmisión de la señal óptica y el procesamiento de la información es similar al arreglo experimental utilizado para la caracterización de sensores de temperatura del capítulo anterior.

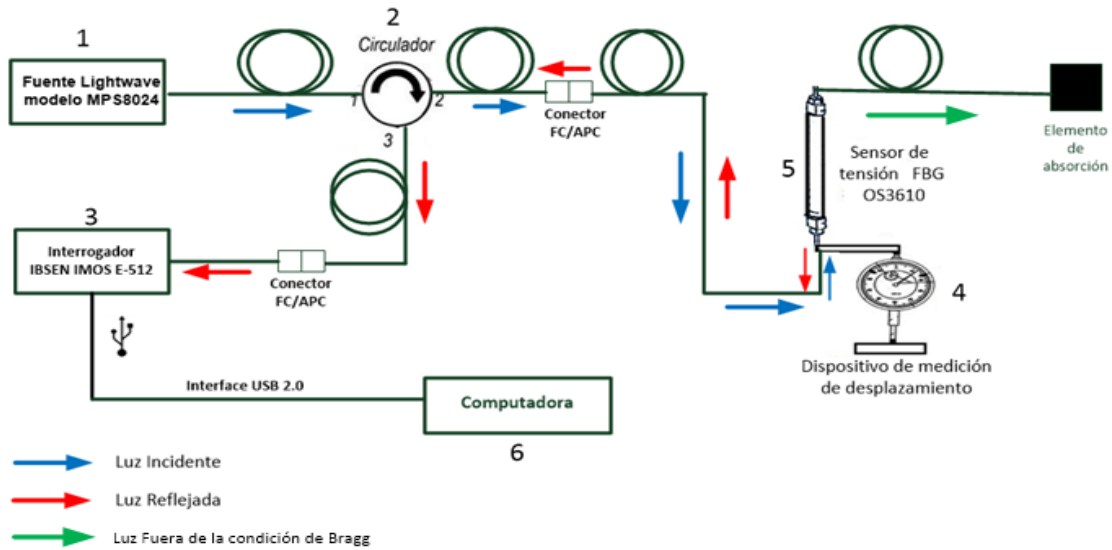


Figura 31. Diagrama esquemático del experimental arreglo para el sensado de tensión

El sensor es sometido a variación de tensión con el fin de obtener su sensibilidad experimental. Los datos obtenidos experimentalmente son analizados y comparados con la información proporcionada por la empresa fabricante del sensor y con las predicciones teóricas. El experimento se repite 3 veces para obtener datos estadísticamente significativos.

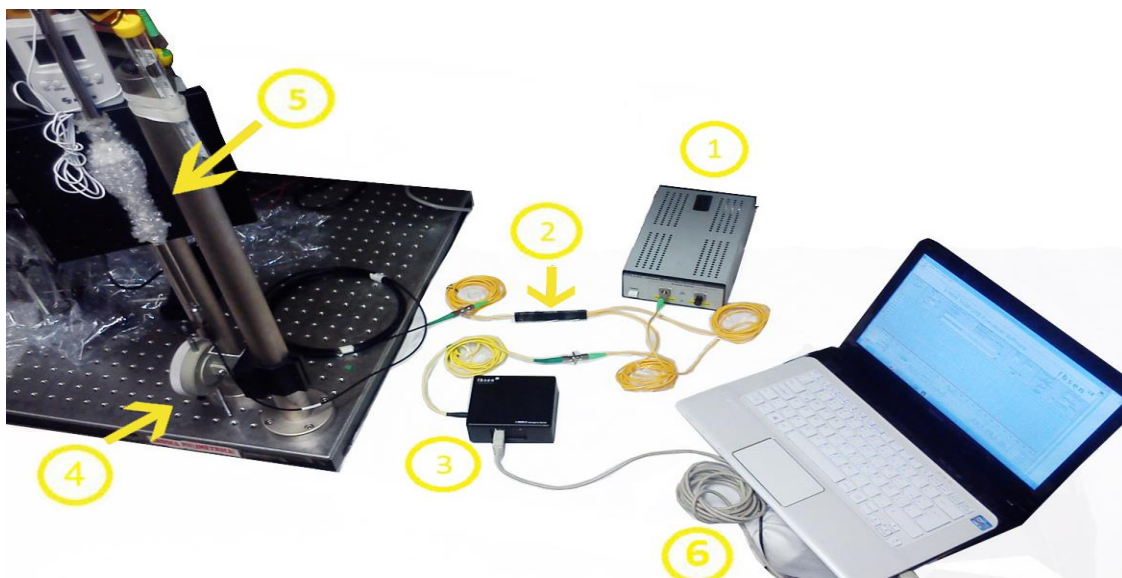


Figura 32. Arreglo experimental para obtener la respuesta de FBG a temperatura (fotografía).

1. Fuente óptica Lightwave MPS8024
2. Circulador óptico de 3 puertos PIOC-3-1550-S320-FC/APC
3. Interrogador FBG Ibsen IMON E-51
4. Reloj comparador
5. Sensor de tensión FBG Micron Optics os3610
6. Ordenador

Descripción del arreglo experimental

La fuente marca Lightwave modelo MPS8024 (1) emite un haz de luz (1550 ± 20 nm) hacia el puerto 2 del circulador PIOC-3-1550-S320-FC/APC (2) el cual es conectado con el sensor de tensión FBG marca Micron Optics modelo os3610 (5).

El sensor Micron Optics os3010 mide la tensión promedio sobre la longitud del sensor FBG. El sensor os3610 mide el movimiento relativo de dos soportes rígidos en los extremos a lo largo del eje del sensor, codificando el desplazamiento que provoca tensión sobre la FBG.

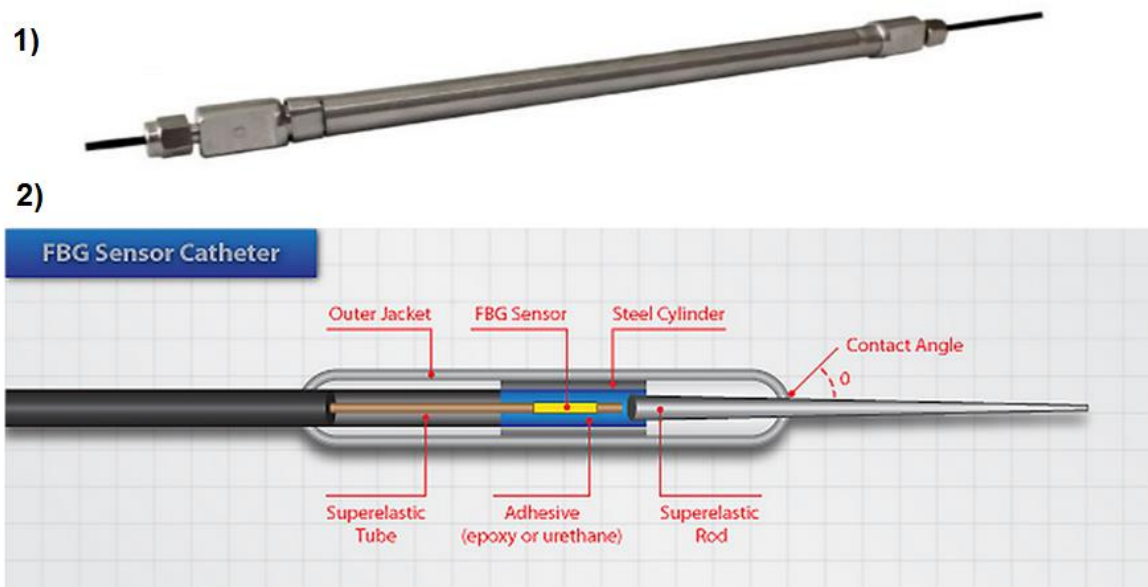


Figura 33. 1) Sensor de tensión os3610, 2) Composición interna del sensor os3610 [44]

Las FBG responden a la tensión y a la temperatura. La variación de temperatura induce cambios similares a la de tensión debido a la expansión termal del sustrato en el que el sensor es montado y la inducción de cambios en el índice de refracción debido a factores térmicos. Ambos factores afectan la longitud de onda de reflexión de la FBG. Por esto, se requiere de la discriminación de los efectos de temperatura y tensión. (Algunas respectivas técnicas son expuestas en el capítulo 3 de esta tesis).

El sensor os3610 ofrece auto compensación de temperatura (método simple cap. 3), para ello una segunda FBG se encuentra dentro del cilindro metálico para la medición y compensación de temperatura, el espectro de reflexión de las dos FBG contenidas en el sensor os3610 mostrado en la siguiente figura.

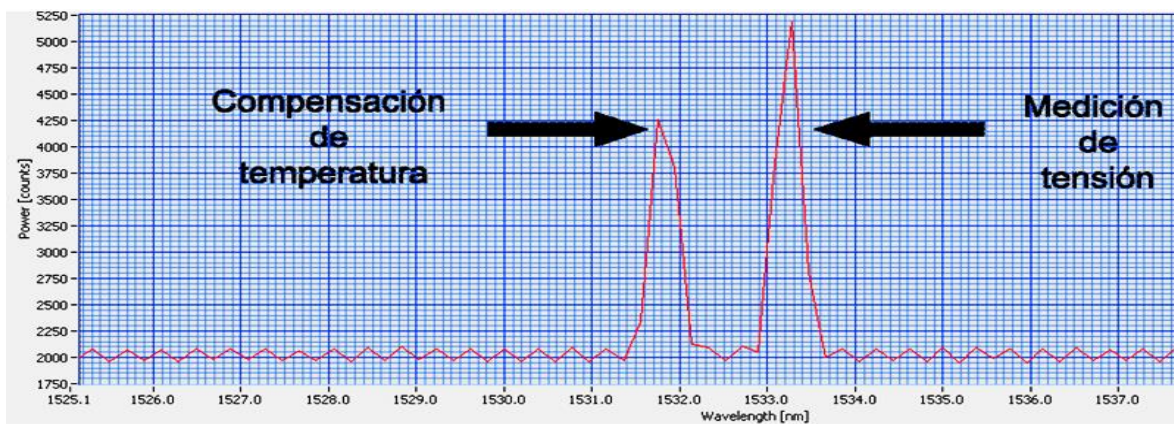


Figura 34. Espectro óptico del sensor de tensión os3610

El sensor es sujetado firmemente a una base para pruebas experimentales. La aplicación de tensión se logra con la elongación de un extremo del sensor, el control de las mediciones se logra con un dispositivo comparador mecánico (4) (figura 32) que mide la elongación del sensor con una resolución de 0.01 mm.

La respuesta (la lectura) del sensor de tensión es codificada en la longitud de onda reflejada por la FBG y es transmitida hacia el puerto 3 del circulador en donde el interrogador Ibsen IMON E-512 procesa el espectro y envía la respectiva información a una computadora.

Descripción de las pruebas experimentales

El equipo os3610 es expuesto a una elongación total de 5 mm lo que provocara la variación de tensión en el sensor (figura 35). La elongación y captura de datos se realizara en intervalos de 0.5 mm.

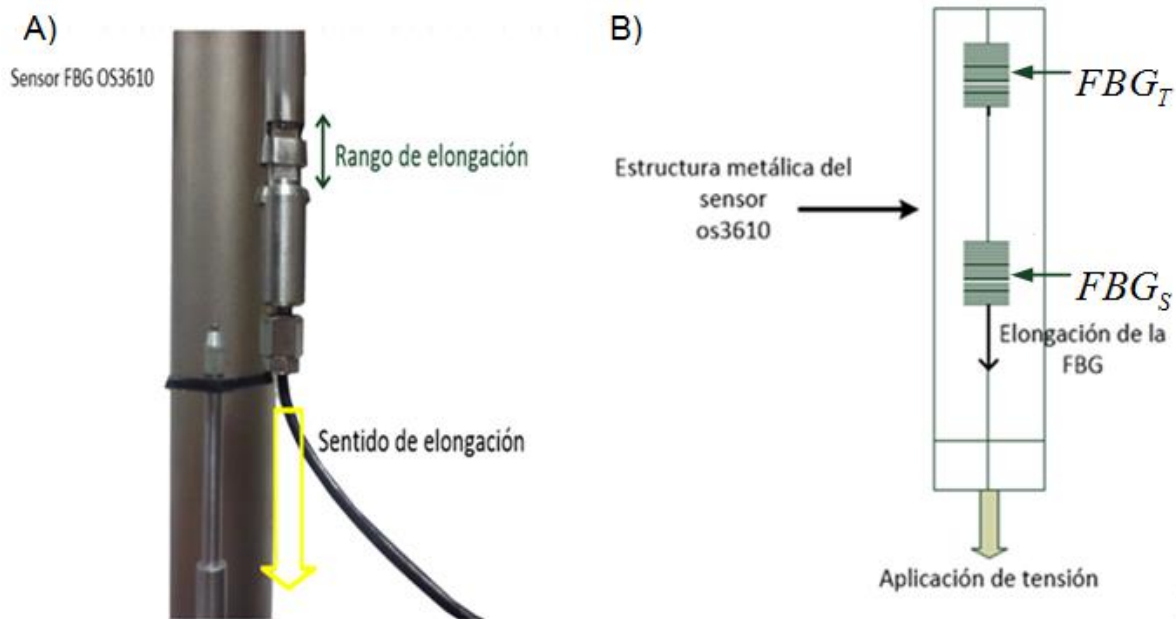


Figura 35. A) Aplicación de tensión sobre el sensor os3610, B) Diagrama esquemático de la aplicación de tensión sobre el sensor os3610

Con el propósito de observar los efectos de la temperatura en las mediciones de tensión del sensor os3610, las pruebas experimentales se desarrollan a distintas temperaturas. La prueba inicial se llevara a cabo a $\approx 18^{\circ}\text{C}$ correspondiente a la temperatura ambiente al momento de la realización del experimento, posteriormente se aumenta la temperatura en dos incrementos de 10°C hasta llegar a 38°C .

5.3. Resultados

Los datos obtenidos representan el desplazamiento de la longitud de onda de reflexión del sensor os3610 en función de la elongación. La elongación fue relacionada con la tensión a través de la ecuación 1.21 Como se menciona en el inciso anterior el sensor os3610 cuenta con 2 FBG internas: FBG_s sensible a cambios de tensión mecánico-térmicos y FBG_T sensible exclusivamente a cambios térmicos para la compensación de temperatura. Los resultados mostrados es el promedio de los datos obtenidos en las distintas pruebas realizadas.

Pruebas a temperatura ambiente 18°C

Las pruebas iniciales se realizaron a temperatura ambiente ($\approx 18^\circ\text{C}$). Los resultados de las mediciones son ilustrados en la tabla 4.

Elongación [mm]	Longitud de onda FBG_s [nm]	Tensión [$\mu\epsilon$]	Longitud de onda FBG_T [nm]
0	1533.28	0	1531.74
0.5	1533.85	461.8	1531.74
1	1534.41	915.33	1531.74
1.5	1535	1392.98	1531.74
2	1535.56	1846.17	1531.74
2.5	1536.33	2469.08	1531.74
3	1536.9	2930.86	1531.74
3.5	1537.47	3391.57	1531.74
4	1538.09	3892.51	1531.74
4.5	1538.81	4474.01	1531.74
5	1539.35	4909.93	1531.74

Tabla 4. Resultados de las mediciones a 18°C

La primera columna de la tabla 4 representa la elongación, en incrementos de 0.5mm. La tensión fue calculada a través de la relación entre el desplazamiento de la longitud de onda pico y la tensión, establecida por la ecuación 1.21 [56]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta WL / WL_0}{F_G} \quad , \quad (1.21)$$

dónde:

ε : Tensión [m/m]

ΔWL : Desplazamiento de la longitud de onda pico de FBG_S [nm]

WL_0 : Longitud de onda pico inicial de FBG_S [nm]

F_G : Gage Factor[1].

Debido a que la temperatura permanece constante durante las pruebas (18°C), la longitud de onda de reflexión de FBG_T permanece constante.

La figura 36 muestra el comportamiento del sensor de tensión os3610 a una temperatura de 18°C en función de la elongación, se observa un comportamiento prácticamente lineal. La línea de tendencia representa el ajuste de los datos obtenidos a una línea recta, la línea de los datos experimentales coincide con la línea de tendencia lo que indica una buena linealidad del sensor.

La sensibilidad experimental obtenida en función de la elongación es de $1.226nm/mm$ obtenida a través de la ecuación de la recta de la figura 36 ($\lambda_B = 1.226nm/mm + 1532nm$).

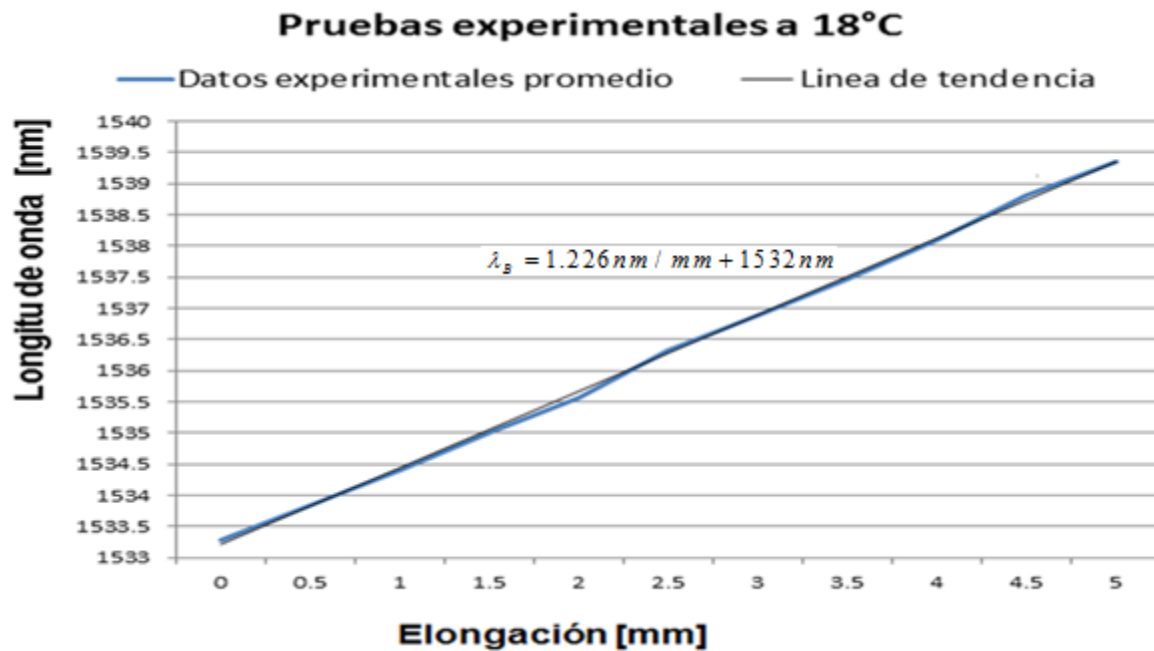


Figura 36. Longitud de onda de reflexión pico en función de la elongación a 18°C

La respuesta del sensor en función de la tensión es mostrada en la figura 37. La tensión provocada por la elongación fue obtenida a través de la ecuación 1.21.

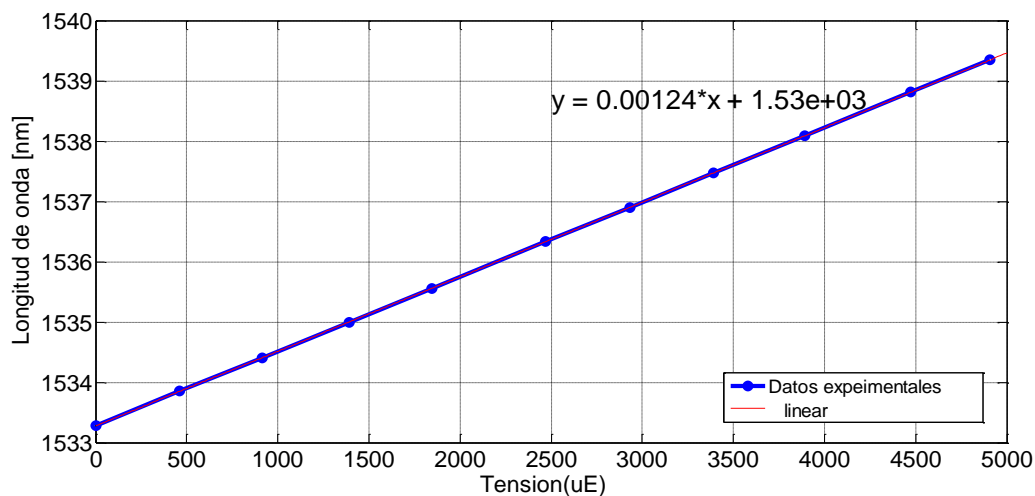


Figura 37. Longitud de onda de reflexión pico en función de la en tensión a 18°C

La sensibilidad experimental del sensor en función de la tensión es de $1.24 \text{ pm} / \mu\epsilon$.

Pruebas a temperatura 28°C

En este experimento la temperatura se subió por 10°C con respecto a las pruebas a temperatura ambiente, es decir, a una temperatura de 28°C. La tabla 5 muestra los datos obtenidos.

Elongación [mm]	Longitud de onda FBG_s [nm]	Tensión [$\mu\varepsilon$]	Longitud de onda FBG_T [nm]
0	1533.47	0	1531.94
0.5	1534.05	469.84	1531.94
1	1534.74	1028.58	1531.94
1.5	1535.39	1554.69	1531.94
2	1535.76	1854.04	1531.94
2.5	1536.52	2468.78	1531.94
3	1537.07	2913.44	1531.94
3.5	1537.77	3479.16	1531.94
4	1538.41	3996.16	1531.94
4.5	1538.82	4327.22	1531.94
5	1539.54	4908.45	1531.94

Tabla 5 Resultados de las mediciones a 28°C

La variación de temperatura en 10°C provocó el desplazamiento de la longitud de onda de reflexión de FBG_s y FBG_T en comparación temperatura 18°C. El desplazamiento era de esperarse debido a que sensibilidad térmica inherente de las FBG induce cambios de tensión en el sensor.

La respuesta del sensor os3610 en función de la elongación a temperatura de 28°C es mostrada en la figura 38.

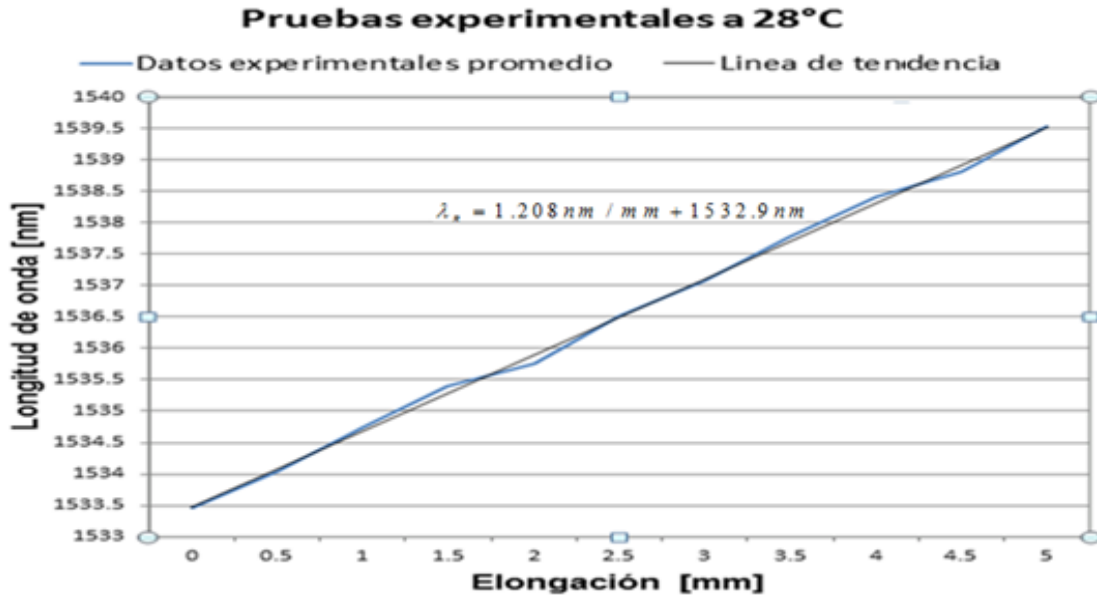


Figura 38. Longitud de onda de reflexión pico en función de la elongación a 28°C

La respuesta del sensor es lineal con ligeras fluctuaciones con respecto a la línea de tendencia ($R = 0.9986$) a 28°C. La sensibilidad experimental del sensor a elongación resulto 1.208 nm/mm .

El cambio de temperatura provoco una disminución de la sensibilidad en el sensor.

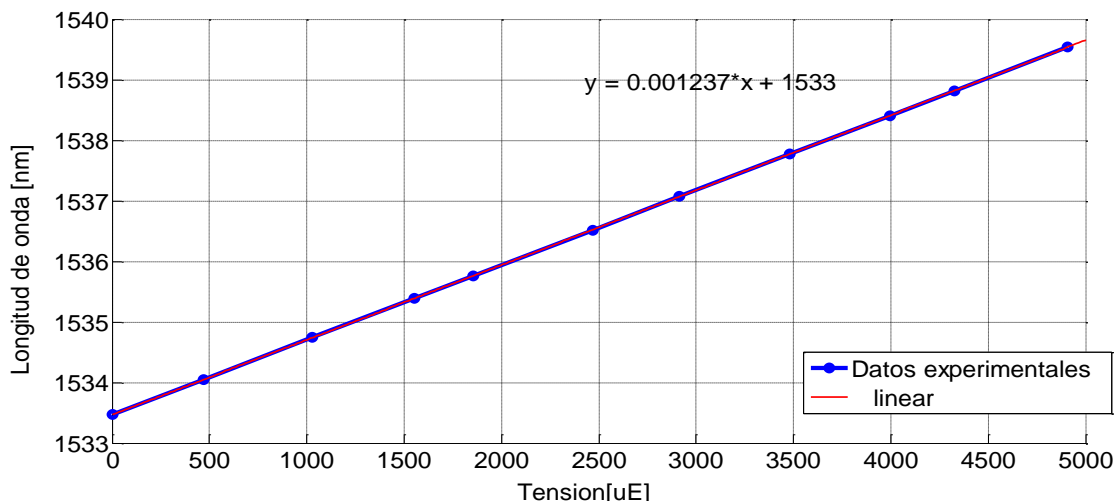


Figura 39. Longitud de onda de reflexión pico en función de la tensión a 28°C

La figura 39 ilustra la respuesta del sensor a la tensión a temperatura de 28°C. La respuesta del sensor muestra una muy buena linealidad. La sensibilidad experimental es de $1.237 \text{ pm} / \mu\epsilon$.

Pruebas Experimentales a 38°C

Los datos experimentales registrados a 38°C son expuestos en la tabla 4.

Elongación [mm]	Longitud de onda FBG_S [nm]	Tensión [$\mu\epsilon$]	Longitud de onda FBG_T [nm]
0	1533.67	0	1532.13
0.5	1534.24	461.69	1532.13
1	1534.81	923.2	1532.13
1.5	1535.38	1384.54	1532.13
2	1535.95	1845.71	1532.13
2.5	1536.53	2314.79	1532.13
3	1537.09	2767.53	1532.13
3.5	1537.85	3381.74	1532.13
4	1538.41	3834.09	1532.13
4.5	1538.97	4285.27	1532.13
5	1539.54	4745.36	1532.13

Tabla 4. Resultados de las mediciones a 38°C.

Se observó un desplazamiento en comparación con las pruebas a 18° y 28°C. La respuesta del sensor en función de la elongación a temperatura 38°C es mostrada en la figura 40. Se muestra buena linealidad, la sensibilidad es de $1.184 \text{ nm} / \text{mm}$. Se observó un decremento debido al aumento de temperatura.

En la figura 41 es graficada la respuesta a la tensión, la sensibilidad experimental resultado $1.237 \text{ pm} / \mu\epsilon$.

Pruebas experimentales a 38°C

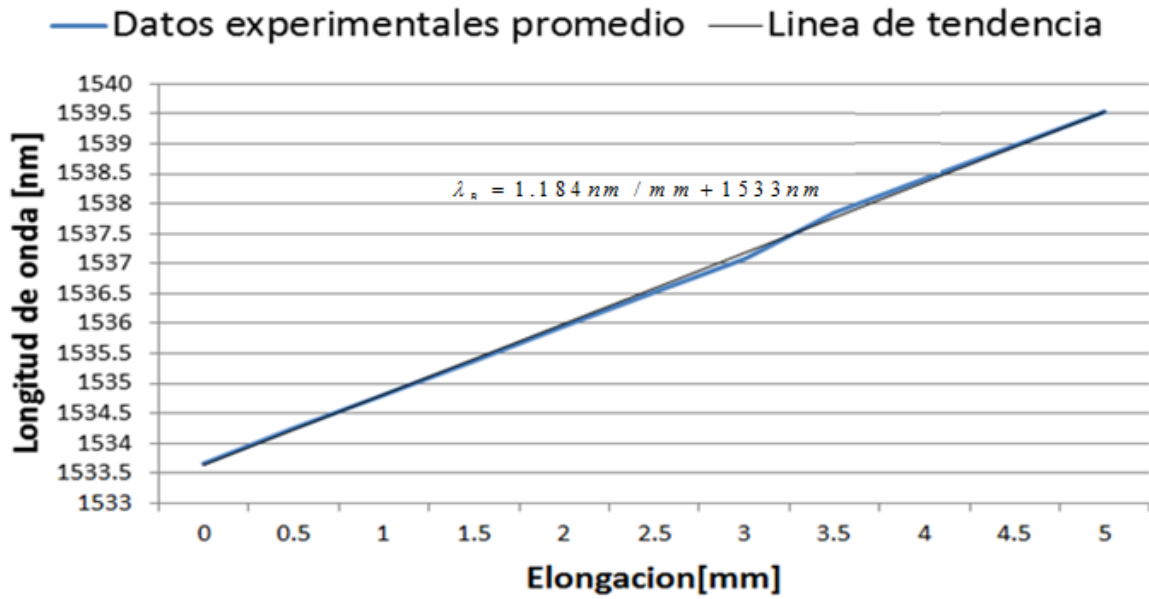


Figura 40. Longitud de onda de reflexión pico en función de la elongación a 38°C

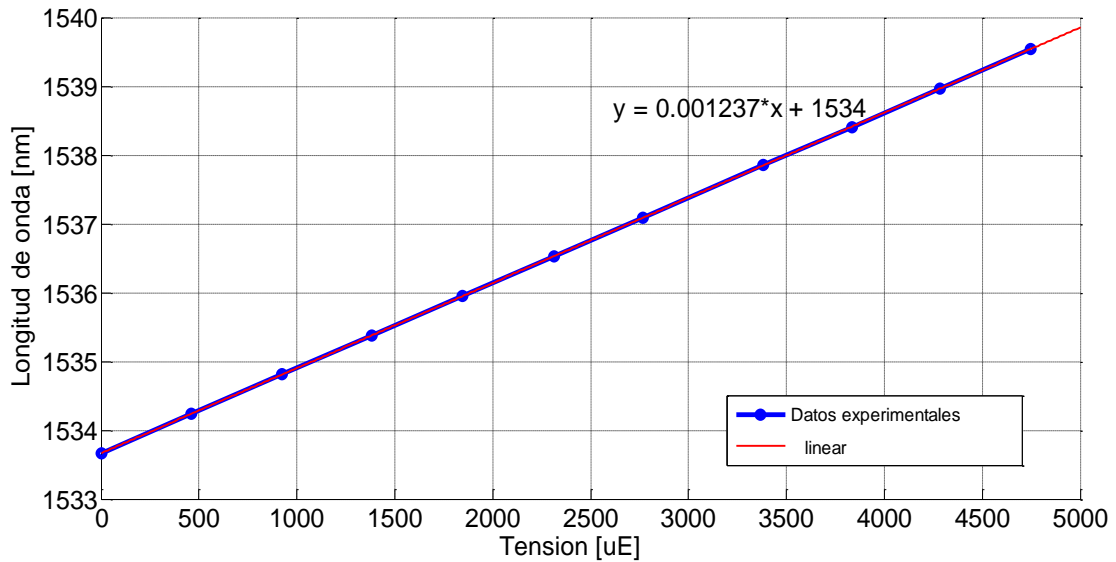


Figura 41. Longitud de onda de reflexión pico en función de la elongación a 38°C

5.4. Espectro óptico de los sensores de tensión FBG

El desplazamiento del espectro óptico del sensor os3610, es obtenido a través del software de interrogación del equipo IMON E-512 y es mostrado en las siguientes figuras(fig. 42 a 52). El pico de reflexión corresponde a FBG_S , el espectro FBG_T es omitido ya que esta mide exclusivamente cambios de temperatura en el sensor por lo cual permanece constante (fig.34). Las figuras corresponden a las pruebas a 18 ° C.

A) Elongación 0mm

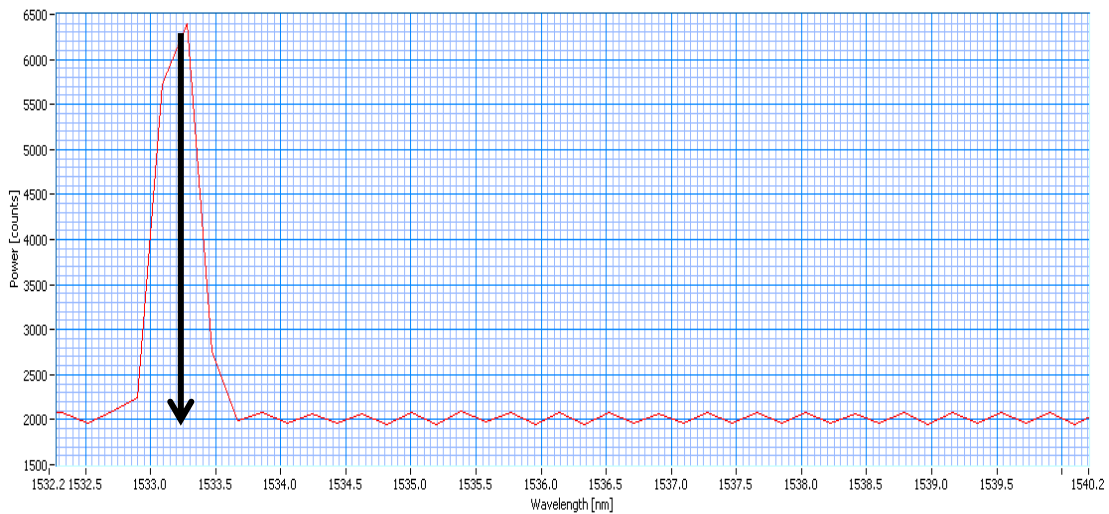


Figura 42. Espectro óptico del sensor os3610 libre de tensión

Resultado:

ΔL [mm]	λ_{in} [nm]	λ_{out} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda_T$ [nm]
0	1533.28	1533.28	0	0

B) Elongación 0.5mm

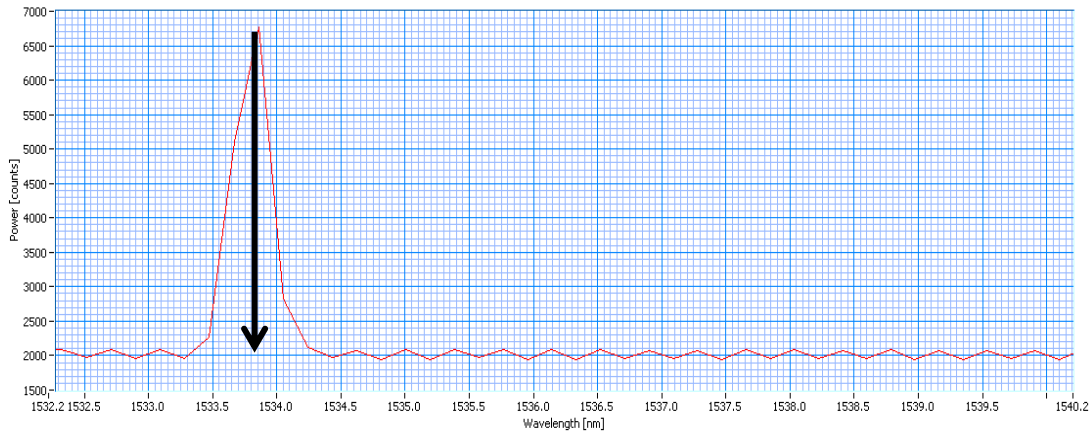


Figura 43. Espectro óptico del sensor os3610 con elongación 0.5mm

Resultado:

ΔL [mm]	λ_{in} [nm]	λ_{out} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda_T$ [nm]
0.5	1533.28	1533.85	0.57	0.57

C) Elongación 1mm

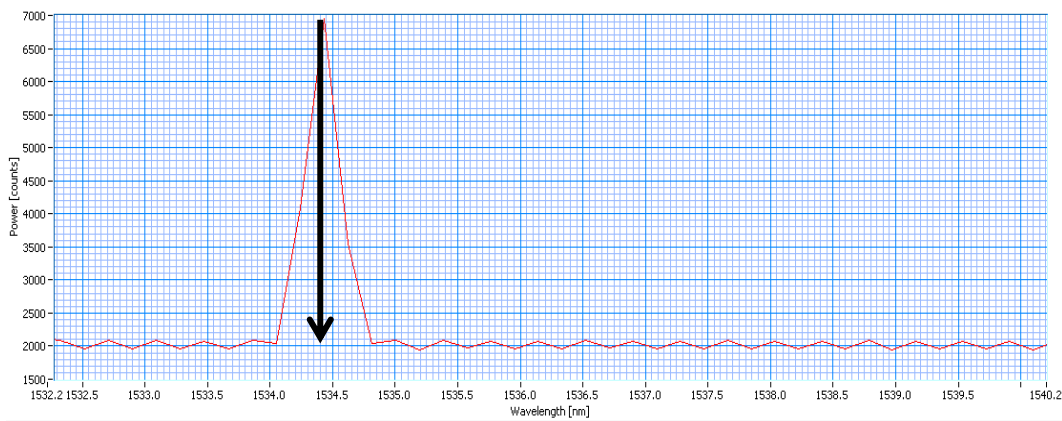


Figura 44. Espectro óptico del sensor os3610 con elongación 1.0mm

Resultado:

ΔL [mm]	λ_{in} [nm]	λ_{out} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda_T$ [nm]
1.0	1533.28	1534.41	0.56	1.13

D) Elongación 1.5mm

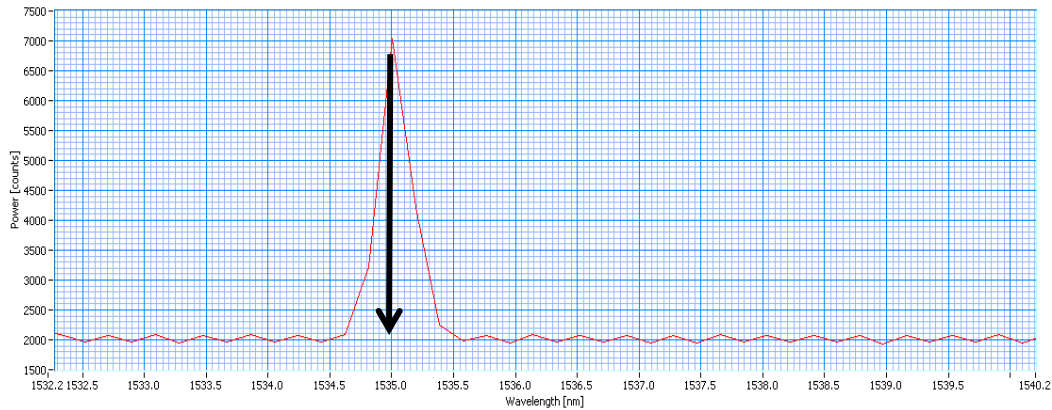


Figura 45. Espectro óptico del sensor os3610 con elongación 1.5mm

Resultado:

ΔL [mm]	λ_{in} [nm]	λ_{out} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda_T$ [nm]
1.5	1533.28	1535.00	0.59	1.72

E) Elongación 2.0mm

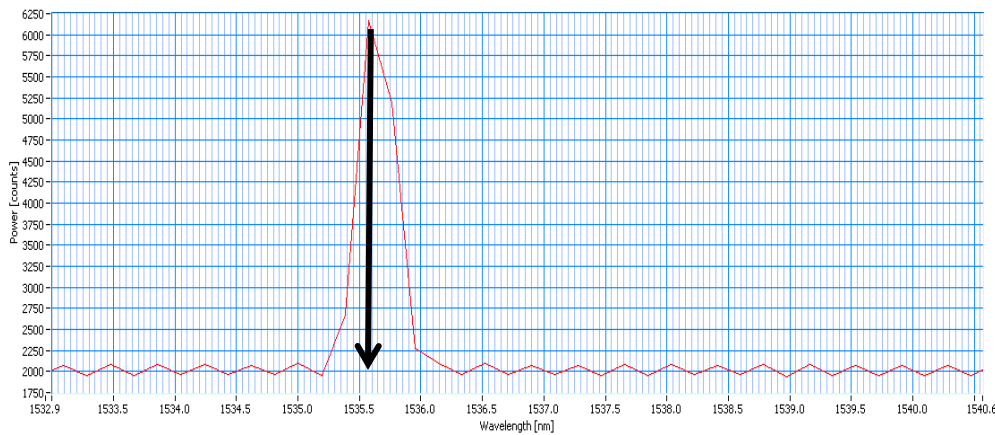


Figura 46. Espectro óptico del sensor os3610 con elongación 2.0mm

Resultados:

ΔL [mm]	λ_{in} [nm]	λ_{out} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda_T$ [nm]
2.0	1533.28	1535.56	0.56	2.28

F) Elongación 2.5mm

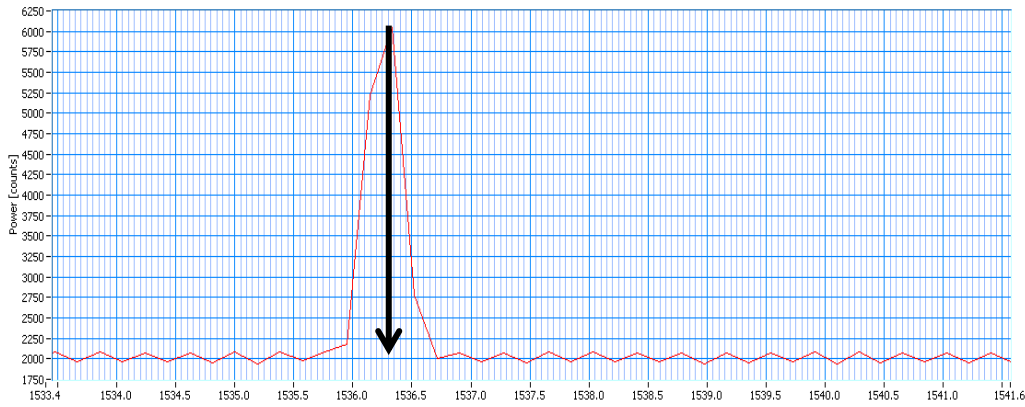


Figura 47. Espectro óptico del sensor os3610 con elongación 2.5mm

Resultado:

ΔL [mm]	λ_{in} [nm]	λ_{out} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda_T$ [nm]
2.5	1533.28	1536.33	0.77	3.05

G) Elongación 3mm

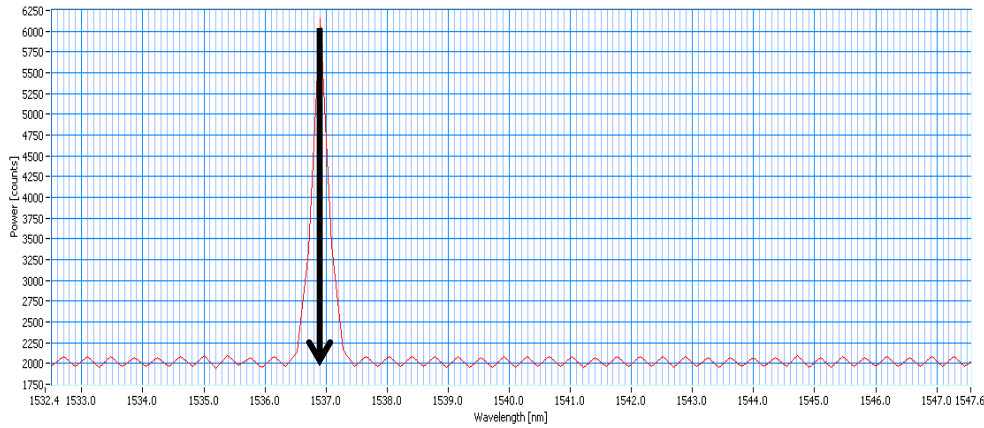


Figura 48. Espectro óptico del sensor os3610 con elongación 3.0mm

Resultado:

ΔL [mm]	λ_{in} [nm]	λ_{out} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda_T$ [nm]
3	1533.28	1536.90	0.57	3.62

H) Elongación 3.5mm

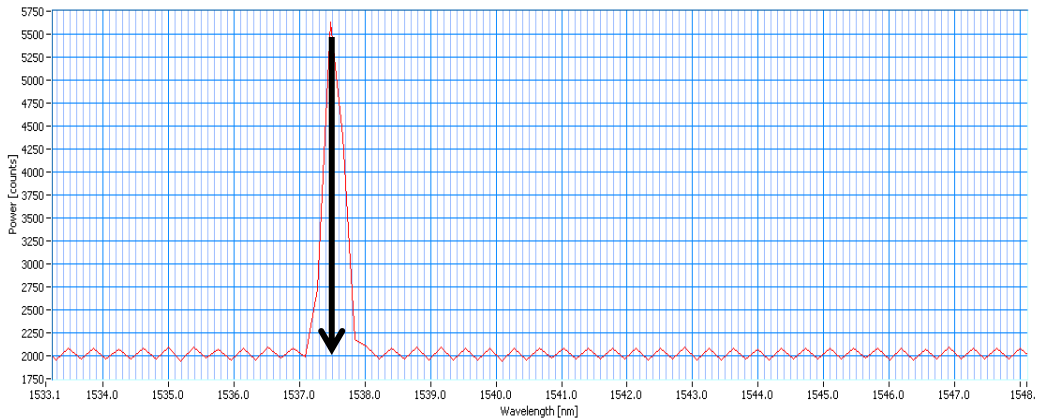


Figura 49. Espectro óptico del sensor os3610 con elongación 3.5mm

Resultado:

ΔL [mm]	λ_{in} [nm]	λ_{out} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda_T$ [nm]
3.5	1533.28	1537.47	0.57	4.19

I) Elongación 4mm

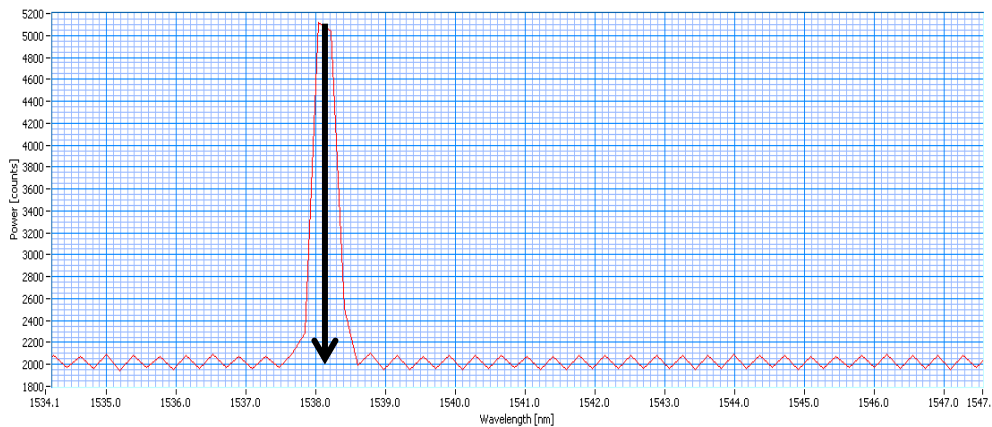


Figura 50. Espectro óptico del sensor os3610 con elongación 4.0mm

Resultado:

ΔL [mm]	λ_{in} [nm]	λ_{out} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda_T$ [nm]
4	1533.28	1538.09	0.62	4.81

J) Elongación 4.5mm

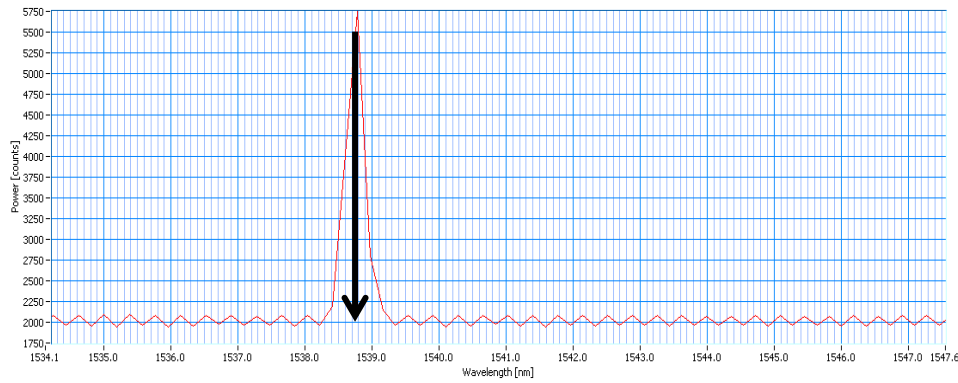


Figura 51. Espectro óptico del sensor os3610 con elongación 4.5mm

Resultado:

ΔL [mm]	λ_{in} [nm]	λ_{out} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda_T$ [nm]
4.5	1533.28	1538.81	0.72	5.53

K) Elongación 5.0mm

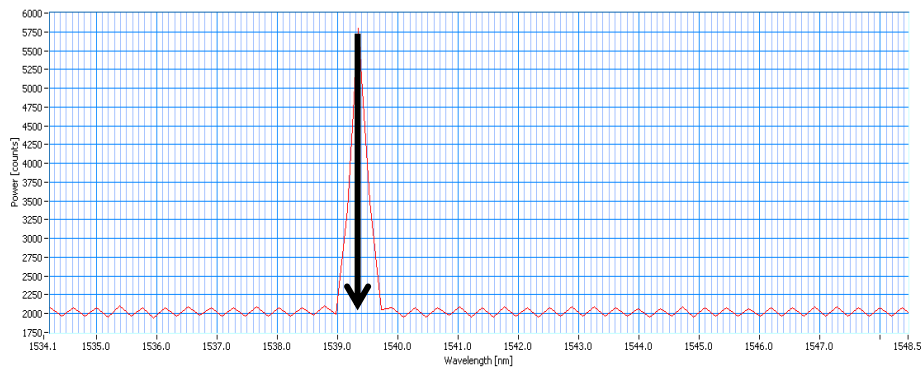


Figura 52. Espectro óptico del sensor os3610 con elongación 5.0mm

Resultado:

ΔL [mm]	λ_{in} [nm]	λ_{out} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda_T$ [nm]
5	1533.28	1539.35	0.54	6.07

Dónde:

ΔL : Elongación total

λ_{in} : Longitud de onda de reflexión del sensor libre de tensión

λ_{out} : Longitud de onda de reflexión del sensor con tensión

$\Delta\lambda$: Desplazamiento de la longitud de onda de reflexión del sensor referido a la medición anterior

$\Delta\lambda_T$: Desplazamiento total de la longitud de onda de reflexión referido a λ_{in}

5.5. Efecto de la temperatura en los sensores de tensión FBG

Se realizaron pruebas a 18°C, 28°C y 38°C, los resultados del comportamiento del sensor son mostrados en la siguiente figura.

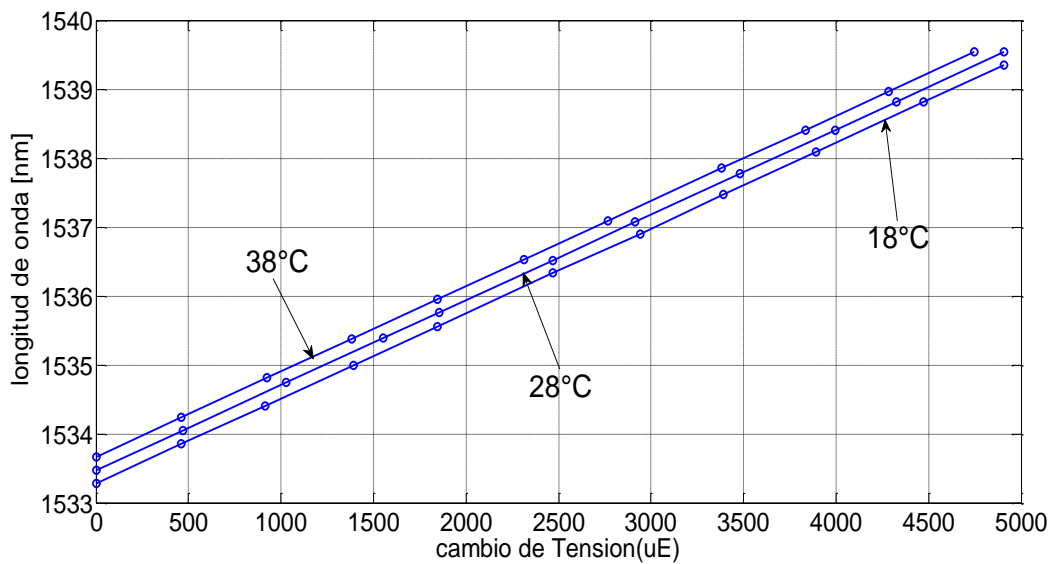


Figura 53. Comportamiento del sensor os3610 a 18°C, 28°C y 38°C

Se observa que la variación de temperatura afecta directamente las mediciones de tensión. A temperatura ambiente la medición inicial libre de tensión ($\epsilon = 0$) es de 1533.28 nm, sin embargo la variación de temperatura induce un cambio de tensión de aproximadamente 0.19 nm en las mediciones a 28°C. Por otra parte la variación de temperatura a 38°C produce una inducción de tensión aproximada de 0.2 nm sobre las mediciones de tensión a 28°C y 0.39nm sobre las pruebas a

18°C. El aumento de temperatura produce una disminución de la sensibilidad del sensor. .

De igual forma la rejilla FBG_T de compensación de temperatura tiene una desplazamiento de la longitud de onda de reflexión por el cambio de temperatura, el desplazamiento es de 0.2 nm de 18°C a 28°C, y de 0.19 nm de 28°C a 38°C, mostrado en la figura 1.57.

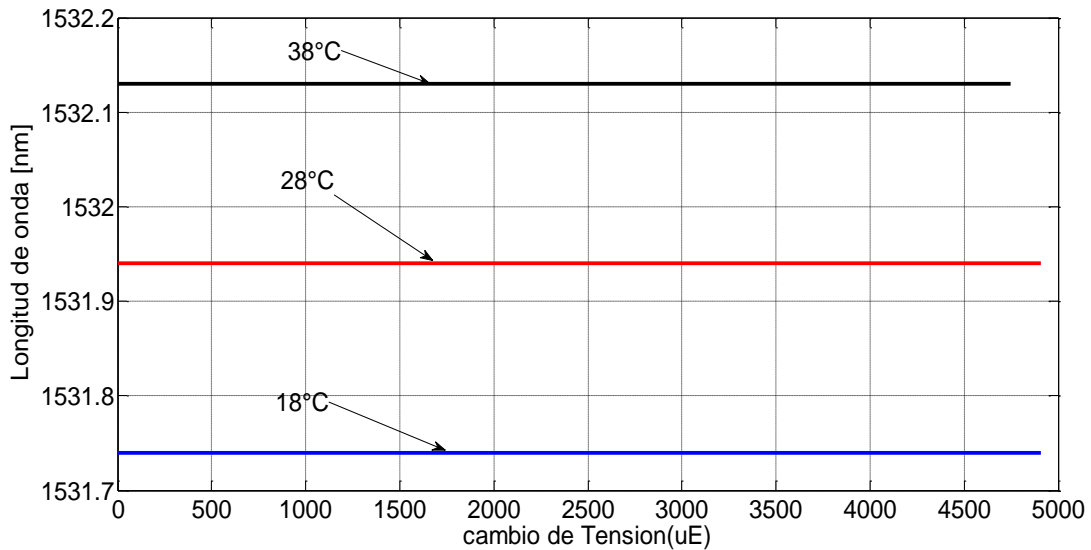


Figura 54. Comportamiento del sensor os3610 a 18°C, 28°C y 38°C rejilla FBG_T

De esta forma la compensación de temperatura es importante en la medición de tensión con sensores FBG, ya que la sensibilidad térmica inherente de las FBG afecta las mediciones de tensión en el sensor.

5.6. Compensación de temperatura del sensor de tensión FBG os3610

Como es mencionado anteriormente en este capítulo, los sensores de tensión basados en FBG responden a la tensión inducida por la temperatura y a la tensión inducida mecánicamente. El sensor de tensión os3610 utiliza un método simple (capitulo 3) utilizando una segunda FBG libre de tensión ($\varepsilon = 0$) dedicada a la medición exclusiva de temperatura en el sensor.

El desplazamiento del pico de reflexión de la segunda FBG es relacionada con el cambio de tensión inducida térmicamente. La corrección de las mediciones de tensión es lograda aplicando la ecuación (1.22). La tensión inducida térmicamente medida por FBG_T es sustraída de la medición de tensión total de realizada por FBG_S . La corrección de las mediciones está dada por la siguiente ecuación [44].

$$\varepsilon = \left[(\Delta\lambda / \lambda_0)(1x10^6) / FG \right]_{Strain} - \varepsilon_{T_0} \quad , \quad \text{Ec. (1.22)}$$

donde;

ε : Tensión mecánica con compensación de temperatura [m / m]

$\Delta\lambda$: Desplazamiento de la longitud de onda pico de FBG_S [nm]

λ_0 : Longitud de onda pico inicial de FBG_S [nm]

F_G : Gage Factor [1]

ε_{T_0} : Medición de FBG_T [$\mu m / m$].

La medición de FBG_T es relacionada con la tensión inducida por la temperatura de acuerdo a la siguiente ecuación [44].

$$\varepsilon_{T_0} = [(\Delta\lambda_T)(1x10^6) / C_1] + (CTE_S - C_2)(1X10^3)(\lambda_{T_{emp}} / ST) \quad , \quad \text{Ec. (1.23)}$$

dónde:

$\Delta\lambda_{Temp}$: Desplazamiento de la longitud de onda de reflexión de FBG_T [nm]

C_1 : 0.813 [1]

CTE_s : Cociente de expansión térmica de la superficie en prueba [$\mu m / m - ^\circ C$]

ST : Sensibilidad térmica [$pm / ^\circ C$]

5.7. Comparación de las predicciones teóricas con el experimento

La comparación de los resultados obtenidos experimentales con las predicciones teóricas es mostrada en la figura 55.

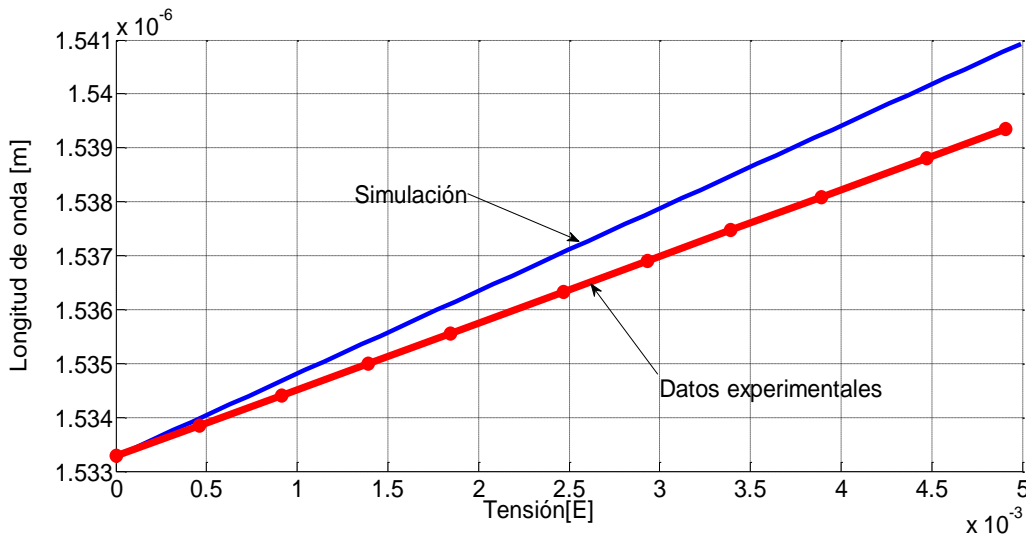


Figura 55. Respuesta teórica y experimental del sensor de tensión FBG

Comparando la sensibilidad de la FBG simulada y observada experimentalmente del sensor os3610, se obtiene la sensibilidad experimental de $1.24 pm / \mu\epsilon$, y la sensibilidad teórica de $1.5 pm / \mu\epsilon$. La diferencia porcentual entre los dos es de 17.33%.

Una gran cantidad de factores pueden influir en la sensibilidad experimental de las FBG. Primeramente las características del material de la rejilla determinan las variaciones de la tensión inducida en el índice de refracción de la FBG.

Por otra parte la aplicación de tensión sobre el arreglo experimental puede no ser perfecta provocando variaciones de tensión parasitas. La sensibilidad experimental de una FBG es fuertemente dependiente de la construcción del sensor y de la interconexión al arreglo experimental, estos factores pueden ser las principales causas de diferencia en los resultados obtenidos.

A pesar de la diferencia de la sensibilidad experimental, las hojas de especificaciones técnicas del sensor os3610 también proporcionan la sensibilidad de $1.2 \text{ pm} / \mu\epsilon$ [45].

5.8. Conclusiones

Se realizaron pruebas experimentales de un sensor FBG comercial de la marca Micron Optics modelo os3610. El comportamiento del sensor resulto lineal en función de la elongación del sensor. Se obtuvo la tensión inducida por la elongación aplicando la relación entre el desplazamiento de la longitud de reflexión del sensor os3610 y la tensión, esto a través de la ecuación 1.21.

Se observa una diferencia en la sensibilidad simulada y experimental, la cual la atribuimos a las imperfecciones en transferencia de la tensión hacia el sensor. Sin embargo la sensibilidad dada por el fabricante es muy cercana a la experimental, con una diferencia de 0.04 nm.

Se verificó la eficiencia del método de compensación de temperatura empleado en el sensor os3610. Esta compensación se realiza con una segunda FBG de referencia. La tensión inducida térmicamente es sustraída de la lectura del sensor os3610.

Capítulo 6.

Ensayo de elementos de concreto instrumentados con las FBG

En la actualidad el monitoreo de salud estructural tiene gran importancia en la Ingeniería Civil, en la búsqueda de vías de construcción de edificaciones más seguras. El monitoreo de estructuras se ha convertido en una de las aplicaciones más destacadas de los sensores FBG [43].

La tensión es un factor principal que puede ser usado para el monitoreo de estado físico de estructuras [43]. Los sensores FBG ofrecen destacables características que las hacen muy útiles para su aplicación en el monitoreo de estructuras: edificios, presas, puentes, etc. Estas características útiles son: inmunidad a interferencias electromagnéticas incluyendo tormentas eléctricas, tamaño reducido (fibra estándar $125 \mu m$) útil para su instalación sin necesidad de modificar las estructuras, resistencia a la corrosión, y larga vida en ambientes hostiles.

A continuación se describen los ensayos de un elemento estructural de concreto instrumentado con las FBG realizados en el marco del presente trabajo.

6.1. Metodología

La evaluación de las FBG como sensores de tensión en el monitoreo de estructuras, se realizó por medio de ensayos mecánicos de una vigas de concreto de tamaños estándar instrumentada con las FBG, la cual fue sometida a las pruebas de flexión en condiciones de Laboratorio de Estructuras a cargo de Ing. Héctor Guzmán Olguín, del Departamento de Estructuras de la División de la Ingeniería Civil y Geomática de la FI-UNAM.

Capítulo 6. Ensayos de elementos de concreto instrumentados con las FBG

Un sensor FBG se montó sobre una viga de concreto (figura 56) de tamaño estándar ($L_V=600 \text{ mm}$, $H_V=250 \text{ mm}$, $W_V=150 \text{ mm}$). Se pegó una FBG sobre superficie lateral de la viga.

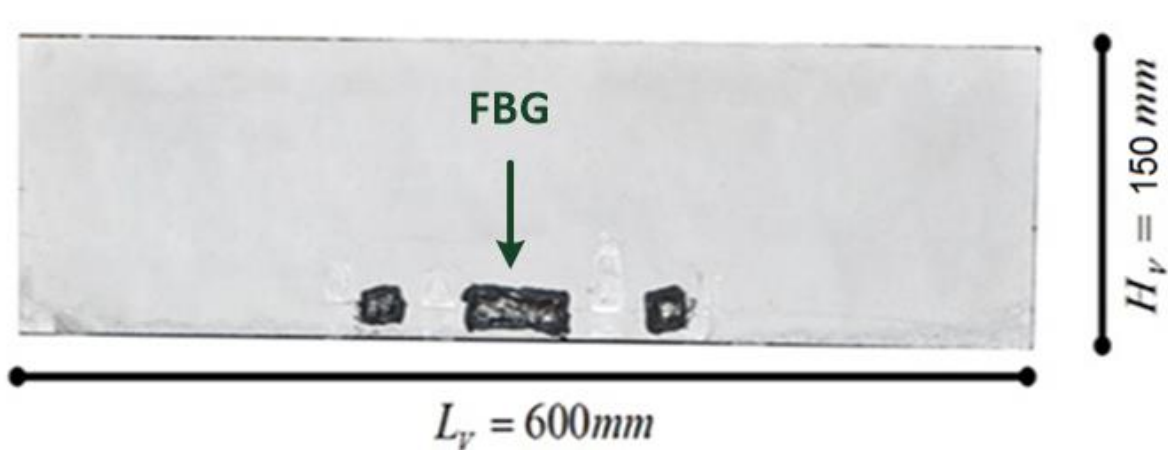


Figura 56. Elemento estructural. Viga de tamaño estándar: $L_V=600 \text{ mm}$, $H_V=250 \text{ mm}$, $W_V=150 \text{ mm}$ (Vista lateral).

El sensor FBG fue pegado superficialmente usando adhesivo epóxico transparente para superficies porosas de la marca RESISTOL de la forma mostrada en la figura 57.

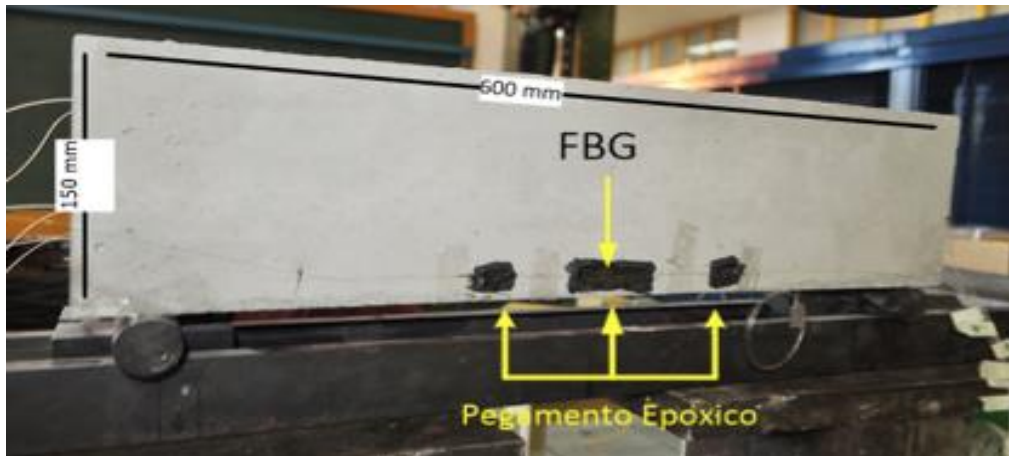


Figura 57. Instrumentación de la viga de concreto con un sensor FBG, técnica de montaje 2.

El arreglo experimental fue similar a los descritos en los capítulos 4 y 5, excepto los elementos de concreto y equipo especializado mecánico para pruebas de flexión y compresión (figura 58).

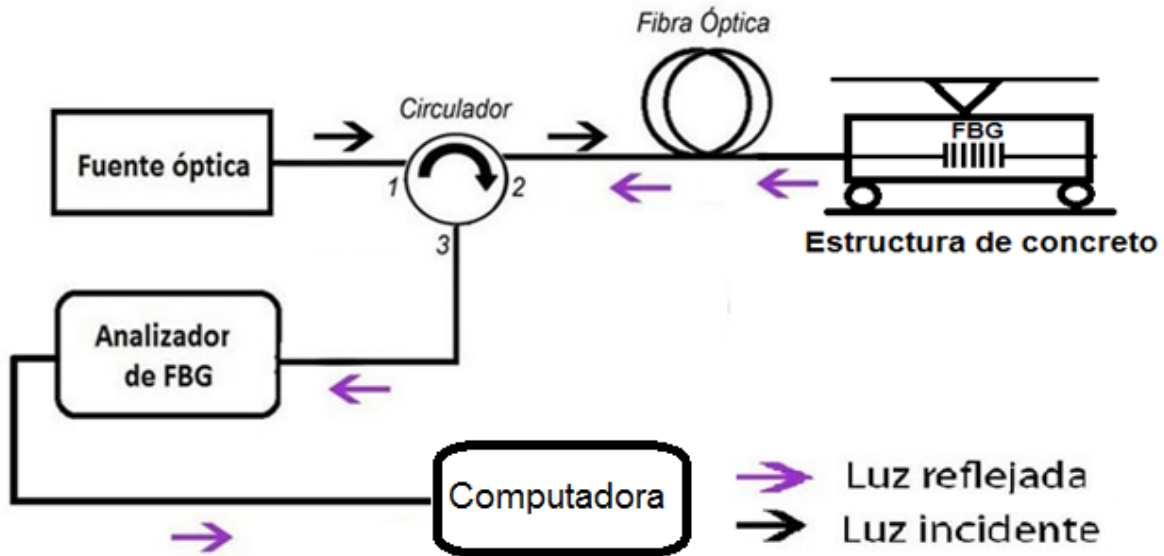


Figura 58. Esquema de arreglo experimental

La aplicación de carga sobre el elemento de concreto bajo prueba se logra a través de una prensa universal, donde la viga es sometida a pruebas de flexión. El montaje de las estructuras en la prensa universal es mostrado en la figuras 59.



Figura 59. Aplicación de carga en la prueba de flexión de la viga instrumentada con una FBG

La aplicación de una fuerza externa provoca la deformación de la estructura. La carga que actúa en la estructura genera flexión y deformación de los elementos estructurales que la constituyen. Esta deformación también produce tensión en los elementos de la estructura incluyendo la FBG, lo que permite monitorear el estado estructural en función del pico de reflexión del sensor FBG.

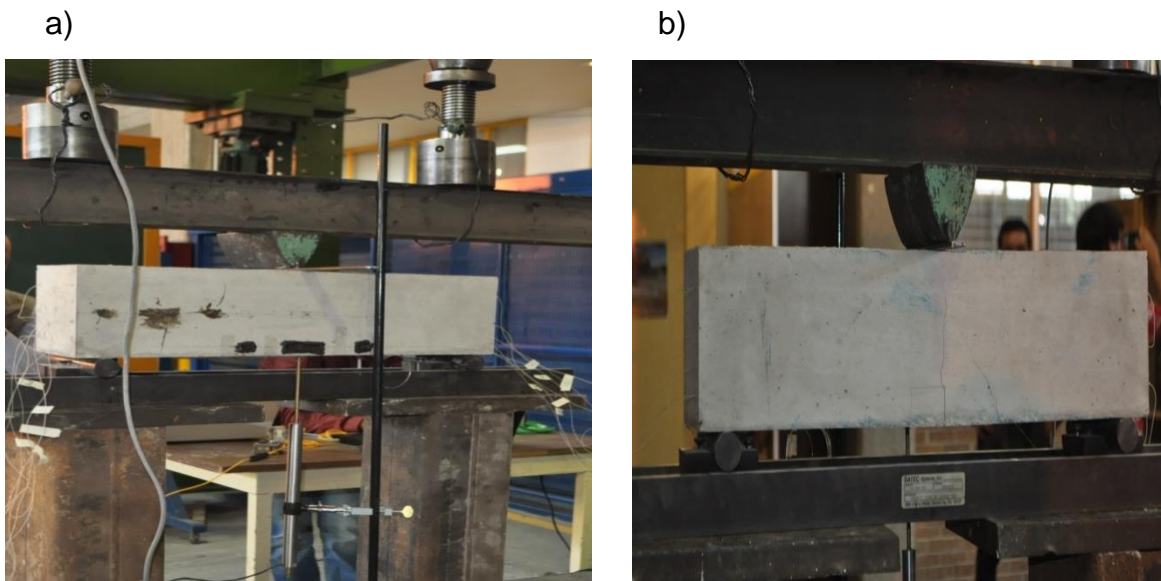


Figura 60. a) Instrumentación del sensor FBG en la estructura de concreto, b) Vista Trasera de la estructura

Como se comprobó en el capítulo anterior las FBG presentan un comportamiento lineal en función de la tensión, el aumento de la longitud de onda de reflexión de la FBG indica un aumento de tensión sobre el sensor, mientras que la disminución de la longitud de onda de reflexión se traduce en el fenómeno de compresión. Esta relación lineal hace posible relacionar la tensión con la carga aplicada en las pruebas experimentales.

6.2. Resultados

Los resultados de las pruebas de flexión indican un comportamiento de la tensión en función de la carga de acuerdo a la figura 61. La variación de la carga se realizó en un rango de 0 a 4010 kg, a 4010 kg la viga se fracturo. Las gráficas representan la carga aplicada por un solo gato hidráulico de la prensa universal, sin embargo, se utilizaron 2 gatos por lo cual el valor de carga se multiplica por 2.

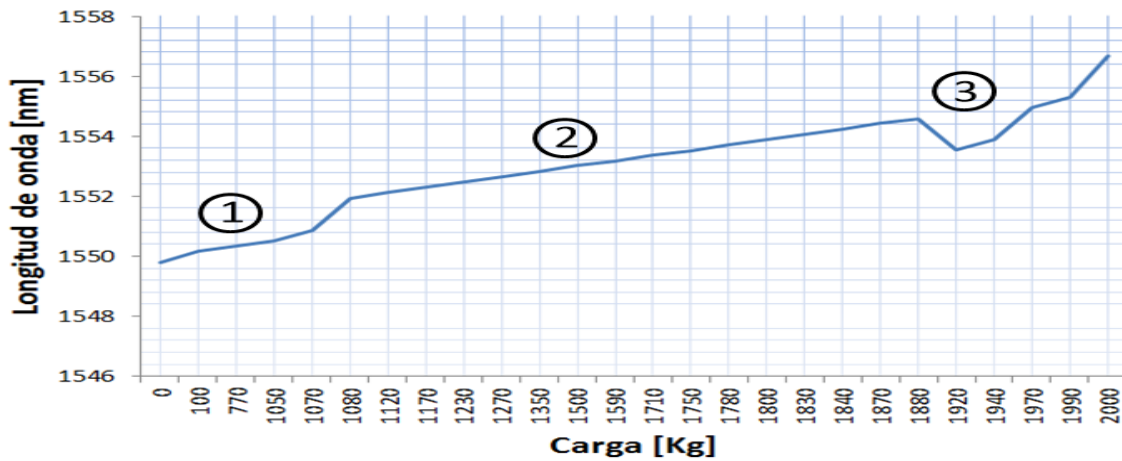


Figura 61 Respuesta del sensor FBG pegado a la viga en función de carga aplicada

La curva carga-desplazamiento (figura 62) expone la relación entre la carga y la deformación de la estructura en las pruebas de flexión de la viga. Los datos fueron obtenidos a través de un sensor de desplazamiento de la prensa universal.

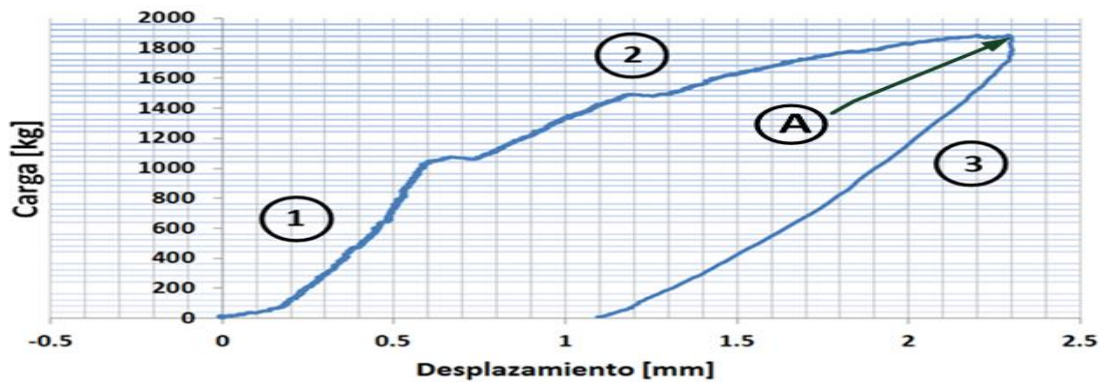


Figura 62. Curva Carga-desplazamiento de la viga, de la prueba de flexión

La flexión de la estructura es el resultado de la deformación causada por los esfuerzos de flexión debido a la carga externa. Conforme se aumenta la carga, la viga sufre deformación adicional, propiciando el desarrollo de las grietas por flexión a lo largo del claro de la viga.

La tensión tiene un comportamiento directamente proporcional al incremento de la carga. La resistencia del concreto de la viga es mayor al inicio de las pruebas por lo que la tensión aumenta lentamente hasta una carga aproximada de 1080 kg (Figura 61,62 numero 1), esto se traduce en un cambio lento en la longitud de onda de reflexión de la FBG, la sensibilidad obtenida en este intervalo es de 0.79 pm/kg .

En este punto ocurre un agrietamiento del concreto, la fuerza aplicada por la carga se transmite al acero de la viga lo que produce un cambio de sensibilidad en el sensor ya que la viga presenta menor resistencia, la sensibilidad del sensor FBG aumenta (2.7 pm/kg) por lo que el cambio de la longitud de onda de reflexión o cambio de tensión ocurre más rápidamente. En este intervalo se tiene un comportamiento prácticamente lineal de la tensión en función de la carga (figura 61,62 numero 2).



Figura 63. Fractura de la viga y del sensor FBG (fotografía).

Incrementos continuos de la carga conducen a la falla del elemento estructural cuando la carga externa alcanza la capacidad límite del elemento. A dicho nivel de

carga se le llama estado límite de falla en flexión. Este fenómeno se presenta sobre una carga aproximada de 1880 kg en donde la viga se fractura provocando la caída de la carga y por consecuencia provoca el decremento de tensión en este punto (figura 61, 62, 63 numero 3), esto ilustrado con mayor claridad en la curva de carga-desplazamiento en donde en este punto (A) de carga el desplazamiento de la estructura disminuye.

6.3. Conclusiones

El sensor de tensión FBG empleado en los ensayos de elementos estructurales: en la viga de concreto mostró una respuesta a la tensión similar a lo obtenido experimental y teóricamente en el capítulo 5. La tensión ejercida en la estructura muestra un comportamiento lineal en función de la carga aplicada.

La tensión en la viga aumento de forma lineal hasta la fractura de esta, los cambios de sensibilidad se deben a la resistencia variable de los componentes estructurales de la viga. La técnica de pegado tuvo buena adhesión, en todo momento permaneció fija a la estructura, incluso después de la fractura de esta.

La sensibilidad de la FBG adherida en la viga tuvo un valor muy bajo con respecto a la sensibilidad obtenida en el sensor de tensión del capítulo 5. La baja sensibilidad del sensor la atribuimos a la alta resistencia de los elementos estructurales de la viga.

La instrumentación de la estructura con el sensor FBG resultó un proceso complejo debido principalmente a la fragilidad del tipo particular de FBG que se implementó. Además, fue necesario empalmar de nuevo la FBG en diversas ocasiones por la fractura de la fibra óptica. Por esta razón es necesario el perfeccionamiento de cada etapa de instrumentación de elementos estructurales con los sensores de fibra óptica para facilitar este proceso y asegurar la operación de los sensores en ambientes reales.

7. Conclusiones Generales

Se realizó un estudio teórico y práctico de las Rejillas de Bragg en la aplicación de estas como sensores de temperatura y tensión.

- Se obtuvo la respuesta espectral teórica de distintas clases de FBG empleando los modelos matemáticos existentes de estos elementos.
- Se confirmó que una FBG de periodo constante descrita por la teoría de modos acoplados tiene un espectro simple lo que la hace útil para el monitoreo de diversos factores físicos, también la teoría indica que las FBG tipo *I* periodo constante (las que fueran empleadas en la parte experimental de este trabajo) son apropiadas para aplicaciones de sensado.
- La teoría que describe los principios de sensado de las FBG proporciono los elementos necesarios para la realización mediante la plataforma MATLAB de simulaciones y predicciones sobre la respuesta de las FBG. La respuesta obtenida muestra un comportamiento lineal en función de la temperatura y tensión, este comportamiento, así como las sensibilidades teóricas obtenidas en este trabajo muestran similitud con trabajos previos de distintos autores.

Se implementaron instalaciones experimentales para la obtención de la respuesta experimental de los sensores FBG a temperatura y tensión.

- Se obtuvo la respuesta espectral de las FBG en función de la temperatura. La longitud de onda pico tuvo un desplazamiento lineal en función de la temperatura igual a la esperada en las predicciones teóricas. La sensibilidad teórica tuvo una diferencia de 37% sobre la experimental. Esta diferencia la atribuimos a la diferencia en los parámetros de las FBG simulada y a la FBG experimental, así como a la estabilidad térmica del sistema que no fue perfecta.

7. Conclusiones Generales

- Por otra parte el sensor de tensión FBG os3610 mostro un comportamiento lineal, la sensibilidad experimental tuvo una diferencia de 17% con respecto a las predicciones teóricas, sin embargo la hoja de especificaciones técnicas y distintos autores obtienen un resultado muy cercano al obtenido en esta tesis.
- Se comprobó que la temperatura es un factor de gran importancia para los sensores de tensión FBG, las mediciones de tensión en este tipo de sensores tienen dependencia directa de la temperatura. Por esta razón es necesaria la corrección de las mediciones por medio de un método de discriminación de la temperatura y tensión.

Se realizaron ensayos estructurales de una viga concreto instrumentada con un sensor FBG a través adherida superficialmente en la estructura.

- La tensión tuvo un comportamiento lineal con cambios de sensibilidad en la viga debido a la composición interna de la estructura (concreto-acero), la fractura del elemento causa una caída de la carga que produce una disminución de tensión en el sensor.
- La técnica de adhesión superficial tuvo un buen comportamiento, el sensor FBG permaneció fijo en todo momento.
- Se presentaron problemas de montaje debido a la fragilidad del tipo particular de FBG implementado. Es necesaria el perfeccionamiento de la instrumentación de las estructuras en la implementación de los sensores para facilitar el montaje y la operación segura.

7. Conclusiones Generales

Las FBG es un elemento con mucho potencial en las aplicaciones de sensado, sin embargo es necesario sobreponer problemas como el traslape de tensión/temperatura, protección física del sensor y minimización de costo de equipos de interrogación que actualmente son bastante costosos.

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.

8. Referencias

- [1] C.R. Giles, "Lightwave applications of fiber Bragg gratings", J. Lightwave Technol., vol. 15, pp. 1391 – 1404, 1997.
- [2] Y. Rao, "In-fibre Bragg grating sensors", Measurement science and technology, vol. 4, pp. 355-375, 1996.
- [3] A. Selvarajan, "Photonics fiber optic sensor and their applications in smart ", Journal of Non-Destructive Evaluation, vol. 15, 1995.
- [4] A. Othonos and K. Kally, "*Fiber Bragg Gratings, Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*", Artech House, Boston, Mass., 1999.
- [5] R. Kashyap, "*Fiber Bragg Gratings*", Photon Design, USA, 2010.
- [6] Y. Zhu, "Temperature characteristic of fiber Bragg grating", International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, vol. 8, pp. 4020-4022, 2011.
- [7] B.Qi, "Response of an embedded fibre Bragg grating to thermal and mechanical loading in a composite laminate", Cooperative Research Centre for Advanced Composite Structures, vol. 27, pp. 93-99, 2004.
- [8] A. Selvarajan and A. Asundi, "Photonics fiber optic sensor and their applications in smart structures", J. Non-Destructive Evaluation, vol. 15, 1995.
- [9] C.R. Giles, "Lightwave applications of fiber Bragg gratings", J. Lightwave Technology, vol.15, pp. 1391 – 1404, 1997.

8. Referencias

- [10] L. Xueming, Y. Xiufeng, L. Fuyun, Z. Xiaoqun, and L. Chao, "Stable and uniform dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on fiber Bragg gratings and photonic crystal fiber", *Optic Express*, vol. 13, pp. 142-147, 2005.
- [11] S.W. Harun, "Gain clamping in L-band erbium-doped fiber amplifier using a fiber Bragg Grating", *Photonics Technology Letters*, vol. 14, pp. 293 – 295, 2002.
- [12] O. Ozoliņš, G. Ivanovs, "Realization of optimal FBG band-pass filters for high speed HDWDM", Scientific Institute of Telecommunications, Riga Technical University, pp. 41-44, 2009.
- [13] Tkachenko, G.V, "Wavelength division multiplexer based on FBG with defect", *Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Proceedings of LFNM 2005. 7th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks*, pp. 176 – 179, 2005.
- [14] A. Dochhan, "FBG dispersion compensation in a 43 Gbit/s WDM system: comparing different FBG types and modulation formats", *Transparent Optical Networks*, 2009, pp. 1-4, 2009.
- [15] R. Yun-Jiang, "In-fibre Bragg grating sensors", *Measurement science and technology*, vol. 4, pp. 355-375, 1996.
- [16] G. Giachetta, "Energy-momentum conservation laws, Gauge approach", Moscow State University, Physics Faculty, Department of Theoretical Physics, vol. 5, pp. 92-100, 1999.
- [17] A. Yariv, "Coupled-mode theory for guided-wave optics", *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. QE-9, pp. 919-933, 1973.
- [18] H. Pratch and S.L. Gilbert, "Growth of Bragg gratings produced by continuous-wave ultraviolet light in optical fiber", *Optics Letters*, vol. 18, pp. 1484-1486, 1993.

8. Referencias

- [19] I. Riant and F. Haller, "Study of the photosensitivity at 193 nm and comparison with photosensitivity at 240 influence fiber tension: type IIA aging", IEEE J. lightwave technology, vol. 15, pp. 1464-2469, 1997.
- [20] J.L. Archambault, L. Reekie and S. Russel, "100% reflectivity Bragg reflectors produced in optical fibers by single eximer laser pulses", Electronics Letters, vol. 29, pp. 453-455, 1993.
- [21] M. Yamasa and K. Sakuda, "Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguide via a fundamental matrix approach", Applied Optics, vol.2,pp. 3474-3478, 6, 1987.
- [22] X. Zhan, "Frequency response equalization using fiber Bragg grating tilted filter in RoF systems", J. Lightwave Technology, Vol. 27, pp. 2465 – 2469, 2009.
- [23] J. Zhang and A. Li, "The design and fabrication of Fibonacci Quasi-periodic superstructure fiber Bragg gratings", IEEE Photonics and Optoelectronics Symposium, pp. 1-4, 2010.
- [24] X. Yang, Y. Liu, and X. Fu, "Transmission properties of light through the Fibonacci-class multilayers", Phys. Rev. B, vol. 59, pp. 4545-4548, 1999.
- [25] D. Gloge, "Weakly guiding fibres", Applied Optics, vol. 10, pp.252-258, 1971.
- [26] M.P. Rouard, "*Etudes des propriétés optiques des lames métalliques très minces*", Annal. Phys. II, vol. 20, 1937.
- [27] A. Winick, "Effective-index method and coupled-mode theory for almost periodic waveguide gratings", Applied Optics, vol. 31, pp. 757-764, 1992.
- [28] E. Peral, "Iterative solution to the Gel'Fand-Levitan-Marchenko coupled equations and application to synthesis of fiber gratings", The J. Quantum Electronics, vol. 32, pp. 2078 – 2084, 1996.

8. Referencias

- [29] J.L. Frolik and A.E. Yagle, "An asymmetric discrete-time approach for the design and analysis of period waveguide gratings", *J. Lightwave Technology*, vol. 13, pp. 175–185, 1995.
- [30] S. Radic, N. George and G.P. Agrawal, "Analysis of nonuniform nonlinear distributed feedback structures: Generalised transfer matrix approach", *IEEE J. Quantum Electron*, vol. 31, pp. 1326–1336, 1995.
- [31] L. Poladin, "Variational technique for nonuniform gratings and distributed feedback lasers", *J. Opt. Soc. Am. A-1*, pp. 1846–1853, 1974.
- [32] M. Norton, T. Erdogan, and G. Michael Morris, "Coupled-mode theory of resonant-grating filters", *JOSA A*, vol. 14, pp. 629-639, 1997.
- [33] Z. Zhou, "Techniques of temperature compensation for FBG strain sensors used in long-term structural monitoring", *Proceeding of Asian Pacific Fundamental Problems of Opto-Microelectronics*, vol. 5851, pp. 167-172, 2004.
- [34] G. Meltz, "Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity", *International Workshop on Photoinduced Self- Organization Effects in Optical Fiber*, vol. 1516, pp. 185-199, 1991.
- [35] M. Xu, "Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors", *Electronics Letters*, vol. 30, pp. 1085-1087, 1994.
- [36] S.W. James, M.L. Dockney and R.P. Tatam, "Independent measurement of temperature and strain using in fiber Bragg grating sensors", *Proceedings of the 11th International Conference on Optical Fiber Sensors*, vol. 32, pp. 1133 – 1134, 1996.
- [37] E. Chehura, W. J. Stephen and R. P. Tatam, "Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre Bragg grating", *Optics Communications*, vol. 275, pp 344-347, 2007.

8. Referencias

- [38] B. Qi, M. Bannister, X. Liu, A. Michie, L. Rajasekera and B. Ashton, "Response of an embedded fibre bragg grating to thermal and mechanical loading in a composite laminate", Cooperative Research Centre for Advanced Composite Structures, vol. 27, pp. 93-99, 2004.
- [39] Z. Yue-hong, "Temperature Characteristic of Fiber Bragg Grating", International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, pp. 4020-4022, 2011.
- [40] C. Qiying and L. Ping, "Fiber Bragg Gratings and their applications as temperature and humidity sensors", Atomic Molecular and Optical Physics, pp.235-260, 2008.
- [41] L. Ping, M. Liqiu and C. Qiying, "Resolving cross sensitivity of fiber Bragg gratings with different polymeric coatings", Applied Physics Letters, vol. 92, 2008.
- [42] V.P. Wnuk, "Process for Mounting and Packaging of Fiber Bragg grating strain sensors for use in harsh environment applications", Smart Structures Conference, 2005.
- [43] A. Selvarajan and A. Asundi, "Photonics fiber optic sensor and their applications in smart structures", Journal of Non-Destructive Evaluation, vol. 15, 1995.
- [44] Archive for the 'OS Technology' Category, Micron Optics, [online] <http://micronoptics.com/blog/category/os-technology/>, (Acceso: Febrero 2014)
- [45] Sensor Information Sheet, Micron Optics, [online] http://www.micronoptics.com/support_downloads/Sensors/Strain/os3600/, (Acceso: febrero 2014,)

9. Apéndices

1. Código en Matlab para la simulación de FBG uniformes

```
close all
clear all
clc
l1=1549e-9;
l2=1551e-9;
lam= l1:0.001e-9:l2;
S=1.0; % Visibilidad
neff=1.47; %neff=nco
per= 530.4827e-9 ; %% Periodo, per=hd /2neff
L=0.018; %Longitud de la fibra
for i=1
M=100;%Número desecciones 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
dneff=1e-4;%
k=(pi./lam)*S*dneff%
dcc=0; perdidas por absorcion dcc-----> 0
hd= 1550e-9; Longitud de onda de resonancia
vd=(2*pi*neff).*((1./lam)-(1/hd)); 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); %REFLEXION
R1=1-(sinh(L*sqrt(K-DCgen)).^2)./(cosh(L*sqrt(K-
DCgen)).^2-DCgen./K); %REFLEXION
P=[exp((-1i*fase)/2), 0; 0, exp((1i*fase)/2)]; % Matriz
de fase
for i=1549e-9:0.01e-9:1551e-9;
E=[1;0];
hold on
plot(lam,R);
xlabel('Longitud de onda [nm]')
ylabel('Reflectividad[%]')
grid
axis([1.5496e-6,1.5504e-6, 0, 1])
figure(2)
plot(lam,10*log10(R))
axis([1.5496e-6,1.5504e-6, -120, 10])
```

```
xlabel('Longitud de onda ')
ylabel('Potencia [dB]')
grid
L=L+0.001;
end
```

2. Código en MATLAB para la simulación de sensores FBG de temperatura

```
e=8.6e-6;
alfa=0.55e-6;
a=e+alfa;
dT=0:1:120;
hb=1550e-9;
dhB=(a.*dT)*hb+hb;
figure(1)
hold on;
plot(dT,dhB)
ylabel('Longitud de onda m');
xlabel('Temperatura °C');
grid on
```

3. Código en MATLAB para la simulación de sensores FBG de temperatura

```
pe= 0.22e-06; % Constante Efectiva Fotoelastica
hb=1550e-9; % Longitud de onda de Bragg de la FBG
Ez=-200e-6:10e-6:1600e-6;
dhb=((1-pe).*Ez.*hb)+hb; Ecuacion de tension
hold
figure(1)
plot(Ez,dhb);
ylabel('longitud de onda m');
xlabel('cambio de Tensión(E)');
Grid
```


4. Características técnicas del equipo experimental


- Interrogador FBG

Modelo	Rango de medición	Resolución	Software y conexiones	Sensibilidad	Imagen
IBSEN IMON E 512	1510-1590 nm	<0.5 pm	Developer Kit - Interfaz USB 2.0	-80 dBm	

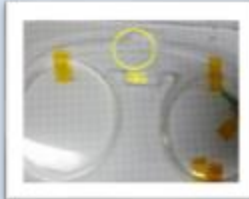
- Fuente óptica de banda ancha

Modelo	Tipo	Operación	Tipo de fibra	Conectores	Potencia de salida	Imagen del equipo
Lightwave MPS8024	LED	1310nm y 1550nm	Monomodo 125/9	FC/PC	-3 dBm/ 500 μ W	

• **Circulador**

Mod.	# de puertos	$\lambda_{operacion}$	Perdidas de inserción	Aislamiento P2-P1 P3-P2	Potencia entrada	Imagen
PIOC3	3	1310 nm 1510 \pm 30 nm	0.6 dB	>50	300mW	

• **FBG**

Marca	Modelo	Tipo de fibra	Long.	Reflectividad	BW (3dB)	Imagen
---	A101012-006	SMF-28	10 mm	96.38 %	0.194nm	

• **Sensor os3610**

Marca	Mod.	Sensibilidad Strain/Temp.	Temp. de operación	Tensión máx.	Reflec. pico	Imagen
Micron Optics	OS3610	1.2pm/uE 22 pm/°C	-40 a 80 °C	5000uE	>70%	