

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERÍA

EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN UN OADM SINTONIZABLE MEDIANTE TENSIÓN.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

ALEJANDRO GÓMEZ CRUZ

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. SELENE PÉREZ GARCÍA



Ciudad Universitaria, México D.F., Septiembre 2015

Agradecimientos.

Agradezco a mis padres por su esfuerzo, trabajo y dedicación. Han hecho de mi un hombre con valores y con la capacidad de luchar con todas sus fuerzas para alcanzar sueños y metas, a jamás flaquear, perseverar y siempre alcanzar lo propuesto ante cualquier adversidad, creyendo plena y totalmente en mí. Espero estén tan orgullosos como yo lo estoy de ustedes.

A mi madre Norma Cruz Maya por colmarme de amor, cariño y apoyo, siendo el ejemplo perfecto de valor, compromiso, perseverancia, honestidad y entrega, pues me ha acompañado a lo largo de toda mi vida, siendo un pilar importante en mi formación personal y profesional.

A mi padre Ignacio Gómez Vázquez por todo su amor, apoyo, ayuda y comprensión, ya que sus consejos me han permitido alcanzar cosas importantes, enseñándome día a día a ser un hombre respetuoso, trabajador, íntegro, educado, generoso y responsable.

A mi novia Victoria Fernández Rocha, por apoyarme incondicionalmente a lo largo de estos 5 años, en lo cuales ha sabido comprenderme y ayudarme en todo momento. Gracias por todo el amor y la felicidad, pues tu has sido participe de este gran logro.

A mis abuelos, Cristina, Consuelo, Ignacio y Eduardo pues ustedes cuatro han contribuido en mi crianza y formación, gracias por sus enseñanzas, anécdotas, amor, y paciencia.

A mis amigos, por todo el apoyo que me brindaron y por compartir conmigo momentos inolvidables dentro y fuera de las aulas.

A mi directora de tesis la Dra. Selene Pérez García por depositar su confianza en mí, por su completo apoyo, paciencia y compromiso en la realización de la misma, gracias por todos los consejos, disponibilidad y por el conocimiento que amablemente compartió conmigo.

A la DGAPA-PAPIIT de la UNAM por el apoyo en forma de Proyecto de investigación científica “Implementación de un nuevo método de monitoreo del comportamiento de estructuras hasta su falla de elementos de concreto y materiales compuestos, con arreglos de fibras ópticas” con número de referencia IT102515.

A mi alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme formar parte de sus filas y cumplir el sueño de estudiar y egresar de la máxima casa de estudios de mi país.

A la Facultad de Ingeniería, por acogerme, instruirme y formarme íntegramente como profesional de las telecomunicaciones, brindándome el conocimiento y la enseñanza de todos y cada uno de mis profesores.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción 1

1.1. Objetivo General 2
1.2. Objetivos Particulares 3
1.3. Metas 3
1.4. Metodología 3
1.5. Justificación 3
1.6. Antecedentes 4
1.6.1. Características deseables de un OADM sintonizable 4
1.6.2. Dispositivos involucrados en la creación de un OADM sintonizable 4
1.7. Estado del Arte 6
1.8. Conclusiones 23
1.9. Referencias 24

Capítulo 2. Estudio de la respuesta teórica de un OADM sintonizable bajo efectos de tensión y temperatura 26

2.1. Objetivo 26
2.2. Introducción 26
2.2.1. Respuesta de las rejillas de Bragg a cambios en factores externos 27
2.2.2. Variación de la temperatura en una rejilla de Bragg 28
2.2.3. Variación de la tensión en una rejilla de Bragg 28
2.2.3.1. Strain como unidad de tensión 29
2.2.4. Variación de la presión en una rejilla de Bragg 30
2.2.5. Efectos conjuntos de temperatura y tensión en una rejilla de Bragg 30
2.3. Simulación de los efectos provocados en una rejilla de Bragg debido a cambios en su tensión 33
2.3.1. Metodología 33
2.3.2. Resultados 33
2.4. Simulación de los efectos provocados en una rejilla de Bragg debido a la variación de la temperatura externa a la rejilla 43
2.4.1. Metodología 43
2.4.2. Resultados 43
2.5. Simulación de los efectos en una rejilla de Bragg debido a cambios en su tensión y en su temperatura 49
2.5.1. Metodología 49
2.5.2. Resultados 50
2.6. Conclusiones 57

2.7. Referencias 58

Capítulo 3. Caracterización de las rejillas de Bragg 60

3.1. Objetivo 61
3.2. Introducción 61
3.3. Respuesta espectral de las rejillas de Bragg en ausencia de tensión y sin cambio en la temperatura 61
3.3.1. Equipo empleado 61
3.3.2. Metodología 62
3.3.3. Descripción de la instalación 62
3.3.4. Resultados 64
3.4. Respuesta espectral de las rejillas de Bragg a cambios en la tensión axial 69
3.4.1. Equipo empleado 69
3.4.2. Metodología 69
3.4.3. Descripción de la instalación 70
3.4.4. Resultados 71
3.5. Respuesta espectral de las rejillas de Bragg a cambios en la temperatura 83
3.5.1. Equipo empleado 83
3.5.2. Metodología 83
3.5.3. Descripción de la instalación 84
3.5.4. Resultados 85
3.6. Conclusiones 93
3.7. Referencias 94

Capítulo 4. Análisis de resultados teóricos y experimentales 95

4.1. Objetivo 95
4.2. Introducción 95
4.3. Análisis de resultados teóricos 95
4.4. Análisis de resultados experimentales 97
4.5. Conclusiones 100
4.6. Referencias 101

Capítulo 5. Construcción y caracterización del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión basado en una rejilla de Bragg y dos circuladores ópticos 102

5.1. Objetivo 102
5.2. Introducción 102
5.3. Respuesta espectral en los diferentes puertos del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión 103

5.3.1. Equipo empleado 103
5.3.2. Metodología 103
5.3.3. Descripción de la instalación 104
5.3.4. Resultados 107
5.4. Efectos de la temperatura en el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión 115
5.4.1. Equipo empleado 115
5.4.2. Metodología 116
5.4.3. Descripción de la instalación 116
5.4.4. Resultados 118
5.5. Conclusiones 125
5.6. Referencias 127

Capítulo 6. Conclusiones Generales 128

Anexo A. Programas de MATLAB 130

Anexo B. Especificaciones técnicas de los dispositivos utilizados en el estudio experimental de esta tesis 133

Glosario de acrónimos por orden alfabético.

Acrónimo	Definición en inglés	Definición en español
ADD/add	Add	Puerto, canal o proceso de inserción
AMZI	Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer	Interferómetro Mach-Zehnder Asimétrico
AOTF	Acousto-Optic Tunable Filter	Filtro Acusto-Óptico Sintonizable
AWG	Arrayed Waveguide Grating	Multiplexor/Demultiplexor AWG
BOADM	Broadband Optical Add Drop Multuiplexer	Multiplexor Óptico de Inserción y Extracción de Banda Ancha
BWU	Bandwidth Utilization	Factor de Utilización de Ancho de Banda
DROP/drop	Drop	Puerto, canal o proceso de extracción
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa
EOTF	Electro-Optic Tunable Filter	Filtro Electro-Óptico Sintonizable
FBG	Fiber Bragg Grating	Rejilla de Bragg.
FFP-TF	Fiber Fabry-Pérot Tunable Filter	Filtro Fabry-Pérot Sintonizable
FFP	Fiber Fabry-Pérot	Resonador/Filtro Fabry-Pérot
FLC	Ferroelectric Liquid Crystal	Cristal Líquido Ferro-eléctrico
FOADM	Fixed Optical Add Drop Multiplexer	Multiplexor Óptico de Inserción y Extracción Fijo
FWHM	Full Width Half Maximum	Ancho Espectral a la Mitad de la Potencia Máxima
LC-FP	Liquid Crystal Fabry-Pérot	Resonador Fabry-Pérot basado en Cristal Líquido

MEMS	Micro Electro Mechanical Systems	Sistemas Micro Electro Mecánicos
MMF	Multi Mode Fiber	Fibra óptica Multimodo
MZI	Mach-Zehnder Interferometer	Interferómetro Mach-Zehnder
OADM	Optical Add Drop Multiplexer	Multiplexor Óptico de Inserción y Extracción
PBS	Polarization Beam Splitter	Divisor de Polarización
PC	Polarization Conversion	Conversión de Polarización
PDL	Polarization Dependent Loss	Pérdidas por Polarización
PMD	Polarization Mode Dispersion	Dispersión por Modo de Polarización
RL	Return Loss	Pérdidas por Retorno
ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer	Multiplexor Óptico de Inserción y Extracción Reconfigurable
SLSR	Sidelobe Suppression Ratio	Relación de Supresión de Lóbulos Laterales
SMF	Single Mode Fiber	Fibra óptica Monomodo
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	Amplificador Óptico de Semiconductor
SOTF	Strain-Optic Tunable Filter	Filtro Tenso-Óptico Sintonizable
TOADM	Tunable Optical Add Drop Multiplexer	Multiplexor Óptico de Inserción y Extracción Sintonizable
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexación por División de Longitud de Onda
WSS	Wavelength Selective Switch	Conmutador Selectivo de Longitud de Onda

Resumen.

En esta tesis se presentan los resultados de los estudios teóricos y experimentales de los efectos de la temperatura en un Multiplexor Óptico de Inserción y Extracción Sintonizable, conocido como TOADM (por sus siglas en inglés Tunable Optical Add Drop Multiplexer).

Con base en el estado del arte de los OADM's sintonizables se construyó un prototipo funcional con rejillas de Bragg (FBG, por sus siglas en inglés Fiber Bragg Grating) y circuladores ópticos de tres puertos, cuyo método de sintonización es la variación de la tensión axial que se aplica sobre la FBG, cambiando así su periodo y por lo tanto su longitud de onda de Bragg.

Se realizaron experimentos variando la temperatura y el nivel de tensión aplicada a la FBG con la finalidad de observar y analizar los efectos que produce la variación de estas magnitudes en un OADM sintonizable por tensión.

A través de los datos cuantitativos obtenidos de manera experimental se obtuvo un modelo matemático que explica el comportamiento del OADM sintonizable por tensión expuesto a cambios en la temperatura, para después comparar dicho modelo matemático con las expresiones teóricas que relacionan los efectos de ambas magnitudes físicas sobre la longitud de onda de Bragg de las rejillas que conforman al OADM sintonizable de ésta tesis.

Capítulo 1.

Introducción.

En este capítulo se muestra el Estado del Arte de los Multiplexores Ópticos de Extracción e Inserción Sintonizables, conocidos como TOADM's, presentando diversos desarrollos, investigaciones, características y aplicaciones de dichos dispositivos.

Existen diferentes tipos de Multiplexores Ópticos de Extracción e Inserción ó OADM's (por sus siglas en inglés Optical Add Drop Multiplexer), entre los que resaltan, el OADM Fijo ó FOADM (por sus siglas en inglés Fixed Optical Add Drop Multiplexer), el OADM Sintonizable ó TOADM (por sus siglas en inglés Tunable Optical Add Drop Multiplexer) y el OADM Reconfigurable o ROADM (por sus siglas en inglés Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer).

Un FOADM permite trabajar sólo con una longitud de onda, es decir, se puede extraer e insertar el canal óptico a la longitud de onda para la cual está diseñado este dispositivo. Si se desea extraer/insertar un canal óptico que trabaje a diferente longitud de onda, se tendría que adquirir un FOADM con características distintas. El esquema de este dispositivo se muestra en la Figura 1.1.

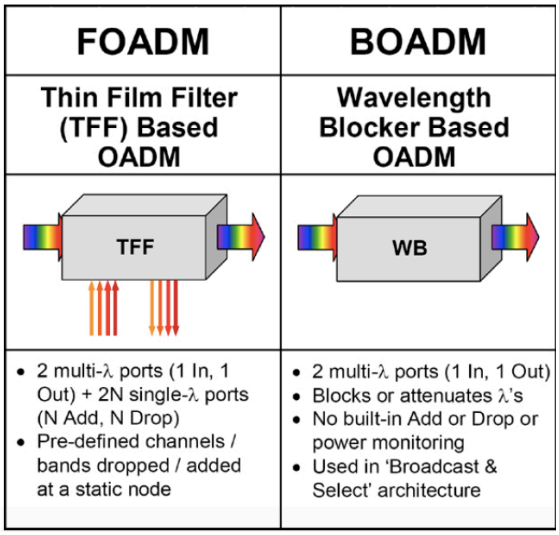


Figura 1.1. Esquema y funcionalidades de un FOADM y BOADM [1].

Una solución ante la imposibilidad de modificar la longitud de onda de operación es la utilización de un TOADM. Este dispositivo permite sintonizar y por lo tanto cambiar su longitud de onda de operación. Con esto será posible extraer e insertar diferentes canales ópticos sin la necesidad de demultiplexar/multiplexar. Existen diferentes métodos de sintonización tales como eléctrico (variación de diferencia de potencial), térmico (variación de temperatura), elástico (variación de tensión axial o estiramiento), entre otros. Finalmente, un ROADM permite la extracción e inserción de una o varias longitudes

de onda al mismo tiempo a través de la configuración dinámica de estos procesos, ya que hace uso de demultiplexores, multiplexores y conmutadores selectivos de longitud de onda (WSS, por sus siglas en inglés Wavelength Selective Switch). Primero demultiplexa todos los canales ópticos para después escoger aquellos que se desean extraer en los puertos DROP. Posteriormente multiplexa los canales ópticos que no se extrajeron previamente con los canales insertados en los puertos ADD [1], [2].
En las Figuras 1.2 y 1.3 se muestran los esquemas de varios tipos de TOADM's y ROADM's respectivamente.

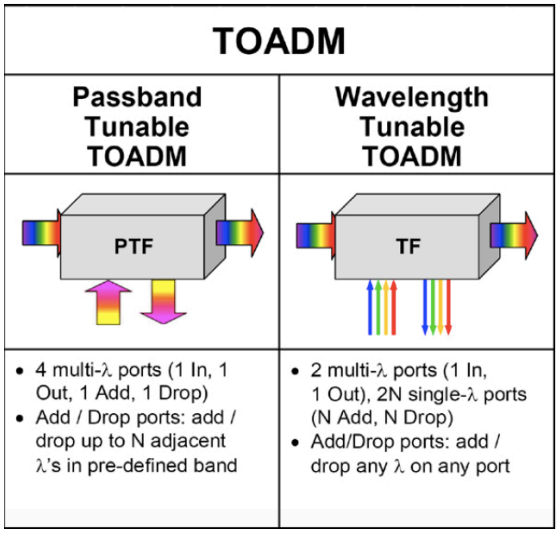


Figura 1.2. Esquema y funcionalidades de diferentes tipos de TOADM [1].

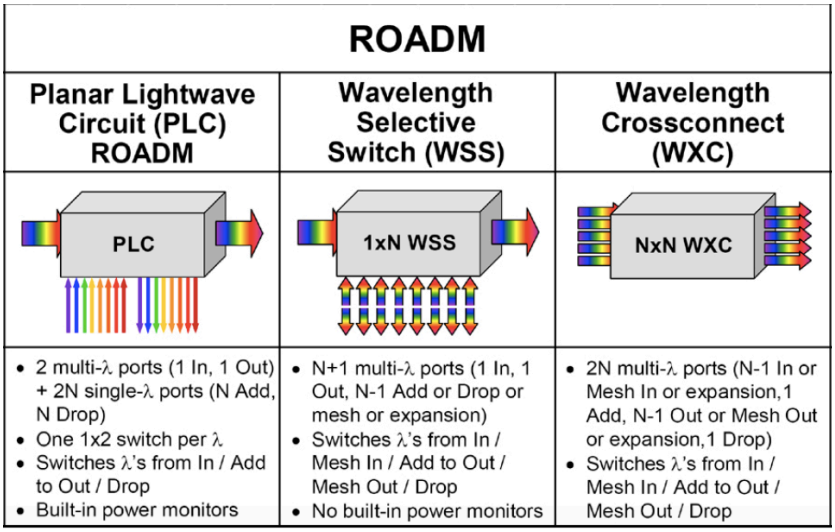


Figura 1.2. Esquema y funcionalidades de diferentes tipos de ROADM [1].

1.1. Objetivo General.

Obtener nuevo conocimiento sobre los efectos que presenta la variación de temperatura en un OADM sintonizable mediante tensión.

1.2. Objetivos Particulares.

1. Diseñar, fabricar y caracterizar un prototipo funcional de un OADM sintonizable por tensión.
2. Estudiar los efectos de la tensión en un OADM sintonizable de forma teórica.
3. Estudiar los efectos de la temperatura en un OADM sintonizable de forma teórica.
4. Simular la respuesta de un OADM sintonizable a cambios en temperatura y tensión.
5. Experimentar con variaciones de temperatura en el prototipo funcional construido.
6. Estudiar, medir y cuantificar los efectos que produce la temperatura en el OADM sintonizable por tensión.
7. Comparar los resultados experimentales obtenidos con los resultados teóricos.

1.3. Metas.

I. Caracterización de las FBG a utilizar en los diversos experimentos.
II. Verificar el correcto funcionamiento de un OADM.
III. Añadir la funcionalidad de sintonización al OADM implementado a través de la aplicación de tensión sobre las FBG.
IV. Realizar experimentos que involucren la variación de temperatura y tensión en el OADM sintonizable.
V. Realizar un estudio sobre los efectos que produce la variación de la temperatura en un OADM sintonizable.

1.4. Metodología.

La metodología de esta tesis abarca métodos teóricos y experimentales.

En la parte teórica se utilizarán expresiones matemáticas que modelan la respuesta espectral de un OADM sintonizable ante cambios en la temperatura y la tensión aplicados a las FBG's (por sus siglas en inglés Fiber Bragg Gratings).

En la parte experimental se realizarán diversos experimentos con el prototipo funcional del OADM sintonizable construido bajo cambios en la temperatura y la tensión del mismo.

1.5. Justificación.

Los OADM's representan un pilar muy importante de las redes de comunicaciones ópticas, ya que a través de ellos se puede extraer e insertar información a la red óptica en la que se encuentra instalado este dispositivo a una determinada longitud de onda, sin modificar o interactuar con los demás canales ópticos que son transmitidos a lo largo de ésta, es decir, preservando su integridad.

Aunado a lo anterior, si se agrega al OADM la funcionalidad de poder sintonizar la longitud de onda con la cual se desea trabajar, se obtendrán grandes ventajas en cuanto a reconfiguración, ampliación, crecimiento y practicidad de la red óptica en cuestión.

Debido a que el OADM sintonizable por tensión implementado en esta tesis está constituido por FBG's, es importante conocer e investigar los efectos que ocasiona la variación de la temperatura en el funcionamiento, sintonización y caracterización de este dispositivo. Es por esto que se ha decidido realizar una serie de desarrollos experimentales que permitan conocer cómo se comporta un OADM sintonizable mediante cambios en la tensión axial de una FBG al estar expuesto a cambios en la temperatura.

1.6. Antecedentes.

Un OADM sintonizable es aquel dispositivo óptico que permite sintonizar la longitud de onda del canal del que deseamos extraer (DROP) o insertar (ADD) información en un nodo específico de una red óptica. Su capacidad de sintonización los hace dispositivos sumamente atractivos y necesarios en redes de última generación.

1.6.1. Características deseables de un OADM sintonizable.

Dentro de las características con las que se desea que cumpla un OADM sintonizable se encuentran [3], [4], [5]:

- Alta velocidad de sintonización (Del orden de [ns]).
- Un excelente coeficiente de sintonización (Dependerá del mecanismo de sintonización).
- Amplio rango de sintonización ($\sim$ 20 [nm]).
- Bajas pérdidas de inserción (< 3.5 [dB]).
- Canales con ancho de banda estrecho.
- Bajo consumo de energía eléctrica.
- Independencia de la polarización.
- Bajas pérdidas por polarización (< 0.5 [dB]).
- Mecanismos de control simples y fáciles de manipular.
- Una forma de sintonización fácil, segura, estable y confiable.
- Sencillez y practicidad en su instalación.
- Estabilidad en el dispositivo.
- Dimensiones pequeñas.

1.6.2. Dispositivos involucrados en la creación de un OADM sintonizable.

Diversos tipos de filtros ópticos sintonizables pueden utilizarse como principio para diseñar e implementar OADM's reconfigurables de manera remota. Los filtros ópticos sintonizables tienen la capacidad de seleccionar, añadir y extraer un canal o un grupo de canales ópticos sin la necesidad de demultiplexar y multiplexar la señal óptica.

Entre los principales filtros ópticos sintonizables, dispositivos ópticos y materiales estudiados están [3]:

- Rejillas de Bragg (FBG).
- Filtros Fabry-Pérot Sintonizables basados en fibra óptica (FFP-TF, por sus siglas en inglés Fiber Fabry-Pérot Tunable Filter).
- Interferómetro Mach-Zehnder Asimétrico (AMZI, por sus siglas en inglés Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer).
- Filtro Acusto-óptico Sintonizable (AOTF, por sus siglas en inglés Acousto-Optic Tunable Filter).
- Filtro Electro-óptico Sintonizable (EOTF, por sus siglas en inglés Electro-Optic Tunable Filter) .
- Filtro Tenso-óptico Sintonizable (SOTF, por sus siglas en inglés Strain-Optic Tunable Filter).
- Arrayed Waveguide Grating (AWG).
- Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés Micro Electro Mechanical Systems).
- Cristal Líquido (LC, por sus siglas en inglés Liquid Crystal).

A continuación se muestra una tabla comparativa entre los diferentes tipos de filtros ópticos sintonizables que se han investigado con el propósito de desarrollar OADM's sintonizables. En dicha tabla se comparan características como:

- Rango de Sintonización.
- Velocidad de Sintonización.
- Independencia de la Polarización.
- Funcionalidad de Inserción/Extracción (ADD/DROP).
- Mecanismo de Sintonización.

Tabla 1.1. Tipos de filtros ópticos sintonizables [3].

Tipo	Rango de sintonización (nm)	Velocidad de sintonización	Independencia de la polarización	Funcionalidad Add/Drop	Mecanismo de sintonización
FFP	500	1 ms	✓	✗	PZT
FBG	10	1 ms	✓	✓	Temperatura
LC-FP	50	1 μs	✗	✗	Orientación de los cristales
Cascaded MZI	5	1 ms	✓	✗	Temperatura
AOTF	250	5 μs	✓	✓	Acusto-óptico

EOTF	15	50 ns	✓	✓	Electro-óptico
SOTF	24	50 ns	✓	✓	Tenso-óptico
Ring resonator	15	1 ms	✗	✓	Temperatura

De todas las tecnologías mencionadas anteriormente, sólo el EOTF y el SOTF proporcionan velocidades de sintonización por debajo de los microsegundos, característica necesaria para la rápida conmutación de paquetes en redes ópticas; sin olvidar la independencia a la polarización que presentan dichos dispositivos y su capacidad para extraer e insertar canales.

1.7. Estado del Arte.

El esquema básico de un OADM está constituido por cuatro puertos: un puerto de entrada, un puerto "DROP" (para extraer la información de una determinada longitud de onda), un puerto "ADD" (para insertar información a la misma longitud de onda de la que se extrajo información en el puerto "DROP") y un puerto de salida, tal como se muestra en la Figura 1.4.

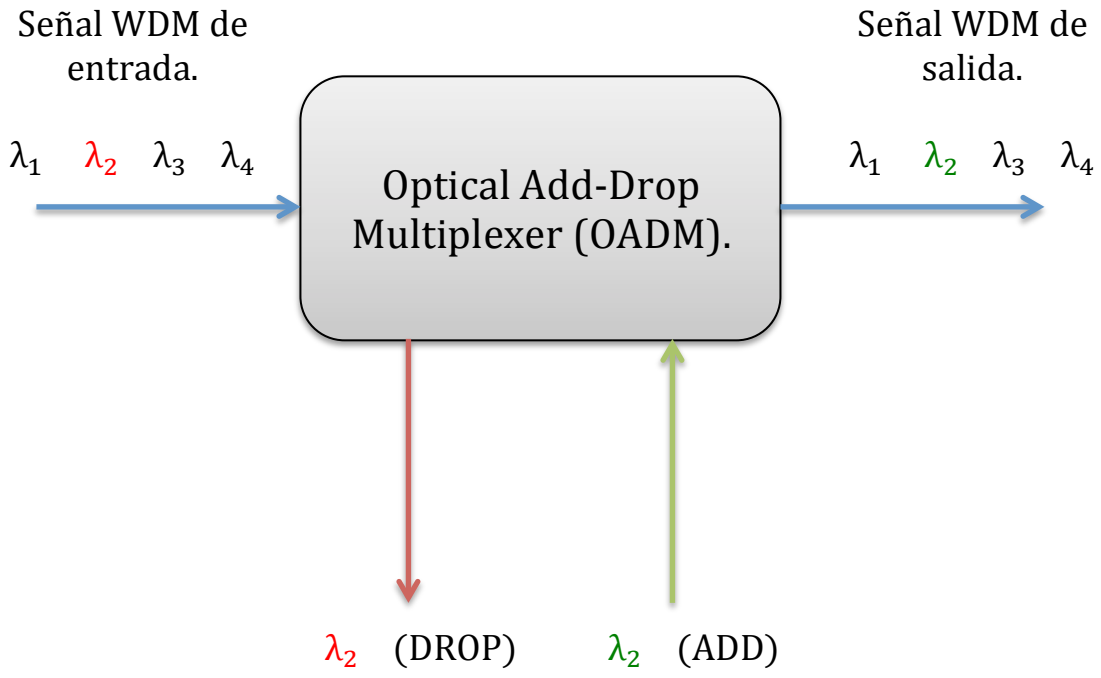


Figura 1.4. Esquema básico de un OADM.

Muchos esquemas han sido utilizados en el desarrollo de OADM's, los cuales contienen una variedad de componentes y dispositivos ópticos, entre los que resaltan, una amplia variedad de rejillas de Bragg, circuladores ópticos, interferómetros Mach-Zehnder, entre otros. A continuación se presentarán algunas de las diferentes técnicas de diseño utilizadas para el desarrollo de los OADM's sintonizables.

OADM basado en interferómetros Mach-Zehnder y rejillas de Bragg.

El principio de funcionamiento de una rejilla de Bragg puede emplearse en la construcción de un OADM. Sin embargo, si se utiliza una rejilla a base de fibra óptica, sólo se tendrán dos puertos, por lo cual resulta necesario utilizar dispositivos ópticos que tengan cuatro o más puertos como es el caso de acopladores direccionales, circuladores ópticos e interferómetros Mach-Zehnder [6].

Tomando en cuenta lo anterior, es posible construir un OADM usando dos rejillas de Bragg dentro de los dos brazos de un interferómetro Mach-Zehnder, tal como se muestra en la Figura 1.5.

Para un correcto funcionamiento de este dispositivo, es necesario utilizar rejillas de Bragg con características idénticas, es decir, misma longitud de onda de Bragg, mismo ancho espectral, misma capacidad de reflexión, etc., además de colocarlas exactamente a la misma distancia, es decir, entre tramos de fibra óptica de igual longitud [6].

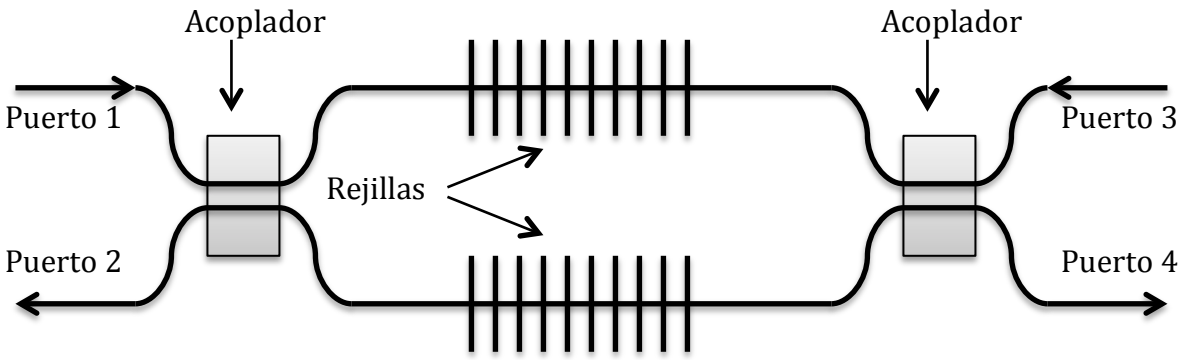


Figura 1.5. OADM implementado con un Interferómetro Mach-Zehnder y dos FBG.

Basándose en la Figura 1.5, la señal WDM (por sus siglas en inglés Wavelength Division Multiplexing) incide en el puerto 1 del dispositivo. El acoplador óptico a -3 [dB] permite que dicha señal se divida en dos señales iguales cuya potencia será la mitad de la que poseía la señal WDM incidente. Cada una de las señales es transmitida a la rejilla de Bragg correspondiente. Por otro lado, el canal óptico cuya longitud de onda central λ_c se encuentra dentro de la banda de rechazo de ambas rejillas se refleja totalmente. Dicho canal se extrae por el puerto 2 como consecuencia del desfasamiento de π radianes inducido por el acoplador a -3 [dB] durante el viaje completo de la señal a través del dispositivo. Los demás canales no se ven afectados por las rejillas de Bragg, por lo cual se transmiten por el puerto 4 debido al cambio de fase de π radianes producido por los acopladores.

Por otro lado, es posible insertar información a la longitud de onda λ_c a través del puerto 3, cumpliendo así con la funcionalidad de inserción/extracción de un OADM.

Si los procesos de inserción (ADD) y extracción (DROP) se realizan simultáneamente, es importante tener rejillas altamente reflectivas (cerca del 100% de reflexión), esto para minimizar el "cross-talk" [6].

En la práctica, el funcionamiento de este OADM puede desviarse del comportamiento ideal si [6]:

- El interferómetro MZ no se encuentra balanceado o equilibrado a la perfección, es decir, que no se presenten los mismos cambios de fase en la señal óptica en ambos brazos del interferómetro MZ.
- Los acopladores direccionales no son acopladores a -3 [dB] perfectos.
- La rejilla de Bragg no es 100% reflectiva.

OADM basado en circuladores ópticos con rejillas de Bragg.

Es posible construir un OADM utilizando circuladores ópticos en combinación con una o más rejillas de Bragg (FBG). El diseño de un OADM conformado por los dispositivos antes mencionados resulta sumamente sencillo. Éste se logra conectando los dos extremos de la FBG a dos circuladores ópticos de tres puertos cada uno, tal como se muestra en la Figura 1.6. El funcionamiento de este prototipo se describe a continuación:
Se hace incidir una señal WDM en el puerto P1 del circulador óptico 1, la cual pasará al puerto P2 para llegar a la FBG. La longitud de onda reflejada por la FBG (λ_5) aparecerá en el puerto P3 de dicho circulador (DROP), mientras que las demás longitudes de onda pasarán intactas por la FBG hasta llegar al puerto P2 del circulador óptico 2. Es posible insertar información a la longitud de onda (λ_5) en el puerto P1 del circulador óptico 2 (ADD), esta señal óptica pasará al puerto P2 del mismo y al ser reflejada por la FBG saldrá por el puerto P3 junto con las demás longitudes de onda de la señal WDM [6], [7].

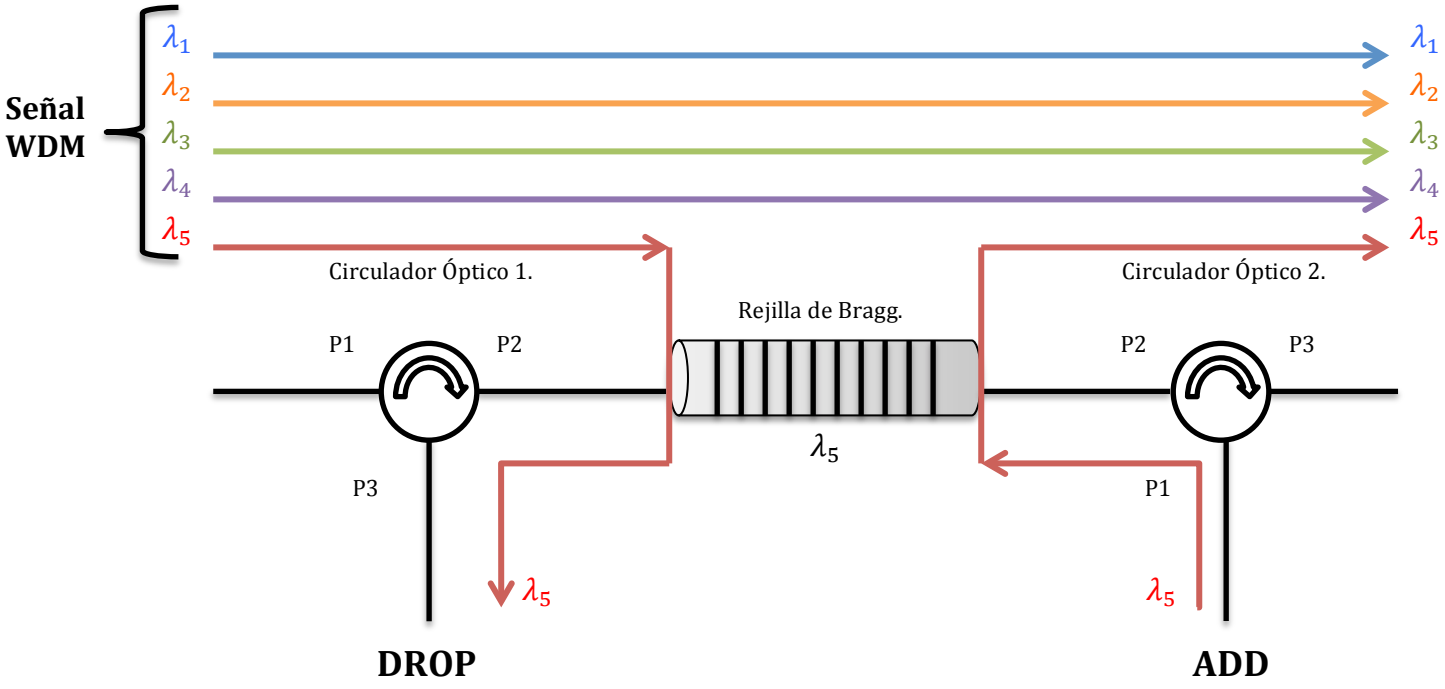


Figura 1.6. OADM basado en dos circuladores ópticos y una rejilla de Bragg.

Entre la variedad de OADM's desarrollados hasta el momento, aquellos que permiten sintonizar la longitud de onda del canal que va a ser extraído, resultan más convenientes y atractivos para los sistemas WDM y las redes ópticas de última generación, en las cuales suele extraerse más de un canal en cada nodo.

Algunas características que hacen que los OADM's sintonizables sean sumamente utilizados en sistemas WDM son:

- Aumenta el tiempo de vida de la red óptica sobre la cual se trabaja.
- Permite o garantiza el acceso a todas las longitudes de onda de las señales WDM.
- Provee flexibilidad y capacidad de reconfiguración a la red.
- Satisface requerimientos de reconfiguración.
- Mejora la protección de la red.
- Disminuye considerablemente los costos.
- Genera un gran avance y desarrollo en el sector de las telecomunicaciones.

A continuación se presentarán algunos de los diferentes experimentos y desarrollos que se han realizado con el propósito de desarrollar OADM's sintonizables, los cuales utilizan diferentes técnicas de sintonización y presentan diferentes características físicas, funcionales y ópticas.

OADM sintonizable basado en dos AWG y un arreglo de amplificadores entre ellos.

Este dispositivo está compuesto por dos demultiplexores AWG idénticos, los cuales se fabricaron usando guías de onda de InGaAsP sobre un sustrato de fosfuro de indio, InP. Estas guías de onda se encuentran conectadas en serie de tal manera que un arreglo de amplificadores ópticos de semiconductor (SOA's por sus siglas en inglés Semiconductor Optical Amplifiers) conecta cada puerto de salida de un AWG con su correspondiente puerto de entrada del otro AWG [6]. En la Figura 1.7 se muestra el esquema de este dispositivo.

La primera AWG separa los canales WDM incidentes y los dirige a diferentes puertos.
La ganancia de los amplificadores se ajusta de tal manera que sólo el canal que va a ser extraído experimenta amplificación cuando pasa a través del dispositivo, mientras que los otros canales se atenúan considerablemente debido a diferentes tipos de pérdidas, entre las cuales se encuentran las pérdidas de inserción. La segunda AWG multiplexa todos los canales, de modo que la salida provenga de un solo puerto, pero esta salida esta compuesta principalmente del canal que se intenta extraer, el cual fue previamente amplificado, mientras que los canales restantes fueron atenuados de manera considerable. La longitud de onda del canal que deseamos extraer se puede cambiar electrónicamente si modificamos las corrientes inyectadas o introducidas al arreglo de amplificadores. Los canales pueden ser añadidos usando acopladores de unión en Y en el extremo de la entrada de cada amplificador colocado después de la segunda AWG, es decir, una vez que se ha extraído la longitud de onda deseada [6].

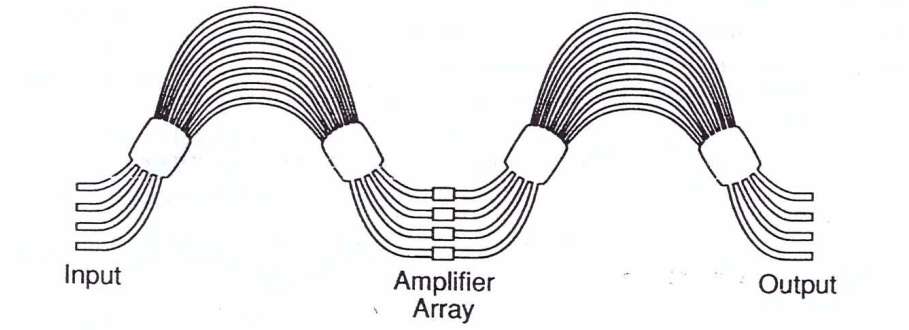


Figura 1. 7. Dispositivo Sintonizable Extractor de Canal (Channel-Dropping) hecho de 2 AWG's con un arreglo de amplificadores entre ellos [6].

OADM sintonizable mediante el uso de interferómetros Mach-Zehnder.

El uso de la tecnología sílice-sobre-silicio también permite sintonizar un OADM. La idea básica se encuentra dentro del concepto de los filtros Mach-Zehnder (MZ) y es similar al esquema mostrado en la Figura 1.8. Éste consiste en una serie de varios interferómetros Mach-Zehnder asimétricos en cascada con un calentador de cromo incorporado en uno de los brazos de cada interferómetro MZ [6].

El cambio de fase relativo entre los dos brazos del interferómetro Mach-Zehnder puede alterarse si se cambia el índice de refracción en uno de los brazos. Este cambio de índice de refracción se consigue variando la temperatura de uno de los brazos del interferómetro a través de un calentador, en este caso, de cromo. Dicho cambio permite sintonizar la longitud de onda del canal que debe ser extraído o añadido por el dispositivo, según sea el caso [6].

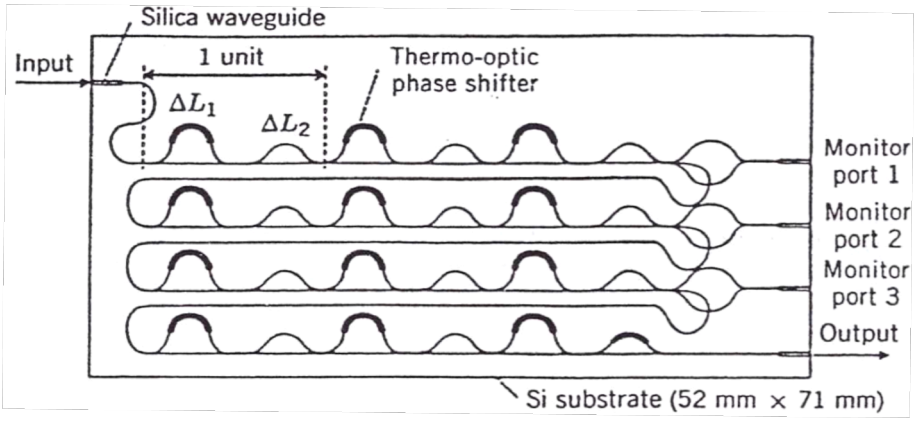


Figura 1.8. Interferómetros Mach-Zehnder asimétricos en cascada [6].

El dispositivo de la Figura 1.8 está conformado por 24 interferómetros Mach-Zehnder asimétricos conectados en cascada. Un calentador de cromo es depositado en uno de los brazos de algunos interferómetros con la finalidad de proveer un control termo-óptico de la fase óptica.

La principal ventaja de este dispositivo radica en que sus características de dispersión pueden controlarse cambiando la longitud de los brazos y el número de interferómetros conectados. La sintonización se lleva a cabo cambiando el índice de refracción en uno de los brazos de cada interferómetro (mediante cambios en la temperatura, es por esto que se colocan los calentadores de cromo). Debido a que el mecanismo de sintonización es térmico, la velocidad de sintonización se encuentra alrededor de $\sim 1\ [\mathrm{ms}]$.

Cabe mencionar que la sintonización podría ser mucho más rápida si se utilizaran guías de onda de niobato de litio $(\mathrm{LiNbO_3})$, debido a que la longitud de la trayectoria óptica de ambos brazos del interferómetro puede ser cambiada mediante el cambio electrónico del índice de refracción del material. Dicho dispositivo resulta muy similar al modulador de $\mathrm{LiNbO_3}$, con la diferencia de que el interferómetro Mach-Zehnder está desbalanceado debido a que sus brazos tienen diferentes longitudes. Otra alternativa es el hacer uso de guías de onda de materiales semiconductores montadas en substratos de arseniuro de galio (GaAs) ó InP. Dichos dispositivos Mach-Zehnder pueden implementarse de manera compacta (con un tamaño de $\sim 1\ [\mathrm{mm}]$ o menos) y pueden acoplarse con otros componentes, por ejemplo, con amplificadores ópticos [6].

OADM sintonizable basado en rejillas de Bragg de polímeros termo-ópticos de tecnología planar, con amplio rango de sintonización.

En Abril de 1999, investigadores Miembros del IEEE publicaron el desarrollo de un OADM sintonizable, el cual se logró mediante la combinación de Rejillas de Bragg hechas de polímeros planares (las cuales se sintonizan térmicamente), con circuladores ópticos.

En lo que respecta a las rejillas de Bragg, poseen una reflexión mejor que 45 [dB], es decir, en el modo de transmisión, la longitud de onda de Bragg presenta una potencia 45 [dB] menor a la que presentan los otros canales, mientras que en el modo de reflexión, la longitud de onda de Bragg presenta una potencia 45 [dB] mayor a la obtenida en los demás canales [8].

Este tipo de OADM's presentan un factor de utilización de ancho de banda (BWU , por sus siglas en inglés Bandwidth Utilization) muy alto, del orden de 0.92, con una separación mínima entre canales de 75 [GHz]. Estos dispositivos son sintonizables a una tasa de -0.256 $[\mathrm{nm}/^{\circ}\mathrm{C}]$. Cabe resaltar que se demostró la sintonización en un rango de 20 [nm] con un solo dispositivo [8].
La gran variación del índice de refracción que presentan los polímeros ópticos a través de cambios en su temperatura permite la sintonización térmica del canal óptico del filtro a través de una amplia gama de longitudes de onda, una funcionalidad capaz de permitir una revolución arquitectónica en la industria de las telecomunicaciones.

Este dispositivo se muestra en la Figura 1.9.

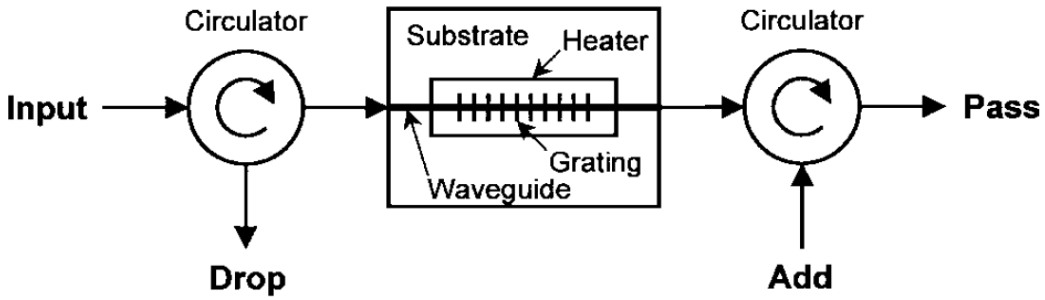


Figura 1.9. Esquema del OADM sintonizable. [8]

Este tipo de OADM's ofrecen pérdidas de inserción muy bajas y uniformes para las trayectorias de los canales añadidos o extraídos (< 2 [dB]), una alta eficiencia al extraer el canal reflejado mediante el uso de circuladores con alto aislamiento (> 60 [dB]), y bajas reflexiones, fuera de la banda, en el puerto de extracción (DROP) debido al uso de rejillas apodizadas, las cuales son simétricas, tienen una resistencia uniforme a través de las capas del núcleo y del revestimiento, y tienen un índice de refracción uniforme en corriente continua. Las pérdidas totales de inserción del OADM mostrado en la Figura 1.9 son 1.8 [dB], mientras que las pérdidas debido a la polarización son menores a 0.1 [dB].

La Figura 1.10 (a) muestra el espectro en transmisión obtenido en el puerto de paso cuando se sintoniza el filtro entre 20 [°C] y 100 [°C], obteniendo un rango de sintonización de 20 [nm] con un solo OADM sintonizable. La sintonización sobre rangos más amplios puede obtenerse colocando en cascada varios de estos componentes o integrando múltiples rejillas en un solo "chip".

La Figura 1.10 (b) muestra cómo la longitud de onda de Bragg de la rejilla es función de la temperatura que posee dicho dispositivo. El grado de linealidad de la longitud de onda sintonizada sobre el rango de temperatura investigado es bastante alto.

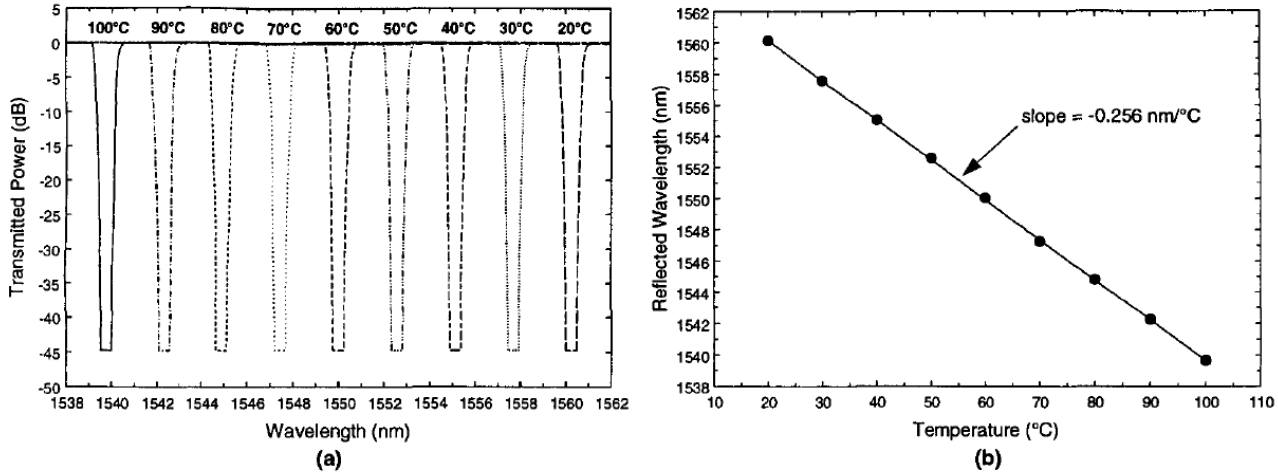


Figura 1.10. Resultados experimentales de las pruebas de temperatura realizadas al OADM sintonizable bajo estudio. (a) Espectro en transmisión del OADM sintonizable cuando éste se sintoniza en un rango de temperatura de 20 °C a 100 °C. (b) Canal reflejado vs. Temperatura. [8]

OADM rápidamente sintonizable por tensión estática inducida a través de rejillas de $LiNbO_3$.

En Enero de 2003, investigadores Miembros del IEEE publicaron el desarrollo de un OADM sintonizable.

Este OADM sintonizable (ver Figura 1.11) está conformado por dos guías de onda de entrada, un divisor de polarización (PBS, por sus siglas en inglés Polarization Beam Splitter), dos secciones de conversión de polarización y sintonización electro-óptica de longitud de onda, un segundo PBS y dos guías de onda de salida. Las guías de onda, que son de modo único para ambas polarizaciones, TE y TM, se fabricaron sobre un sustrato de niobato de litio ($LiNbO_3$) mediante difusión de titanio (Ti) [4], [9].

Por otro lado, la aplicación de una diferencia de potencial genera la sintonización del dispositivo al cambiar la birrefringencia de las guías de onda y por lo tanto, la longitud de onda óptica a la que se produce la conversión de polarización más eficiente.

Como el método de sintonización de este dispositivo es eléctrico, se obtuvo un coeficiente de sintonización de 0.1 [nm/V] con un rango máximo de 24 [nm]. Se consiguió una velocidad de sintonización de 50 [ns], la cual corresponde a una tasa de 0.128 [nm/ns]. El aislamiento de canal es de 24 [dB]. Las pérdidas de inserción entre fibra y fibra son < 5.4 [dB], además de que las pérdidas por polarización (PDL, por sus siglas en inglés Polarization Dependent Loss) son de 0.24 [dB] para ambos puertos. El FWHM (por sus siglas en inglés Full Width Half Maximum) a -3 [dB] fue de 2.3 [nm] [4].

El esquema de este dispositivo se muestra en la Figura 1.11.

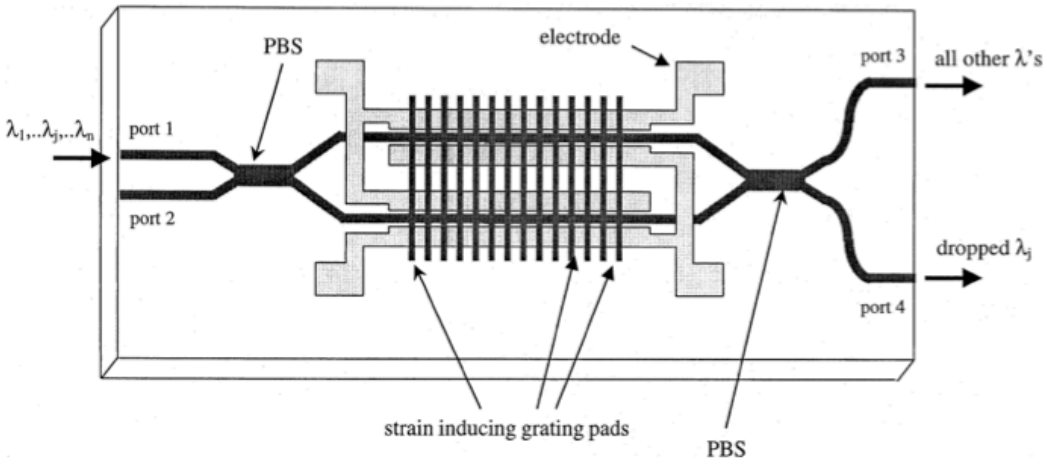


Figura 1.11. OADM sintonizable mediante mecanismos electro-ópticos basado en guías de onda de $LiNbO_3$. [4]

La tensión que inducen las películas del dieléctrico colocadas en la superficie de las guías de onda, en la sección media de las mismas, promueven la conversión de la polarización (a través del acoplamiento de fases "phase matching"), mientras que los electrodos generan el voltaje de sintonización. Todas las guías de onda, excepto las porciones de la mitad de cada PBS, son de modo único para las polarizaciones TE y TM [4], [9].

El funcionamiento de este dispositivo se explica a continuación:

1. La señal óptica entra por el puerto 1, el PBS dirige la polarización TM hacia la guía de onda superior, mientras que la polarización TE es dirigida a la guía de onda inferior, tal como se muestra en la Figura 1.12.

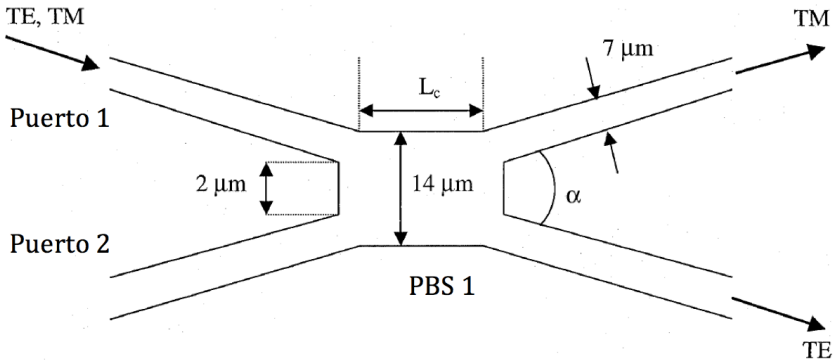


Figura 1.12. Dimensiones físicas de los PBS utilizados en el OADM sintonizable. [4]

2. Las componentes de polarización TE y TM dentro de las guías de onda son sometidas a una longitud de onda dependiente de la conversión de polarización (PC, por sus siglas en inglés Polarization Conversion) a través del efecto de tensión óptica.
3. La conversión de polarización entre $\mathrm{TE} \leftrightarrow \mathrm{TM}$ es más eficiente a la longitud de onda λ_j, para la cual se satisface la condición de acoplamiento de fases (si se cumple dicha condición, sus polarizaciones rotaran $\pi/2$, por lo cual la polarización TM se convertirá en TE y viceversa).
4. Para cada polarización, sólo las longitudes de onda cercanas a λ_j salen por el puerto 4 del filtro (DROP), mientras que las demás longitudes de onda salen a través del puerto 3.
5. El puerto 2 de la entrada puede ser utilizado para añadir (ADD) la misma longitud de onda λ_j, la cual experimenta una conversión de polarización y recombinación con las otras señales, emergiendo así por el puerto 3.
6. La sintonización de las longitudes de onda en el OADM se lleva a cabo aplicando una diferencia de potencial a través de los electrodos, lo cual cambia la birrefringencia de las guías de onda, y por lo tanto, la longitud de onda λ_j para la cual ocurre el acoplamiento de fases.
7. El cambio en el valor de la birrefringencia es inducido electro-ópticamente a través del efecto Pockels.

La gráfica de la Figura 1.13 relaciona la longitud de onda obtenida en [nm] según el voltaje aplicado al OADM en [V] para dos diferentes longitudes de separación entre los electrodos.

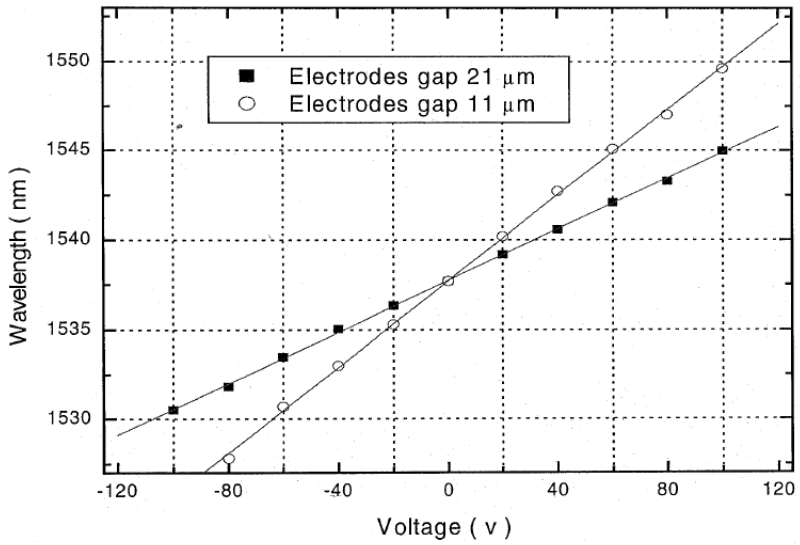


Figura 1.13. Longitud de onda sintonizada en [nm] vs. Voltaje aplicado al dispositivo en [V]. [4]

OADM sintonizable basado en filtros Fabry-Pérot sintonizables para redes WDM bidireccionales.

En Octubre de 2004, investigadores del Instituto de Ingeniería Electro-Óptica de la Universidad Nacional de Chiao-Tung y la Universidad Yuan Ze en Taiwán publicaron el desarrollo de un OADM sintonizable basado en la utilización y los principios de los filtros sintonizables Fabry- Pérot basados en fibra óptica (FFP-TF's).

El espaciamiento entre canales y el número de éstos en el OADM sintonizable depende directamente del rango de sintonización y ancho de banda del FFP-TF.

El FFP-TF es un dispositivo totalmente hecho de fibra óptica, el cual posee un amplio rango de sintonización (>100 [nm]), bajas pérdidas de inserción (<2 [dB]) y bajas pérdidas por polarización (0.1 [dB]). Además, el FFP-TF proporciona un filtro altamente selectivo (1 [MHz]), lo cual lo hace un dispositivo sumamente atractivo para redes DWDM (por sus siglas en inglés Dense Wavelength Division Multiplexing) [5].

El OADM de la Figura 1.14 está conformado por dos FFP-TF, dos conmutadores ópticos 1 X 2 (SW), dos circuladores ópticos de cuatro puertos (C) y dos acopladores 1 X 2. Primero, se tienen multiplexadas N longitudes de onda ($\lambda_1\ \lambda_3\ \cdots\ \lambda_{2N+1}$), las cuales serán enviadas al FFP-TF a través del circulador óptico. Después, únicamente el canal óptico (λ_{2N+1}) podrá pasar a través del FFP-TF. Los otros canales ópticos serán reflejados por el FFP-TF y enviados al siguiente puerto del circulador óptico. Los canales ópticos que salen del

circulador óptico son enviados al acoplador 1 X 2 y multiplexados con el canal óptico que se desea añadir (λ_{2N+1}). Finalmente, los canales ópticos dejan el OADM a través del otro circulador óptico de cuatro puertos [5].

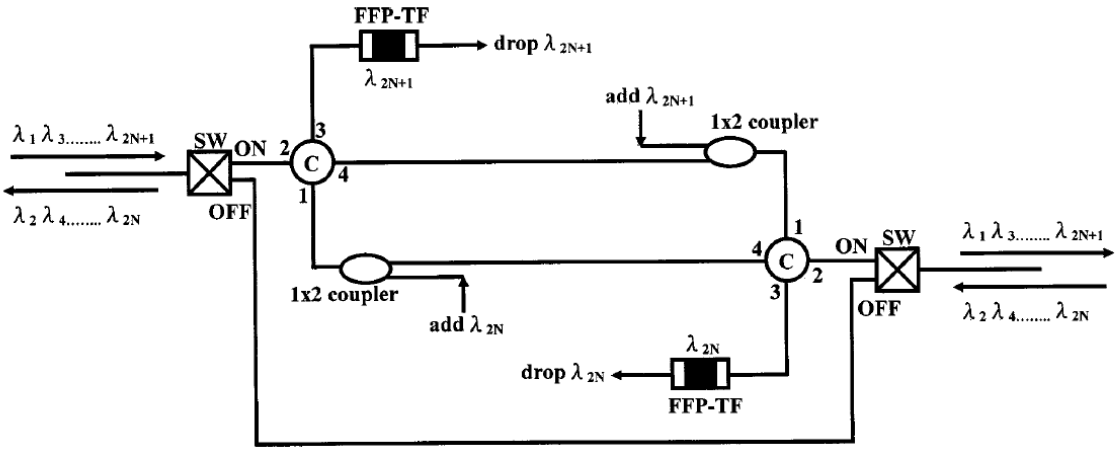


Figura 1.14. OADM sintonizable basado en un filtro sintonizable Fabry-Pérot. [5]

Para proteger a todos los canales ópticos que operan con normalidad cuando el OADM deja de funcionar correctamente o falla, los conmutadores ópticos 1 X 2 son utilizados para conmutar el estado del OADM sintonizable, ya sea en encendido (ON) o en apagado (OFF).

La longitud central del FFP-TF (Dispositivo de la empresa Micron Optics, Inc) es sintonizada mediante el voltaje aplicado al transductor piezoeléctrico. El rango de voltaje de operación del FFP-TF va de 0 [V] a 11.2 [V], pudiendo seleccionar un rango de sintonización que va de los 0 [nm] a los 49.8 [nm]. Las pérdidas de inserción del FFP-TF son de 1.9 [dB]. El rango espectral libre y el ancho de banda a -3 [dB] del FFP-TF son de 49.8 [nm] y 0.4 [nm] respectivamente [5].

La velocidad o tiempo de sintonización es de 5 [ms] aproximadamente, con una tasa de 10 [nm/ns]. Las pérdidas por polarización del FFP-TF y del circulador óptico están por debajo de los 0.22 [dB] y 0.04 [dB] respectivamente. Cabe mencionar que el mínimo espaciamiento entre canales del OADM sintonizable depende de la finesa del FFP-TF.

OADM sintonizable transparente y rentable basado en FBG's para redes DWDM.

En Julio de 2001 investigadores del Instituto de Telecomunicaciones de la Universidad de Aveiro en Portugal presentaron un OADM sintonizable basado en rejillas de Bragg, donde la información del canal de extracción (DROP) es obtenida usando un circulador óptico, mientras que el canal de inserción (ADD) es incorporado a través de un acoplador óptico pasivo. Este tipo de OADM's son transparentes por diseño y sumamente rentables debido al uso de un solo circulador óptico. Las capacidades de sintonización de longitud de onda del OADM están relacionadas con las capacidades que poseen las rejillas de Bragg para cambiar su longitud de onda de Bragg.

Por otro lado, existen dos principales técnicas de sintonización, la primera radica en cambiar la longitud de onda de Bragg de la rejilla a través de la variación o modificación del valor del índice de refracción de la fibra, o bien, se puede cambiar el valor del periodo de la rejilla. Estas variaciones pueden inducirse dinámicamente ya sea por temperatura o por estrés mecánico [10].

Sin embargo, este OADM utiliza un método híbrido (ver Figura 1.15), el cual está basado en un estrés térmico, mejorando térmicamente la actuación y el desempeño de la rejilla de Bragg, al momento de sintonizar su longitud de onda central. Dicha sintonización térmica mejorada emplea una configuración diferente para amplificar el cambio de longitud de onda inducido térmicamente mediante el uso de un material de expansión térmica positiva como apoyo a la rejilla de Bragg [10].

Esta técnica de sintonización híbrida permite incrementar el rango de sintonización manteniendo las ventajas de la sintonización térmica, por ejemplo, para la tercera ventana de transmisión, $\lambda = 1550\ [\mathrm{nm}]$, el coeficiente de sintonización es 4.11 $[\mathrm{pm}/^{\circ}\mathrm{C}]$, es decir, por cada unidad de temperatura en ℃ se obtendrá un desplazamiento en longitud de onda de 4.11 [pm] [10].

La rejilla utilizada en este trabajo fue manufacturada mediante la iluminación de una fibra óptica expuesta a una máscara de fase especialmente modulada con luz UV (248 [nm]), el haz de escritura fue originado por un láser de excímero KrF. La fibra óptica (SMF) se mantuvo previamente bajo una atmósfera de hidrógeno a alta presión, esto con la finalidad de mejorar su foto sensibilidad debido a la difusión de hidrógeno en la matriz de vidrio. Este proceso es fiable y da excelentes resultados en la reducción del tiempo de la escritura (grabado) de la rejilla [10].

El aumento de la temperatura y el estrés aplicado sobre la rejilla de Bragg, resulta en la disminución de la reflectividad y en el aumento del ancho de banda, sin embrago, estas alteraciones en el funcionamiento de la FBG no afectan significativamente el funcionamiento del OADM.

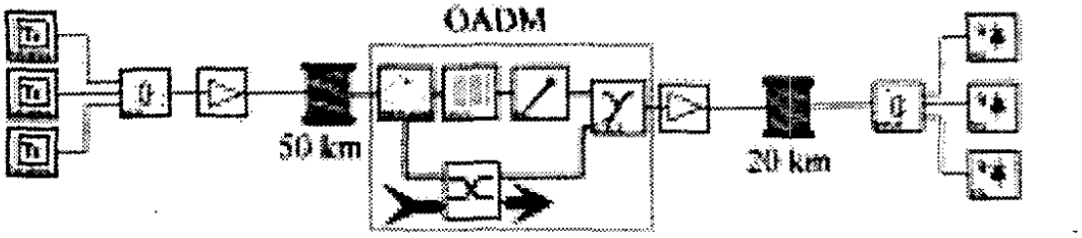


Figura 1.15. Esquema del OADM sintonizable y la transmisión experimental en una red DWDM [10].

OADM sintonizable basado en un interferómetro Mach-Zehnder sobre una guía de onda de silicio y con revestimiento de cristal líquido ferro-eléctrico.

En noviembre de 2014, investigadores miembros del IEEE propusieron el desarrollo de un OADM sintonizable basado en un interferómetro Mach-Zehnder sobre una guía de onda de silicio, el cual posee una estructura de rejillas y un revestimiento de cristal líquido ferro-eléctrico (FLC por sus siglas en inglés Ferroelectric Liquid Crystal). El material FLC provoca un cambio en las condiciones de Bragg para la propagación de la luz en una guía de onda de acuerdo con la dirección del campo eléctrico aplicado a este [11].

En la Figura 1. 16 se muestra el esquema del OADM sintonizable propuesto.

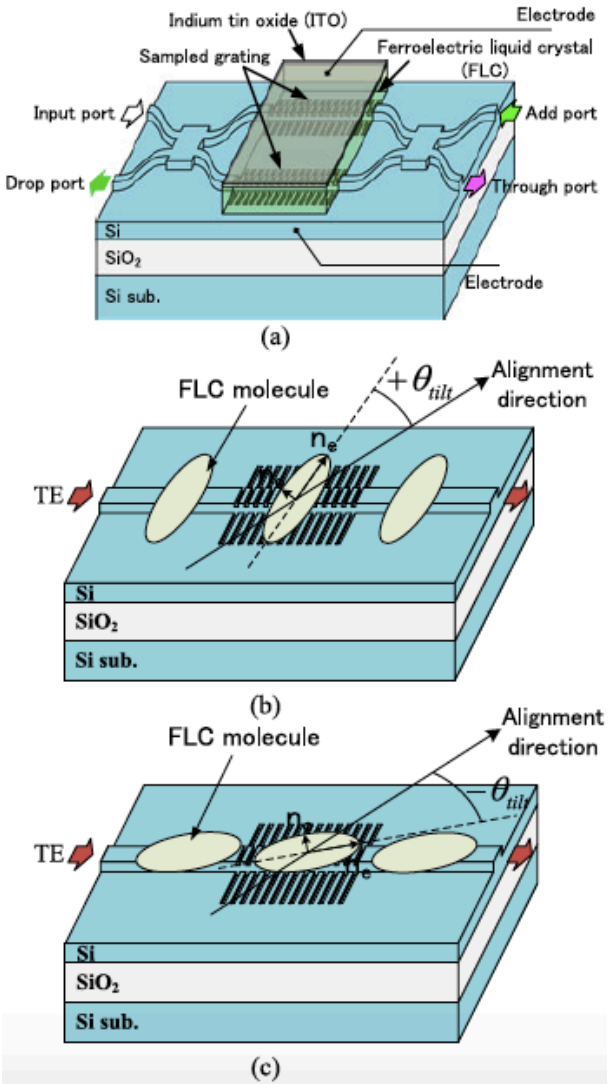


Figura 1.16. Esquemas del OADM sintonizable. (a) Diagrama del OADM sintonizable propuesto el cual utiliza una rejilla sobre una guía de onda de silicio con un revestimiento de material FLC. Moléculas del material FLC sobre las guías de onda de silicio: (b) voltaje positivo aplicado, y (c) voltaje negativo aplicado [11].

En lo que respecta a su principio de operación, la señal WDM se introduce en el puerto de entrada (Input port) para después dividirse en dos por un acoplador de interferencia multimodal (MMI por sus siglas en inglés Multimode Interference coupler), transmitiéndose así por ambos brazos de la guía de onda. El canal óptico cuya longitud de onda es reflejada por la rejilla saldrá por el puerto de extracción (Drop port), mientras que los demás canales que pasan a través de la rejilla saldrán por el puerto de transmisión (Through port). Las nuevas señales ópticas podrán ser introducidas por el puerto de inserción (Add port) a la misma longitud de onda del canal que previamente se extrajo.

Por otro lado, en la Figura 1.17 se muestra la sección transversal de uno de los brazos de guía de onda. Cabe mencionar que el cambio en el índice de refracción efectivo del material FLC depende de la polaridad del voltaje que se le aplique al dispositivo. En lo que respecta al proceso de sintonización, se aplica un voltaje de DC entre el electrodo ITO (electrodo de óxido de indio y estaño, por sus siglas en inglés Indium Tin Oxide Electrode) superior y la capa guía de silicio, la cual se utiliza como una referencia de tierra. Además, la orientación molecular del material FLC es bi-estable y con un ángulo de inclinación $\pm\theta_{tilt}$ a partir de la orientación molecular inicial la cual depende de la polaridad del voltaje aplicado [11].

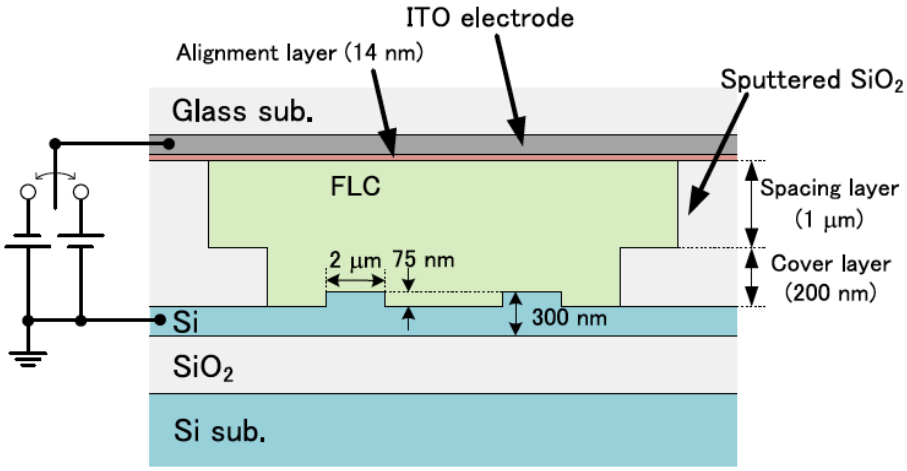


Figura 1.17. Sección transversal de la guía de onda de silicio con el revestimiento de material FLC [11].

Debido a la anisotropía óptica de las moléculas del material FLC, el índice de refracción de la luz polarizada en el modo transversal eléctrico (TE por sus siglas en inglés Transverse-Electric) en la guía de onda cambia de acuerdo a la inclinación de las moléculas de dicho material. Esto provoca un cambio en la constante de propagación de la guía de onda, dando como resultado la conmutación bi-estable de la longitud de onda de Bragg de la rejilla.

En la Figura 1.18 se muestra la estructura de la rejilla, cuya profundidad es de 10 [nm], ya que una profundidad pequeña, es decir, casi superficial proporciona características de banda estrecha, que son sumamente importantes en las redes WDM.

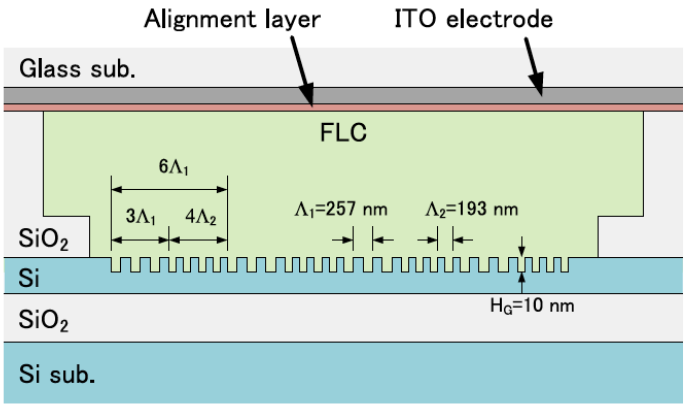


Figura 1.18. Sección transversal de la rejilla del OADM sintonizable [11].

En la Figura 1.19 se muestran los resultados de las pruebas realizadas sobre la extracción e inserción de la longitud de onda del canal óptico sintonizado por el dispositivo propuesto.

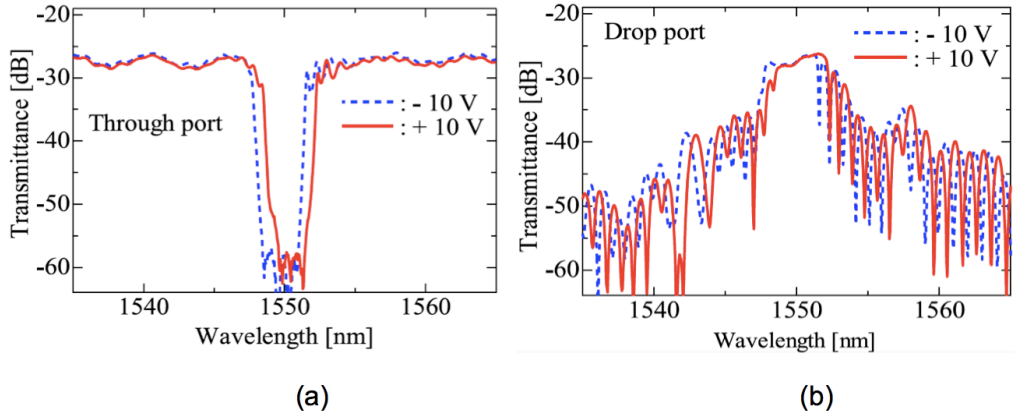


Figura 1.19. Longitud de onda en [nm] vs. Transmitancia en [dB]. (a) Espectro óptico en el puerto de transmisión (Through port). (b) Espectro óptico en el puerto de extracción (Drop port) [11].

Experimentalmente el ancho espectral de la banda de rechazo en el puerto de transmisión (Through port) fue de aproximadamente 3.6 [nm] (400 [GHz]), mientras que el cambio en la longitud de onda de Bragg o la longitud de onda central de la banda de rechazo fue de 0.7 [nm] al momento de invertir la polaridad del voltaje aplicado a dicho dispositivo. La razón de extinción en el puerto de transmisión (Through port) fue de 24.5 [dB], y en el puerto de extracción (Drop port) de 24.4 [dB]. El desarrollo experimental se realizo a la longitud de onda, $\lambda = 1551.6\ [\mathrm{nm}]$. Finalmente, el rango de temperatura de operación de este dispositivo estaría limitado por la temperatura de cristalización $(-10\ [℃])$ y la temperatura de transición de fase $(61\ [℃])$ [11].

OADM de cuatro canales basado en rejillas de Bragg con un set de control de temperatura estable e inteligente.

En 2004, investigadores del Instituto de Óptica Moderna de la Universidad de Nankai y de la "Tianjin Optical and Electrical Communication Technique Corporation Limited", en Tianjin, China, implementaron un OADM de cuatro canales basado en rejillas de Bragg con un set de control de temperatura, lo cual soluciona el conflicto entre la capacidad de sintonización y la estabilidad a la temperatura de la longitud de onda central.

Se utilizó una viga en voladizo[1] como medio de sintonización. Dentro del rango de temperatura de $-20\ [℃] \sim +60\ [℃]$, el cambio en la longitud de onda central fue de $0.004\ [\mathrm{nm}/℃]$ mientras que la estabilidad térmica obtenida es 6.75 veces mayor a la que se tenía sin control de temperatura. El espaciamiento entre longitudes de onda fue de 0.8 [nm], de acuerdo a la recomendación ITU-T G.692, mientras que el aislamiento entre canal adyacente obtenido fue más de 35 [dB] [13].

El desempeño y características de un OADM dependen de los dispositivos utilizados para su construcción. Por ejemplo, un OADM basado en rejillas de Bragg presenta bajas pérdidas de inserción y alto aislamiento entre canales. Sin embargo, es difícil fabricar rejillas de Bragg con la longitud de onda exacta de acuerdo con la recomendación ITU-T. Existe otro problema con los OADM's basados en rejillas de Bragg, la estabilidad térmica, ya que la longitud de onda central de las rejillas cambiará debido a las variaciones de temperatura (el cambio en la longitud de onda central de una rejilla de Bragg en fibra óptica desnuda debido a la temperatura es de aproximadamente $0.01\ [\mathrm{nm}/℃]$.). Una solución ante este problema es utilizar materiales con diferentes coeficientes de expansión térmica para cubrir la rejilla de Bragg, sin embargo, este método sólo es apto para rejillas de Bragg fijas, es decir, sin la capacidad de sintonizar su longitud de onda central.

Es por esto que diseñaron un set de control de temperatura inteligente, especialmente para rejillas de Bragg sintonizadas mediante el uso de una viga en voladizo. El esquema de este dispositivo se muestra en la Figura 1.20.

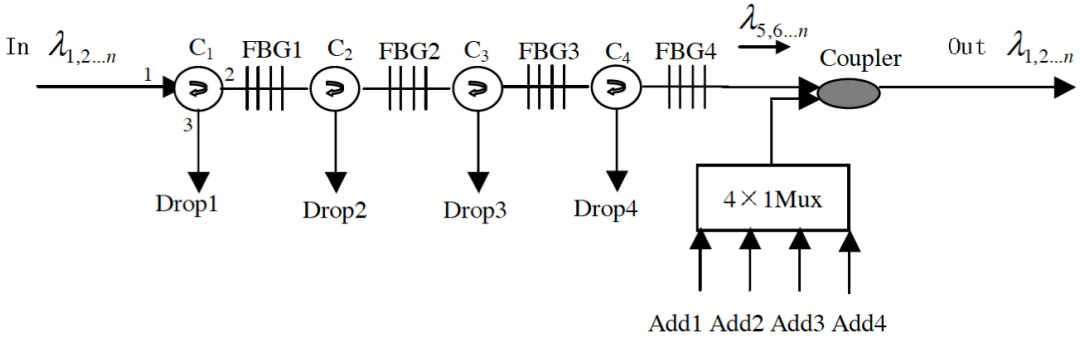


Figura 1.20. Esquema del OADM de cuatro puertos basado en rejillas de Bragg [13].

[1] Una viga en voladizo es aquella estructura que se caracteriza por estar apoyada en sólo uno de sus extremos mediante un empotramiento.

El OADM está conformado por 4 circuladores de tres puertos, 4 rejillas de Bragg con sets de temperatura estable, un multiplexor 4 x 1 y dos acopladores 2 x 1. El circulador C1 transmite la señal óptica de entrada proveniente del puerto 1 al puerto 2, para después transmitir dicha señal a la FBG1; la longitud de onda reflejada por la FBG1, λ_1 será extraída en el puerto 3 del circulador C1. Las longitudes de onda restantes pasarán a través de dicha rejilla de Bragg. De manera similar, las longitudes de onda λ_2, λ_3 y λ_4 serán extraídas por el resto de los circuladores ópticos y las rejillas de Bragg respectivamente. Es posible insertar las mismas longitudes de onda que previamente se extrajeron a través del multiplexor y el acoplador.

Por otro lado, la rejilla de Bragg se adhirió a la viga en voladizo con la finalidad de sintonizar su longitud de onda central aplicando presión a la viga. En este caso, la estabilidad térmica de la rejilla de Bragg dependerá tanto de la fibra óptica como de la viga. Esto debido a que el material del cual está hecha la viga podría sufrir una expansión térmica, lo cual modificaría sus dimensiones y por lo tanto aplicaría involuntariamente tensión sobre la rejilla. En lo que respecta a esta investigación, seleccionaron una viga hecha de una aleación de indio y acero, debido a la elasticidad y estabilidad térmica de este material. El set de temperatura estable se colocó a un lado de la viga en voladizo, lo cual limita el rango de variación de la temperatura en aproximadamente 11.8 $[℃]$ cuando la temperatura ambiente se encuentra dentro del rango de $-20\ [℃] \sim +\ 60\ [℃]$.

El set de temperatura estable está constituido por una parte de calentamiento, un sensor y un circuito de auto-control. El punto de control de la temperatura se ajusta a través de una resistencia variable. Para una determinada temperatura X, cuando la temperatura ambiente sea menor que X, la temperatura del set de control será igual a X de manera constante. Por otro lado, cuando la temperatura ambiente sea mayor que X, la temperatura del set de control será igual a la temperatura ambiente. Las bondades de este set consisten en dimensiones pequeñas, aproximadamente 50 [mm] X 18 [mm] X 1.5 [mm], y bajo consumo de potencia, el cual es menor a 3 [W] [13].

La variación de la longitud de onda central de las rejillas de Bragg debido a la temperatura ambiental se muestra en la Figura 1.21, con una longitud de onda inicial de 1550.92 [nm]. La curva 2 representa la variación de la longitud de onda de las rejillas sin el set de compensación de temperatura. Se observa que dicha variación tiene un comportamiento lineal respecto a la temperatura ambiente. En el rango de temperatura de $-20\ [℃] \sim +\ 60\ [℃]$, el cambio total en la longitud de onda central fue de 2.16 [nm] mientras que el cambio promedio fue de 0.027 $[\mathrm{nm}/℃]$. La curva 1 representa la variación en la longitud de onda de las rejillas con el set de compensación de temperatura. Cuando la temperatura es menor a $50\ [℃]$, el cambio en la longitud de onda central es aproximadamente igual a cero. Cuando la temperatura es mayor a $50\ [℃]$, el cambio en la longitud de onda debido a la temperatura ambiente comienza a tener un comportamiento lineal. El cambio total en la longitud de onda central fue de 0.31 [nm] con un cambio promedio de 0.004 $[\mathrm{nm}/℃]$ [13].

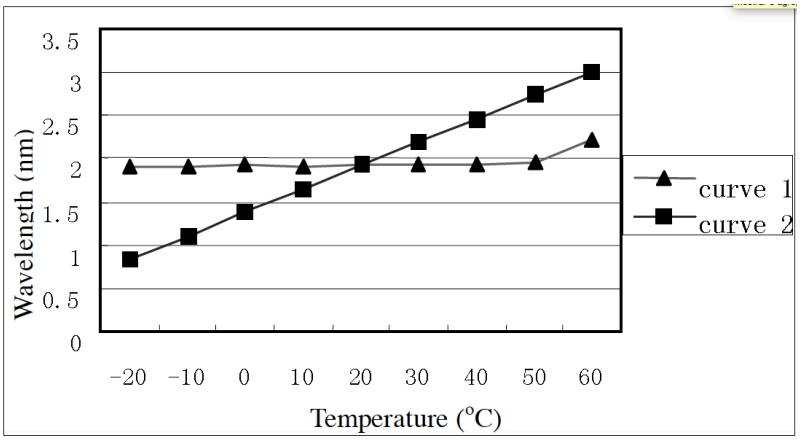


Figura 1.21. Cambio en la longitud de onda central vs. Temperatura ambiental [13].

1.8. Conclusiones.

Al realizar el estudio del Estado del Arte de los OADM's sintonizables se dice que aquellos dispositivos cuyo método de sintonización se basa en filtros sintonizables electro-ópticos y tenso-ópticos poseen tiempos de sintonización sumamente pequeños, del orden de 50 [ns], una característica muy importante en este tipo de dispositivos ya que permiten cambiar la longitud de onda a la cual se trabaja de una manera rápida y eficaz. Sin embargo, el utilizar un filtro sintonizable electro-óptico como base para un OADM sintonizable aumenta la complejidad y el costo del sistema.

Por otro lado, en la Tabla 1.1 de este capítulo se presentó una comparación entre los diferentes filtros ópticos sintonizables que pueden utilizarse en el diseño de un OADM sintonizable.

El utilizar una rejilla de Bragg como principio de este dispositivo asegura velocidades de sintonización de alrededor de 1 [ms], lo cual podría ser un inconveniente si se requiere reconfigurar la red óptica en la cual se encuentra instalado este dispositivo de una manera más rápida. Sin embargo, el utilizar rejillas de Bragg permite tener diversos métodos de sintonización, entre los que destacan la aplicación de tensión/compresión axial a la rejilla, cambios en la presión hidrostática, variación de la temperatura, entre otros.

Por otro lado un OADM sintonizable basado en rejillas de Bragg altamente reflectivas y con un ancho de banda sumamente estrecho permite abarcar un rango de sintonización relativamente amplio y con un bajo "cross-talk" entre canales.

Cabe mencionar que el rango de longitudes de onda con las cuales trabaja un OADM basado en rejillas de Bragg y sintonizable mediante tensión sólo se encuentra limitado por las características físicas de la rejilla, es decir, la tensión máxima que se le puede aplicar a la rejilla de Bragg sin que ésta se rompa o cambie sus propiedades.

Finalmente, para el OADM sintonizable propuesto en esta tesis las pérdidas por atenuación y las pérdidas de inserción que éste presenta son mayoritariamente las pérdidas de los dispositivos que lo conforman. Además, en comparación con los dispositivos que utilizan tecnología planar, un OADM diseñado con rejillas de Bragg y circuladores ópticos resulta más económico y sencillo de manipular, ya que utiliza una forma de sintonización fácil, segura, estable y confiable, lo cual se refleja en la sencillez y estabilidad de su operación.

1.9. Referencias.

[1] Louay Eldada, "Optical add/drop multiplexing architecture for metro area networks," *SPIE Newsroom Optoelectronics & Communications,* January 2008.

[2] Dra. Selene Pérez García, Notas de Clase, Sistemas de Comunicaciones Ópticas, Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Verano 2014.

[3] H. S. Jung, "2 X 2 acousto-optical add-drop multiplexers utilizing tilted film-loaded strip SiO_2 SAW waveguides in Ti:$LiNbO_3$," *SPIE Optical Engineering*, vol. 44(2), pp. 024601-1 to 024601-8, February 2005.

[4] P. Tang, O. Eknoyan, and H. F. Taylor, " Rapidly tunable optical add-drop multiplexer (OADM) using a static-strain-induced grating in $LiNb0_3$," *IEEE Journal of Lightwave Technology* , vol. 21, no. 1, pp. 236-245, January 2003.

[5] P.-C. Peng, H.-Y. Cheng, and S. Chi, "Wavelength-tunable add-drop multiplexers using fiber Fabry-Pérot tunable filters for bidirectional wavelength-division multiplexing networks," *SPIE Optical Engineering*, vol. 43, no. 10, pp. 2422-2425, October 2004.

[6] G. P. Agrawal. *Lightwave Technology: Components and Devices*. New Jersey: Wiley-Interscience, 2004.

[7] R. Kashyap. *Fiber Bragg Gratings*. 1st. ed., pp. 85-93, 152-155, 263-284. London: Academic Press, Optics and Photonics, 1999.

[8] L. Eldada, R. Blomquist, M. Maxfield, D. Pant, G. Boudoughian, C. Poga, and R. A. Norwood, "Thermooptic planar polymer Bragg grating OADM's with broad tuning range," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, pp. 448-450, April 1999.

[9] Yong-Wook Shin; Eknoyan, O.; Madsen, C.K.; Taylor, H.F., "Rapidly Tunable Optical Add Drop Multiplexer in Ti:$LiNbO_3$ Utilizing Non-polarizing Beam Splitters," in Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008. Conference on , vol., no., pp.1-3, 24-28 February 2008.

[10] Andre, P.S.; Pinto, A.N.; Pinto, J.L.; Almeida, T.; Pousa, M., "Tunable transparent and cost effective optical add-drop multiplexer based on fiber Bragg grating for DWDM networks," *Advanced Semiconductor Lasers and Applications/Ultraviolet and Blue Lasers and Their Applications/Ultralong Haul DWDM Transmission and Networking/WDM Components, 2001. Digest of the LEOS Summer Topica* , vol., no., pp.2 pp.,, July 30, 2001-August 1, 2001.

[11] Kato, A.; Nakatsuhara, K.; Hayama, Y., "Switching Operation in Tunable Add-Drop Multiplexer With Si-Grating Waveguides Featuring Ferroelectric Liquid Crystal Cladding," in Lightwave Technology, Journal of , vol.32, no.22, pp.4464-4470, November 15, 2014.

[12] Jiansen Ye ; Xin Wang ; Zhuo Li ; Yang Yang ; Rui Xu and Rui Shi " Design of a reconfigurable optical add/drop multiplexer based on tunable Fabry-Perot array ", Proc. SPIE 9619, 2015 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Devices and Optical Signal Processing, 96190W, August 5, 2015.

[13] X. Ma, Y. Huang, J. Li, G. Kai, X. Dong, C. Yang, and C. Xiao, “Four-channel OADM Base don Fiber Gratings With Smart Temperature Stable Sets,” *Proc. of SPIE*, Vol. 5281, Optical Transmission, Switching, and Subsystems, pp. 173, 178, 2004.

[14] R. Gutierrez-Castrejón, “Hacia un Sistema de Telecomunicaciones Completamente Óptico”, *Series del Instituto de Ingeniería*, SD/48, 2005. [Online]. Available: http://www.iingen.unam.mx/Publicaciones/default.aspx

Capítulo 2.

Estudio de la respuesta teórica de un OADM sintonizable bajo efectos de tensión y temperatura.

2.1. Objetivo.

Investigar los modelos matemáticos que describen el comportamiento de la rejilla de Bragg cuando se presentan cambios en su periodo al aplicar tensión o variar su temperatura.

Realizar el estudio teórico de la respuesta espectral de un OADM sintonizable mediante tensión a cambios en la temperatura con ayuda de simulaciones en el software MATLAB.

2.2. Introducción.

En este capítulo se presentarán diversas expresiones matemáticas que permitirán conocer cómo cambia la longitud de onda de Bragg de una rejilla al exponerla a cambios en su longitud axial provocados por la aplicación de tensión y variación de temperatura.

También se expondrán las variables físicas que intervienen en dichas expresiones, tales como el coeficiente de expansión térmica, el coeficiente termo óptico, la constante foto elástica efectiva, entre otros, haciendo énfasis en los valores de dichas variables para la fibra SMF-28e ya que de ésta están hechas las rejillas de Bragg que se emplearán en los diferentes experimentos.

Dentro del estudio teórico se buscará comprobar si los efectos que provocan los cambios en la temperatura y la tensión en una rejilla de Bragg pueden sumarse, específicamente, el cambio en la longitud de onda de reflexión.

Por otra parte, se estudió el comportamiento que presentan las rejillas de Bragg al ser expuestas a cambios de tensión y temperatura.

Los resultados de las simulaciones se exponen en forma gráfica para medir y cuantificar los cambios de longitud de onda así como el rango de sintonización teórico que puede alcanzar el OADM sintonizable al cambiar la tensión axial y la temperatura de la rejilla de Bragg de manera individual así como sus efectos conjuntos.

Capítulo 2. Estudio de la respuesta teórica de un OADM sintonizable bajo efectos de tensión y temperatura.

2.2.1. Respuesta de las rejillas de Bragg a cambios en factores externos.

Como se sabe, una rejilla de Bragg es aquél dispositivo óptico que presenta una variación periódica del índice de refracción efectivo de la fibra a lo largo de la longitud de la rejilla, tal como se muestra en la Figura 2.1 [1], [2].

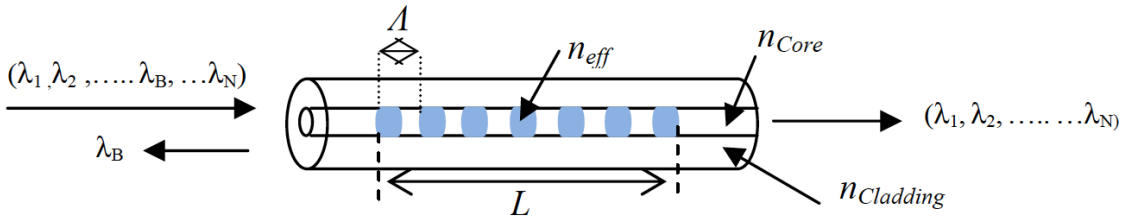


Figura 2.1. Rejilla de Bragg. [1]

El periodo de la rejilla de Bragg está directamente relacionado con la longitud de onda de Bragg a través de la expresión:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda\,, \tag{2.1}$$

donde λ_B es la longitud de onda de Bragg, n_{eff} es el índice de refracción efectivo de la fibra óptica y Λ es el periodo de la rejilla [1], [2].

La estructura, respuesta y características de las rejillas de Bragg pueden modificarse con la variación de diversos factores externos, entre los que resaltan la temperatura, tensión vibración y presión. Esto debido a la sensibilidad del índice de refracción efectivo y el periodo de la rejilla a perturbaciones térmicas o mecánicas.

Cuando se expone una rejilla de Bragg a cambios en la temperatura, sus dimensiones físicas cambian, ya que los materiales de los cuales está fabricada dicha rejilla sufren una expansión/compresión térmica debido al calentamiento o enfriamiento de la misma. Lo anterior aunado a la relación directa que tiene el valor del índice de refracción con la temperatura; el efecto termo-óptico provoca que la longitud de onda de Bragg de la rejilla cambie.

Por otro lado, cuando se aplica tensión axial a una rejilla de Bragg, la longitud de onda de Bragg de dicha rejilla cambia, esto debido al cambio parcial del periodo de la rejilla como resultado de la elongación física de la fibra óptica, además del cambio en el índice de refracción producido por los efectos foto-elásticos.

2.2.2. Variación de la temperatura en una rejilla de Bragg.

Como se mencionó anteriormente, la variación de la longitud de onda de Bragg al aumentar la temperatura de la misma es provocada por la expansión térmica de la fibra óptica y el cambio en el índice de refracción debido al efecto termo-óptico.

La sensibilidad a la temperatura de una rejilla de Bragg está dada por la expresión [1], [3], [4]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B_0}} = (\alpha + \xi)\,\Delta T\ , \tag{2.2}$$

donde $\Delta\lambda_B$ es el cambio de la longitud de onda de Bragg, λ_{B_0} es la longitud de onda de Bragg inicial (antes de cambiar/variar la temperatura de la rejilla de Bragg), ΔT es la diferencia de temperatura aplicada a la rejilla, α es el coeficiente de expansión térmica, el cual a su vez está dado por [1], [3]:

$$\alpha = \left(\frac{1}{\Lambda}\right)\left(\frac{d\Lambda}{dT}\right) \tag{2.3}$$

En la expresión (2.2) ξ es el coeficiente termo-óptico, el cual se calcula con la ecuación [1], [3]:

$$\xi = \left(\frac{1}{n_{eff}}\right)\left(\frac{dn_{eff}}{dT}\right) \tag{2.4}$$

"Para el sílice, los valores del coeficiente de expansión térmica (α) y del coeficiente termo-óptico (ξ) son $0.55 \times 10^{-6}\ [°C^{-1}]$ y $8.6 \times 10^{-6}\ [°C^{-1}]$, respectivamente. Sustituyendo dichos valores en la expresión (2.2), la diferencia de temperatura requerida para un cambio de longitud de onda de 45 [nm] será de 3173 [°C] aproximadamente. Tal diferencia de temperatura es esencialmente imposible de aplicar en la práctica. Por ejemplo, temperaturas de alrededor de 500 [°C] dañarán el revestimiento de fibra y reducirán sustancialmente la reflectividad de la rejilla de Bragg, hasta el punto de dañarla físicamente" [3], [5].

2.2.3. Variación de la tensión en una rejilla de Bragg.

Al aplicar tensión axial sobre la rejilla de Bragg estamos modificando directamente el periodo de la misma, efecto que se ve reflejado en el cambio de la longitud de onda de Bragg.

Por otro lado, la sensibilidad a la tensión axial de la rejilla de Bragg está dada por la expresión [1], [3], [4], [6]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B_0}} = (1 - P_e)\,\varepsilon_{ax}\ , \tag{2.5}$$

donde P_e es la constante foto-elástica efectiva (usualmente igual a 0.22), ε_{ax} es la tensión axial aplicada a la rejilla de Bragg, la cual está dada por la expresión [1], [3], [4], [6]:

$$\varepsilon_{ax} = \Delta L_{ax}/L_0 \tag{2.6}$$

En la expresión (2.6), ΔL_{ax} es el cambio en la longitud axial de la fibra, variable a la cual se referirá como "estiramiento" en el desarrollo de esta tesis, mientras que L_0es la longitud inicial de la fibra óptica (al referirse a la fibra óptica se considera que el desarrollo experimental se realiza con una rejilla de Bragg inmersa en un trozo de fibra óptica, con lo cual cambian las propiedades de toda la fibra y no solo de la rejilla).

"El valor de λ_{B_0} actualmente en uso es de alrededor de 1550 [nm]. El valor promedio de P_e es de 0.22 aproximadamente. De acuerdo con la expresión (2.5), si se desea obtener un cambio en la longitud de onda de 45 [nm], el cambio requerido de la tensión axial de la fibra será de aproximadamente un 4 %" [3].

Por otra parte el cambio en n_{eff} debido a la tensión axial (ε_{ax}) está dado por [1], [3], [4], [6]:

$$P_e = \frac{n_{eff}^2}{2}\left[P_{12} - v(P_{11} + P_{12})\right], \tag{2.7}$$

donde $P_{11} = 0.113$, $P_{12} = 0.252$ y $v = 0.16$ son los componentes del tensor foto elástico y la razón de Poisson respectivamente, para fibras ópticas de baja birrefringencia a una longitud de onda de $\lambda = 633$ [nm] [7].

2.2.3.1. "Strain" como unidad de tensión.

Se entiende por "strain" o esfuerzo a la cantidad de deformación de un cuerpo debida a la fuerza aplicada sobre él. Si lo ponemos en términos matemáticos, "strain", ε_{ax}, se define como la fracción de cambio en longitud, como se demuestra en la Figura 2.2.

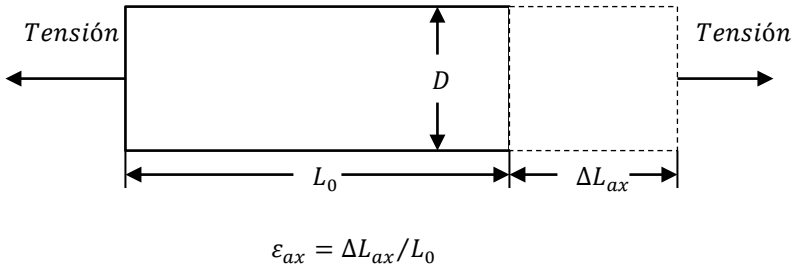


Figura 2.2. Definición física de "strain".

El parámetro "strain" puede ser positivo (tensión) o negativo (compresión). Si bien es adimensional, en muchos casos se suele expresar en unidades de [mm/mm]. En la práctica, la magnitud de medida de "strain" es muy pequeña por lo que usualmente se expresa como $[\mu\varepsilon]$ [8], [9].

2.2.4. Variación de la presión en una rejilla de Bragg.

Es posible variar la longitud de onda de Bragg de una rejilla si se modifica la presión hidrostática que actúa o incide sobre ella. La sensibilidad a la presión de una rejilla de Bragg está dada por la ecuación (2.8) [3], [10]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B_0}} = \left[-\frac{(1-2v)}{E} + \frac{n_{eff}^2}{2E}(1-2v)(2P_{12}+P_{11})\right]\Delta P\ , \tag{2.8}$$

donde ΔP es la variación de la presión hidrostática y E es el módulo de la elasticidad o módulo de Young.

"Para un índice de refracción efectivo $n_{eff} \cong 1.45$, una razón de Poisson $v \cong 0.165$ y coeficientes tenso-ópticos $P_{11} \cong 0.121$ y $P_{12} \cong 0.27$, si se desea obtener un cambio de longitud de onda de 45 [nm] la presión requerida sería aproximadamente de $10.3 \cdot 10^3\ [MPa]$, lo cual es prácticamente imposible (la compresión admisible de la fibra óptica es de aproximadamente $3.5 \cdot 10^3\ [MPa]$)" [3].

Cabe mencionar que el utilizar la presión hidrostática como método de sintonización en una rejilla de Bragg, resulta sumamente complicado y costoso, especialmente para $\Delta\lambda$ muy pequeñas.

2.2.5. Efectos conjuntos de temperatura y tensión en una rejilla de Bragg.

La sensibilidad de la longitud de onda de las rejillas de Bragg se rige por las propiedades elásticas, tenso-ópticas y termo-ópticas de la fibra. De acuerdo con la condición de Bragg ($\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$), la longitud de onda de Bragg depende del índice de refracción efectivo y del periodo de la rejilla. Derivando esta ecuación y despreciando términos de orden superior, el cambio de la longitud de onda de Bragg $\Delta\lambda_B$ está dado por [3], [4], [6], [11]:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda\frac{\partial n_{eff}}{\partial L} + n_{eff}\frac{\partial\Lambda}{\partial L}\right)\Delta L + 2\left(\Lambda\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right)\Delta T\ , \tag{2.9}$$

donde ΔL es el cambio en la longitud de la rejilla, y ΔT es el cambio en la temperatura de la rejilla. Así, el cambio en la longitud de onda de la rejilla de Bragg se puede generar cambiando su tensión (ΔL) y/o su temperatura (ΔT).

El primer término de la ecuación 2.9 modela la respuesta de la rejilla de Bragg a cambios en su tensión axial, mientras que el segundo término representa la respuesta a cambios en la temperatura en dicho dispositivo.

Cabe mencionar que en los sistemas de comunicaciones ópticas modernos y en los sistemas WDM, se requiere un rango de sintonización de al menos 45 [nm] para trabajar con un ancho de banda grande.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, "la respuesta de una rejilla de Bragg a cambios en la tensión surge debido tanto a la elongación física de la rejilla (y el correspondiente cambio fraccional en el periodo de la rejilla), y el cambio en el índice de refracción de la fibra debido a los efectos foto elásticos, mientras que la respuesta a cambios en la temperatura se presenta debido a la expansión térmica inherente del material del cual está hecha la fibra y a la dependencia a la temperatura que presenta el índice de refracción" [8]. Por lo tanto, el cambio en la longitud de onda de Bragg de la rejilla debido a cambios en la tensión axial y la temperatura puede modelarse a través de la expresión [12]:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda\left(\left\{1-\left(\frac{n_{eff}^2}{2}\right)[P_{12}-v(P_{11}+P_{12})]\right\}\varepsilon_{ax}+\left[\alpha+\frac{\left(\frac{dn_{eff}}{dT}\right)}{n_{eff}}\right]\Delta T\right), \qquad (2.10)$$

donde ε_{ax} es la tensión axial que se ejerce sobre la fibra, los coeficientes $P_{i,j}$ son los coeficientes de Pockel's del tensor foto-elástico, v es la razón de Poisson, y α es el coeficiente de expansión térmica del material de la fibra, y ΔT es el cambio en la temperatura. El factor $\{(n_{eff}^2/2)[P_{12}-v(P_{11}+P_{12})]\}$ se conoce como la constante foto-elástica efectiva P_e, y tiene un valor numérico de ≈ 0.22. La respuesta de la rejilla a cambios en la tensión medida a temperatura constante está dada por [12]:

$$\frac{1}{\lambda_{B_0}}\frac{d\lambda_B}{d\varepsilon_{ax}} = 0.78\times10^{-6}\ [\mu\varepsilon^{-1}] \qquad (2.11)$$

Por otro lado, en fibras de sílice, la respuesta a variaciones en la temperatura es dominada por el término dn_{eff}/dT (que corresponde al efecto termo-óptico), el cual representa el 95% del cambio observado en la longitud de onda de Bragg. La respuesta térmica normalizada medida a tensión constante está dada por [12]:

$$\frac{1}{\lambda_{B_0}}\frac{d\lambda_B}{dT} = 6.67\times10^{-6}\ [°\mathrm{C}^{-1}] \qquad (2.12)$$

Con la finalidad de simplificar las expresiones (2.9) y (2.10) y facilitar las simulaciones, el cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, o el cambio en la frecuencia, Δf_B de una rejilla de Bragg debido a cambios en la temperatura, ΔT, o en la tensión a lo largo del eje de la fibra, ε_{ax}, puede calcularse a través de la ecuación [14], [15], [16], [17], [18]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B_0}} = -\frac{\Delta f_B}{f_{B_0}} = K_T \Delta T + K_\varepsilon \varepsilon_{ax} \tag{2.13}$$

"A partir de la ecuación (2.13), el coeficiente de temperatura K_T es la suma del coeficiente de expansión térmica y el coeficiente termo-óptico, cuyos valores típicos son de 0.55×10^{-6} [°C^{-1}] y 6.1×10^{-6} [°C^{-1}] respectivamente, para fibras de sílice dopadas con germanio. El coeficiente de tensión K_ε es una función de n_{eff}; los componentes tenso-ópticos, P_{ij}; y la razón de Poisson, v. Los valores típicos de n_{eff}, P_{12}, P_{11} y v para fibras de sílice dopadas con Germanio producen un valor para K_ε de 0.787. Así, un cambio en la temperatura o la tensión no es más que una escala lineal (para rangos de temperatura y tensión moderados) del cambio de frecuencia espectral Δf_B" [14].

Los valores medidos de los coeficientes de temperatura y tensión para las fibras SMF-28e e InfiniCor 300 de la empresa Corning reportados en el trabajo de Stephen T. Kreger, Dawn K. Gifford, Mark E. Froggatt, Brian J. Soller y Matthew S. Wolfe en 2006 [14], se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Coeficientes de temperatura y tensión [14].

Tipo de Fibra	K_ε	K_T
SMF-28e	0.7314 ± 0.0006	$7.09 \pm 0.04 \times 10^{-6}$ °C^{-1}
InfiniCor 300	0.7484 ± 0.0004	$7.64 \pm 0.04 \times 10^{-6}$ °C^{-1}

Finalmente, sustituyendo las expresiones (2.2) y (2.5) en la expresión (2.13) se obtiene [17]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B_0}} = [(\alpha + \xi)\,\Delta T + \,(1 - P_e)\,\varepsilon_{ax}]\,, \tag{2.14}$$

donde $\Delta\lambda_B$ es el cambio de la longitud de onda de Bragg, λ_{B_0} es la longitud de onda de Bragg inicial, α es el coeficiente de expansión térmica, ξ es el coeficiente termo-óptico, P_e es la constante foto-elástica efectiva, ΔT y ε_{ax} son la diferencia de temperatura y la tensión axial que se le aplica a la rejilla de Bragg, respectivamente [5].

Con esto se afirma que el cambio en la longitud de onda de Bragg de una rejilla es directamente proporcional a la suma de las variaciones de tensión y temperatura aplicadas a dicha rejilla.

2.3. Simulación de los efectos provocados en una rejilla de Bragg debido a cambios en su tensión.

2.3.1. Metodología.

El programa "Simulación_Tensión_FBG" del Anexo A permite obtener el cambio en la longitud de onda de Bragg de una rejilla, $\Delta\lambda_B$, en función de la tensión aplicada a la misma, ε_{ax}. Dicho programa hace uso de la expresión (2.13) y de los valores presentados en la Tabla 2.1.

Para llevar a cabo la simulación es necesario ingresar el valor de diferentes variables:

- Longitud de onda de Bragg inicial de la rejilla, λ_{B_0}.
- Longitud inicial de la fibra, es decir, justo antes de aplicar tensión sobre ésta, L_0.
- El arreglo que representa las diferentes magnitudes de estiramiento aplicado a la fibra óptica, ΔL_{ax} (es importante que esté en las mismas unidades que el valor de la longitud inicial de la fibra, de lo contrario los datos de la simulación serán erróneos).

Una vez que se ingresaron los datos de las variables antes mencionadas, el programa generará dos gráficas. "Figure 1" corresponde al valor de la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, en [m] según el valor de la tensión axial aplicada, ε_{ax}, en [ε], mientras que "Figure 2" relaciona el valor de la longitud de onda de Bragg, λ_B, en [m] con el estiramiento que presenta la fibra óptica al estar bajo tensión, ΔL_{ax}, en [mm]. Ambas figuras son generadas por el programa "Simulación_Tensión_FBG", el cual se muestra en el Anexo A de esta tesis, en el momento en que se ejecutan sus instrucciones en MATLAB.

2.3.2. Resultados.

A continuación se muestran las simulaciones realizadas para distintas rejillas de Bragg utilizadas en los desarrollos experimentales de ésta tesis.

Cabe mencionar que en el desarrollo teórico y experimental de esta tesis se caracterizarán cuatro diferentes rejillas de Bragg, de las cuales se hablará más adelante.

- *Rejilla de Bragg Modelo 136802, Marca Smart Fibres.*

Los datos ingresados en el programa de MATLAB son:

- $\lambda_{B_0} = 1550.010\ [\mathrm{nm}]$
- $L_0 = 163.0\ [\mathrm{mm}]$
- $\Delta L_{ax} = 0{:}\ 0.127{:}\ 2.159\ [\mathrm{mm}]$

En la Tabla 2.2 se encuentran registrados los resultados de la simulación.

Tabla 2.2. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136802 para diferentes valores de tensión axial.

Estiramiento (ΔL_{ax}) [mm]	Tensión axial (ε_{ax}) [mε]	Longitud de onda de Bragg (λ_B) [nm]
0.000	0.000	1550.010
0.127	0.779	1550.893
0.254	1.558	1551.777
0.381	2.337	1552.660
0.508	3.117	1553.543
0.635	3.896	1554.426
0.762	4.675	1555.310
0.889	5.454	1556.193
1.016	6.233	1557.076
1.143	7.012	1557.960
1.270	7.791	1558.843
1.397	8.571	1559.726
1.524	9.350	1560.610
1.651	10.129	1561.493
1.778	10.908	1562.376
1.905	11.687	1563.259
2.032	12.466	1564.143
2.159	13.245	1565.026

Con los datos de la Tabla 2.2 se generaron las gráficas de las Figuras 2.3 y 2.4, las cuales relacionan a la longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136802, λ_B, con el estiramiento que sufrió la fibra, ΔL_{ax}, y la tensión que se le aplicó, ε_{ax}, respectivamente.

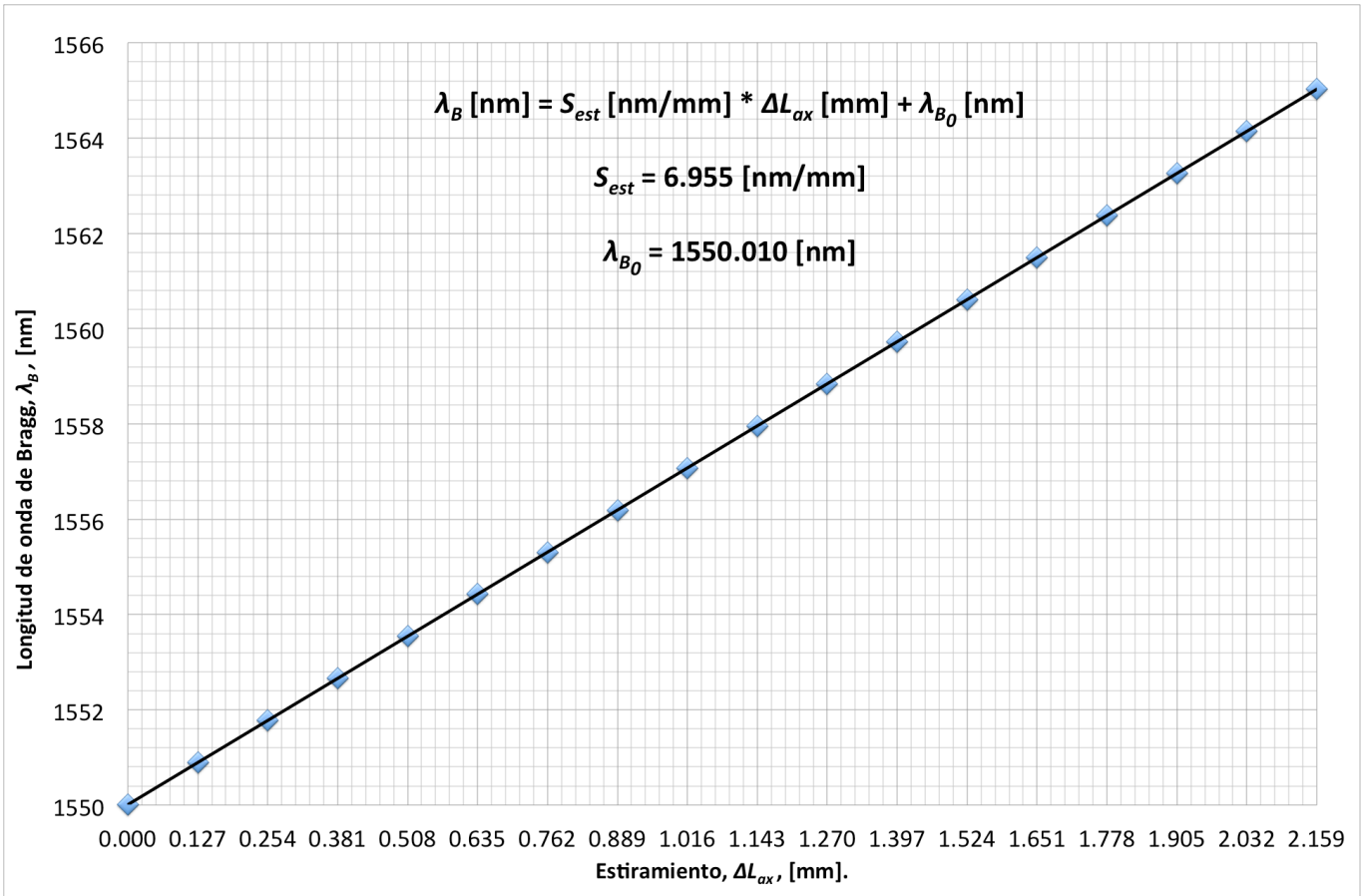


Figura 2.3. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Estiramiento, ΔL_{ax} en [mm]. Rejilla de Bragg Modelo 136802.

A partir de la Figura 2.3, el valor de la longitud de onda de Bragg, λ_B, debido al estiramiento, ΔL_{ax}, está dado por el modelo matemático:

$$\lambda_B\ [\text{nm}] = \left(S_{est}\left[\frac{\text{nm}}{\text{mm}}\right] \cdot \Delta L_{ax}\ [\text{mm}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\text{nm}]$$

Cuya pendiente representa la sensibilidad teórica de la rejilla de Bragg a cambiar su longitud de onda de Bragg ante el estiramiento que se le aplica, con un valor de:

$$S_{est} = 6.955\left[\frac{\text{nm}}{\text{mm}}\right]$$

Mientras que la ordenada al origen corresponde al valor de la longitud de onda de Bragg inicial, es decir, la longitud de onda de Bragg que presenta la rejilla sin que ésta experimente estiramiento alguno. En este modelo matemático el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1550.010\ [\text{nm}]$$

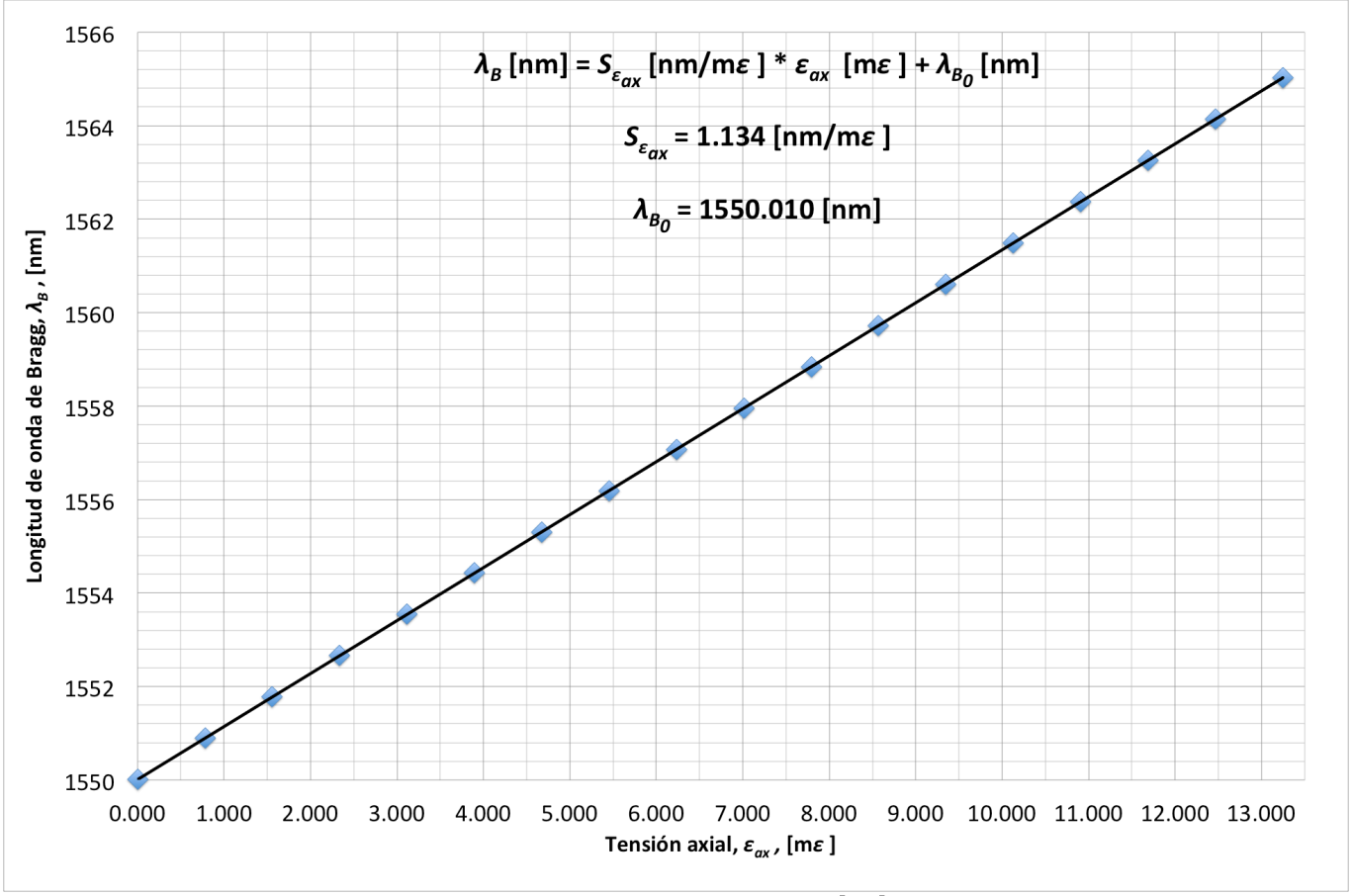


Figura 2.4. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Tensión axial, ε_{ax} en $[\mathrm{m\varepsilon}]$. Rejilla de Bragg Modelo 136802.

Al analizar la gráfica de la Figura 2.4 se determina que el valor de la longitud de onda de Bragg, λ_B, debido a la tensión axial que se le aplica, ε_{ax}, está dado por el modelo matemático:

$$\lambda_B\ [\mathrm{nm}] = \left(S_{\varepsilon_{ax}}\left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{m\varepsilon}}\right] \cdot \varepsilon_{ax}\ [\mathrm{m\varepsilon}]\right) +\ \lambda_{B_0}\ [\mathrm{nm}]$$

Cuya pendiente representa la sensibilidad teórica de la rejilla de Bragg a cambiar su longitud de onda de Bragg debido a la tensión axial que se le aplica - a la cual se referirá como sensibilidad elástica - , con un valor de:

$$S_{\varepsilon_{ax}} = 1.134\left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{m\varepsilon}}\right] = 1.134 \times 10^{-6}\ \left[\frac{\mathrm{m}}{\varepsilon}\right]$$

Mientras que la ordenada al origen corresponde al valor de la longitud de onda de Bragg inicial, es decir, la longitud de onda de Bragg que presenta la rejilla sin que ésta experimente tensión alguna. En este modelo matemático el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1550.010\ [\mathrm{nm}]$$

- *Rejilla de Bragg Modelo 136806, Marca Smart Fibres.*

Los datos ingresados en el programa de MATLAB son:

- $\lambda_{B_0} = 1550.062$ [nm]
- $L_0 = 166.0$ [mm]
- $\Delta L_{ax} = 0{:}\,0.127{:}\,2.159$ [mm]

En la Tabla 2.3 se encuentran registrados los resultados de la simulación.

Tabla 2.3. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136806 para diferentes valores de tensión axial.

Estiramiento (ΔL_{ax}) [mm]	Tensión axial (ε_{ax}) [mε]	Longitud de onda de Bragg (λ_B) [nm]
0.000	0.000	1550.062
0.127	0.765	1550.929
0.254	1.530	1551.797
0.381	2.295	1552.664
0.508	3.060	1553.531
0.635	3.825	1554.399
0.762	4.590	1555.266
0.889	5.355	1556.134
1.016	6.120	1557.001
1.143	6.886	1557.868
1.270	7.651	1558.736
1.397	8.416	1559.603
1.524	9.181	1560.470
1.651	9.946	1561.338
1.778	10.711	1562.205
1.905	11.476	1563.072
2.032	12.241	1563.940
2.159	13.006	1564.807

Con los datos de la Tabla 2.3 se generaron las gráficas de las Figuras 2.5 y 2.6, las cuales relacionan a la longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136806, λ_B, con el estiramiento que sufrió la fibra, ΔL_{ax}, y la tensión que se le aplicó, ε_{ax}, respectivamente.

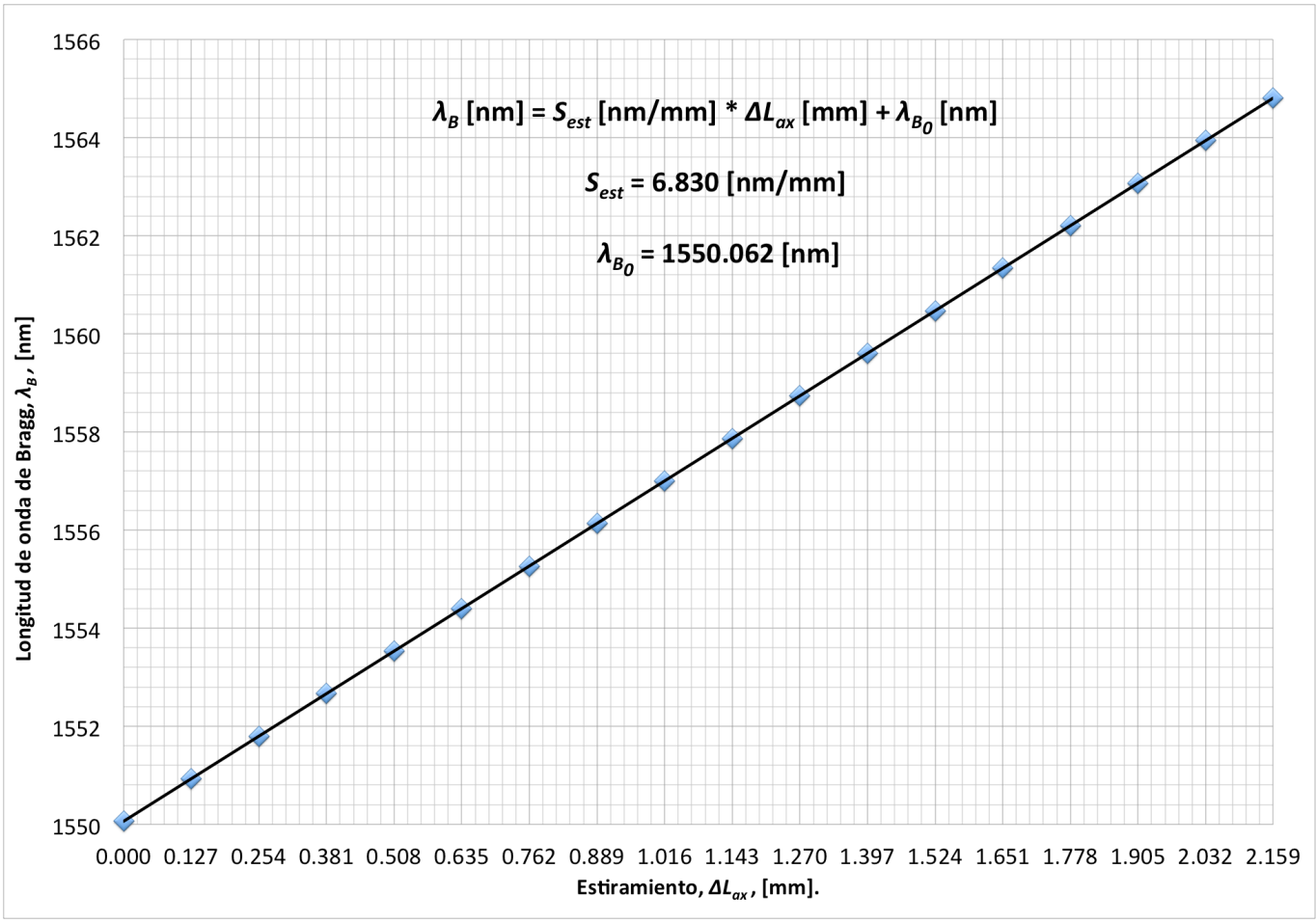


Figura 2.5. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Estiramiento, ΔL_{ax} en [mm]. Rejilla de Bragg Modelo 136806.

A partir de la Figura 2.5, el valor de la longitud de onda de Bragg, λ_B, debido al estiramiento, ΔL_{ax}, está dado por el modelo matemático:

$$\lambda_B\ [\text{nm}] = \left(S_{est}\left[\frac{\text{nm}}{\text{mm}}\right] \cdot \Delta L_{ax}\ [\text{mm}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\text{nm}]$$

Donde la pendiente teórica presenta un valor de:

$$S_{est} = 6.830\ \left[\frac{\text{nm}}{\text{mm}}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1550.062\ [\text{nm}]$$

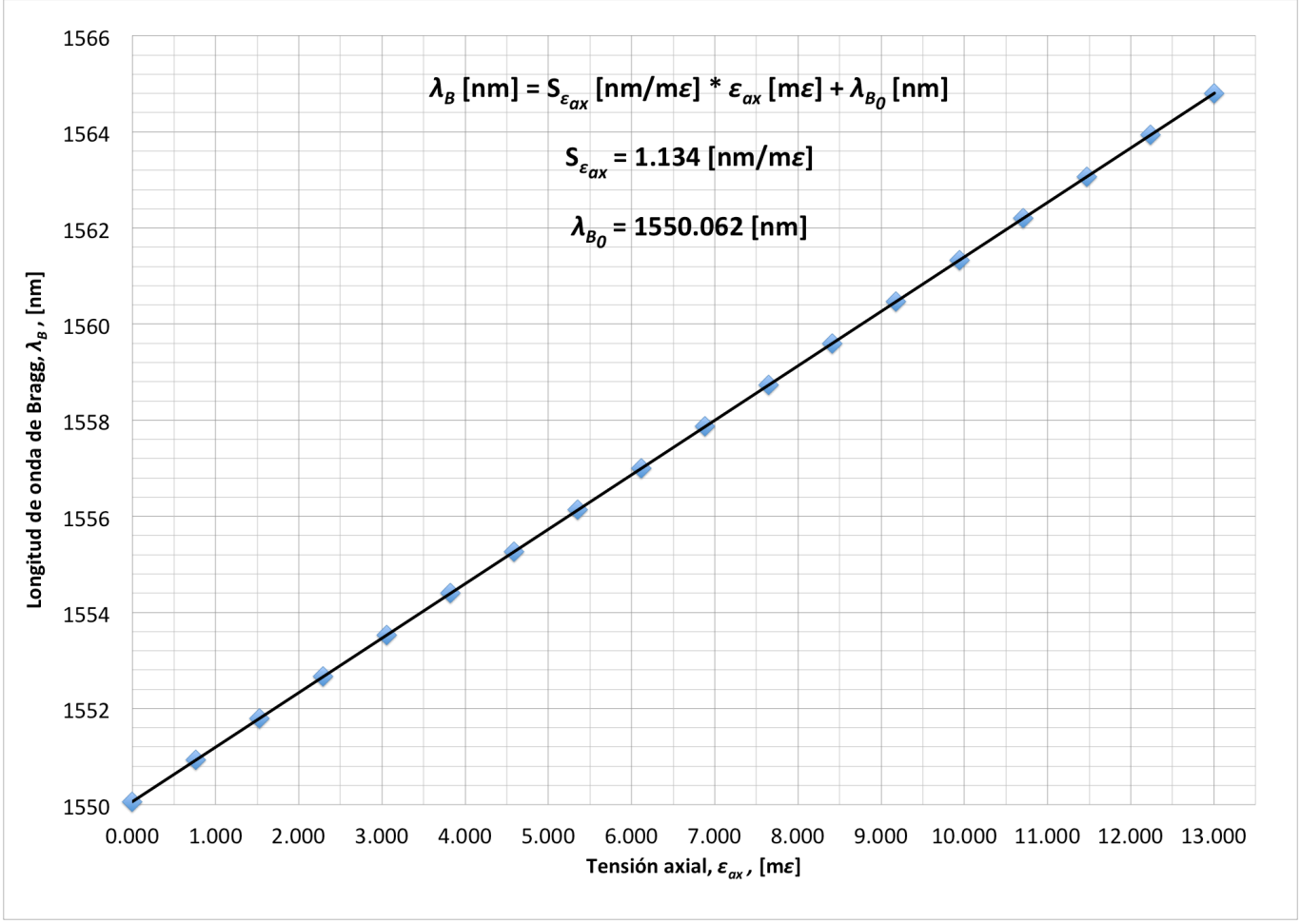


Figura 2.6. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Tensión axial, ε_{ax} en $[\mathrm{m\varepsilon}]$. Rejilla de Bragg Modelo 136802.

Al analizar la gráfica de la Figura 2.6 se determina que el valor de la longitud de onda de Bragg, λ_B, debido a la tensión axial que se le aplica, ε_{ax}, está dado por el modelo matemático:

$$\lambda_B\ [\mathrm{nm}] = \left(S_{\varepsilon_{ax}}\left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{m\varepsilon}}\right] \cdot \varepsilon_{ax}\ [\mathrm{m\varepsilon}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\mathrm{nm}]$$

Donde la pendiente teórica presenta un valor de:

$$\mathrm{S}_{\varepsilon_{ax}} = 1.134\left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{m\varepsilon}}\right] = 1.134 \times 10^{-6}\ \left[\frac{\mathrm{m}}{\varepsilon}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1550.062\ [\mathrm{nm}]$$

- *Rejilla de Bragg Modelo 136807, Marca Smart Fibres.*

Los datos ingresados en el programa de MATLAB son:

- $\lambda_{B_0} = 1550.048$ [nm]
- $L_0 = 177.8$ [mm]
- $\Delta L_{ax} = 0{:}\,0.127{:}\,2.159$ [mm]

En la Tabla 2.4 se encuentran registrados los resultados de la simulación.

Tabla 2.4. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136807 para diferentes valores de tensión axial.

Estiramiento (ΔL_{ax}) [mm]	Tensión axial (ε_{ax}) [mε]	Longitud de onda de Bragg (λ_B) [nm]
0.000	0.000	1550.048
0.127	0.714	1550.858
0.254	1.429	1551.668
0.381	2.143	1552.477
0.508	2.857	1553.287
0.635	3.571	1554.097
0.762	4.286	1554.907
0.889	5.000	1555.717
1.016	5.714	1556.526
1.143	6.429	1557.336
1.270	7.143	1558.146
1.397	7.857	1558.956
1.524	8.571	1559.765
1.651	9.286	1560.575
1.778	10.000	1561.385
1.905	10.714	1562.195
2.032	11.429	1563.005
2.159	12.143	1563.814

Con los datos de la Tabla 2.4 se generaron las gráficas de las Figuras 2.7 y 2.8, las cuales relacionan a la longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136807, λ_B, con el estiramiento que sufrió la fibra, ΔL_{ax}, y la tensión que se le aplicó, ε_{ax}, respectivamente.

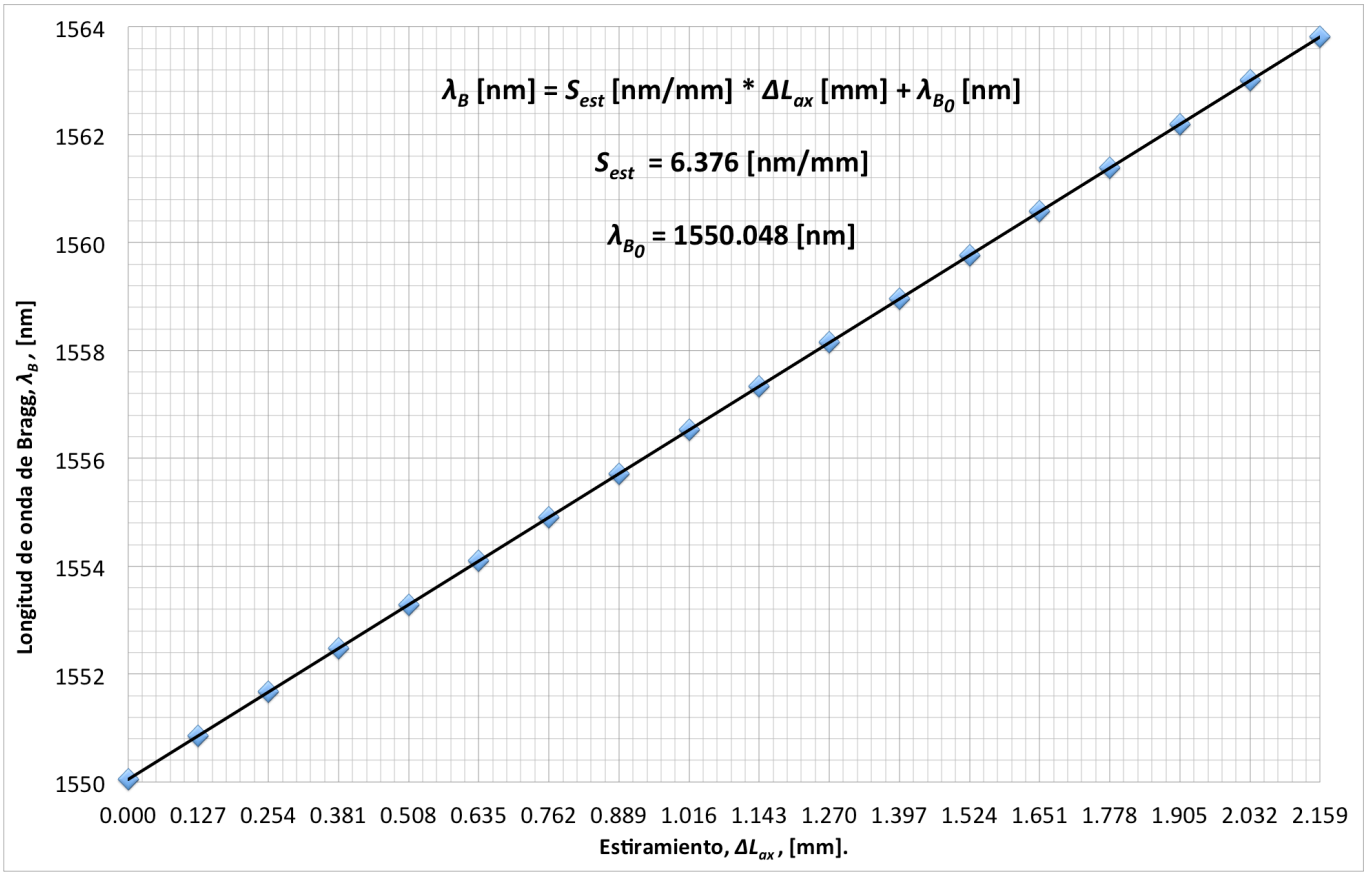


Figura 2.7. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Estiramiento, ΔL_{ax} en [mm]. Rejilla de Bragg Modelo 136807.

A partir de la Figura 2.7, el valor de la longitud de onda de Bragg, λ_B, debido al estiramiento, ΔL_{ax}, está dado por el modelo matemático:

$$\lambda_B\ [\text{nm}] = \left(S_{est}\left[\frac{\text{nm}}{\text{mm}}\right] \cdot \Delta L_{ax}\ [\text{mm}]\right) +\ \lambda_{B_0}\ [\text{nm}]$$

Donde la pendiente teórica presenta un valor de:

$$S_{est} = 6.376\ \left[\frac{\text{nm}}{\text{mm}}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1550.048\ [\text{nm}]$$

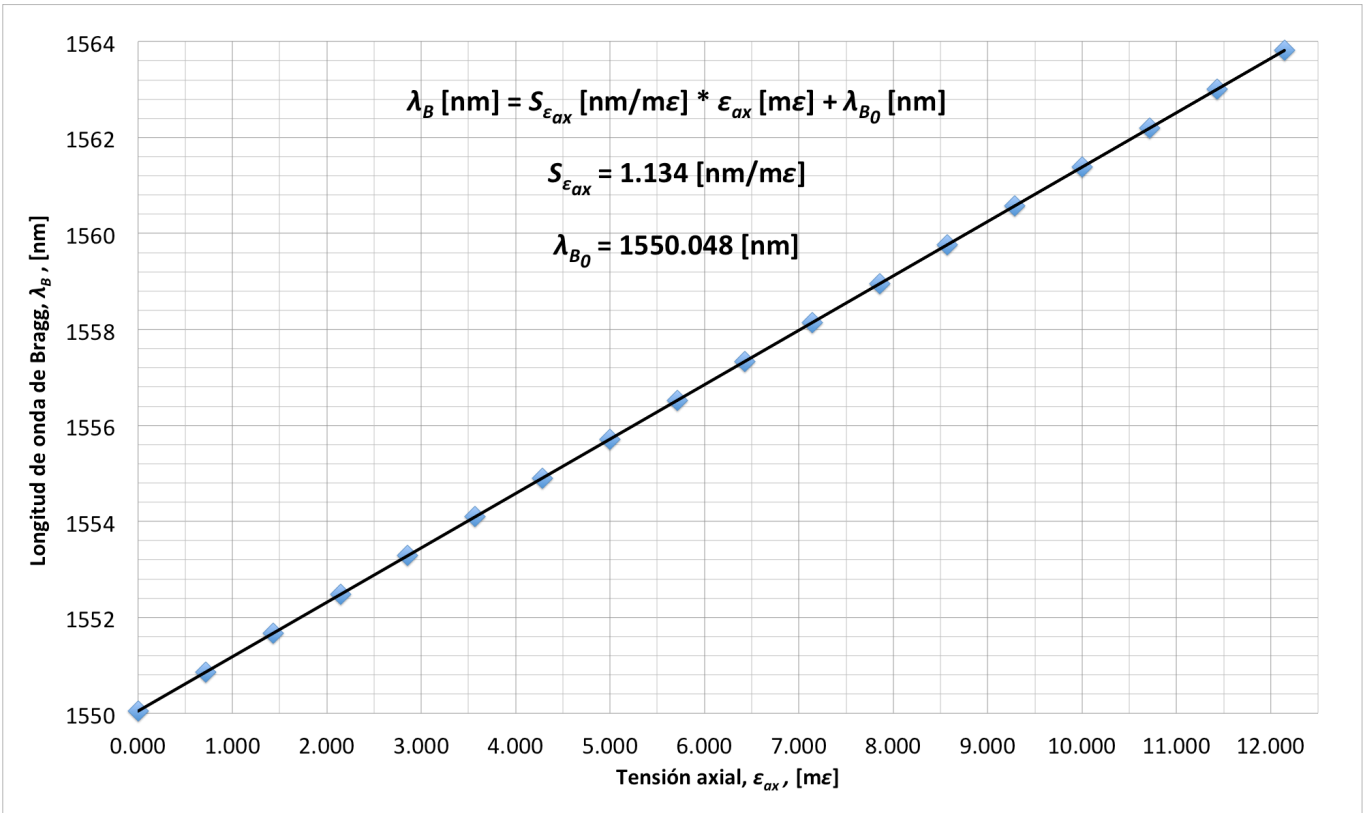


Figura 2.8. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Tensión axial, ε_{ax} en $[\mathrm{m\varepsilon}]$. Rejilla de Bragg Modelo 136807.

Al analizar la gráfica de la Figura 2.8 se determina que el valor de la longitud de onda de Bragg, λ_B, debido a la tensión axial que se le aplica, ε_{ax}, está dado por el modelo matemático:

$$\lambda_B\ [\mathrm{nm}] = \left(S_{\varepsilon_{ax}}\left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{m\varepsilon}}\right] \cdot \varepsilon_{ax}\ [\mathrm{m\varepsilon}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\mathrm{nm}]$$

Donde la pendiente teórica presenta un valor de:

$$\mathrm{S}_{\varepsilon_{ax}} = 1.134\left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{m\varepsilon}}\right] = 1.134 \times 10^{-6}\ \left[\frac{\mathrm{m}}{\varepsilon}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1550.048\ [\mathrm{nm}]$$

2.4. Simulación de los efectos provocados en una rejilla de Bragg debido a la variación de la temperatura externa a la rejilla.

2.4.1. Metodología.

El programa "Simulación_Temperatura_FBG" del Anexo A permite obtener el cambio en la longitud de onda de Bragg de una rejilla, $\Delta\lambda_B$, en función del cambio en su temperatura, ΔT. Dicho programa hace uso de la expresión (2.13) y de los valores presentados en la Tabla 2.1.
Para llevar a cabo la simulación es necesario ingresar el valor de diferentes variables, como lo son:

- Longitud de onda de Bragg inicial de la rejilla, λ_{B_0}.
- Temperatura inicial de la fibra, es decir, la temperatura ambiente del espacio en el cual se van a llevar a cabo los experimentos, T_0.
- El arreglo que representa las diferentes magnitudes del cambio de temperatura aplicado a la rejilla de Bragg, ΔT.

Una vez que se ingresaron los datos de las variables antes mencionadas, el programa generará una gráfica, la cual relaciona el valor de la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, en [m] según la temperatura de ésta, T_{FBG}, en [°C].

2.4.2. Resultados.

A continuación se muestran las simulaciones realizadas para distintas rejillas de Bragg utilizadas en los desarrollos experimentales de ésta tesis.

- *Rejilla de Bragg Modelo 136802, Marca Smart Fibres.*

La temperatura ambiente, T_0, contemplada para esta simulación es de 25 [°C], en la cual se registró un valor de longitud de onda de Bragg inicial, λ_{B_0}, de 1550.010 [nm]. En la Tabla 2.5 se encuentran registrados los resultados de la simulación.

Tabla 2.5. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136802 según la diferencia de temperatura aplicada.

Temperatura de la rejilla, T_{FBG}, [°C]	Diferencia de temperatura, $\Delta T = T_{FBG} - T_0$, [°C]	Longitud de onda de Bragg, λ_B, [nm]
25	0	1550.010
30	5	1550.065
35	10	1550.120
40	15	1550.175
45	20	1550.230

50	25	1550.285
55	30	1550.340
60	35	1550.395
65	40	1550.450
70	45	1550.505
75	50	1550.559
80	55	1550.614
85	60	1550.669
90	65	1550.724
95	70	1550.779
100	75	1550.834
105	80	1550.889
110	85	1550.944
115	90	1550.999
120	95	1551.054
125	100	1551.109
130	105	1551.164

Con los datos de la Tabla 2.5 se logró obtener la gráfica de la Figura 2.9, la cual muestra la relación que tiene la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, con el cambio en la temperatura de la misma, ΔT.

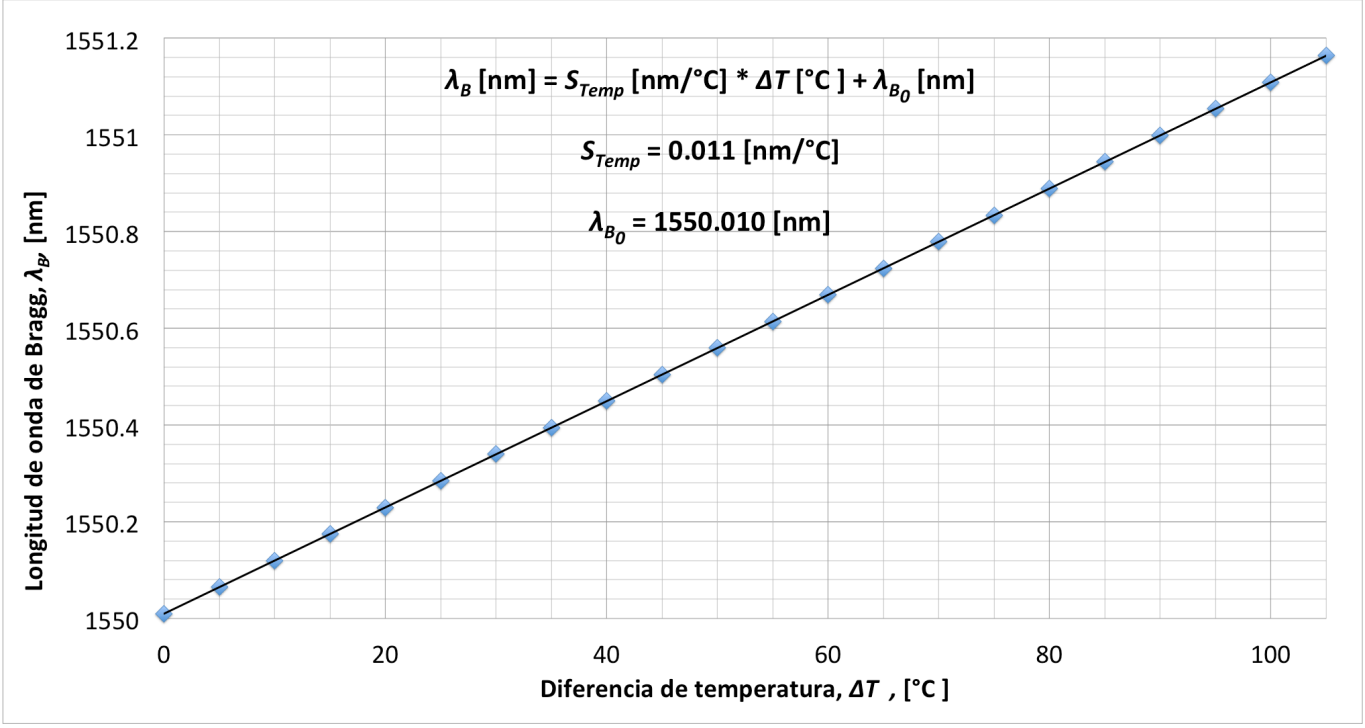


Figura 2.9. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Diferencia de temperatura, ΔT en [°C]. Rejilla de Bragg Modelo 136802.

Al observar la gráfica de la Figura 2.9 se determina que el valor de la longitud de onda de Bragg, λ_B, debido al cambio en la temperatura de la misma, ΔT, está dado por el modelo matemático:

$$\lambda_B\ [\text{nm}] = \left(S_{Temp}\left[\frac{\text{nm}}{°\text{C}}\right] \cdot \Delta T\ [°\text{C}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\text{nm}]$$

Cuya pendiente representa la sensibilidad térmica teórica o sensibilidad a la temperatura de la rejilla de Bragg a cambiar su longitud de onda de Bragg debido al cambio en su temperatura, con un valor de:

$$S_{Temp} = 0.011\ \left[\frac{\text{nm}}{°\text{C}}\right] = 1.1 \times 10^{-11}\ \left[\frac{\text{m}}{°\text{C}}\right]$$

Mientras que la ordenada al origen corresponde al valor de la longitud de onda de Bragg inicial, es decir, la longitud de onda de Bragg que presenta la rejilla sin que ésta experimente cambio de temperatura. En este modelo matemático el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1550.010\ [\text{nm}]$$

- *Rejilla de Bragg Modelo 136807, Marca Smart Fibres.*

La temperatura ambiente, T_0, contemplada para esta simulación es de 25 [°C], en la cual se registró un valor de longitud de onda de Bragg inicial, λ_{B_0}, de 1550.048 [nm]. En la Tabla 2.6 se encuentran registrados los resultados de la simulación.

Tabla 2.6. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136807 según la diferencia de temperatura aplicada.

Temperatura de la rejilla, T_{FBG}, [°C]	Diferencia de temperatura, $\Delta T = T_{FBG} - T_0$, [°C]	Longitud de onda de Bragg, λ_B, [nm]
25	0	1550.048
30	5	1550.103
35	10	1550.158
40	15	1550.213
45	20	1550.268
50	25	1550.323
55	30	1550.378
60	35	1550.433
65	40	1550.488
70	45	1550.543
75	50	1550.597
80	55	1550.652
85	60	1550.707
90	65	1550.762

95	70	1550.817
100	75	1550.872
105	80	1550.927
110	85	1550.982
115	90	1551.037
120	95	1551.092
125	100	1551.147
130	105	1551.202

Con los datos de la Tabla 2.6 se logró obtener la gráfica de la Figura 2.10, la cual muestra la relación que tiene la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, con el cambio en la temperatura de la misma, ΔT.

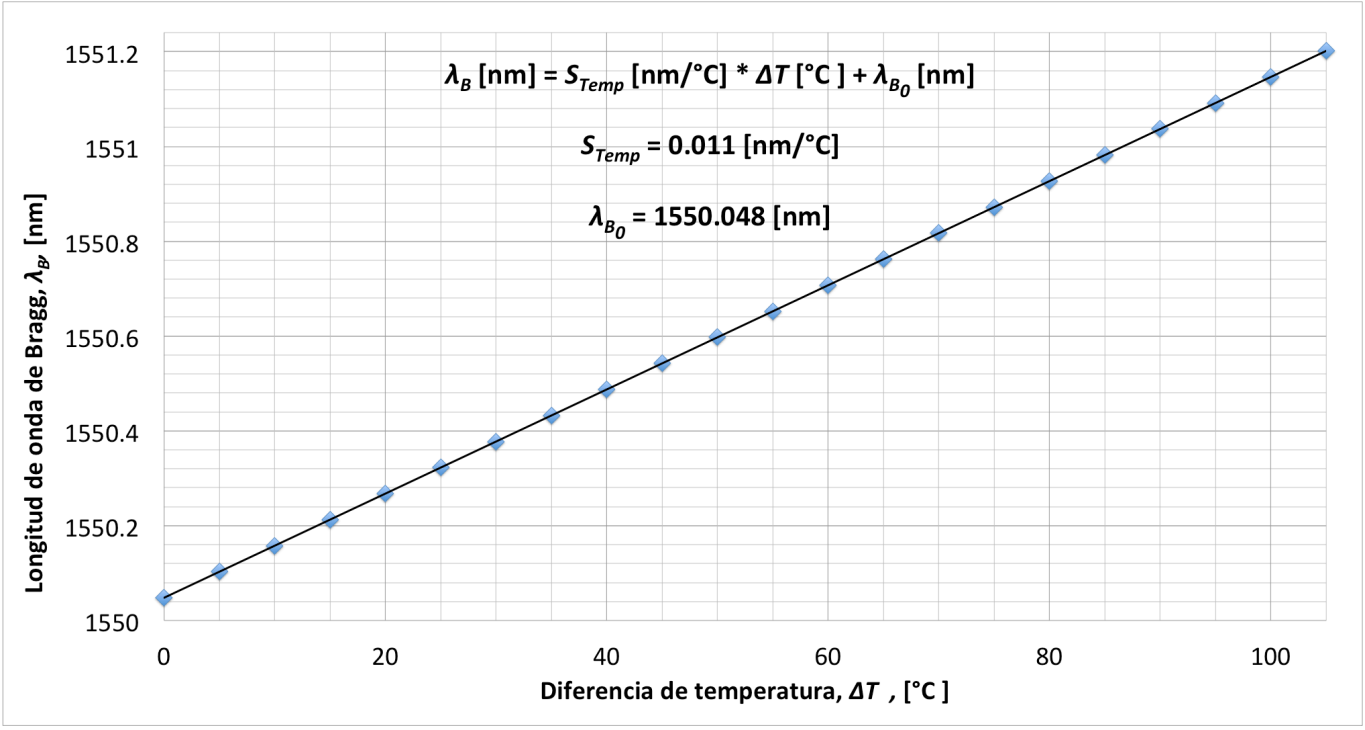


Figura 2.10. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Diferencia de temperatura, ΔT en [°C]. Rejilla de Bragg Modelo 136807.

Al observar la gráfica de la Figura 2.10 se determina que el valor de la longitud de onda de Bragg, λ_B, debido al cambio en la temperatura de la misma, ΔT, está dado por el modelo matemático:

$$\lambda_B\ [\text{nm}] = \left(S_{Temp}\left[\frac{\text{nm}}{°\text{C}}\right] \cdot \Delta T\ [°\text{C}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\text{nm}]$$

Donde la pendiente teórica presenta un valor de:

$$S_{Temp} = 0.011 \left[\frac{\text{nm}}{^{\circ}\text{C}}\right] = 1.1 \times 10^{-11} \left[\frac{\text{m}}{^{\circ}\text{C}}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1550.048 \text{ [nm]}$$

- *Rejilla de Bragg Modelo 136810, Marca Smart Fibres.*

La temperatura ambiente, T_0, contemplada para esta simulación es de 25 [°C], en la cual se registró un valor de longitud de onda de Bragg inicial, λ_{B_0}, de 1550.141 [nm]. En la Tabla 2.7 se encuentran registrados los resultados de la simulación.

Tabla 2.7. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136810 según la diferencia de temperatura aplicada.

Temperatura de la rejilla, T_{FBG}, [°C]	Diferencia de temperatura, $\Delta T = T_{FBG} - T_0$, [°C]	Longitud de onda de Bragg, λ_B, [nm]
25	0	1550.141
30	5	1550.196
35	10	1550.251
40	15	1550.306
45	20	1550.361
50	25	1550.416
55	30	1550.471
60	35	1550.526
65	40	1550.581
70	45	1550.636
75	50	1550.691
80	55	1550.745
85	60	1550.800
90	65	1550.855
95	70	1550.910
100	75	1550.965
105	80	1551.020
110	85	1551.075
115	90	1551.130
120	95	1551.185
125	100	1551.240
130	105	1551.295

Con los datos de la Tabla 2.7 se logró obtener la gráfica de la Figura 2.11, la cual muestra la relación que tiene la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, con el cambio en la temperatura de la misma, ΔT.

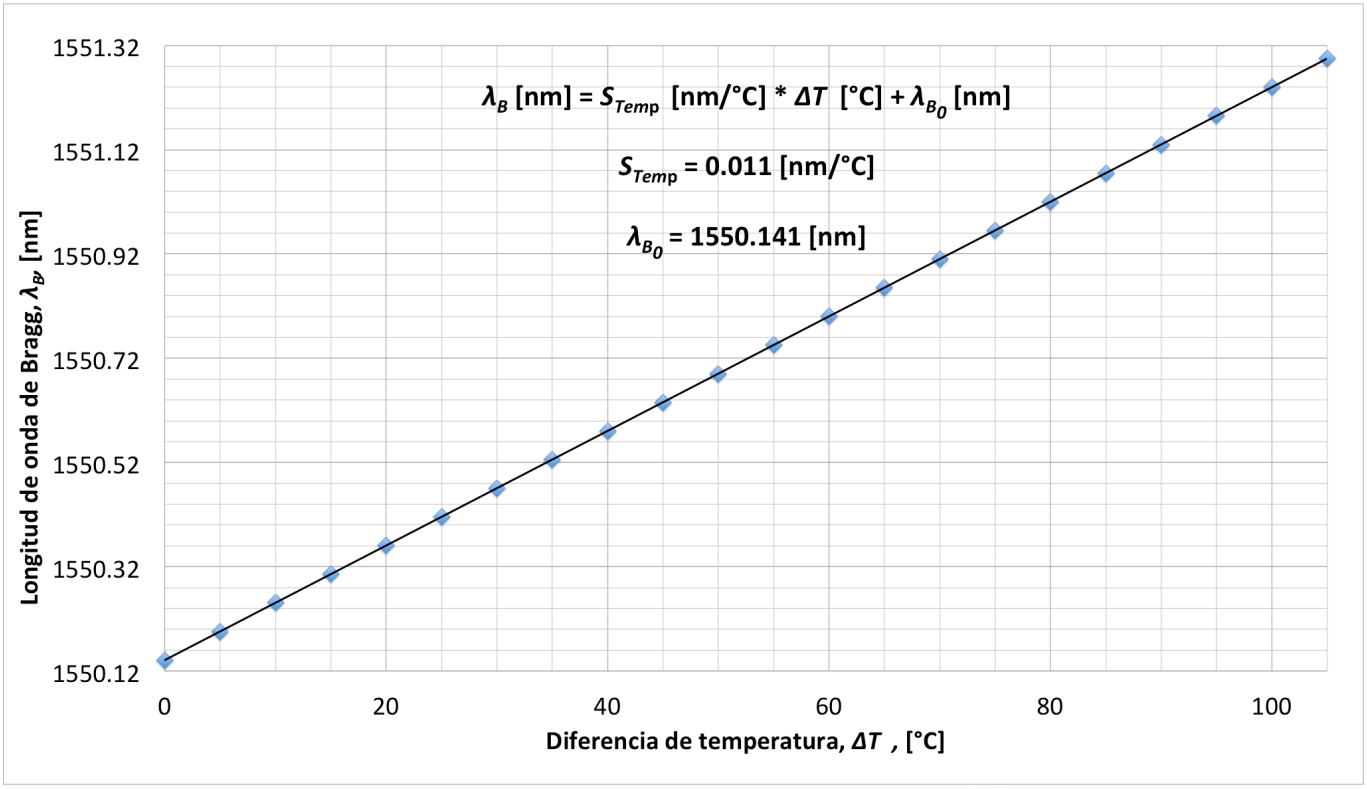


Figura 2.11. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Diferencia de temperatura, ΔT en [°C]. Rejilla de Bragg Modelo 136810.

Al observar la gráfica de la Figura 2.11 se determina que el valor de la longitud de onda de Bragg, λ_B, debido al cambio en la temperatura de la misma, ΔT, está dado por el modelo matemático:

$$\lambda_B\ [\text{nm}] = \left(S_{Temp}\left[\frac{\text{nm}}{°\text{C}}\right] \cdot \Delta T\ [°\text{C}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\text{nm}]$$

Donde la pendiente teórica presenta un valor de:

$$S_{Temp} = 0.011\ \left[\frac{\text{nm}}{°\text{C}}\right] = 1.1 \times 10^{-11}\ \left[\frac{\text{m}}{°\text{C}}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1550.141\ [\text{nm}]$$

2.5. Simulación de los efectos provocados en una rejilla de Bragg debido a cambios en su tensión y en su temperatura.

2.5.1. Metodología.

El programa "Simulación_Tensión_y_Temperatura_FBG" del Anexo A permite obtener el cambio en la longitud de onda de Bragg de una rejilla, $\Delta\lambda_B$, ante cambios en su tensión axial, ε_{ax}, y en su temperatura, ΔT. Dicho programa hace uso de la expresión (2.13) y de los valores presentados en la Tabla 2.1.
Para llevar a cabo la simulación es necesario ingresar el valor de diferentes variables, como lo son:

- Longitud de onda de Bragg inicial de la rejilla, λ_{B_0}.
- Temperatura inicial de la fibra, es decir, la temperatura ambiente del espacio en el cual se van a llevar a cabo los experimentos, T_0.
- El arreglo que representa las diferentes magnitudes del cambio de temperatura aplicado a la rejilla de Bragg, ΔT.
- Longitud inicial de la fibra, es decir, justo antes de aplicar tensión sobre ésta, L_0.
- El arreglo que representa las diferentes magnitudes del estiramiento aplicado a la fibra óptica, ΔL_{ax} (es importante que esté en las mismas unidades que el valor de la longitud inicial de la fibra, de lo contrario los datos de la simulación serán erróneos).

Una vez que se ingresaron los datos de las variables antes mencionadas, el programa primero calculará los valores de la longitud de onda de Bragg, λ_B, según la temperatura que posee la rejilla, T_{FBG}, para generar así un arreglo llamado "lambda_Bragg1", el cual corresponde al cambio de la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, debido a la temperatura.

Utilizando a cada elemento del arreglo "lambda_Bragg1" como la longitud de onda de Bragg inicial, λ'_{B_0}, para cada simulación de tensión, es decir, como la ordenada al origen de la respuesta de la rejilla de Bragg a cambios en su tensión axial, ε_{ax}, el programa calculará los valores de la longitud de onda de Bragg, λ_B, para cada valor de tensión axial, ε_{ax}, y para todos los valores de temperatura de la rejilla, T_{FBG} , creando así la matriz "lambda_Bragg2". Es importante mencionar que dicha matriz se fue llenando con ayuda de dos ciclos "for", el primer ciclo corresponde a las columnas de la matriz (valores de temperatura, T_{FBG}), mientras que el segundo ciclo corresponde a las filas de la misma (valores de tensión axial, ε_{ax}).

Finalmente el programa graficará la matriz "lambda_Bragg2", mostrando como cambia la longitud de onda de Bragg de una rejilla, λ_B, al variar su tensión axial y su temperatura.

2.5.2. Resultados.

A continuación se muestran las simulaciones realizadas para distintas rejillas de Bragg utilizadas en los desarrollos experimentales de ésta tesis.

- *Rejilla de Bragg Modelo 136802, Marca Smart Fibres.*

Los valores de las variables indicadas anteriormente para llevar a cabo la simulación en el programa de MATLAB son:

- $\lambda_{B_0} = 1550.010$ [nm]
- $T_0 = 25$ [℃]
- $\Delta T = 0{:}\,25{:}\,100$ [℃]
- $L_0 = 163.0$ [mm]
- $\Delta L_{ax} = 0{:}\,0.127{:}\,2.159$ [mm]

Los resultados obtenidos a través de esta simulación se encuentran registrados en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136802 para diferentes valores de tensión axial y temperatura.

		Temperatura, T_{FBG}, [℃]				
Estiramiento, ΔL_{ax}, [mm]	Tensión, ε_{ax}, [mε]	25	50	75	100	125
0.000	0.000	1550.010	1550.285	1550.559	1550.834	1551.109
0.127	0.779	1550.893	1551.168	1551.443	1551.718	1551.993
0.254	1.558	1551.777	1552.052	1552.327	1552.602	1552.877
0.381	2.337	1552.660	1552.935	1553.210	1553.486	1553.761
0.508	3.117	1553.543	1553.819	1554.094	1554.369	1554.645
0.635	3.896	1554.426	1554.702	1554.978	1555.253	1555.529
0.762	4.675	1555.310	1555.585	1555.861	1556.137	1556.412
0.889	5.454	1556.193	1556.469	1556.745	1557.021	1557.296
1.016	6.233	1557.076	1557.352	1557.628	1557.904	1558.180
1.143	7.012	1557.960	1558.236	1558.512	1558.788	1559.064
1.270	7.791	1558.843	1559.119	1559.396	1559.672	1559.948
1.397	8.571	1559.726	1560.003	1560.279	1560.556	1560.832
1.524	9.350	1560.610	1560.886	1561.163	1561.439	1561.716
1.651	10.129	1561.493	1561.770	1562.046	1562.323	1562.600
1.778	10.908	1562.376	1562.653	1562.930	1563.207	1563.484
1.905	11.687	1563.259	1563.537	1563.814	1564.091	1564.368
2.032	12.466	1564.143	1564.420	1564.697	1564.974	1565.252
2.159	13.245	1565.026	1565.303	1565.581	1565.858	1566.136

En la Figura 2.12 se observa la respuesta teórica de la rejilla de Bragg Modelo 136802 a cambios en su tensión.
En dicha figura se observa cómo cambia la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, según el estiramiento aplicado a la fibra, ΔL_{ax}, y el valor de la temperatura que posee la rejilla, T_{FBG}; ya que conforme aumenta la magnitud de estos efectos externos también lo hace la longitud de onda de Bragg.

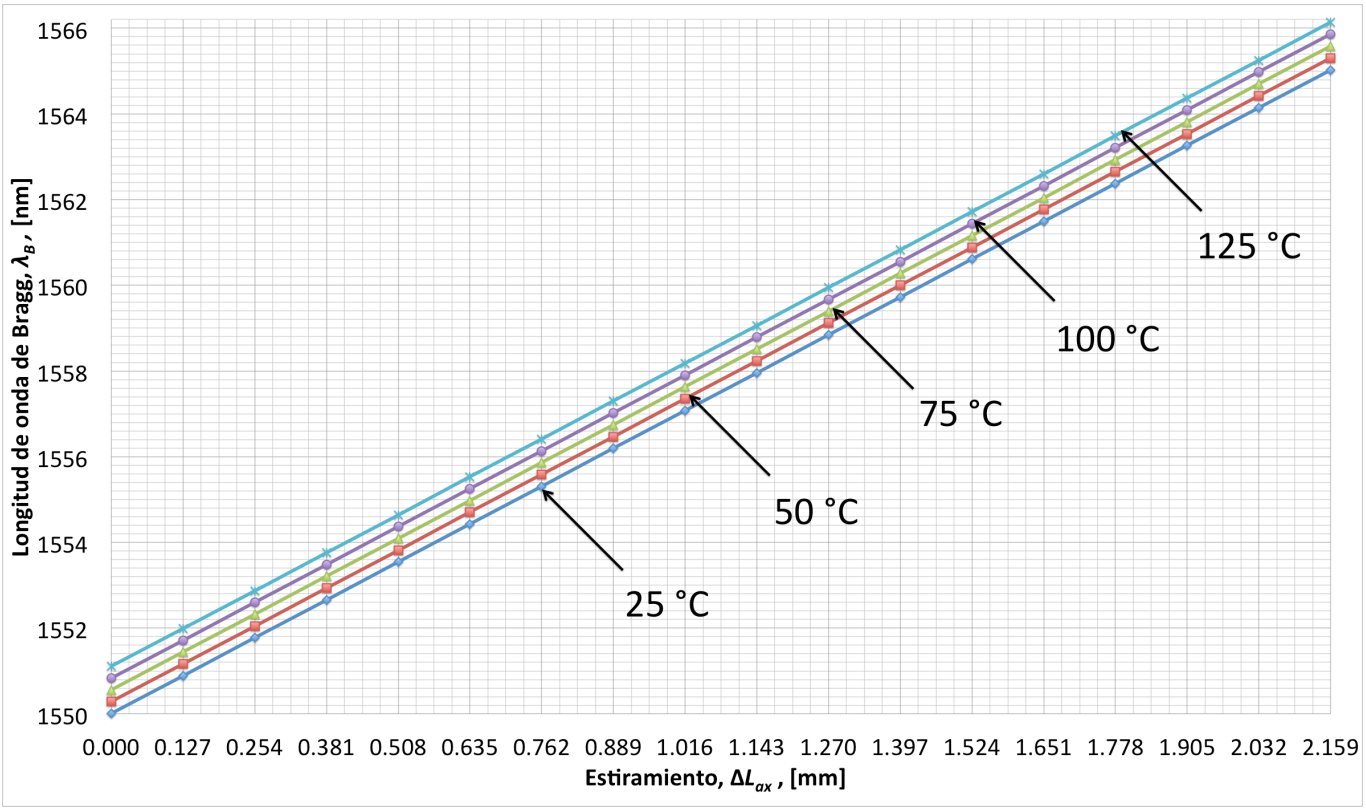


Figura 2.12. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Estiramiento, ΔL_{ax} en [mm]. Cada recta corresponde a un valor diferente de temperatura, T_{FBG}, presentado por la rejilla de Bragg Modelo 136802.

- *Rejilla de Bragg Modelo 136806, Marca Smart Fibres.*

Los valores de las variables indicadas anteriormente para llevar a cabo la simulación en el programa de MATLAB son:

- $\lambda_{B_0} = 1550.062$ [nm]
- $T_0 = 25$ [°C]
- $\Delta T = 0{:}\,25{:}\,100$ [°C]
- $L_0 = 166.0$ [mm]
- $\Delta L_{ax} = 0{:}\,0.127{:}\,2.159$ [mm]

Los resultados obtenidos a través de esta simulación se encuentran registrados en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136806 para diferentes valores de tensión axial y temperatura.

		Temperatura, T_{FBG}, [°C]				
Estiramiento, ΔL_{ax}, [mm]	Tensión, ε_{ax}, [mε]	25	50	75	100	125
0.000	0.000	1550.062	1550.337	1550.611	1550.886	1551.161
0.127	0.765	1550.929	1551.204	1551.479	1551.754	1552.029
0.254	1.530	1551.797	1552.072	1552.347	1552.622	1552.897
0.381	2.295	1552.664	1552.939	1553.215	1553.490	1553.765
0.508	3.060	1553.531	1553.807	1554.082	1554.358	1554.633
0.635	3.825	1554.399	1554.674	1554.950	1555.225	1555.501
0.762	4.590	1555.266	1555.542	1555.818	1556.093	1556.369
0.889	5.355	1556.134	1556.409	1556.685	1556.961	1557.237
1.016	6.120	1557.001	1557.277	1557.553	1557.829	1558.105
1.143	6.886	1557.868	1558.144	1558.421	1558.697	1558.973
1.270	7.651	1558.736	1559.012	1559.288	1559.564	1559.841
1.397	8.416	1559.603	1559.879	1560.156	1560.432	1560.709
1.524	9.181	1560.470	1560.747	1561.024	1561.300	1561.577
1.651	9.946	1561.338	1561.614	1561.891	1562.168	1562.445
1.778	10.711	1562.205	1562.482	1562.759	1563.036	1563.313
1.905	11.476	1563.072	1563.349	1563.627	1563.904	1564.181
2.032	12.241	1563.940	1564.217	1564.494	1564.771	1565.049
2.159	13.006	1564.807	1565.084	1565.362	1565.639	1565.917

En la Figura 2.13 se observa la respuesta teórica de la rejilla de Bragg Modelo 136806 a cambios en su tensión para diferentes valores de temperatura.

En dicha figura se observa cómo cambia la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, al modificar los valores de tensión y temperatura que actúan sobre ésta.

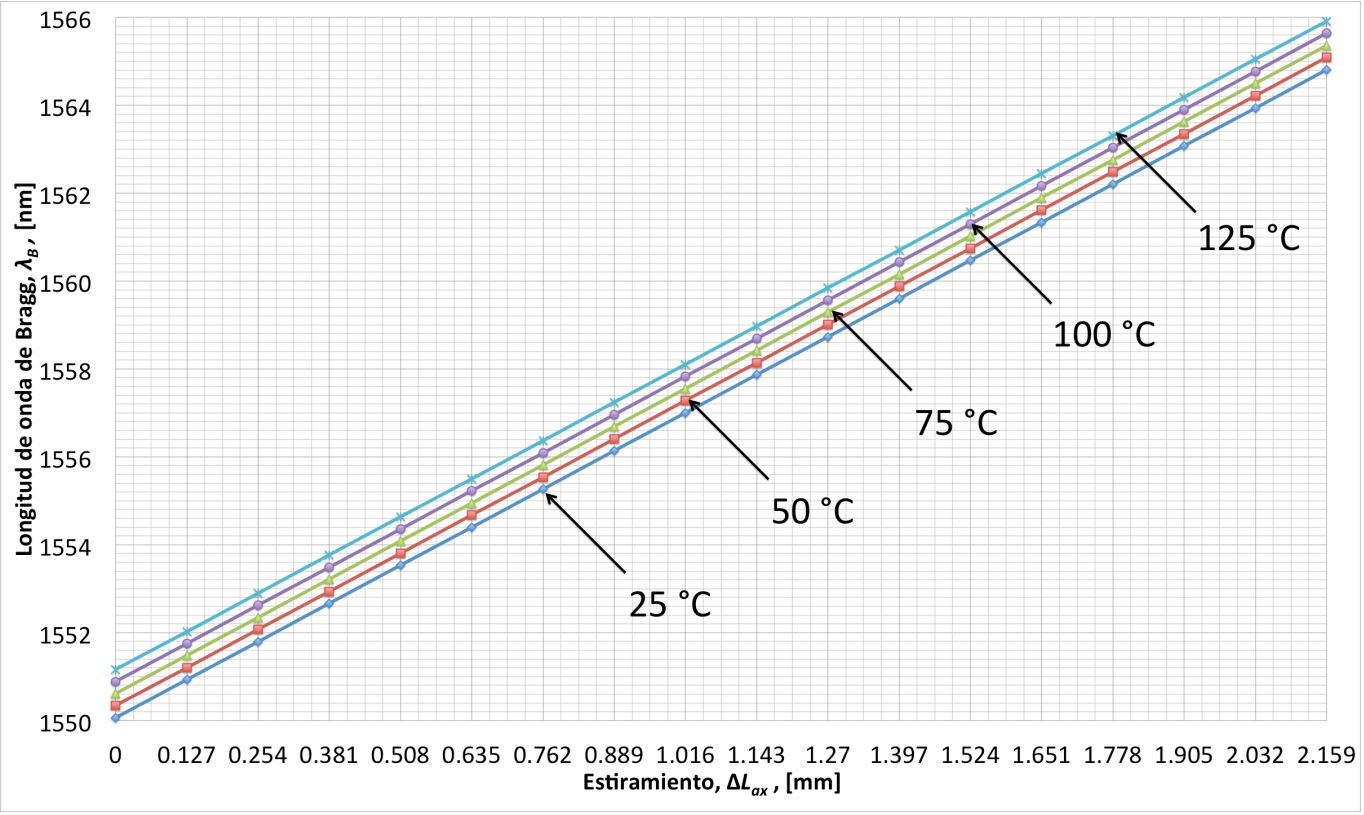


Figura 2.13. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Estiramiento, ΔL_{ax} en [mm]. Cada recta corresponde a un valor diferente de temperatura, T_{FBG}, presentado por la rejilla de Bragg Modelo 136806.

- *Rejilla de Bragg Modelo 136807, Marca Smart Fibres.*

Los valores de las variables indicadas anteriormente para llevar a cabo la simulación en el programa de MATLAB son:

- $\lambda_{B_0} = 1550.048$ [nm]
- $T_0 = 25$ [°C]
- $\Delta T = 0{:}\,25{:}\,100$ [°C]
- $L_0 = 177.8$ [mm]
- $\Delta L_{ax} = 0{:}\,0.127{:}\,2.159$ [mm]

Los resultados obtenidos a través de esta simulación se encuentran registrados en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136807 para diferentes valores de tensión axial y temperatura.

		Temperatura, T_{FBG}, [°C]				
Estiramiento, ΔL_{ax}, [mm]	Tensión, ε_{ax}, [mε]	25	50	75	100	125
0.000	0.000	1550.048	1550.323	1550.597	1550.872	1551.147
0.127	0.714	1550.858	1551.133	1551.408	1551.682	1551.957
0.254	1.429	1551.668	1551.943	1552.218	1552.493	1552.768
0.381	2.143	1552.477	1552.753	1553.028	1553.303	1553.578
0.508	2.857	1553.287	1553.562	1553.838	1554.113	1554.388
0.635	3.571	1554.097	1554.372	1554.648	1554.923	1555.199
0.762	4.286	1554.907	1555.182	1555.458	1555.734	1556.009
0.889	5.000	1555.717	1555.992	1556.268	1556.544	1556.820
1.016	5.714	1556.526	1556.802	1557.078	1557.354	1557.630
1.143	6.429	1557.336	1557.612	1557.888	1558.164	1558.440
1.270	7.143	1558.146	1558.422	1558.698	1558.974	1559.251
1.397	7.857	1558.956	1559.232	1559.508	1559.785	1560.061
1.524	8.571	1559.765	1560.042	1560.318	1560.595	1560.871
1.651	9.286	1560.575	1560.852	1561.128	1561.405	1561.682
1.778	10.000	1561.385	1561.662	1561.939	1562.215	1562.492
1.905	10.714	1562.195	1562.472	1562.749	1563.026	1563.302
2.032	11.429	1563.005	1563.282	1563.559	1563.836	1564.113
2.159	12.143	1563.814	1564.092	1564.369	1564.646	1564.923

En la Figura 2.14 se muestra la respuesta teórica de la rejilla de Bragg Modelo 136807 ante variaciones de temperatura y tensión.

En dicha figura se observa que el cambio en la longitud de onda de Bragg de la rejilla es directamente proporcional al valor de tensión y temperatura de éste dispositivo.

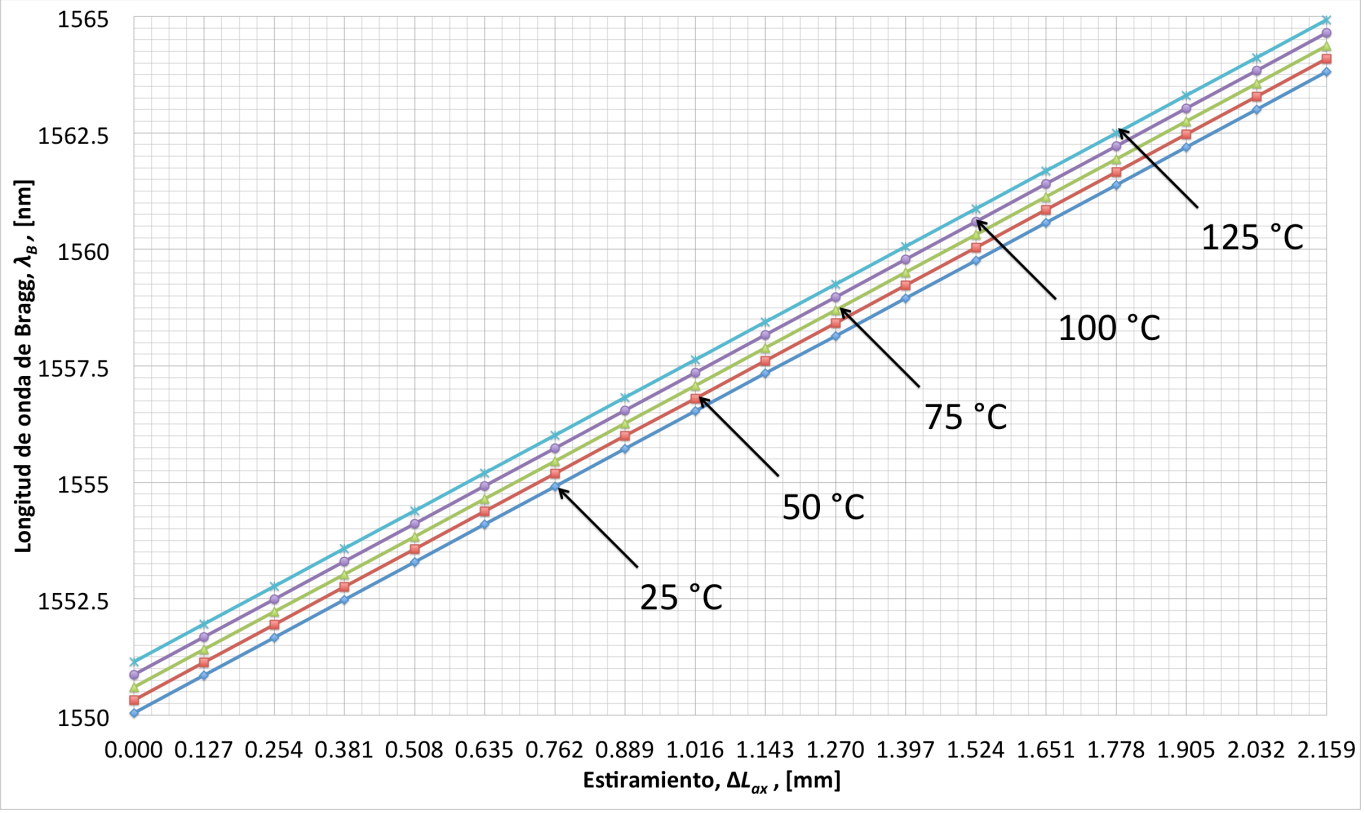


Figura 2.14. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Estiramiento, ΔL_{ax} en [mm]. Cada recta corresponde a un valor diferente de temperatura, T_{FBG}, presentado por la rejilla de Bragg Modelo 136807.

- *Rejilla de Bragg Modelo 136810, Marca Smart Fibres.*

Los valores de las variables indicadas anteriormente para llevar a cabo la simulación en el programa de MATLAB son:

- $\lambda_{B_0} = 1550.141$ [nm]
- $T_0 = 25$ [°C]
- $\Delta T = 0{:}\,25{:}\,100$ [°C]
- $L_0 = 152.4$ [mm]
- $\Delta L_{ax} = 0{:}\,0.127{:}\,2.159$ [mm]

Los resultados obtenidos a través de esta simulación se encuentran registrados en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136810 para diferentes valores de tensión axial y temperatura.

		Temperatura, T_{FBG}, [°C]				
Estiramiento, ΔL_{ax}, [mm]	Tensión, ε_{ax}, [mε]	25	50	75	100	125
0.000	0.000	1550.141	1550.416	1550.691	1550.965	1551.240
0.127	0.833	1551.086	1551.361	1551.636	1551.911	1552.186
0.254	1.667	1552.031	1552.306	1552.581	1552.856	1553.131
0.381	2.500	1552.975	1553.251	1553.526	1553.801	1554.076
0.508	3.333	1553.920	1554.196	1554.471	1554.747	1555.022
0.635	4.167	1554.865	1555.141	1555.416	1555.692	1555.967
0.762	5.000	1555.810	1556.086	1556.361	1556.637	1556.913
0.889	5.833	1556.755	1557.031	1557.307	1557.582	1557.858
1.016	6.667	1557.699	1557.976	1558.252	1558.528	1558.804
1.143	7.500	1558.644	1558.921	1559.197	1559.473	1559.749
1.270	8.333	1559.589	1559.866	1560.142	1560.418	1560.695
1.397	9.167	1560.534	1560.811	1561.087	1561.364	1561.640
1.524	10.000	1561.479	1561.756	1562.032	1562.309	1562.586
1.651	10.833	1562.424	1562.700	1562.977	1563.254	1563.531
1.778	11.667	1563.368	1563.645	1563.923	1564.200	1564.477
1.905	12.500	1564.313	1564.590	1564.868	1565.145	1565.422
2.032	13.333	1565.258	1565.535	1565.813	1566.090	1566.368
2.159	14.167	1566.203	1566.480	1566.758	1567.036	1567.313

En la Figura 2.15 se muestra la respuesta teórica de la rejilla de Bragg Modelo 136810 ante variaciones de temperatura y tensión.

En dicha figura se observa que el cambio en la longitud de onda de Bragg de la rejilla es directamente proporcional al valor de tensión y temperatura de éste dispositivo.

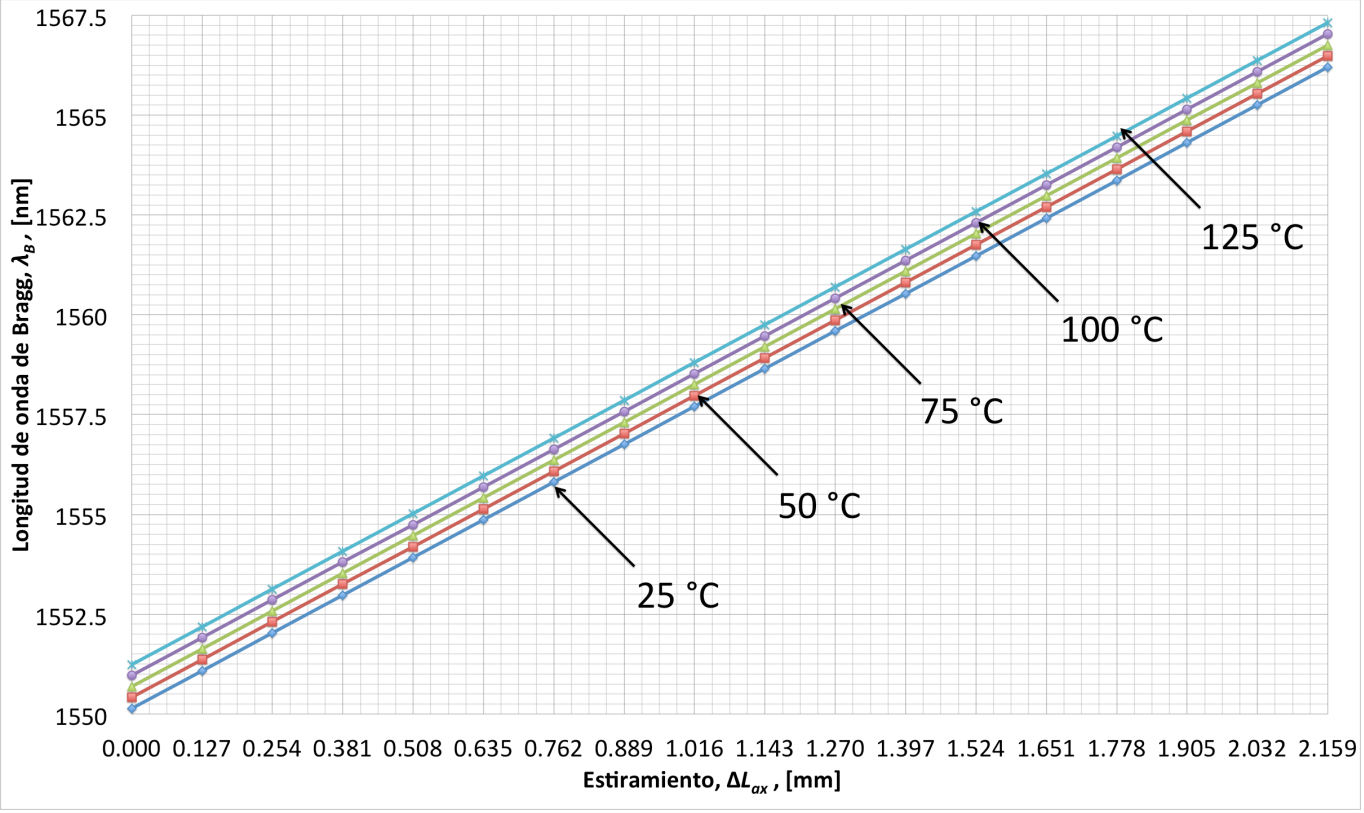


Figura 2.15. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Estiramiento, ΔL_{ax} en [mm]. Cada recta corresponde a un valor diferente de temperatura, T_{FBG}, presentado por la rejilla de Bragg Modelo 136810.

2.6. Conclusiones.

Al realizar las simulaciones que permiten conocer la respuesta teórica de una rejilla de Bragg ante cambios en la tensión y la temperatura, se observó que la longitud de onda de Bragg cambia proporcionalmente según el valor de tensión y/o temperatura que presente la rejilla, presentando un comportamiento lineal en ambos casos.

En las simulaciones de tensión de las diferentes rejillas de Bragg se obtuvieron pendientes de distintas magnitudes en cuanto a las gráficas de Longitud de onda de Bragg vs. Estiramiento se refiere, lo cual se debe a los diferentes valores que se tomaron en cuenta para la variable que representa a la longitud inicial de la fibra, L_0, ya que mientras mayor sea el valor de ésta variable, menor será la magnitud de la pendiente S_{est}.

Sin embargo, el valor de la pendiente que representa la sensibilidad teórica de la fibra ante la tensión axial, $S_{\varepsilon_{ax}}$, fue el mismo para los tres modelos de rejillas de Bragg involucrados en las simulaciones, hecho que se debe al valor del coeficiente de tensión, K_ε utilizado, el cual corresponde al de la fibra SMF-28e (ver Tabla 2.1).

Al igual que en las gráficas que relacionan la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, con la tensión axial aplicada a la fibra, ε_{ax}, en las simulaciones de temperatura también se obtuvo el mismo valor de sensibilidad térmica teórica, S_{Temp}, para las tres rejillas de Bragg utilizadas, lo cual quiere decir que cómo las tres rejillas están hechas sobre fibra SMF-28e presentan la misma sensibilidad teórica ante cambios en la temperatura.

Finalmente, se observaron los efectos conjuntos del cambio en la tensión y la temperatura en una rejilla sobre la longitud de onda de Bragg de la misma, encontrando un cambio mayor en el estiramiento de la fibra, comparado con el calentamiento de la misma. Este hecho juega un papel muy importante en el diseño y fabricación de un OADM sintonizable mediante tensión basado en rejillas de Bragg, pues teóricamente podemos alcanzar un rango de sintonización de alrededor de 15 [nm], sin embargo el efecto de la temperatura en este dispositivo representa un problema, pues teóricamente tenemos un cambio en la longitud de onda de Bragg de 1 [nm] aproximadamente, con lo cual tendríamos problemas con al menos dos canales DWDM con espaciamiento de 50 [GHz], esto debido a que dicho espaciamiento entre canales tiene un valor de 0.4 [nm].

2.7. Referencias.

[1] M. Ferchichi, M. Najjar, and H. Rezig, “Design of Temperature-Strain Tunable UDWDM, DWDM, WDM FBG filter for Passive Optical Network Access,” *Mediterranean Winter, 2008. ICTON-MW 2008. 2nd ICTON* , vol., no., pp.1,5, 11-13 December 2008.

[2] R. Kashyap. *Fiber Bragg Gratings*. 1st. ed., pp. 85-93, 152-155, 263-284. London: Academic Press, Optics and Photonics, 1999.

[3] Mohammad, N.; Szyszkowski, W.; Zhang, W.J.; Haddad, E.I.; Zou, J.; Jamroz, W.; Kruzelecky, R., "Analysis and development of a tunable fiber Bragg grating filter based on axial tension/compression,"*Lightwave Technology, Journal of* , vol.22, no.8, pp.2001,2013, August 2004

[4] Weiwei Qiu; Xusheng Cheng; Yanhua Luo; Qijin Zhang; Bing Zhu, "Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using a Single Bragg Grating in a Few-Mode Polymer Optical Fiber," in *Lightwave Technology, Journal of* , vol.31, no.14, pp.2419-2425, July15, 2013.

[5] Ferchichi, M.; Najjar, M.; Rezig, H., "Pulse reflection of tunable Fiber Bragg Grating WDM filter," in *Telecommunications (ICT), 2010 IEEE 17th International Conference on* , vol., no., pp.538-543, 4-7 April 2010.

[6] J.P. Rendón, “Rejillas de Bragg en Fibras Ópticas como Sensores de Tensión y Temperatura, en el Monitoreo de Estructuras”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Mayo 2014.

[7] S. M. Melle, K. Liu, and R. M. Measures, “Practical fiber-optic Bragg grating strain gauge system,” *Optical Society of America, Applied Optics*, vol. 32, no. 19, pp. 3601, 3609, July 1993

[8] Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Plata , “Galgas Extensiométricas Strain Gages 1”, Consultado en Mayo 2015. [Online]. Available: http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Strain_Gages_1.pdf

[9] Cad Cae Ingeniería Ltda., “Strain Gages”, Consultado en Mayo 2015. [Online]. Available: http://www.cad-cae.com/strain_gages.html

[10] Bhowmik, K.; Rajan, G.; Peng, G.; Ambikairajah, E.; Luo, Y.; Walsh, B.; Lovric, V., "Experimental Study and Analysis of Hydrostatic Pressure Sensitivity of Polymer Fibre Bragg Gratings," Lightwave Technology, Journal of , vol.PP, no.99, pp.1,1.

[11] Lei Liang; Yongjiao Wang; Haokun Mi; Yinquan Yuan, "Effects of strain and temperature change on the spectra of superstructure fiber gratings," in *Electronics and Optoelectronics (ICEOE), 2011 International Conference on* , vol.2, no., pp.V2-261-V2-264, 29-31 July 2011

[12] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, “Fiber Grating Sensors,” *Journal of Lightwave Technology,* vol. 15, no. 8, August 1997

[13] Ramakrishnan, M.; Rajan, G.; Semenova, Y.; Farrell, G., "Hybrid Fiber Optic Sensor System for Measuring the Strain, Temperature, and Thermal Strain of Composite Materials," in *Sensors Journal, IEEE* , vol.14, no.8, pp.2571-2578, August 2014.

[14] S. T. Kreger, D. K. Gifford, M. E. Froggatt, B. J. Soller, and M. S. Wolfe, “High Resolution Distributed Strain or Temperature Measurements in Single- and Multi-mode Fiber Using Swept-Wavelength Interferometry,” *Luna Technologies, 2020 Kraft Dr. Suite 2000, Blacksburg, VA 24060,* 2006.

[15] Héctor Arellano Sotelo, “Aplicación de las rejillas de Bragg en fibra óptica para medición de vibraciones en eventos de baja frecuencia,” Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones en Óptica, Gto., México, 2006.

[16] Lima, H.F.; Antunes, P.F.; de Lemos Pinto, J.; Nogueira, R.N., "Simultaneous Measurement of Strain and Temperature With a Single Fiber Bragg Grating Written in a Tapered Optical Fiber," in *Sensors Journal, IEEE* , vol.10, no.2, pp.269-273, February 2010.

[17] Liu, Mingyao; Zhang, Zhijian; Ji, Dongliang; Xiao, Shuang, "Temperature characteristic of ring type dynamometer based on FBG sensors," in *Mechatronics and Automation (ICMA), 2015 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.1070-1075, 2-5 August 2015.

[18] Tianshu Wang; Guo, Yubin; Xiaosu Zhan; Ming Zhao; Ke Wang, "Simultaneous Measurements of Strain and Temperature with Dual Fiber Bragg Gratings for Pervasive Computing," in *Pervasive Computing and Applications, 2006 1st International Symposium on* , vol., no., pp.786-790, 3-5 August 2006.

[19] Hill, Kenneth O.; Meltz, G., "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.15, no.8, pp.1263,1276, August 1997.

[20] Y.-H. Zhu, G.-X. Wang, and H. Qi, "Temperature Characteristic of Fiber Bragg Grating*", Proceedings of International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, vol. 8, pp. 4020-4022, 2011.

[21] Andreas Frank; Philipp M. Nellen; and Urs J. Sennhauser, "Novel methods for simultaneous strain and temperatura measurements with optical fiber Bragg gratings", *Proc. SPIE* 3860, Fiber Optic Sensor Technology and Applications, 89 (December 9, 1999).

[22] Xiufeng Yang; Xinyong Dong; Chun-liu Zhao; Jun Hong Ng; Qizhen Peng, et al., "Temperature-independent measurement of displacement based on the chirp tuning of a fiber grating", *Opt. Eng.* 44(7), 074401 (July 18, 2005).

[23] Bashir Ahmed Tahir; Jalil Ali; and Rosly Abdul Rahman, "Fiber Bragg Grating Based System For Temperature Measurements", *International Journal of Modern Physics B*, vol. 23, no. 10, pp. 2349-2356, April 2009.

[24] Keke Tian; Yuliang Liu; and Qiming Wang, "Temperature-independent fiber Bragg grating strain sensor using bimetal cantilever", *Optical Fiber Technology 11*, pp. 370-377, May 2005.

Capítulo 3.

Caracterización de las Rejillas de Bragg.

3.1. Objetivo.

Realizar el estudio experimental de la respuesta espectral de una rejilla de Bragg ante cambios a la tensión y temperatura de operación.

3.2. Introducción.

En este capítulo se realiza un estudio experimental de la respuesta espectral de las rejillas de Bragg.

A través del interrogador de rejillas se estudiaron las características espectrales de las rejillas de Bragg en ausencia de tensión y cambio en la temperatura, al aplicarles tensión y al cambiar su temperatura.

En la caracterización de las rejillas en ausencia de tensión y sin cambio en la temperatura se registró el valor de la longitud de onda pico además del ancho de banda, mientras que para la caracterización de las rejillas bajo efectos de tensión y temperatura se realizó una tabulación con las diferentes mediciones de longitud de onda realizadas y su correspondiente valor de temperatura y tensión según fuese el caso.

3.3. Respuesta espectral de las rejillas de Bragg en ausencia de tensión y sin cambio en la temperatura.

3.3.1. Equipo empleado.

El equipo utilizado en el proceso de caracterización de las Rejillas de Bragg se enumera a continuación:

1. Fuente óptica de amplio espectro: Marca Agilent, Modelo 83437A.
2. Circulador óptico de 3 puertos: Número de serie 906221[2].
3. Conectores FC/FC.
4. Rejilla de Bragg: Marca Smart Fibres (Posteriormente se especificarán las características propias de cada una de las rejillas utilizadas).
5. Interrogador de Rejillas de Bragg: Marca Ibsen Photonics, Modelo I-MON 512 E-USB 2.0.
6. Software del interrogador de rejillas v. 2.0.
7. Computadora.

[2] Las especificaciones técnicas de dicho circulador óptico pueden consultarse en la Tabla B.1 del Anexo B de esta tesis.

3.3.2. Metodología.

Para la caracterización de las rejillas de Bragg sin aplicación de estímulos externos tales como tensión y/o temperatura, se estudió el espectro en reflexión de las mismas, obteniendo así su longitud de onda pico (la cual se consideró como la longitud de onda de Bragg para cada rejilla en específico) y su ancho espectral.

3.3.3. Descripción de la instalación.

El diagrama de la instalación montada para llevar a cabo la caracterización de las rejillas de Bragg se muestra en la Figura 3.1.

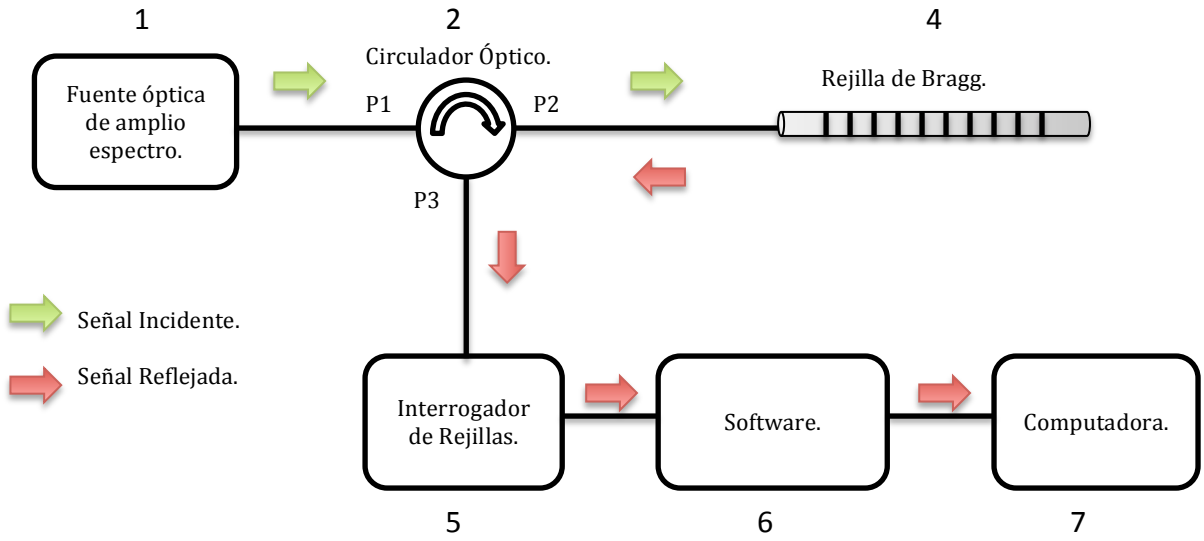


Figura. Diagrama de la instalación montada para la caracterización de las rejillas en ausencia de factores externos (Los números corresponden a la lista del equipo usado en la sección 3.3.1).

Las especificaciones técnicas de la fuente óptica de amplio espectro utilizada se mencionan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Especificaciones técnicas de la fuente óptica Agilent 83437A [1].

Longitud de onda de la fuente [nm]	1430	1550	1650
Longitud de onda pico [nm]	1430 ± 30	1550 ± 20	1650 ± 30
Potencia total	> -13 [dBm]	> -13 [dBm]	> -17 [dBm]
	> 50 [μW]	> 50 [μW]	> 20 [μW]

En la Figura 3.2 se observa el espectro de la fuente óptica Marca Agilent Modelo 83437 A. Cabe mencionar que la potencia mínima registrada en dicho espectro es de 2253 [counts][u.a.][3], mientras que la potencia máxima es de 3036 [counts][u.a.] [2].

Es importante mencionar que las variaciones de potencia presentadas a lo largo de los diferentes experimentos pueden deberse a pérdidas de inserción y/o pérdidas de acoplamiento entre los dispositivos, sin embargo no serán consideradas en esta tesis ya que solo se caracteriza la longitud de onda de Bragg y no la potencia.

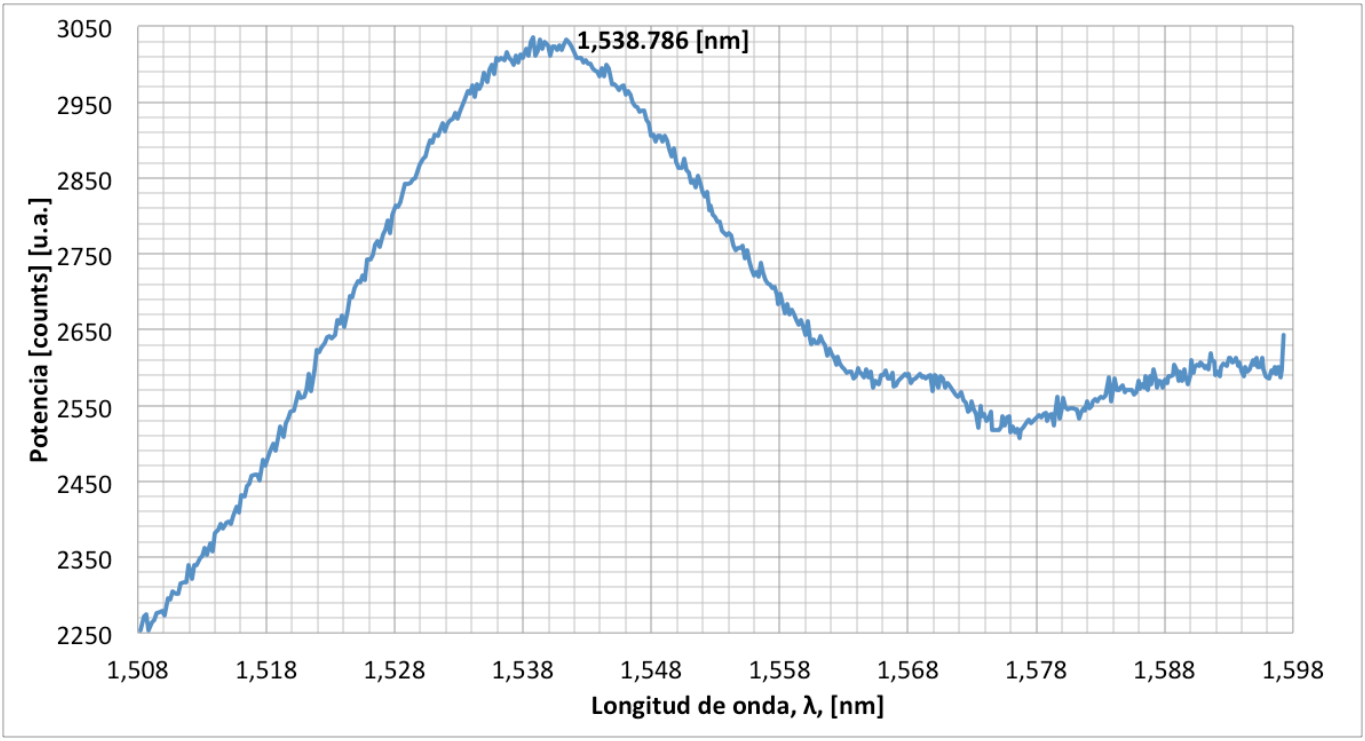


Figura 3.2. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectro de la fuente óptica de amplio espectro Marca Agilent, Modelo 83437A.

En la Figura 3.2 se observa que la fuente óptica de amplio espectro Marca Agilent, Modelo 83437A presenta la mayor potencia en la longitud de onda $\lambda = 1538.786\ [\mathrm{nm}]$.

Por otro lado, en el puerto 2 del circulador se conectaron las rejillas de Bragg a caracterizar mediante un conector FC-FC, esto con la finalidad de que la longitud de onda de Bragg sea reflejada en el puerto 3 del circulador, en el cual se encontraba conectado el Interrogador de Rejillas. Este arreglo de conexiones se muestra en la Figura 3.3.

[3] Se utiliza [u.a.] para especificar que las unidades de potencia proporcionadas por el interrogador de rejillas de Bragg Marca Ibsen Photonics, Modelo I-MON 512 E-USB 2.0 son "unidades arbitrarias" debido a que su funcionamiento se centra en la determinación de longitudes de onda y sus unidades correspondientes.

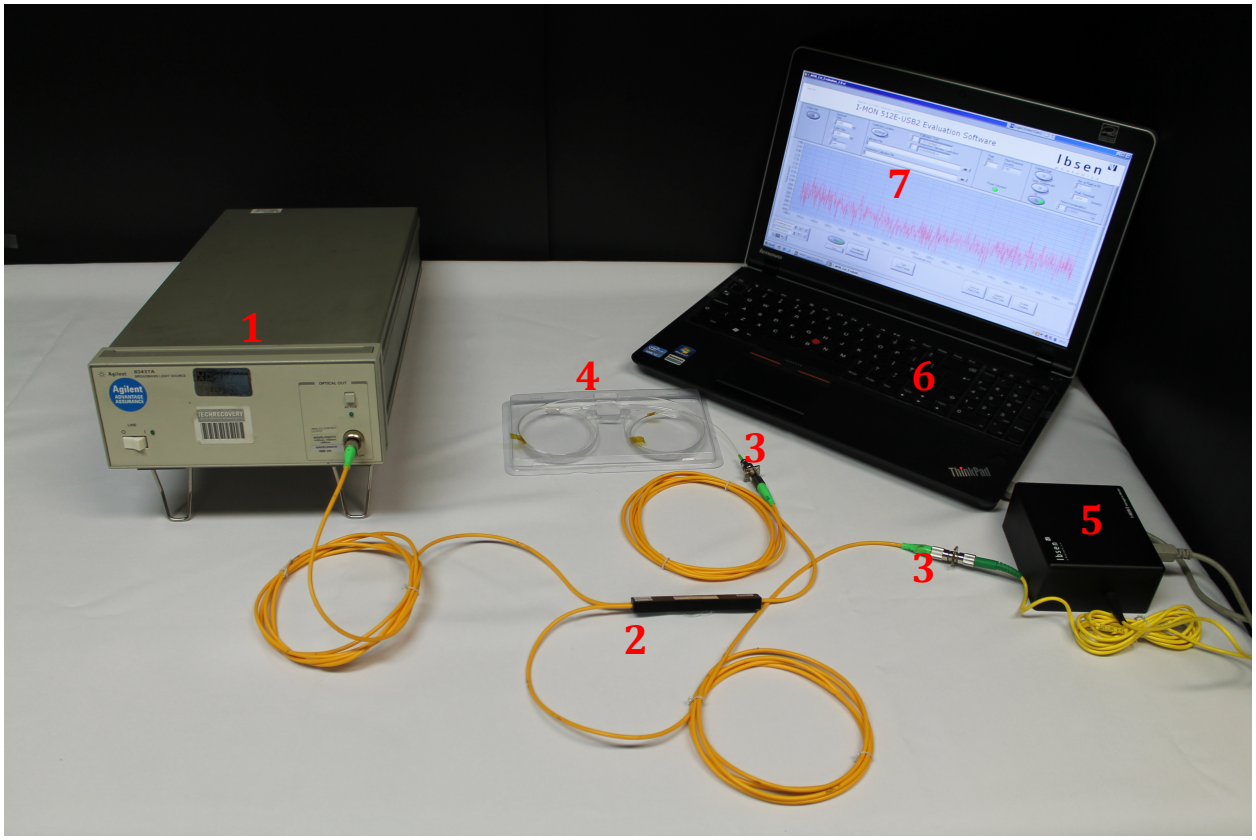


Figura 3.3. Arreglo de conexiones empleado para la caracterización de las rejillas de Bragg sin variación de los parámetros de operación (Los números corresponden a la lista del equipo usado en la sección 3.3.1).

Con ayuda del Interrogador de Rejillas I-MON 512 E-USB 2.0 se observó la respuesta espectral de cada una de las rejillas de Bragg utilizadas en este experimento, obteniendo de esta manera su longitud de onda pico y su ancho espectral.

3.3.4. Resultados.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada una de las rejillas de Bragg utilizadas.

- *Rejilla de Bragg Modelo 136802, Marca Smart Fibres.*

Tabla 3.2. Características de la rejilla de Bragg Modelo 136802.				
	λ_B [nm]	BW @ - 3 dB [nm]	Otros aspectos	
Datos del fabricante	1550.010	0.175	SLSR [dB]	Reflectividad
Datos experimentales	1549.985	0.380[4]	19.12	93.11 %

[4] Debido a que el software del interrogador de rejillas proporciona unidades arbitrarias de potencia, se recurrió a considerar el valor promedio proporcionado por éste como la mitad de la potencia de la señal, esto con la finalidad de obtener el ancho espectral a -3 [dB] aproximado. Cabe mencionar que este procedimiento se ocupó para las rejillas restantes.

En la Figura 3.4 se observa la gráfica de la respuesta espectral de la rejilla de Bragg bajo estudio.

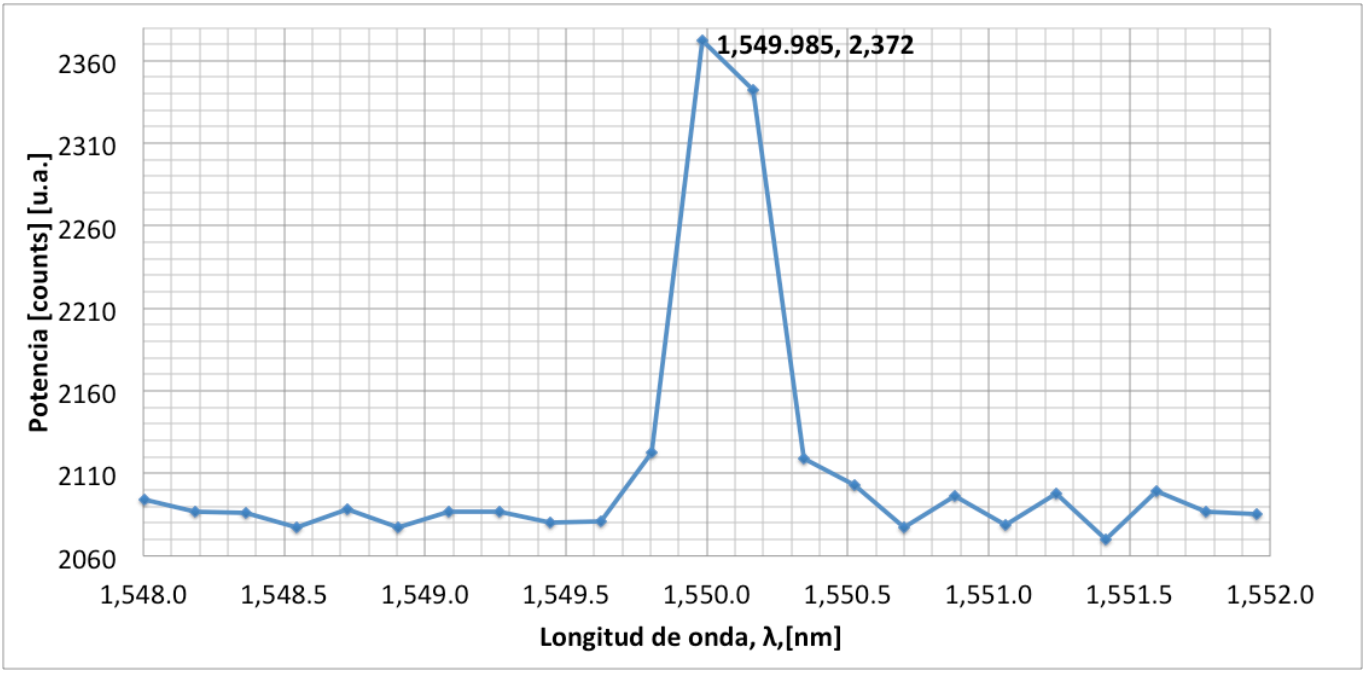


Figura 3.4. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Rejilla de Bragg Modelo 136802.

La rejilla de Bragg Modelo 136802 presenta una longitud de onda pico, la cual se considerará como la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, de 1549.985 [nm], con una potencia de 2372 [counts][u.a.].

- *Rejilla de Bragg Modelo 136806, Marca Smart Fibres.*

Tabla 3.3. Características de la rejilla de Bragg Modelo 136806.

	λ_B [nm]	BW @ - 3 dB [nm]	Otros aspectos	
Datos del fabricante	1550.062	0.194	SLSR [dB]	Reflectividad
Datos experimentales	1550.164	0.340	17.79	96.38 %

En la Figura 3.5 se visualiza la gráfica de la respuesta espectral de la rejilla de Bragg bajo estudio.

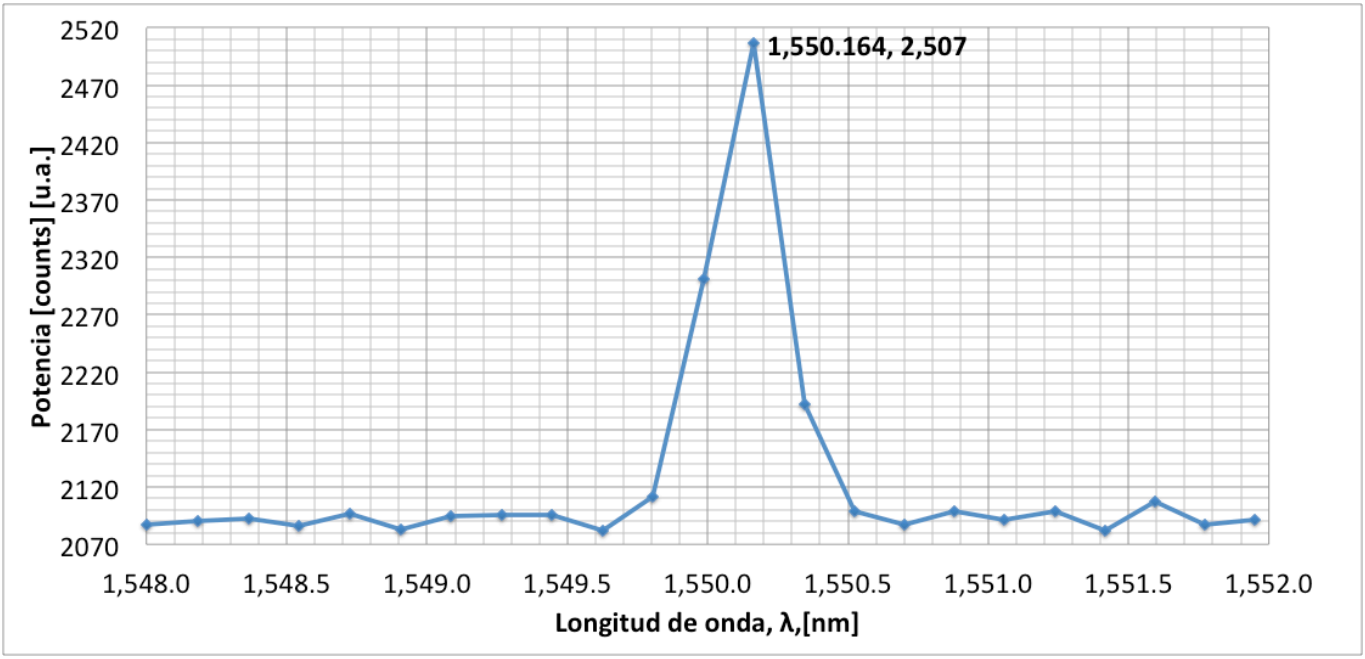


Figura 3.5. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Rejilla de Bragg Modelo 136806.

La rejilla de Bragg Modelo 136806 presenta una longitud de onda pico, la cual se considerará como la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, de 1550.164 [nm], con una potencia de 2507 [counts][u.a.].

- *Rejilla de Bragg Modelo 136807, Marca Smart Fibres.*

Tabla 3.4. Características de la rejilla de Bragg Modelo 136807.				
	λ_B [nm]	BW @ - 3 dB [nm]	Otros aspectos	
Datos del fabricante	1550.048	0.190	SLSR [dB]	Reflectividad
Datos experimentales	1550.165	0.350	21.18	95.26 %

En lo que respecta a esta rejilla de Bragg, en la Figura 3.6 se presenta su respuesta espectral.

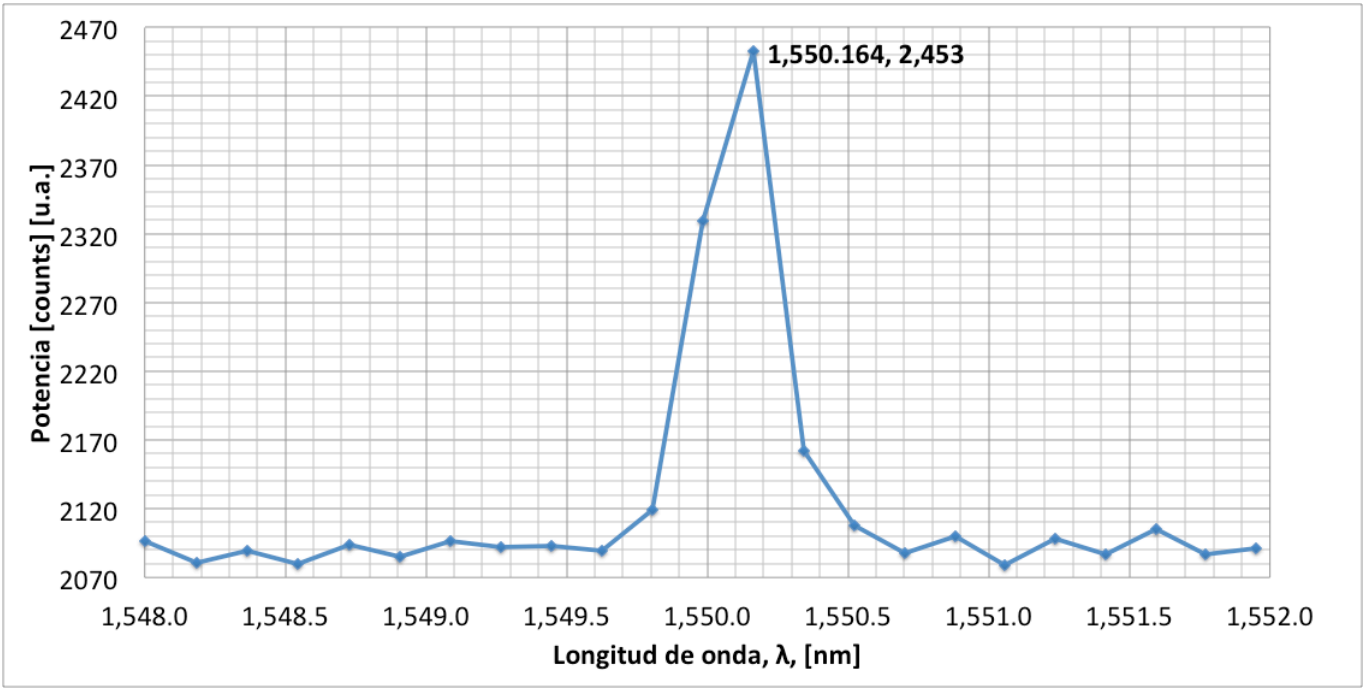


Figura 3.6. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Rejilla de Bragg Modelo 136807.

La rejilla de Bragg Modelo 136807 presenta una longitud de onda pico, la cual se considerará como la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, de 1550.164 [nm], con una potencia de 2453 [counts][u.a.].

- *Rejilla de Bragg Modelo 136810, Marca Smart Fibres.*

Tabla 3.5. Características de la rejilla de Bragg Modelo 136810.				
	λ_B [nm]	BW @ - 3 dB [nm]	Otros aspectos	
Datos del fabricante	1550.141	0.185	SLSR [dB]	Reflectividad
Datos experimentales	1550.165	0.260	18.53	95.99 %

La respuesta espectral de esta rejilla se muestra en la Figura 3.7.

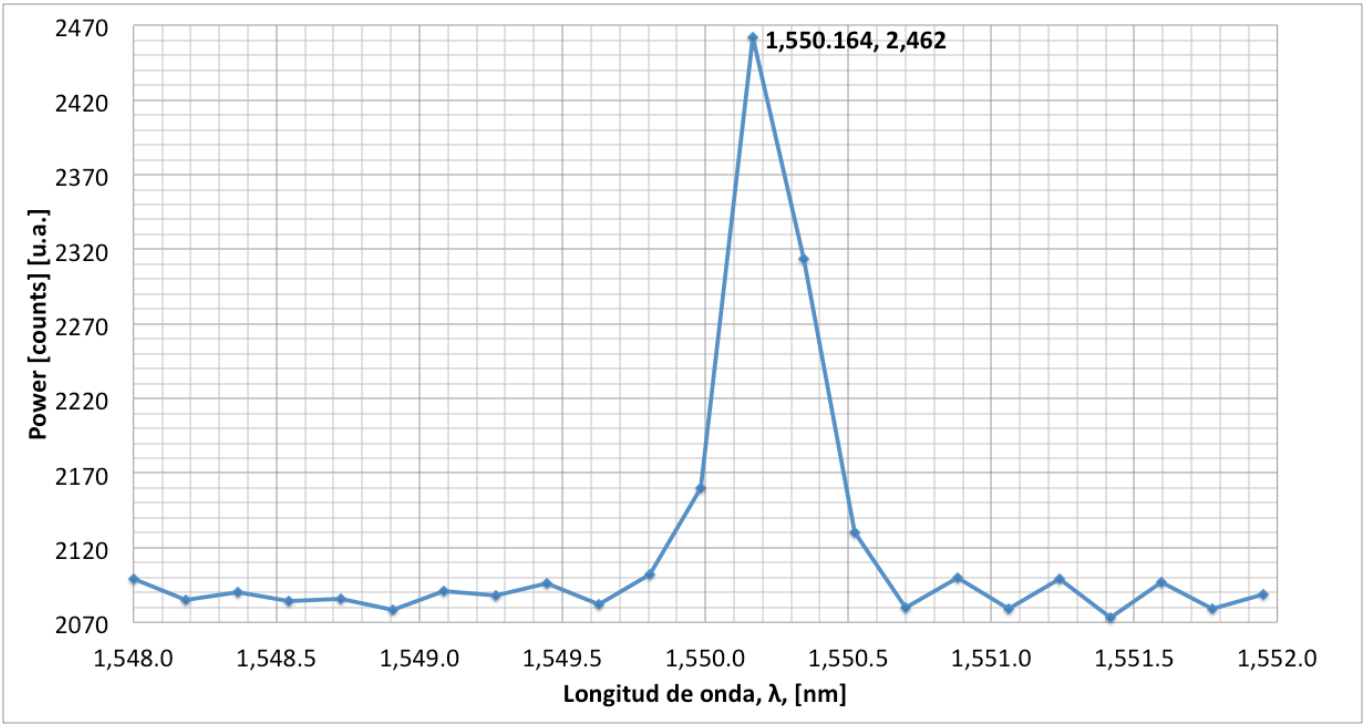


Figura 3.7. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Rejilla de Bragg Modelo 136810.

La rejilla de Bragg Modelo 136810 presenta una longitud de onda pico, la cual se considerará como la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, de 1550.164 [nm], con una potencia de 2462 [counts][u.a.].

Al estudiar las gráficas obtenidas en los experimentos de esta sección, se observa que las rejillas de Bragg Modelos 136806, 136807 y 136810 presentan la misma longitud de onda de Bragg experimental, $\lambda_B = 1550.165\,[\mathrm{nm}]$, sin embargo su respuesta espectral presenta diferencias en forma y potencia. Por otro lado, la rejilla de Bragg Modelo 136802 presenta un valor de longitud de onda de Bragg experimental de $1549.985\,[\mathrm{nm}]$. Es importante mencionar que en las pruebas experimentales realizadas sobre la rejilla de Bragg Modelo 136802 falto resolución en la medición, por tal motivo la respuesta espectral de esta rejilla difiere en la forma que presentan las rejillas restantes.

Por otro lado, los datos obtenidos experimentalmente difieren de los datos proporcionados por el fabricante de las rejillas, lo cual podría deberse a las características y funcionalidad del interrogador de rejillas y su respectivo software.

3.4. Respuesta espectral de las rejillas de Bragg a cambios en la tensión axial.

3.4.1. Equipo empleado.

El equipo empleado en este experimento se enumera a continuación:

1. Fuente óptica de amplio espectro: Marca Agilent, Modelo 83437A.
2. Circulador óptico de 3 puertos: Número de serie 906221.
3. Conectores FC/FC.
4. Rejilla de Bragg: Marca Smart Fibres.
5. Cabezas Micrométricas: Marca Mitutoyo, Modelo 148-811
6. Unidades de Desplazamiento: Marca Thorlabs, Modelo MT1-Z7.
7. Ranuras en V de 250 μm para sujetar la fibra óptica.
8. Placas de Acrílico para colocar y sujetar las ranuras en V a las unidades de desplazamiento.
9. Interrogador de Rejillas de Bragg: Marca Ibsen Photonics, Modelo I-MON 512 E-USB 2.0.
10. Software del interrogador de rejillas v. 2.0.
11. Computadora.

3.4.2. Metodología.

Con la finalidad de obtener la respuesta espectral de las rejillas de Bragg bajo los efectos de tensión, se diseño y construyó una base que permitiera sujetar la rejilla de Bragg de ambos extremos con ayuda de las ranuras en V de 250 [μm] y los soportes micrométricos tal como se muestra en la Figura 3.8.



Figura 3.8. Base diseñada y construida para llevar a cabo los experimentos en donde se cambia la tensión axial de la fibra óptica (Los números corresponden a la lista del equipo usado en la sección 3.4.1).

Una vez que la fibra se encontraba totalmente fija y colocada en un punto inicial de tensión sin que se vieran afectadas sus características físicas y espectrales (longitud inicial de la fibra óptica con la rejilla de Bragg, L_0), se comenzó a aplicar tensión axial, ε_{ax}, sobre ella a través del movimiento de las unidades de desplazamiento.
El estiramiento de la fibra, ΔL_{ax}, se logró a través de las cabezas micrométricas, en un rango que va de 0 a 2.159 [mm] con una resolución de 0.127 [mm].

En cada incremento de tensión se registró la longitud de onda pico del espectro de reflexión de la rejilla de Bragg, así como su respuesta espectral.

3.4.3. Descripción de la instalación.

El diagrama de la instalación utilizada para llevar a cabo la caracterización de las rejillas de Bragg bajo efectos de tensión se muestra en la Figura 3.9.

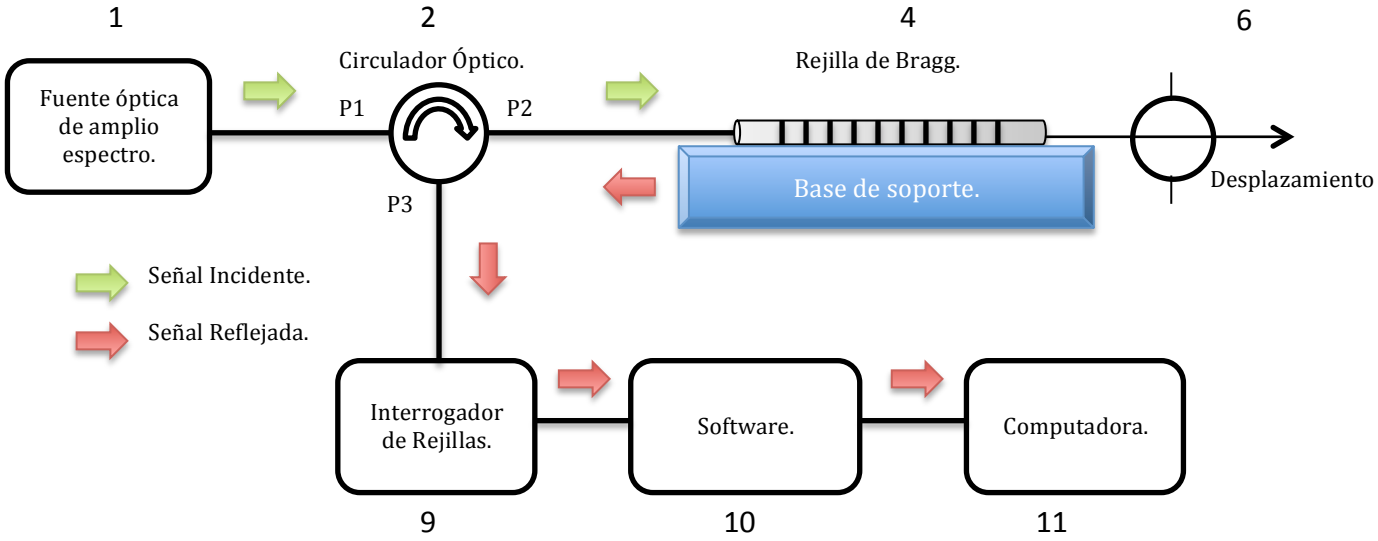


Figura 3.9. Diagrama de la instalación para la caracterización de las Rejillas bajo efectos de tensión (Los números corresponden a la lista del equipo usado en la sección 3.4.1).

En lo que respecta al arreglo de conexiones montado en este experimento, éste se muestra en la Figura 3.10.

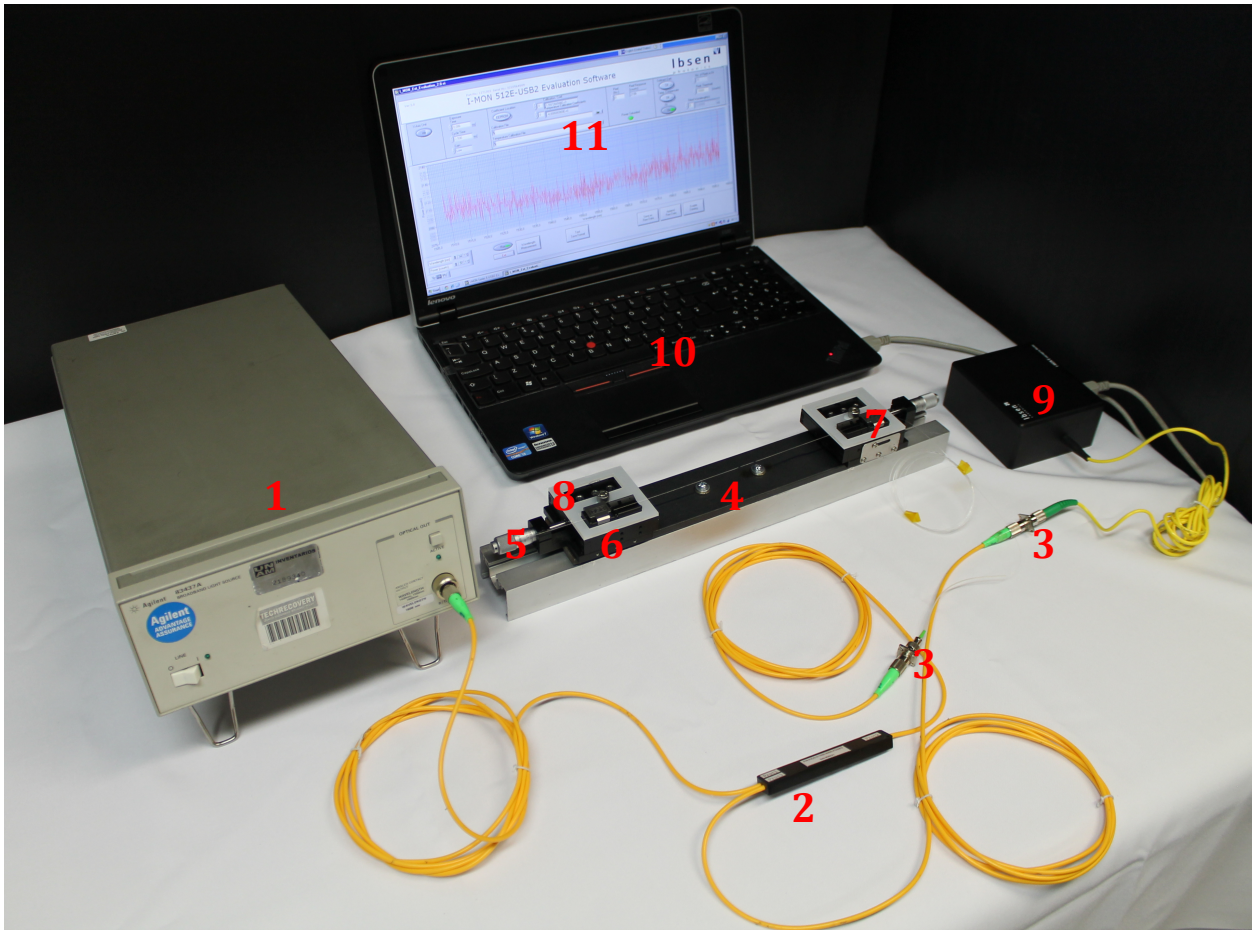


Figura 3.10. Arreglo de conexiones del experimento llevado a cabo para conocer la respuesta espectral de las rejillas de Bragg ante cambios en su tensión axial (Los números corresponden a la lista del equipo usado en la sección 3.4.1).

3.4.4. Resultados.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada una de las rejillas de Bragg empleadas.

- *Rejilla de Bragg Modelo 136802, Marca Smart Fibres.*

La longitud inicial de la fibra, L_0, fue de 163.0 [mm]. Los datos obtenidos en este experimento se encuentran registrados en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136802 para diferentes valores de tensión axial.

Estiramiento (ΔL_{ax}) [mm]	Tensión axial (ε_{ax}) [mε]	Longitud de onda de Bragg (λ_B) [nm]
0.000	0.000	1549.985
0.127	0.779	1550.702
0.254	1.558	1551.238

0.381	2.337	1551.951
0.508	3.117	1552.661
0.635	3.896	1553.370
0.762	4.675	1553.900
0.889	5.454	1554.605
1.016	6.233	1555.132
1.143	7.012	1555.833
1.270	7.791	1556.532
1.397	8.571	1557.228
1.524	9.350	1557.923
1.651	10.129	1558.615
1.778	10.908	1559.478
1.905	11.687	1560.165
2.032	12.466	1560.851

En la Figura 3.11 se observa la gráfica que relaciona la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, contra el estiramiento que sufrió la fibra óptica, ΔL_{ax}.

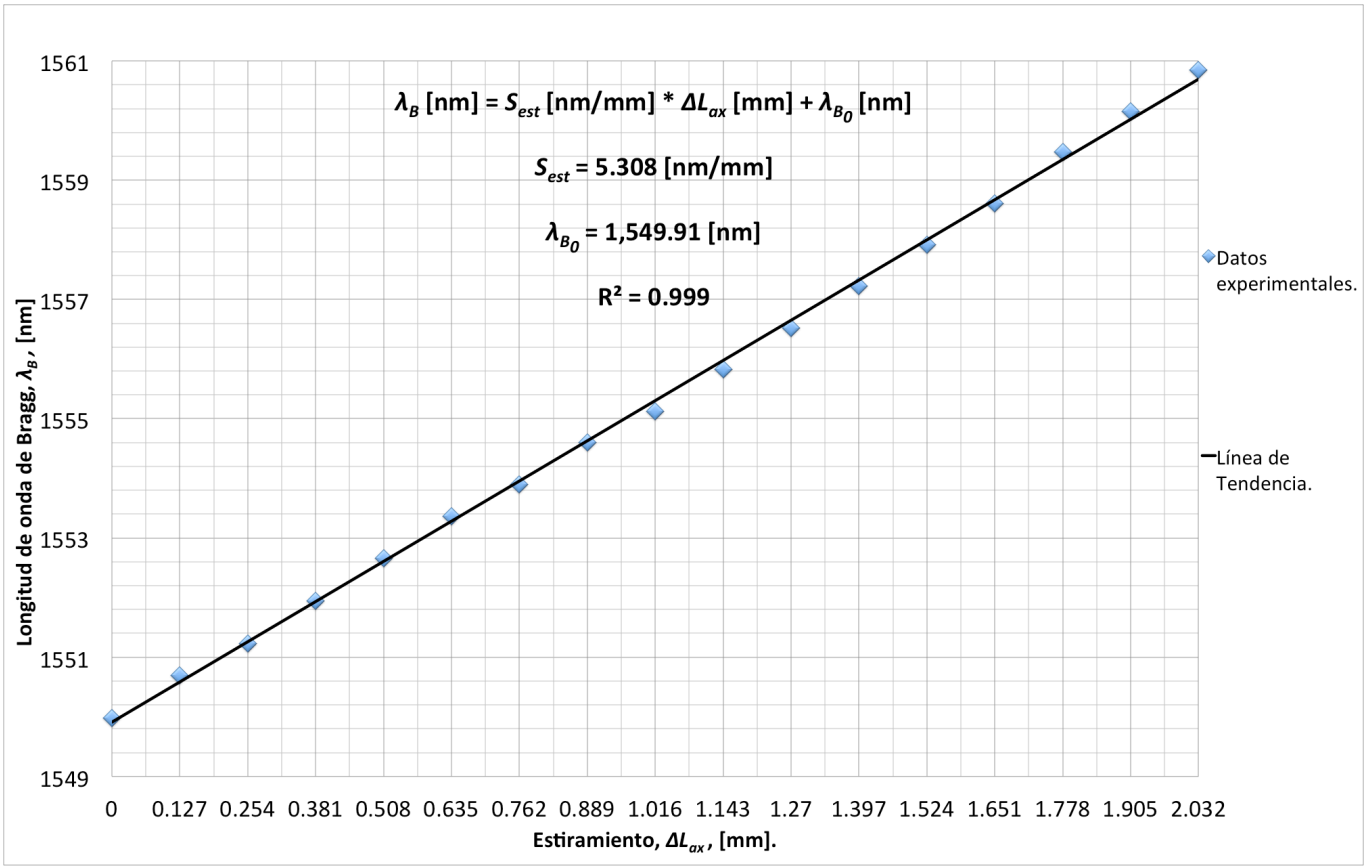


Figura 3.11. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Estiramiento, ΔL_{ax} en [mm]. Rejilla de Bragg Modelo 136802.

Al estudiar la gráfica de la Figura 3.11 se observa que la longitud de onda de Bragg, λ_B, presenta una dependencia lineal respecto al estiramiento, ΔL_{ax}, que se le aplica a la rejilla de Bragg. El modelo matemático obtenido a partir de los datos experimentales está dado por la expresión:

$$\lambda_B\ [\mathrm{nm}] = \left(S_{est}\left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{mm}}\right] \cdot \Delta L_{ax}\ [\mathrm{mm}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\mathrm{nm}]$$

Donde la pendiente representa la sensibilidad experimental de la rejilla de Bragg a cambiar su longitud de onda de Bragg ante el estiramiento que se le aplica, con un valor de:

$$S_{est} = 5.308\ \left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{mm}}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1549.91\ [\mathrm{nm}]$$

Por otro lado, en la Figura 3.12 se muestra la gráfica que relaciona la longitud de onda de Bragg de una rejilla, λ_B, con respecto a la tensión axial aplicada a la misma, ε_{ax}.

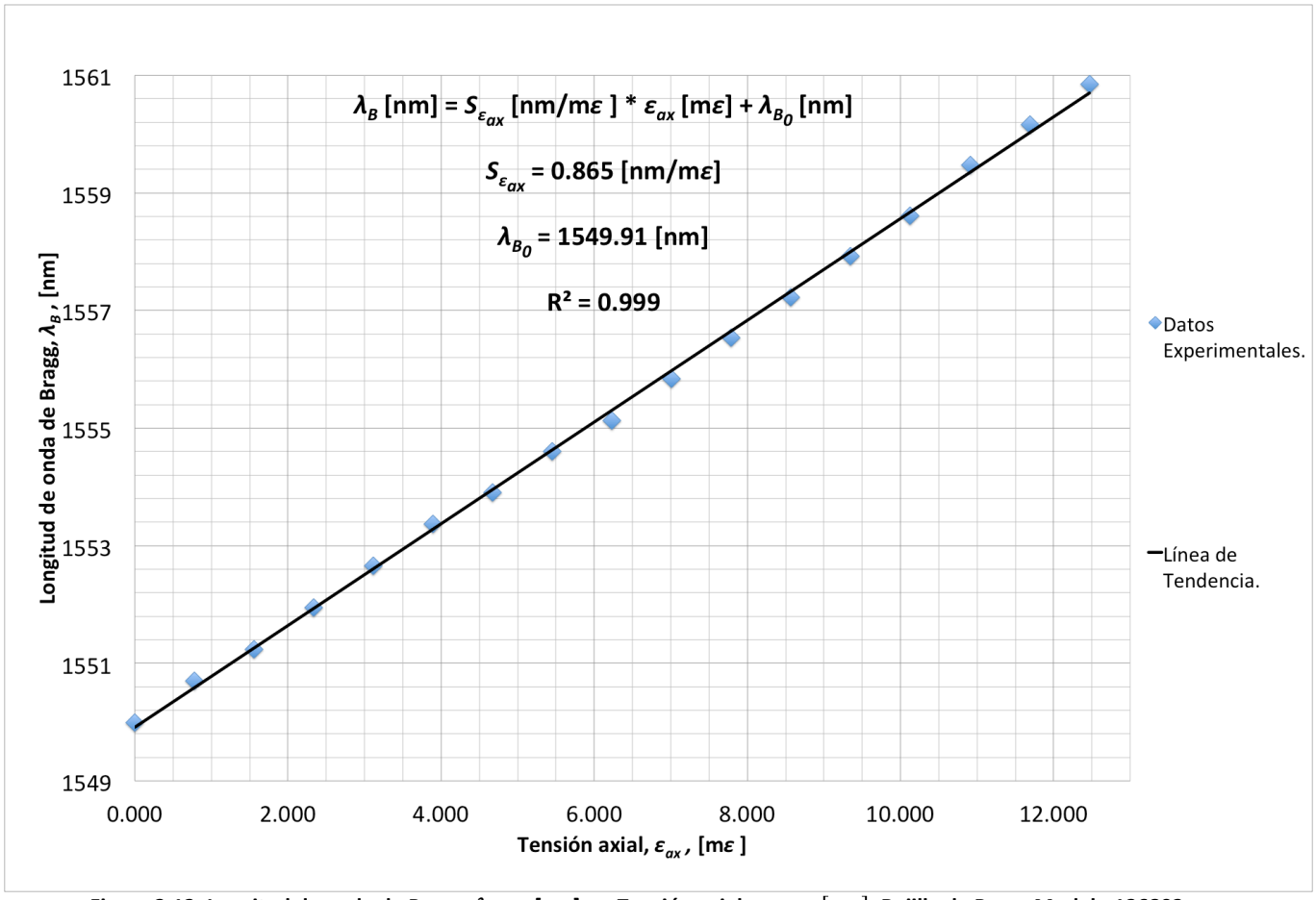


Figura 3.12. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Tensión axial, ε_{ax} en $[\mathrm{m}\varepsilon]$. Rejilla de Bragg Modelo 136802.

Al analizar los resultados presentados en la gráfica de la Figura 3.12 se determina que la longitud de onda de Bragg, λ_B, presenta una dependencia lineal respecto a la tensión axial, ε_{ax}, que se le aplica a la rejilla de Bragg. El modelo matemático obtenido a partir de los datos experimentales está dado por la expresión:

$$\lambda_B\ [\mathrm{nm}] = \left(S_{\varepsilon_{ax}}\left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{m\varepsilon}}\right] \cdot \varepsilon_{ax}\ [\mathrm{m\varepsilon}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\mathrm{nm}]$$

Donde la pendiente representa la sensibilidad experimental de la rejilla de Bragg a cambiar su longitud de onda de Bragg debido a la tensión axial que se le aplica - a la cual nos referiremos como sensibilidad elástica experimental - , con un valor de:

$$\mathrm{S}_{\varepsilon_{ax}} = 0.865\ \left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{m\varepsilon}}\right] = 8.65 \times 10^{-7}\ \left[\frac{\mathrm{m}}{\varepsilon}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1549.91\ [\mathrm{nm}]$$

Finalmente en la Figura 3.13 se observan los diferentes espectros en reflexión de la rejilla de Bragg Modelo 136802 cuando la fibra óptica se ve expuesta a estiramientos de diferente magnitud.

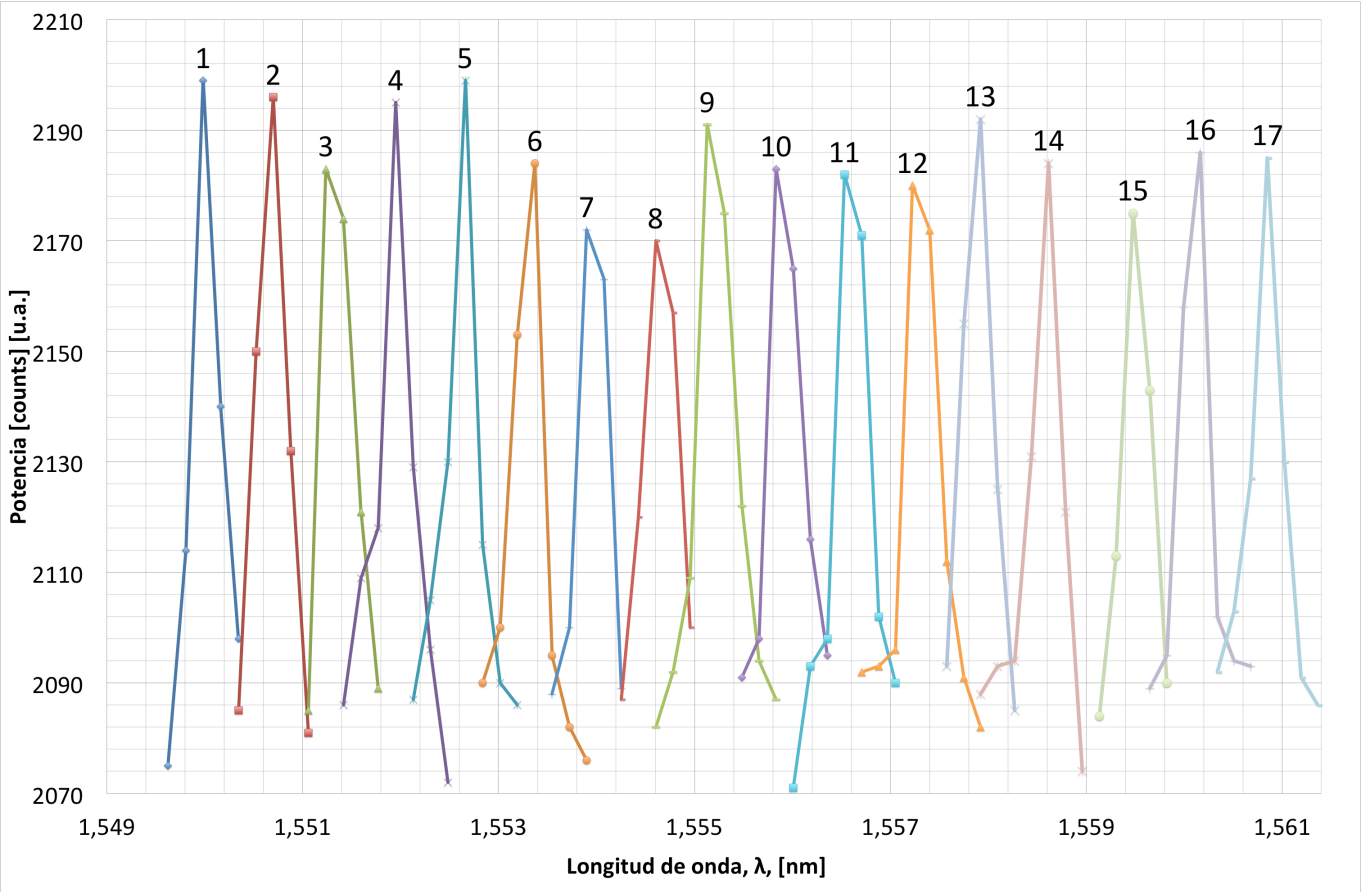


Figura 3.13. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros en reflexión de la rejilla de Bragg Modelo 136802 cuando la fibra óptica experimenta estiramientos de distinta magnitud. Se presenta un cambio en la longitud de onda debido a la tensión que se aplica sobre la rejilla. Estiramientos aplicados: 1.- 0 [mm], 2.- 0.127 [mm], 3.- 0.245 [mm], 4.- 0.381 [mm], 5.- 0.508 [mm], 6.- 0.635 [mm], 7.- 0.762 [mm], 8.- 0.889 [mm], 9.- 1.016 [mm], 10.- 1.143 [mm], 11.- 1.270 [mm], 12.- 1.397 [mm], 13.- 1.524 [mm], 14.- 1.651 [mm], 15.- 1.778 [mm], 16.- 1.905 [mm] y 17.- 2.032 [mm].

Al utilizar la rejilla de Bragg 136802 como pieza fundamental en el diseño y la construcción de un OADM sintonizable podemos asegurar un rango de sintonización de alrededor de 10.866 [nm] además de que se puede trabajar hasta con 17 canales DWDM con una separación de canal de 50 [GHz] [4].

- *Rejilla de Bragg Modelo 136806, Marca Smart Fibres.*

La longitud inicial de la fibra, L_0, fue de 166.0 [mm]. Los datos obtenidos en este experimento se encuentran registrados en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136806 para diferentes valores de tensión axial.		
Estiramiento (ΔL_{ax}) [mm]	Tensión axial (ε_{ax}) [mε]	Longitud de onda de Bragg (λ_B) [nm]
0.000	0.000	1550.164
0.127	0.765	1550.881
0.254	1.530	1551.416
0.381	2.295	1552.129
0.508	3.060	1552.839
0.635	3.825	1553.547
0.762	4.590	1554.253
0.889	5.355	1554.956
1.016	6.120	1555.658
1.143	6.886	1556.357
1.270	7.651	1557.228
1.397	8.416	1557.923
1.524	9.181	1558.615
1.651	9.946	1559.478
1.778	10.711	1560.165
1.905	11.476	1561.022
2.032	12.241	1561.704
2.159	13.006	1562.385

En la Figura 3.14 se muestra la gráfica que relaciona la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, contra el estiramiento que sufrió la fibra óptica, ΔL_{ax}.

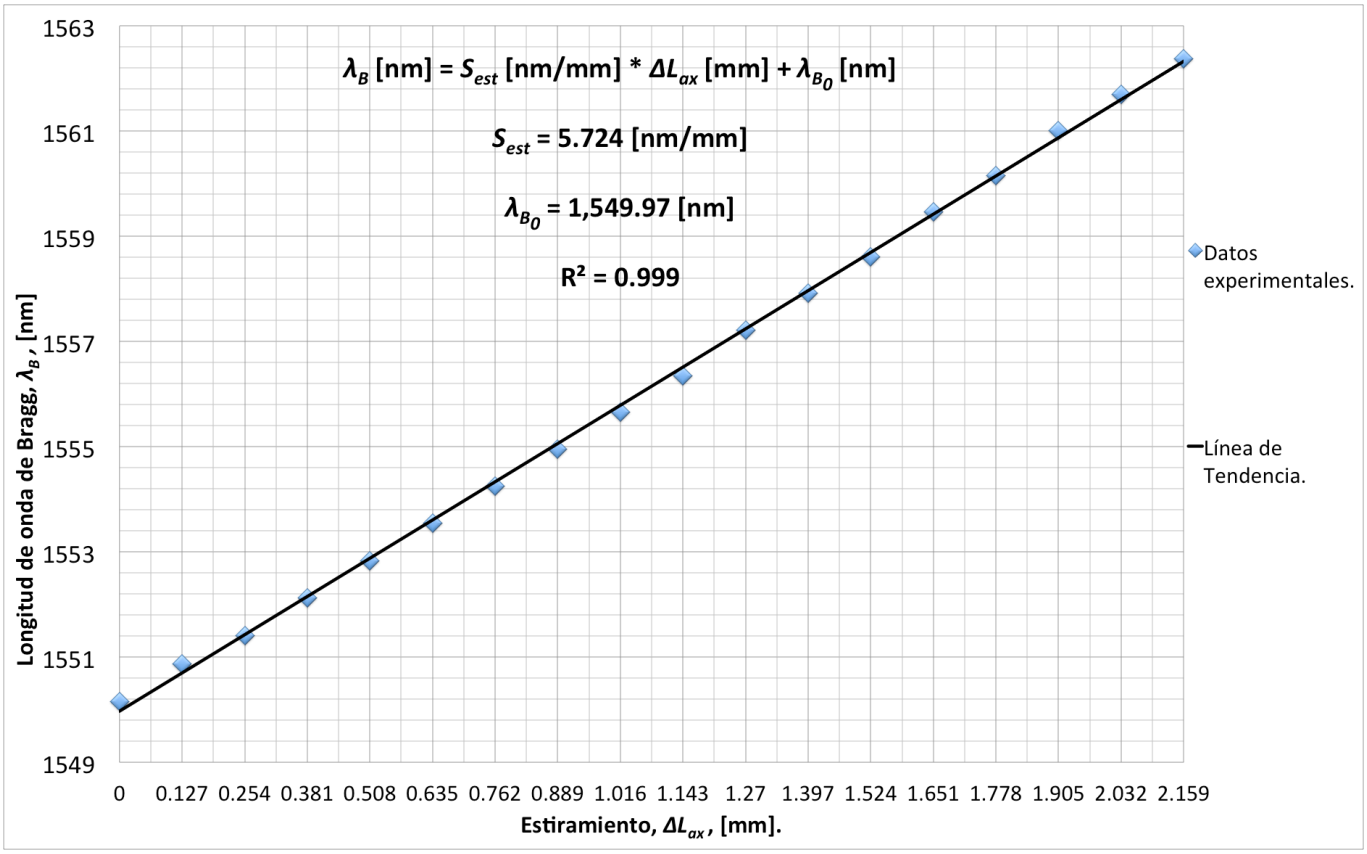


Figura 3.14. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Estiramiento, ΔL_{ax} en [mm]. Rejilla de Bragg Modelo 136806.

El modelo matemático obtenido a partir de los datos experimentales presentados en la Figura 3.14 está dado por la expresión:

$$\lambda_B\ [\text{nm}] = \left(S_{est}\left[\frac{\text{nm}}{\text{mm}}\right] \cdot \Delta L_{ax}\ [\text{mm}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\text{nm}]$$

Donde la pendiente experimental presenta un valor de:

$$S_{est} = 5.724\ \left[\frac{\text{nm}}{\text{mm}}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1549.97\ [\text{nm}]$$

Por otro lado, en la Figura 3.15 se observa la gráfica que relaciona la longitud de onda de Bragg de una rejilla, λ_B, con respecto a la tensión axial aplicada a la misma, ε_{ax}.

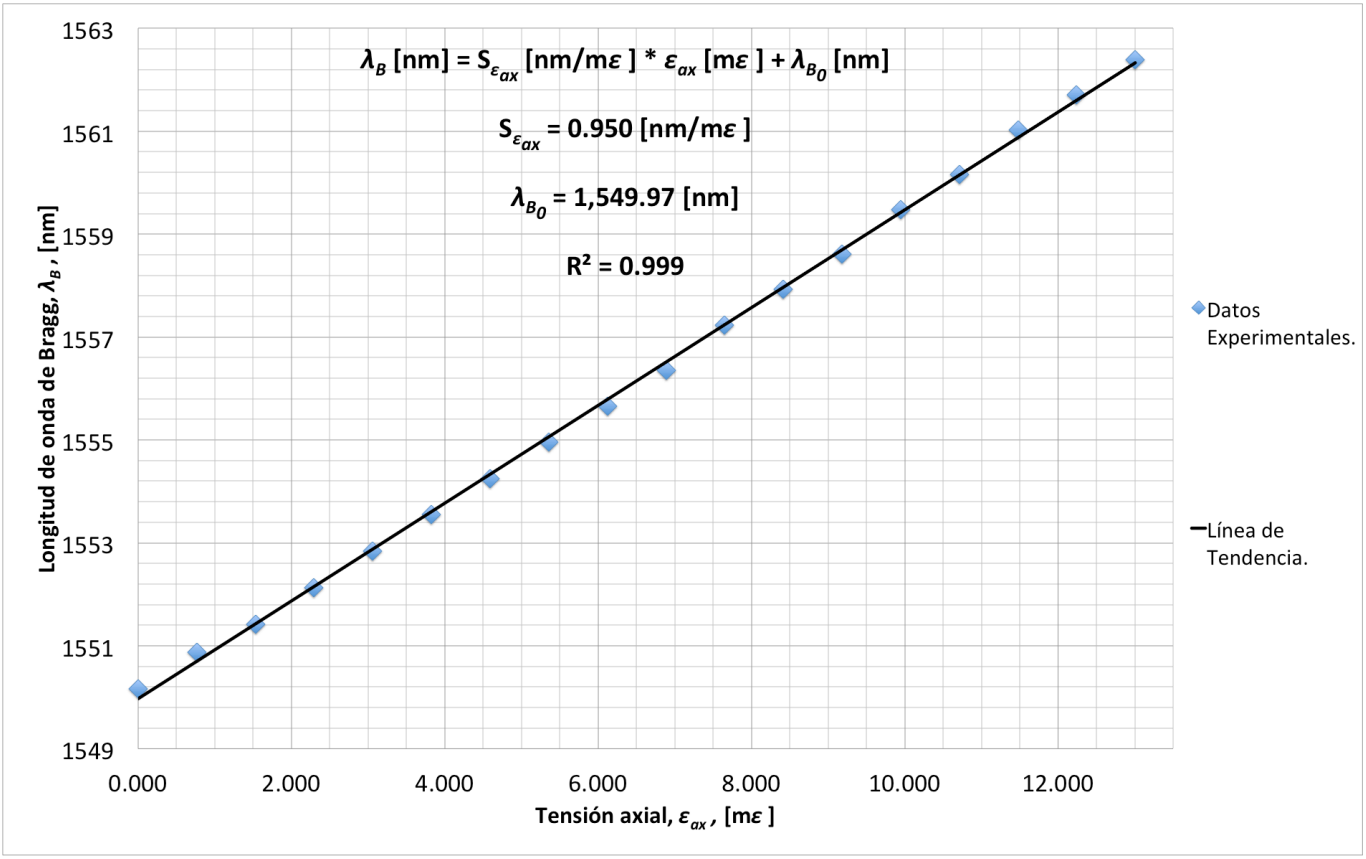


Figura 3.15. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Tensión axial, ε_{ax} en $[m\varepsilon]$. Rejilla de Bragg Modelo 136806.

El modelo matemático obtenido a partir de los datos experimentales presentados en la Figura 3.15 está dado por la expresión:

$$\lambda_B\ [\mathrm{nm}] = \left(S_{\varepsilon_{ax}}\left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{m}\varepsilon}\right] \cdot \varepsilon_{ax}\ [\mathrm{m}\varepsilon]\right) +\ \lambda_{B_0}\ [\mathrm{nm}]$$

Donde la pendiente experimental presenta un valor de:

$$S_{\varepsilon_{ax}} = 0.950\ \left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{m}\varepsilon}\right] = 9.50 \times 10^{-7}\ \left[\frac{\mathrm{m}}{\varepsilon}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1549.97\ [\mathrm{nm}]$$

Finalmente en la Figura 3.16 se observan los diferentes espectros en reflexión de la rejilla de Bragg Modelo 136806 cuando la fibra óptica se ve expuesta a estiramientos de diferente magnitud.

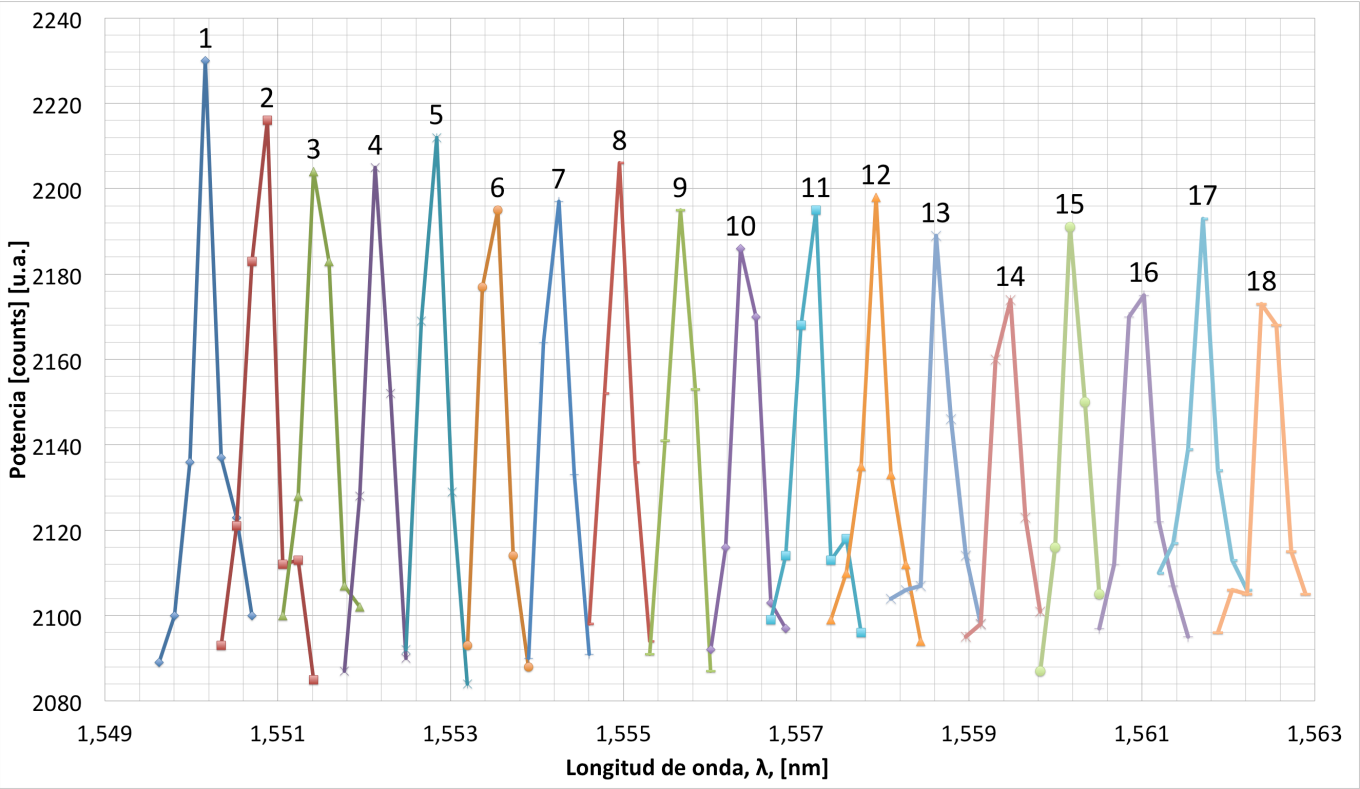


Figura 3.16. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros en reflexión de la rejilla de Bragg Modelo 136806 cuando la fibra óptica experimenta estiramientos de distinta magnitud. Se presenta un cambio en la longitud de onda debido a la tensión que se aplica sobre la rejilla. Estiramientos aplicados: 1.- 0 [mm], 2.- 0.127 [mm], 3.- 0.245 [mm], 4.- 0.381 [mm], 5.- 0.508 [mm], 6.- 0.635 [mm], 7.- 0.762 [mm], 8.- 0.889 [mm], 9.- 1.016 [mm], 10.- 1.143 [mm], 11.- 1.270 [mm], 12.- 1.397 [mm], 13.- 1.524 [mm], 14.- 1.651 [mm], 15.- 1.778 [mm], 16.- 1.905 [mm], 17.- 2.032 [mm] y 18.- 2.159 [mm].

Al utilizar la rejilla de Bragg 136806 como pieza fundamental en el diseño y la construcción de un OADM sintonizable podemos asegurar un rango de sintonización de alrededor de 12.221 [nm] además de que se puede trabajar con 18 canales DWDM con una separación de canal de 50 [GHz] sin ningún inconveniente [4].

- *Rejilla de Bragg Modelo 136807, Marca Smart Fibres.*

La longitud inicial de la fibra, L_0, fue de 177.8 [mm]. Los datos obtenidos en este experimento se encuentran registrados en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136807 para diferentes valores de tensión axial.

Estiramiento (ΔL_{ax}) [mm]	Tensión axial (ε_{ax}) [mε]	Longitud de onda de Bragg (λ_B) [nm]
0.000	0.000	1550.164
0.127	0.714	1550.702
0.254	1.429	1551.238
0.381	2.143	1551.951

0.508	2.857	1552.661
0.635	3.571	1553.193
0.762	4.286	1553.900
0.889	5.000	1554.605
1.016	5.714	1555.307
1.143	6.429	1556.008
1.270	7.143	1556.706
1.397	7.857	1557.402
1.524	8.571	1558.096
1.651	9.286	1558.788
1.778	10.000	1559.306
1.905	10.714	1559.994
2.032	11.429	1560.680

En la Figura 3.17 se muestra la gráfica que relaciona la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, contra el estiramiento que sufrió la fibra óptica, ΔL_{ax}.

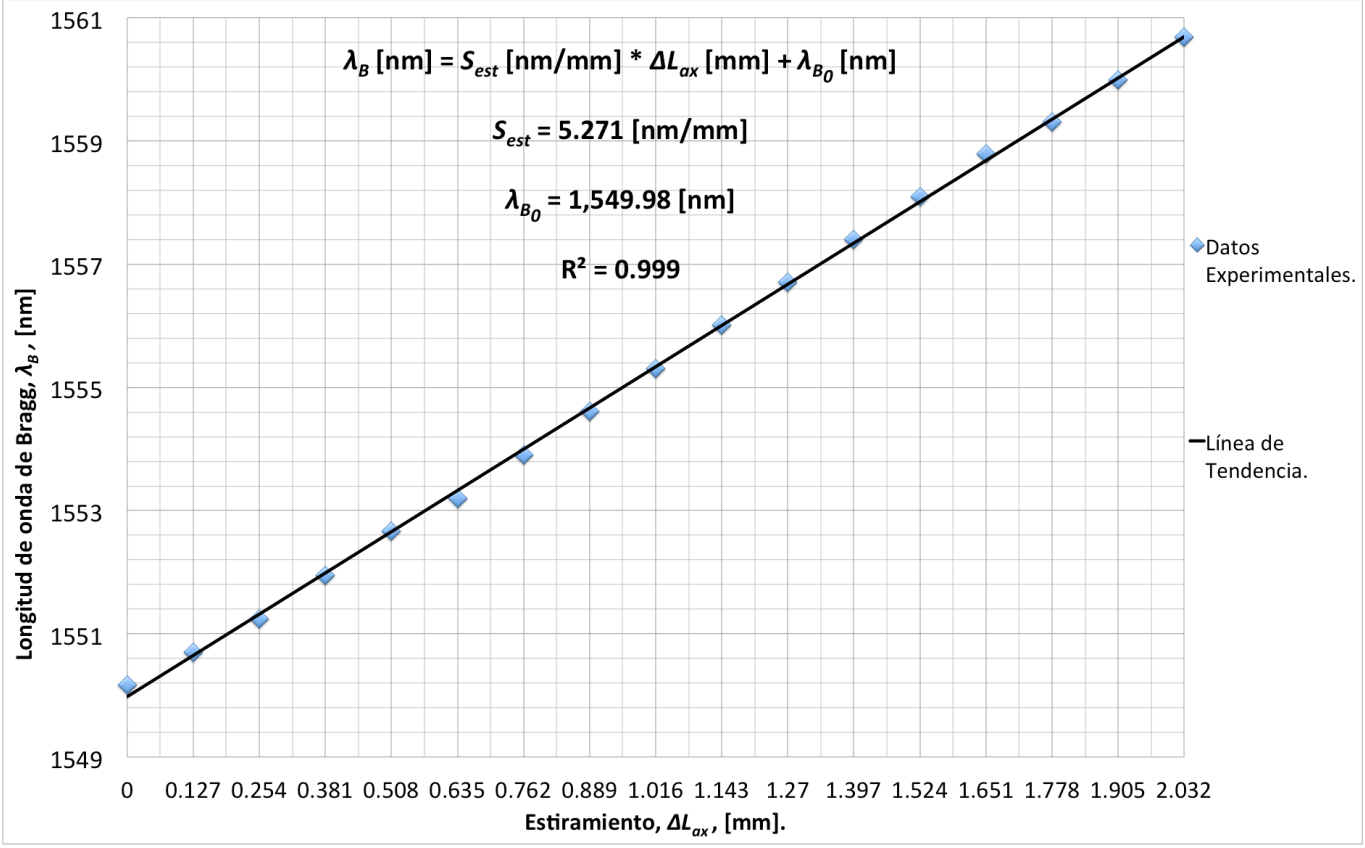


Figura 3.17. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Estiramiento, ΔL_{ax} en [mm]. Rejilla de Bragg Modelo 136807.

El modelo matemático obtenido a partir de los datos experimentales presentados en la Figura 3.17 está dado por la expresión:

$$\lambda_B\ [\mathrm{nm}] = \left(S_{est}\left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{mm}}\right] \cdot \Delta L_{ax}\ [\mathrm{mm}]\right) +\ \lambda_{B_0}\ [\mathrm{nm}]$$

Donde la pendiente experimental presenta un valor de:

$$S_{est} = 5.271\ \left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{mm}}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1549.98\ [\mathrm{nm}]$$

Por otro lado, en la Figura 3.18 se encuentra la gráfica que relaciona la longitud de onda de Bragg de una rejilla, λ_B, con respecto a la tensión axial aplicada a la misma, ε_{ax}.

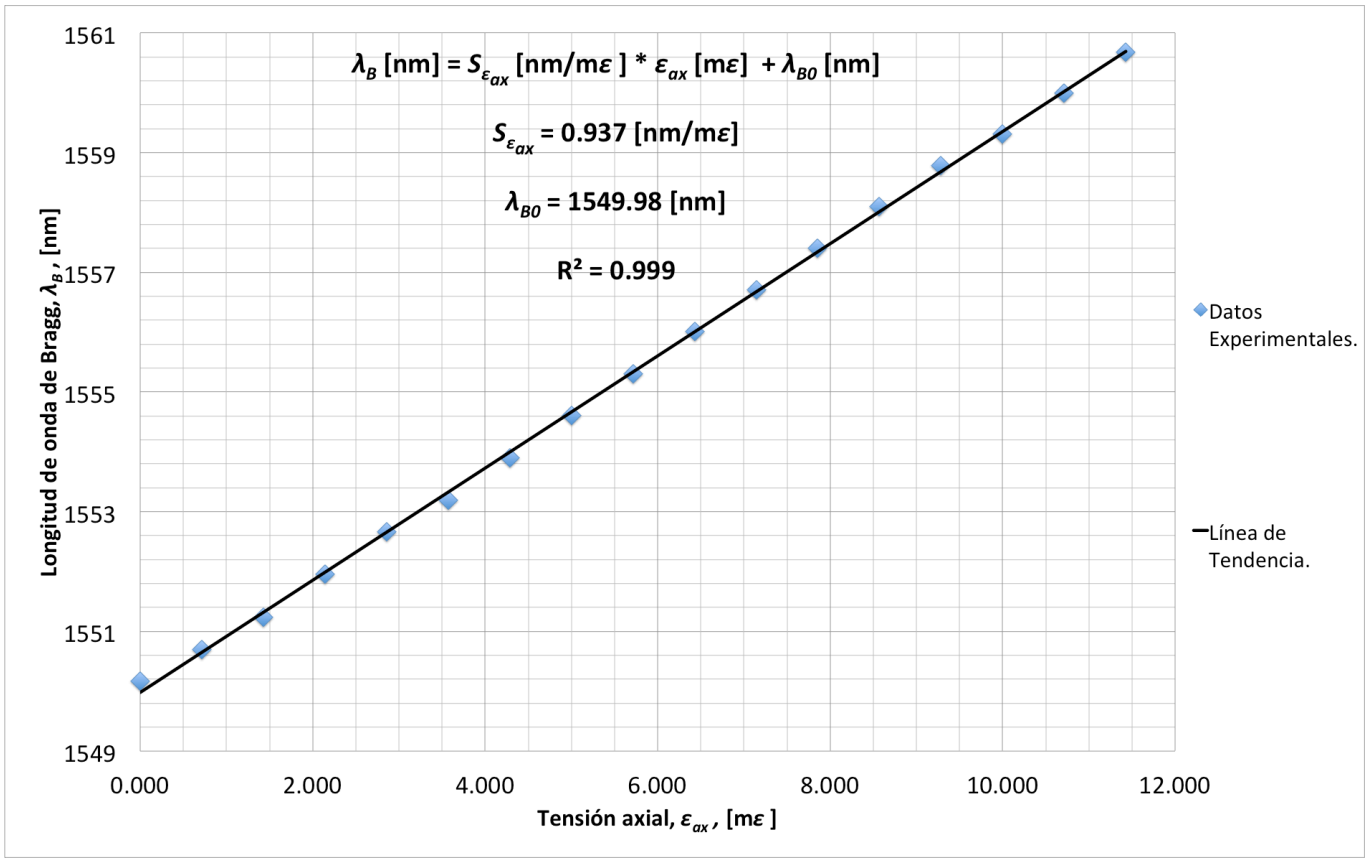


Figura 3.18. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Tensión axial, ε_{ax} en $[\mathrm{m}\varepsilon]$. Rejilla de Bragg Modelo 136807.

El modelo matemático obtenido a partir de los datos experimentales presentados en la Figura 3.18 está dado por la expresión:

$$\lambda_B\ [\mathrm{nm}] = \left(S_{\varepsilon_{ax}}\left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{m}\varepsilon}\right] \cdot \varepsilon_{ax}\ [\mathrm{m}\varepsilon]\right) + \lambda_{B_0}\ [\mathrm{nm}]$$

Donde la pendiente experimental presenta un valor de:

$$\mathrm{S}_{\varepsilon_{ax}} = 0.937\ \left[\frac{\mathrm{nm}}{\mathrm{m}\varepsilon}\right] = 9.37 \times 10^{-7}\ \left[\frac{\mathrm{m}}{\varepsilon}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1549.98\ [\mathrm{nm}]$$

Finalmente en la Figura 3.19 se observan los diferentes espectros en reflexión de la rejilla de Bragg Modelo 136807 cuando la fibra óptica se ve expuesta a estiramientos de diferente magnitud.

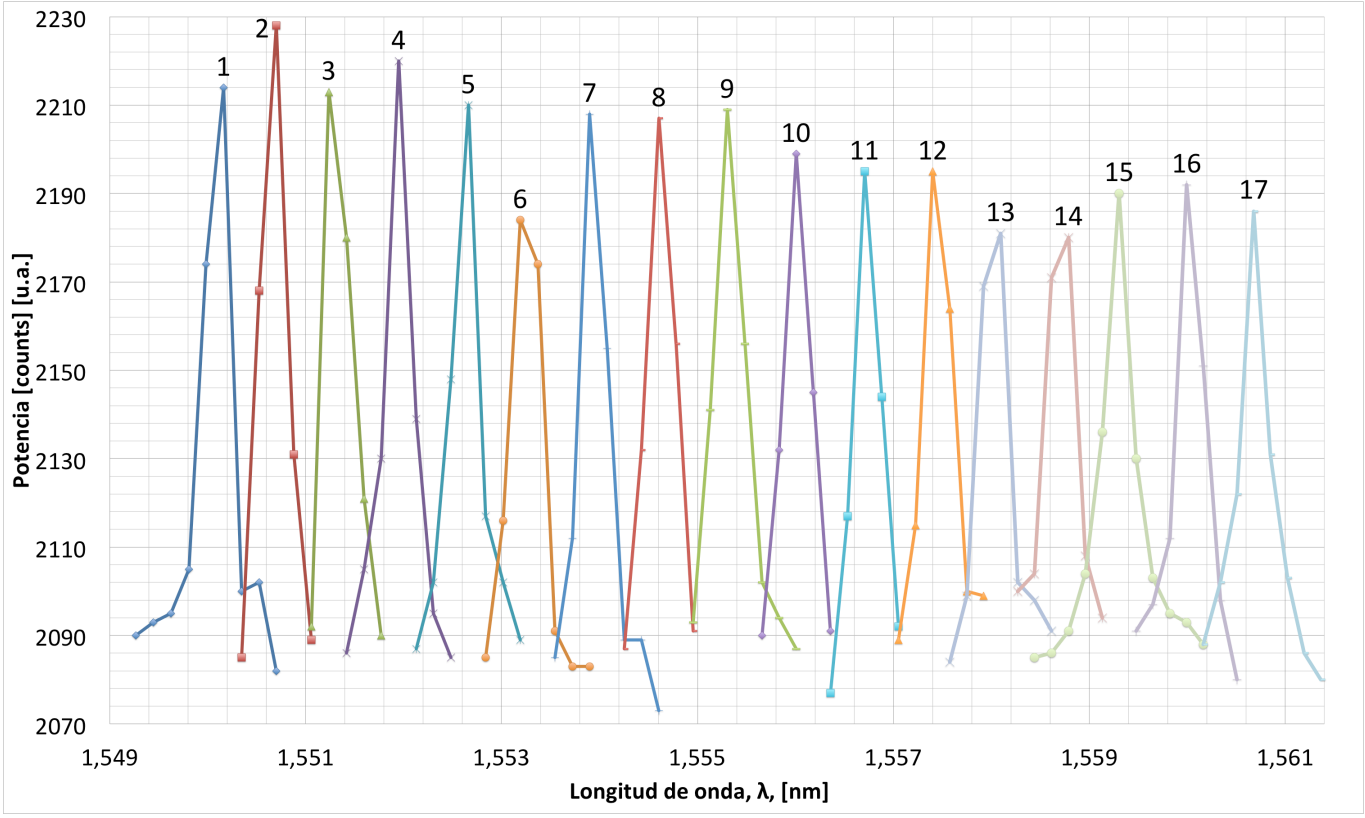


Figura 3.19. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros en reflexión de la rejilla de Bragg Modelo 136807 cuando la fibra óptica experimenta estiramientos de distinta magnitud. Se presenta un cambio en la longitud de onda debido a la tensión que se aplica sobre la rejilla. Estiramientos aplicados: 1.- 0 [mm], 2.- 0.127 [mm], 3.- 0.245 [mm], 4.- 0.381 [mm], 5.- 0.508 [mm], 6.- 0.635 [mm], 7.- 0.762 [mm], 8.- 0.889 [mm], 9.- 1.016 [mm], 10.- 1.143 [mm], 11.- 1.270 [mm], 12.- 1.397 [mm], 13.- 1.524 [mm], 14.- 1.651 [mm], 15.- 1.778 [mm], 16.- 1.905 [mm] y 17.- 2.032 [mm].

Al utilizar la rejilla de Bragg 136807 como pieza fundamental en el diseño y la construcción de un OADM sintonizable podemos asegurar un rango de sintonización de alrededor de 10.516 [nm] además de que se puede trabajar hasta con 17 canales DWDM con una separación de canal de 50 [GHz] [4].

3.5. Respuesta espectral de las rejillas de Bragg a cambios en la temperatura.

3.5.1. Equipo empleado.

El equipo empleado en este experimento fue el siguiente:

1. Fuente óptica de amplio espectro: Marca Agilent, Modelo 83437A.
2. Circulador óptico de 3 puertos: Número de serie 906221.
3. Conectores FC/FC.
4. Rejilla de Bragg: Marca Smart Fibres.
5. Termómetro: Marca, Resolución .
6. Placa de aluminio de 5 [mm] de grosor.
7. Parrilla eléctrica Marca.
8. Ranuras en V de 250 μm para sujetar la fibra óptica.
9. Interrogador de Rejillas de Bragg: Marca Ibsen Photonics, modelo I-MON 512 E-USB 2.0.
10. Software del interrogador de rejillas v. 2.0.
11. Computadora.

3.5.2. Metodología.

Para observar los efectos que produce el cambio en la temperatura de una rejilla de Bragg, se realizó la variación de temperatura en el medio que rodea a la rejilla de Bragg (placa de aluminio) a través de una parrilla eléctrica, para que la transferencia de calor por conducción permita variar la temperatura externa de la rejilla.

Se fijó la rejilla de Bragg en la placa de aluminio con la finalidad de evitar que la elongación física de la fibra modificará las características del espectro en reflexión de la rejilla, ya que al estar colocada de manera recta sobre la placa de aluminio se evita que las modificaciones físicas y las posibles corrientes de aire en el laboratorio alteren las mediciones realizadas.

Una vez que la rejilla se colocó en la placa de aluminio, se dispuso a calentar dicha placa con ayuda de una parrilla eléctrica, alcanzando temperaturas que van de los 25 [°C] a los 130 [°C]. De esta manera se pudieron observar los cambios en la longitud de onda de Bragg y en el espectro de reflexión de la rejilla al variar la temperatura de ésta cada 5 [°C].

3.5.3. Descripción de la Instalación.

El diagrama de la instalación utilizada para llevar a cabo la caracterización de las rejillas de Bragg al presentar variaciones en la temperatura se muestra en la Figura 3.20.

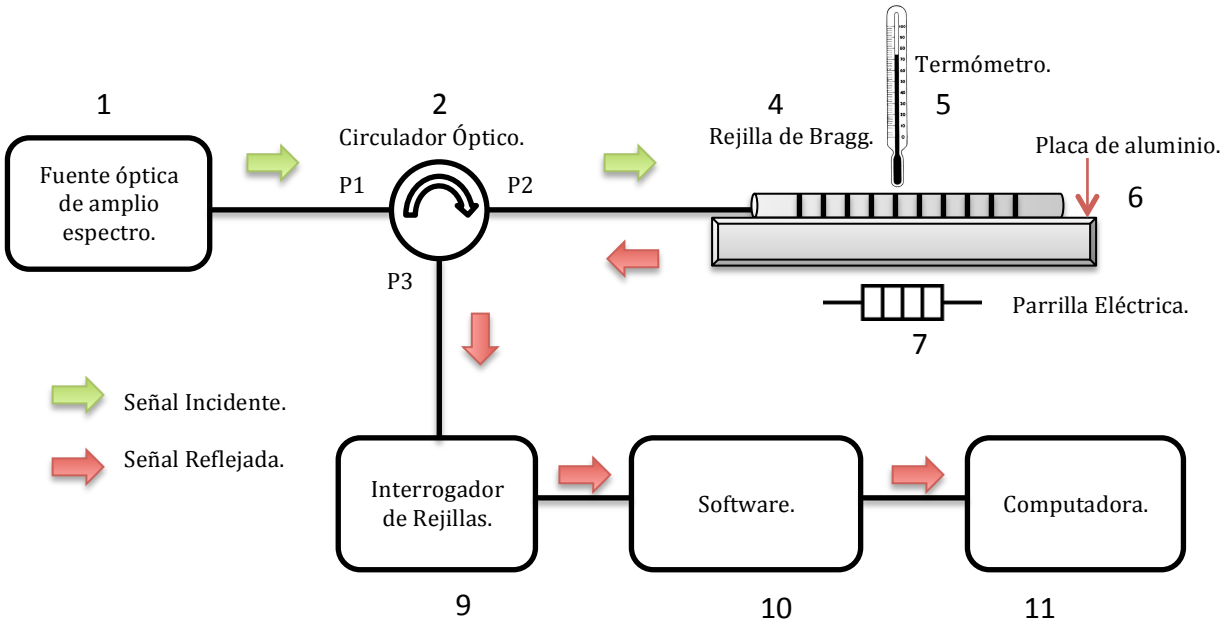


Figura 3.20. Diagrama de la instalación empleada para la caracterización de las rejillas bajo efectos de temperatura (Los números corresponden a la lista del equipo usado en la sección 3.5.1) [3].

En lo que respecta al arreglo de conexiones montado en este experimento, éste se muestra en la Figura 3.21.

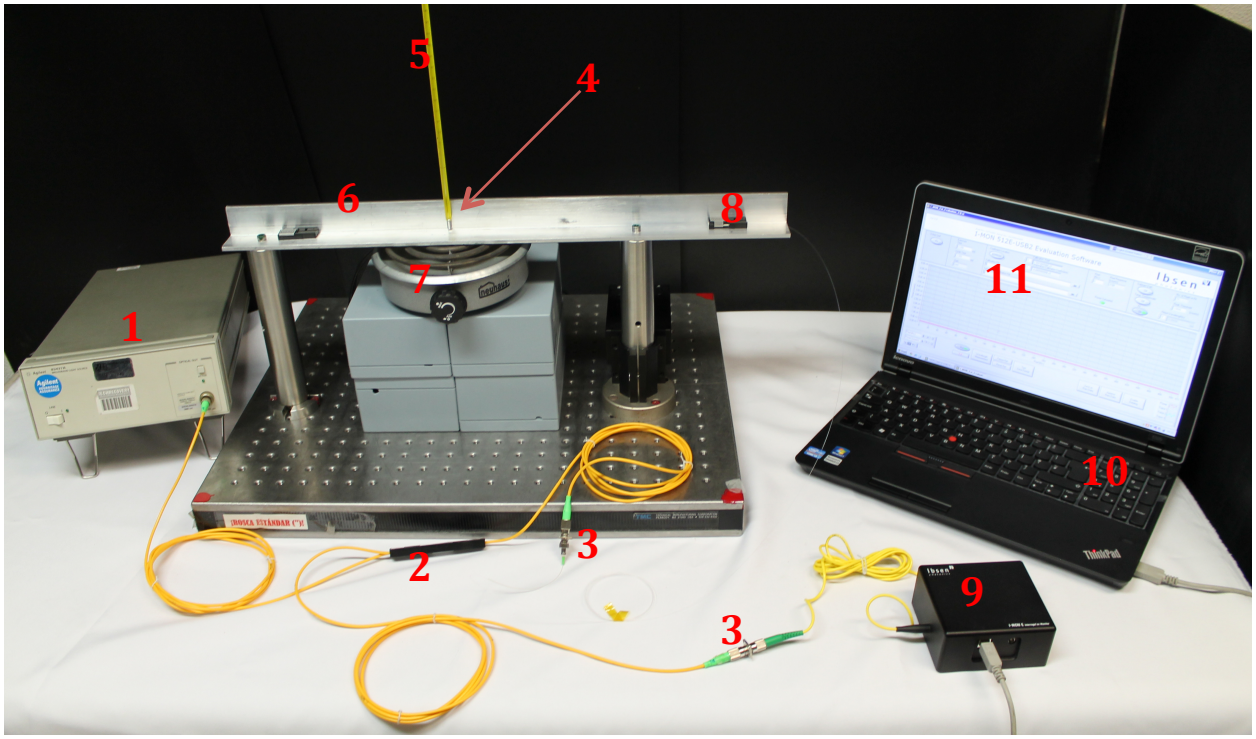


Figura 3.21. Arreglo de conexiones del experimento llevado a cabo para conocer la respuesta espectral de las rejillas de Bragg ante cambios en su temperatura (Los números corresponden a la lista del equipo usado en la sección 3.5.1).

3.5.4. Resultados.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada una de las rejillas de Bragg empleadas.

- *Rejilla de Bragg Modelo 136802, Marca Smart Fibres.*

En la Tabla 3.9 se encuentran registrados los datos experimentales obtenidos durante la prueba de temperatura para la rejilla de Bragg Modelo 136802. Resulta importante mencionar que la temperatura inicial de la rejilla (temperatura ambiente del laboratorio), T_0, fue de 25 [°C].

Tabla 3.9. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136802 para diferentes valores de temperatura.

Temperatura de la rejilla, T_{FBG}, [°C]	Diferencia de temperatura, $\Delta T = T_{FBG} - T_0$, [°C]	Longitud de onda de Bragg, λ_B, [nm]
25	0	1550.164
30	5	1550.523
35	10	1550.523
40	15	1550.702
45	20	1550.881
50	25	1550.881

55	30	1551.059
60	35	1551.059
65	40	1551.059
70	45	1551.238
75	50	1551.238
80	55	1551.238
85	60	1551.416
90	65	1551.416
95	70	1551.416
100	75	1551.595
105	80	1551.595
110	85	1551.773
115	90	1551.773
120	95	1551.773
125	100	1551.951
130	105	1551.951

Con los datos de la Tabla 3.9 se logró obtener la gráfica de la Figura 3.22, la cual muestra la relación que tiene la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, con la temperatura que posee dicho dispositivo, T_{FBG}.

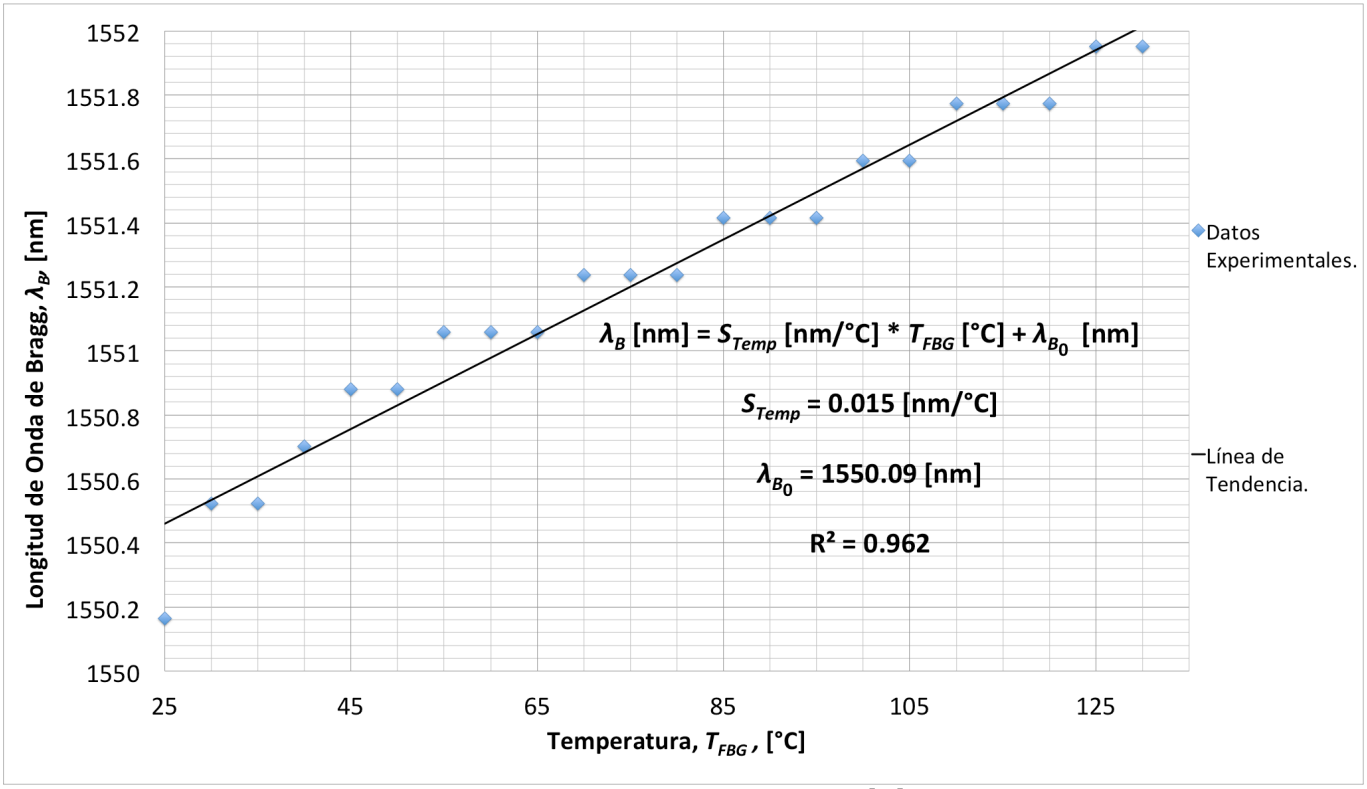


Figura 3.22. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Temperatura, T_{FBG} en [°C]. Rejilla de Bragg Modelo 136802.

Al analizar los resultados presentados en la Figura 3.22 se observa que la longitud de onda de Bragg presenta una dependencia lineal con respecto a la temperatura de la rejilla. Por otro lado, a través de la tendencia lineal obtenida para dichos valores experimentales se obtuvo el siguiente modelo matemático:

$$\lambda_B\ [\mathrm{nm}] = \left(S_{Temp}\left[\frac{\mathrm{nm}}{^{\circ}\mathrm{C}}\right] \cdot T_{FBG}\ [^{\circ}\mathrm{C}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\mathrm{nm}]$$

Donde la pendiente representa la sensibilidad térmica experimental o sensibilidad a la temperatura de la rejilla de Bragg Modelo 136802, con un valor de:

$$S_{Temp} = 0.015\ \left[\frac{\mathrm{nm}}{^{\circ}\mathrm{C}}\right] = 0.015 \times 10^{-9}\ \left[\frac{\mathrm{m}}{^{\circ}\mathrm{C}}\right]$$

Mientras que la ordenada al origen corresponde al valor de la longitud de onda de Bragg inicial, es decir, la longitud de onda de Bragg que presenta la rejilla sin que ésta experimente cambio de temperatura. En este modelo matemático el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1550.09\ [\mathrm{nm}]$$

Además, en la Figura 3.23 se muestran los diferentes espectros en reflexión de la rejilla de Bragg Modelo 136802 a diferentes valores de temperatura registrados.

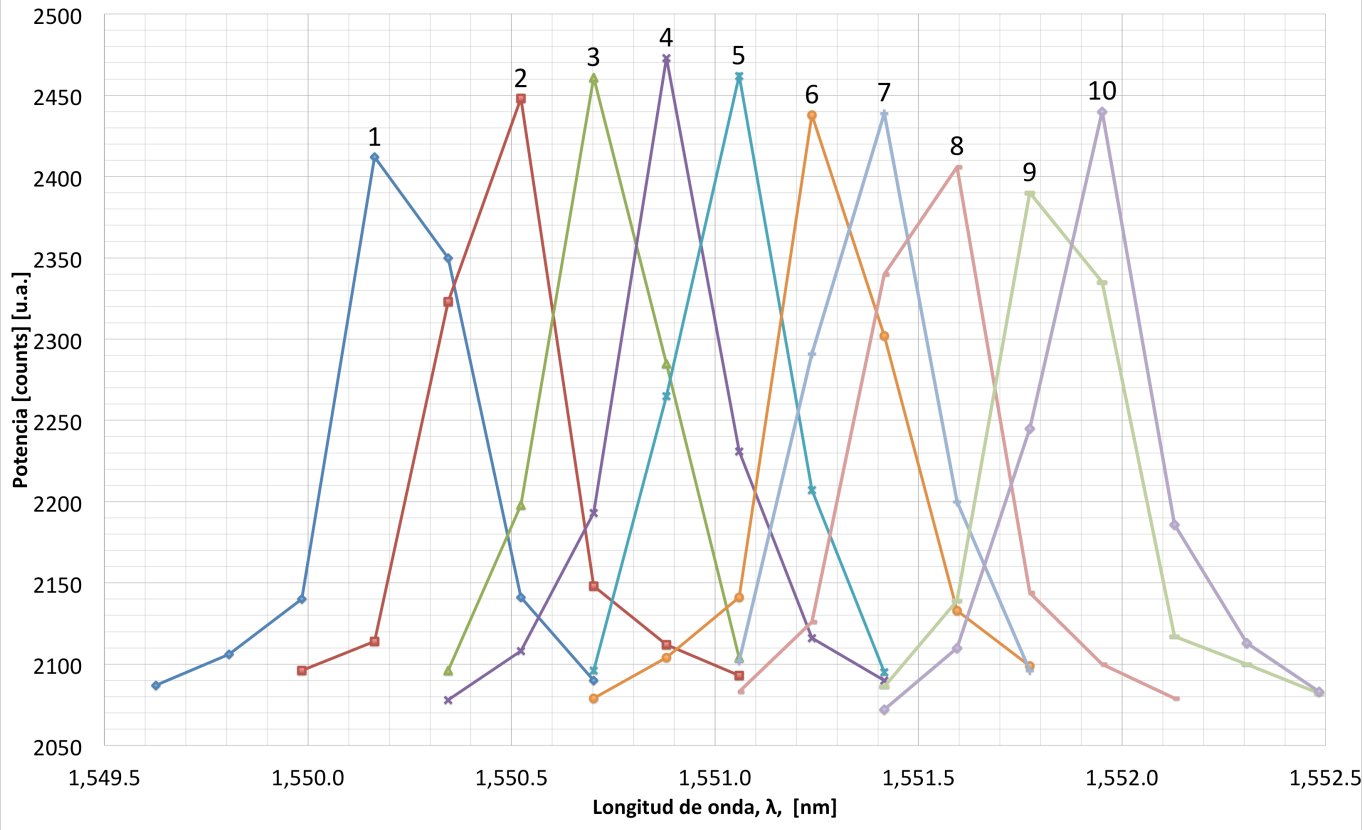


Figura 3.23. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros en reflexión de la rejilla de Bragg Modelo 136802 a diferentes valores de temperatura. Se presenta un cambio en la longitud de onda debido al cambio de temperatura que se aplica a la rejilla. Temperatura de la rejilla de Bragg, T_{FBG}, correspondiente a cada número en la gráfica: 1.- 25 [°C], 2.- 30 [°C], 3.- 40 [°C], 4.- 50 [°C], 5.- 60 [°C], 6.- 80 [°C], 7.- 90 [°C], 8.- 100 [°C], 9.- 120 [°C] y 10.- 130 [°C].

- *Rejilla de Bragg Modelo 136807, Marca Smart Fibres.*

En la Tabla 3.10 se encuentran registrados los datos experimentales obtenidos durante la prueba de temperatura para la rejilla de Bragg Modelo 136807. Resulta importante mencionar que la temperatura inicial de la rejilla (temperatura ambiente del laboratorio), T_0, fue de 25 [°C].

Tabla 3.10. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136807 para diferentes valores de temperatura.

Temperatura de la rejilla, T_{FBG}, [°C]	Diferencia de temperatura, $\Delta T = T_{FBG} - T_0$, [°C]	Longitud de onda de Bragg, λ_B, [nm]
25	0	1550.164
30	5	1550.523
35	10	1550.523
40	15	1550.523
45	20	1550.523
50	25	1550.881
55	30	1550.881
60	35	1550.881
65	40	1550.881
70	45	1551.059
75	50	1551.238
80	55	1551.238
85	60	1551.238
90	65	1551.238
95	70	1551.416
100	75	1551.595
105	80	1551.595
110	85	1551.595
115	90	1551.595
120	95	1551.773
125	100	1551.773
130	105	1551.951

Con los datos de la Tabla 3.10 se obtuvo la gráfica de la Figura 3.24, la cual muestra la relación que tiene la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, con la temperatura que posee dicho dispositivo, T_{FBG}.

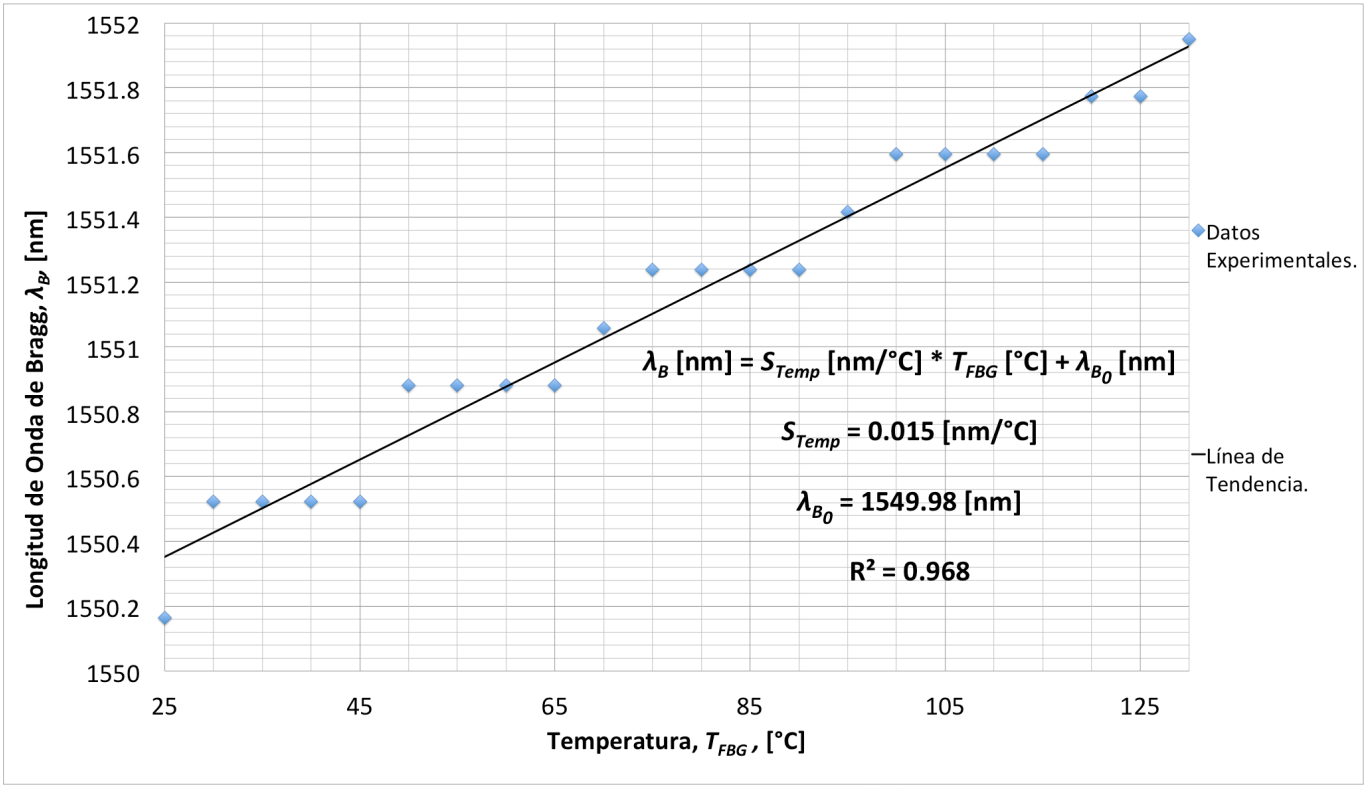


Figura 3.24. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Temperatura, T_{FBG} en [°C]. Rejilla de Bragg Modelo 136807.

El modelo matemático obtenido a partir de los datos experimentales presentados en la Figura 3.24 está dado por la expresión:

$$\lambda_B\ [\text{nm}] = \left(S_{Temp}\left[\frac{\text{nm}}{°\text{C}}\right] \cdot T_{FBG}\ [°\text{C}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\text{nm}]$$

Donde la pendiente experimental presenta un valor de:

$$S_{Temp} = 0.015\ \left[\frac{\text{nm}}{°\text{C}}\right] = 0.015 \times 10^{-9}\ \left[\frac{\text{m}}{°\text{C}}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1549.98\ [\text{nm}]$$

Además, en la Figura 3.25 se observan los diferentes espectros en reflexión de la rejilla de Bragg Modelo 136807 a diferentes valores de temperatura registrados.

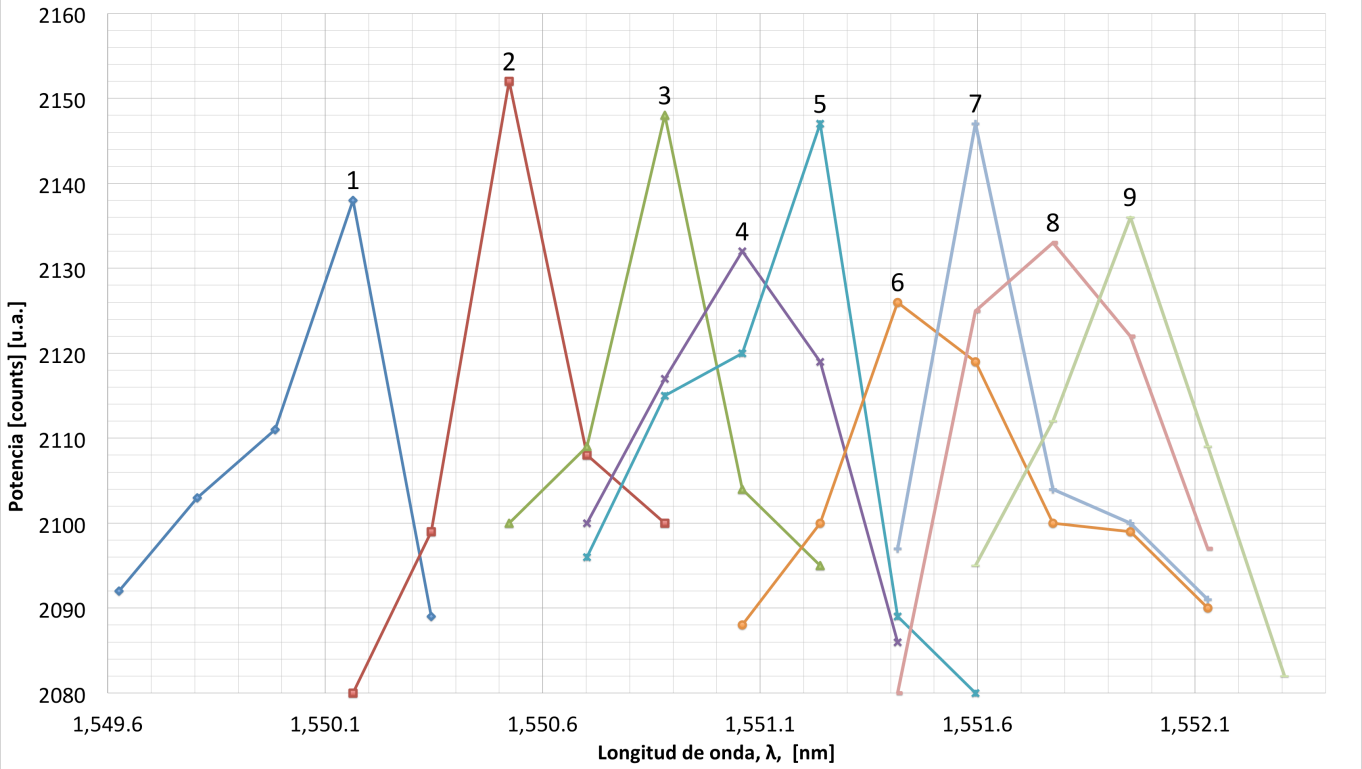


Figura 3.25. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros en reflexión de la rejilla de Bragg Modelo 136807 a diferentes valores de temperatura. Se presenta un cambio en la longitud de onda debido al cambio de temperatura que se aplica a la rejilla. Temperatura de la rejilla de Bragg, T_{FBG}, correspondiente a cada número en la gráfica: 1.- 25 [°C], 2.- 40 [°C], 3.- 60 [°C], 4.- 70 [°C], 5.- 80 [°C], 6.- 95 [°C], 7.- 110 [°C], 8.- 120 [°C] y 9.- 130 [°C].

- *Rejilla de Bragg Modelo 136810, Marca Smart Fibres.*

En la Tabla 3.11 se encuentran registrados los datos experimentales obtenidos durante la prueba de temperatura para la rejilla de Bragg Modelo 136810. Resulta importante mencionar que la temperatura inicial de la rejilla (temperatura ambiente del laboratorio), T_0, fue de 25 [°C].

Tabla 3.11. Longitud de onda de Bragg de la rejilla Modelo 136810 para diferentes valores de temperatura.

Temperatura de la rejilla, T_{FBG}, [°C]	Diferencia de temperatura, $\Delta T = T_{FBG} - T_0$, [°C]	Longitud de onda de Bragg, λ_B, [nm]
25	0	1550.164
30	5	1550.523
35	10	1550.702
40	15	1550.881
45	20	1550.881
50	25	1551.059
55	30	1551.059
60	35	1551.238

65	40	1551.238
70	45	1551.238
75	50	1551.416
80	55	1551.416
85	60	1551.595
90	65	1551.595
95	70	1551.595
100	75	1551.773
105	80	1551.773
110	85	1551.951
115	90	1551.951
120	95	1551.951
125	100	1552.129
130	105	1552.306

Con los datos de la Tabla 3.11 se logró obtener la gráfica de la Figura 3.26, la cual muestra la relación que tiene la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, con la temperatura que posee dicho dispositivo, T_{FBG}.

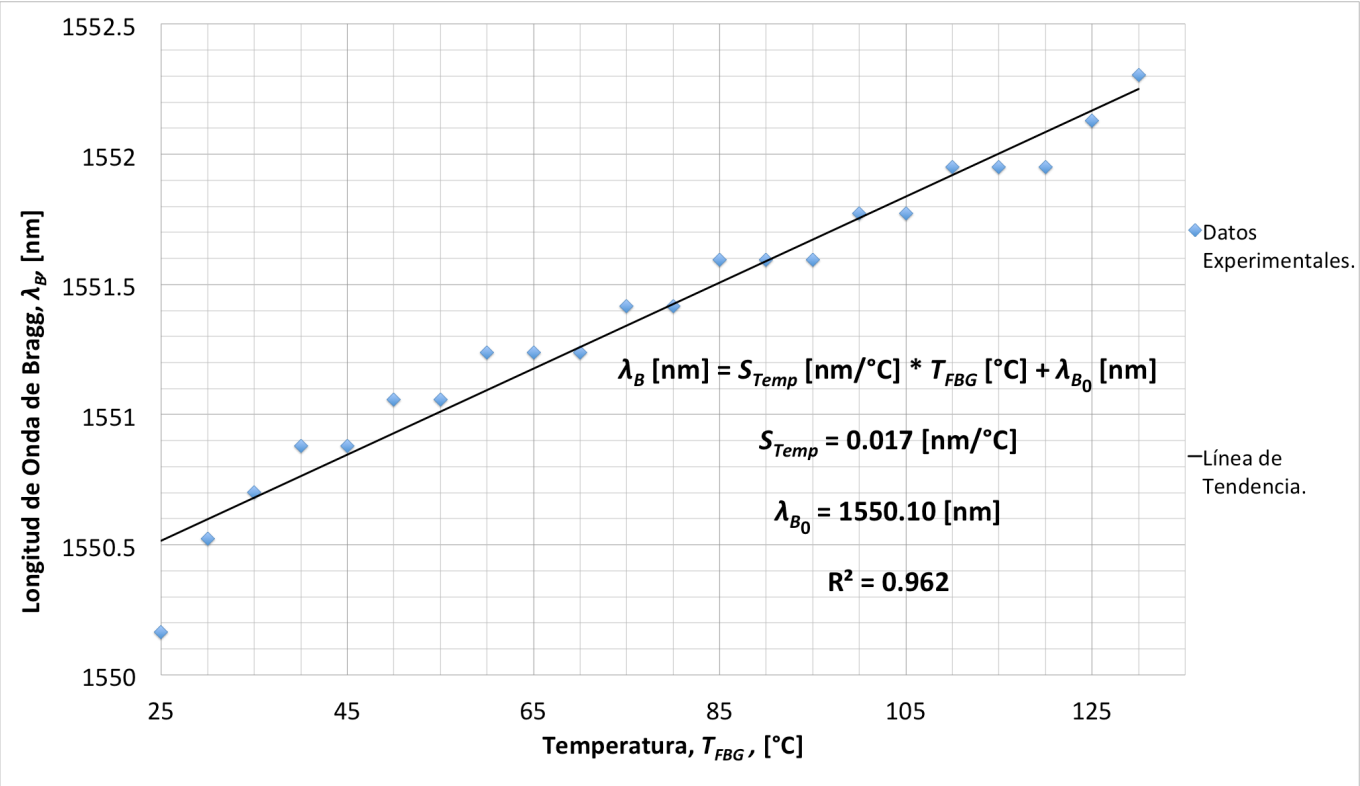


Figura 3.26. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Temperatura, T_{FBG} en [°C]. Rejilla de Bragg Modelo 136810.

El modelo matemático obtenido a partir de los datos experimentales presentados en la Figura 3.26 está dado por la expresión:

$$\lambda_B\ [\mathrm{nm}] = \left(S_{Temp}\left[\frac{\mathrm{nm}}{^{\circ}\mathrm{C}}\right] \cdot T_{FBG}\ [^{\circ}\mathrm{C}]\right) + \lambda_{B_0}\ [\mathrm{nm}]$$

Donde la pendiente experimental presenta un valor de:

$$S_{Temp} = 0.017\ \left[\frac{\mathrm{nm}}{^{\circ}\mathrm{C}}\right] = 0.017 \times 10^{-9}\ \left[\frac{\mathrm{m}}{^{\circ}\mathrm{C}}\right]$$

Mientras que el valor de la ordenada al origen es:

$$\lambda_{B_0} = 1550.10\ [\mathrm{nm}]$$

Además, en la Figura 3.27 se observan los diferentes espectros en reflexión de la rejilla de Bragg Modelo 136810 a diferentes valores de temperatura registrados.

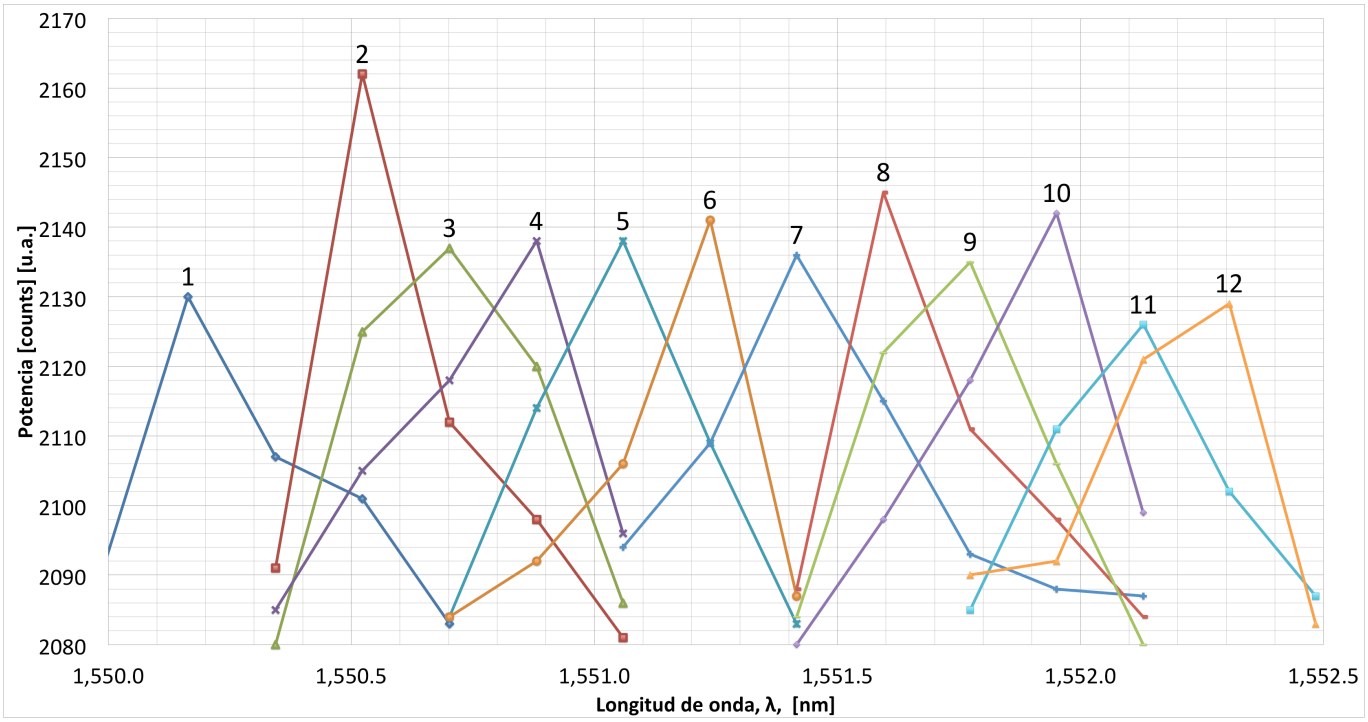


Figura 3.27. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros en reflexión de la rejilla de Bragg Modelo 136810 a diferentes valores de temperatura. Se presenta un cambio en la longitud de onda debido al cambio de temperatura que se aplica a la rejilla. Temperatura de la rejilla de Bragg, T_{FBG}, correspondiente a cada número en la gráfica: 1.- 25 [°C], 2.- 30 [°C], 3.- 35 [°C], 4.- 40 [°C], 5.- 50 [°C], 6.- 60 [°C], 7.- 80 [°C], 8.- 90 [°C], 9.- 100 [°C], 10.- 110 [°C], 11.- 125 [°C] y 12.- 130 [°C].

3.6. Conclusiones.

Una vez realizados los experimentos que involucran cambios en la tensión y la temperatura de la rejilla de Bragg, se comprobó que la longitud de onda de Bragg de la rejilla cambia proporcionalmente conforme se modifican ambos factores externos, presentando un comportamiento lineal tanto en los experimentos en donde se modifica la tensión como en los experimentos que involucran cambios en la temperatura.

En el caso de la tensión, el cambio en la longitud de onda de Bragg ocurre debido al estiramiento físico que sufre la fibra al aplicarle tensión, lo cual a su vez desencadena un cambio en el periodo de la rejilla y en el índice de refracción, variables que intervienen directamente en el valor de la longitud de onda de Bragg.

En lo que respecta al cambio en la temperatura de las rejillas, el comportamiento observado en los experimentos fue lineal, sin embargo, la ausencia de cambio en la longitud de onda de Bragg en ciertos valores de temperatura de la rejilla puede deberse a la falta de resolución por parte del interrogador de rejillas de Bragg utilizado. Por otro lado, durante el experimento se pudo observar que el espectro en reflexión de las diferentes rejillas de Bragg cambiaba su forma y experimentaba variaciones en la potencia de la señal. Además, el cambio en la longitud de onda de la rejilla se debe a la expansión térmica que sufre la fibra lo cual modifica directamente el periodo y el índice de refracción de ésta. Al término de las pruebas de temperatura las características espectrales de la rejillas regresaron a su estado inicial, el cual se refiere a los valores registrados a 25 [°C], mientras que sus características físicas tardaron aproximadamente una hora en regresar a su estado inicial ya que inmediatamente después de la prueba de temperatura la fibra presentaba mayor longitud y elongación, además de que el recubrimiento de acrílico de la rejilla tomó un tono amarillento.

Por último, resulta importante mencionar que el utilizar variaciones en la tensión axial de una rejilla de Bragg para sintonizar diferentes longitudes de onda (como en el caso de un OADM) resulta más eficiente y sencillo que el utilizar métodos que involucren cambios en la temperatura de la rejilla, ya que el rango de sintonización es sumamente mayor en los mecanismos de tensión que en los de temperatura, además, el aumentar la temperatura de la fibra resulta un proceso peligroso y poco eficiente pues para regresar a una temperatura inferior a la cual se está trabajando se necesita equipo de enfriamiento eficaz, lo cual resulta en mayor costo y en mayor tiempo de sintonización, no así el mecanismo de tensión, el cual puede realizarse manualmente o mediante control automático.

3.7. Referencias.

[1] Agilent Technologies, *Agilent 83437A Broadband Light Source User's Guide*, Agilent Technologies, 2004.

[2] Ibsen Photonics, *Manual para el usuario del Interrogador de Rejillas de Bragg: Marca Ibsen Photonics, Modelo I-MON 512 E-USB 2.0.,* Ibsen Photonics.

[3] Símbolos eléctricos y electrónicos, consultado en la dirección electrónica: http://www.simbologia-electronica.com/simbologia-electrica-electronica/simbolos-electricos-electronicos.htm, Consultado en Abril 2015.

[4] ITU-T (02/2012). *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.* Recommendation ITU-T G.694.1. [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en

[5] EXFO, "Multiplexación por división de longitud de onda densa," Consultado en Septiembre 2015. [Online]. Available: http://www.exfo.com/es/soluciones/red-metropolitana-nucleo/redes-dwdm

[6] International Telecommunication Union, "Dense Wavelength Division Multiplexing, Your up-to-date optical transmission system solution", Consultado en Septiembre 2015. [Online]. Available: http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/1D/01/T1D010000090001PDFE.pdf

Capítulo 4.

Análisis de resultados teóricos y experimentales.

4.1. Objetivo.

Analizar los resultados obtenidos en el estudio teórico y experimental de la respuesta espectral de una rejilla de Bragg ante cambios en su tensión y temperatura.

4.2. Introducción.

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos en las simulaciones y experimentos realizados en los Capítulos 2 y 3 con la finalidad de obtener los parámetros o características principales del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión basado en rejillas de Bragg.

Se determinará el rango de sintonización teórico y experimental del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión así como los efectos indeseados que puede provocar la variación de temperatura en este dispositivo.

4.3. Análisis de resultados teóricos.

En la Tabla 4.1 se muestra una comparación entre las diferentes rejillas de Bragg contempladas en la simulación de tensión, mientras que en la Tabla 4.2 se comparan los resultados obtenidos en la simulación de temperatura.

Tabla 4.1. Comparación de los resultados obtenidos en la simulación de tensión para las diferentes rejillas de Bragg.

	Modelos de las rejillas de Bragg		
Características	***136802***	***136806***	***136807***
Longitud de onda de Bragg con la fibra estirada sin tensión axial, λ_{B_N}, [nm]	1550.010 [1]	1550.062 [1]	1550.048 [1]
Longitud de onda de Bragg registrada al simular un estiramiento de 2.159 [mm], λ_{B_E}, [nm]	1565.026	1564.807	1563.814
Sensibilidad al estiramiento, S_{est}, [nm/mm]	6.955	6.830	6.376
Sensibilidad elástica, $S_{\varepsilon_{ax}}$, [nm/mε]	1.134	1.134	1.134
Longitud inicial de la fibra, L_0, [mm]	163.0	166.0	177.8
Máximo estiramiento simulado, $\Delta L_{ax_{MÁX}}$, [mm].	2.159	2.159	2.159

Máxima tensión axial simulada, $\varepsilon_{ax_{MÁX}}$, [mε]	13.245	13.006	12.143
Rango teórico de sintonización [nm]	15.016	14.745	13.766
Número teórico de posibles canales DWDM con una separación entre canales de 50 [GHz], con los que se puede trabajar	37	36	34

Se observa que la rejilla de Bragg Modelo 136802 posee el mayor rango de sintonización teórica, con un valor de 15.016 [nm], característica muy importante en un OADM sintonizable, ya que mientras mayor sea el rango de sintonización de este dispositivo más funcional será. Con dicho rango de sintonización se podrían extraer hasta 37 canales DWDM con una separación de canal de 50 [GHz] [2].

Cabe mencionar que la diferencia entre las características teóricas de cada rejilla de Bragg se debe a los diferentes valores de longitud inicial de la fibra, L_0, empleados.

Tabla 4.2. Comparación de los resultados obtenidos en la simulación de temperatura para las diferentes rejillas de Bragg.

	Modelos de las rejillas de Bragg		
Características	***136802***	***136807***	***136810***
Longitud de onda de Bragg a la temperatura inicial de la fibra, λ_{B_I}, [nm]	1550.010 [1]	1550.048 [1]	1550.141 [1]
Longitud de onda de Bragg con la fibra a 130 [°C], λ_{B_T}, [nm]	1551.164	1551.202	1551.295
Sensibilidad térmica, S_{Temp}, [nm/°C]	0.011	0.011	0.011
Temperatura inicial de la fibra, T_0, [°C]	25	25	25
Máxima temperatura simulada, $T_{FBG_{MÁX}}$, [°C]	130	130	130
Máximo cambio de temperatura simulado, $\Delta T_{MÁX}$, [°C]	105	105	105
Rango teórico de sintonización [nm]	1.154	1.154	1.154

En lo que respecta a la simulación de temperatura, las tres rejillas presentan la misma sensibilidad térmica, S_{Temp}**,** y el mismo rango de sintonización teórico, el cual tiene un valor de 1.154 [nm]. En un OADM sintonizable mediante tensión basado en cualquiera de las tres rejillas de Bragg antes mencionadas, la variación de temperatura en el rango de 25 [°C] a 130 [°C], provocaría errores y mal funcionamiento en dicho dispositivo hasta en tres canales DWDM con una separación de canal de 50 [GHz] [2].

4.4. Análisis de Resultados Experimentales.

En la Tabla 4.3 se muestra una comparación entre las diferentes rejillas de Bragg utilizadas en los experimentos de tensión, mientras que en la Tabla 4.4 se comparan los resultados obtenidos en las pruebas de temperatura.

Tabla 4.3. Comparación de los resultados obtenidos en los experimentos de tensión para las diferentes rejillas de Bragg.

	Modelos de las rejillas de Bragg		
Características	***136802***	***136806***	***136807***
Longitud de onda de Bragg con la fibra estirada sin tensión axial, λ_{B_N}, [nm]	1549.985	1550.164	1550.164
Longitud de onda de Bragg registrada al aplicar un estiramiento de 2.159 [mm], λ_{B_E}, [nm]	1560.851	1562.385	1560.680
Sensibilidad al estiramiento, S_{est}, [nm/mm]	5.308	5.724	5.271
Sensibilidad elástica, $S_{\varepsilon_{ax}}$, [nm/mε]	0.865	0.950	0.937
Coeficiente de determinación, R^2, entre los datos experimentales y la línea de tendencia generada por Excel	0.999	0.999	0.999
Longitud inicial de la fibra, L_0, [mm]	163.0	166.0	177.8
Máximo estiramiento alcanzado, $\Delta L_{ax_{MÁX}}$, [mm]	0.080	0.085	0.080
Máxima tensión axial aplicada, $\varepsilon_{ax_{MÁX}}$, [mε]	12.466	13.006	11.429
Rango experimental de sintonización [nm]	10.866	12.221	10.516
Número de canales DWDM con una separación entre canales de 50 [GHz] que se pudieron sintonizar	17	18	17

En lo que respecta a los resultados experimentales, la rejilla de Bragg Modelo 136806 es la que posee el mayor rango de sintonización, el cual tiene un valor de 12.221 [nm], pudiendo sintonizar experimentalmente 18 canales DWDM con una separación de canal de 50 [GHz], sin embargo, teóricamente se pueden sintonizar 30 canales [2].

Tabla 4.4. Comparación de los resultados obtenidos en los experimentos de temperatura para las diferentes rejillas de Bragg.

	Modelos de las rejillas de Bragg		
Características	***136802***	***136807***	***136810***
Longitud de onda de Bragg a la temperatura inicial de la fibra, λ_{B_I}, [nm]	1550.164	1550.164	1550.164
Longitud de onda de Bragg con la fibra a 130 [°C], λ_{B_T}, [nm]	1551.951	1551.951	1552.306
Sensibilidad térmica, S_{Temp}, [nm/°C]	0.015	0.015	0.017
Coeficiente de determinación, R^2, entre los datos experimentales y la línea de tendencia generada por Excel	0.962	0.968	0.962
Temperatura inicial de la fibra, T_0, [°C]	25	25	25
Máxima temperatura alcanzada, $T_{FBG_{MÁX}}$, [°C]	130	130	130
Máximo cambio de temperatura, $\Delta T_{MÁX}$, [°C]	105	105	105
Rango experimental de sintonización [nm]	1.787	1.787	2.142

Finalmente, en la Tabla 4.4 se observa que la rejilla de Bragg Modelo 136810 presenta un rango de sintonización mayor al de las otras dos rejillas, lo cual afecta mayormente al prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión de esta tesis pues tendremos problemas con un mayor número de canales al modificar la temperatura de dicho dispositivo.

Por otro lado, la rejilla de Bragg Modelo 136807 es la que posee un coeficiente de determinación, R^2, mayor, resultando así en un mejor modelo para las pruebas de temperatura.

Una vez comparados los resultados teóricos y experimentales registrados en las tablas anteriores se obtendrá el error relativo de la sensibilidad al estiramiento, S_{est}, la sensibilidad elástica, $S_{\varepsilon_{ax}}$ y la sensibilidad térmica, S_{Temp}, para las diferentes rejillas de Bragg en cuestión, con la expresión [3], [4]:

$$\%Error_R = \frac{\left|Valor_{Experimental} - Valor_{Teórico}\right|}{Valor_{Teórico}} \times 100\,\% \tag{4.1}$$

En la Tabla 4.5 se muestra el valor de los diferentes errores relativos calculados.

Tabla 4.5. Errores relativos, $\%Error_R$.

Tensión				Temperatura			
Rejillas de Bragg	136802	136806	136807	Rejillas de Bragg	136802	136807	136810
S_{est}	23.7 %	16.2 %	17.3 %	S_{Temp}	36.4 %	36.4 %	54.5 %
$S_{\varepsilon_{ax}}$	23.7 %	16.2 %	17.4 %				

Respecto a los experimentos de tensión, la rejilla de Bragg Modelo 136806 posee el menor porcentaje de error, mientras que la rejilla de Bragg Modelo 136802 es la que posee el mayor porcentaje de error.

Por otro lado, las rejillas de Bragg Modelos 136802 y 136807 presentan el mismo porcentaje de error en los experimentos de temperatura, mientras que la rejilla de Bragg Modelo 136810 es la que presenta el mayor porcentaje de error, el cual tiene un valor del 54.5 %. Lo anterior puede deberse a las condiciones del laboratorio en el cual se realizaron las pruebas de temperatura así como al tipo de fibra sobre la cual está construida la rejilla de Bragg.

Por otro lado, a continuación se presentarán las variaciones que tendrá el valor de la longitud de onda de Bragg de la rejilla considerando los errores relativos obtenidos, variable que denominaremos como $\Delta\lambda_{B_{error}}$. Para dichos cálculos se utilizarán las expresiones 4.2 y 4.3.

Tanto en los experimentos de tensión como en los de temperatura se considerarán el mejor y peor escenario en cuanto a la variación del valor de la longitud de onda de Bragg se refiere, es decir, para valores de estiramiento, ΔL_{ax}, de 0.127 [mm] y 2.159 [mm], respectivamente y para valores de temperatura de la rejilla de Bragg, T_{FBG}, de 30 [°C] y 130 [°C], respectivamente.

$$\Delta\lambda_{B_{error-S}} = (S_{est} \cdot \Delta L_{ax}) \times (\%Error_R\ Tensión) \tag{4.2}$$

Tabla 4.6. Variaciones de la longitud de onda de Bragg debido al porcentaje de error en experimentos de tensión.

$\Delta L_{ax} = 0.127$ [mm]				$\Delta L_{ax} = 2.159$ [mm]			
Rejillas de Bragg	136802	136806	136807	Rejillas de Bragg	136802	136806	136807
$\Delta\lambda_{B_{error-S}}$ [nm]	± 0.160	± 0.118	± 0.116	$\Delta\lambda_{B_{error}}$ [nm]	± 2.714	± 2.000	± 1.972

$$\Delta\lambda_{B_{error-T}} = \left(S_{Temp} \cdot T_{FBG}\right) \times (\%Error_R\ Temperatura) \quad (4.3)$$

Tabla 4.7. Variaciones de la longitud de onda de Bragg debido al porcentaje de error en experimentos de temperatura.

$T_{FBG} = 30$ [°C]				$T_{FBG} = 130$ [°C]			
Rejillas de Bragg	136802	136807	136810	Rejillas de Bragg	136802	136807	136810
$\Delta\lambda_{B_{error-T}}$ [nm]	± 0.164	± 0.164	± 0.278	$\Delta\lambda_{B_{error}}$ [nm]	± 0.709	± 0.709	± 1.205

4.5. Conclusiones.

Al observar las variaciones en la longitud de onda de Bragg de las Tablas 4.6 y 4.7 se decidió utilizar la rejilla de Bragg Modelo 136807 debido a que es el dispositivo que menor variación presenta en los experimentos de tensión, considerando el porcentaje de error entre la sensibilidad al estiramiento teórica y experimental. Con esto, cuando se aplique un estiramiento, ΔL_{ax}, de 2.159 [mm] se tendrá una variación en la longitud de onda de Bragg debido al porcentaje de error, $\Delta\boldsymbol{\lambda_{B_{error-S}}}$, de 1.972 [nm], lo cual podría afectar hasta 5 canales DWDM con una separación de canal de 50 [GHz] [2].

En lo que respecta al porcentaje de error obtenido en las pruebas de temperatura para dicho Modelo de rejilla de Bragg, se espera una variación en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\boldsymbol{\lambda_{B_{error-T}}}$, de 0.709 [nm] cuando la fibra óptica presente una temperatura de 130 [°C], lo cual generará problemas con al menos 1 canal DWDM con una separación de canal de 50 [GHz] [2].

Al utilizar la rejilla de Bragg Modelo 136807 como dispositivo base para el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión se podrá alcanzar un rango de sintonización experimental de 10.516 [nm] al aplicar un estiramiento a la fibra óptica de 2.032 [mm], con lo cual podremos sintonizar teóricamente hasta 26 canales DWDM con una separación de canal de 50 [GHz] [2].

4.6. Referencias.

[1] Smart Fibres, *Fibre Bragg Grating Sensor Datasheet,* SmartFBG, ver Anexo B.

[2] ITU-T (02/2012). *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.* Recommendation ITU-T G.694.1. Available online: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en.

[3] Grupo de Comportamiento Mecánico de los Materiales, Ingeniería de Materiales, Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Almería, "Determinación de Errores y Tratamiento de Datos," Autor: Antonio Miguel Posadas, Consultado en Septiembre 2015. [Online]. Available: www.ual.es/~aposadas/TeoriaErrores.pdf.

[4] Universidad IBERO Campus Ciudad de México, "Importancia de la estadística y la quimiometría en la química analítica," Consultado en Septiembre 2015. [Online]. Available:
www.uia.mx/campus/publicaciones/quimanal/pdf/9estadisticayquimiometría.pdf

Capítulo 5.

Construcción y caracterización del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión basado en una rejilla de Bragg y dos circuladores ópticos.

5.1. Objetivo.

Construir y caracterizar el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión previamente diseñado.

Estudiar la respuesta espectral del OADM sintonizable mediante tensión ante cambios en la temperatura.

5.2. Introducción.

En este capítulo se menciona el proceso de construcción del prototipo funcional de un OADM sintonizable mediante tensión basado en una rejilla de Bragg y dos circuladores ópticos.

Por otro lado se realiza un estudio experimental de la respuesta espectral del OADM sintonizable mediante tensión, en cada uno de sus diferentes puertos, es decir, a la entrada del dispositivo, en el puerto en el cual se extraen las diversas longitudes de onda (DROP), el puerto en el cual se inserta información a determinada longitud de onda (ADD), el puerto en el cual se observa el espectro en transmisión de la rejilla de Bragg después de realizar el filtrado de la longitud de onda de Bragg y finalmente el puerto de salida del OADM sintonizable. Además se caracterizará el OADM sintonizable mediante tensión con la finalidad de obtener el valor y las propiedades más importantes de dicho dispositivo.

Finalmente, se estudiarán los efectos de la temperatura en el OADM sintonizable, mostrando las variaciones y/o cambios en sus principales características, lo cual podrá desencadenar múltiples problemas y errores durante su utilización a nivel comercial. Esto con la finalidad de conocer el comportamiento de este dispositivo al estar expuesto a cambios en la temperatura del cuarto de telecomunicaciones en el cual se desea instalar.

5.3. Respuesta espectral en los diferentes puertos del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión.

5.3.1. Equipo empleado.

El equipo empleado en este estudio experimental se enumera a continuación:

1. Fuente óptica de amplio espectro: Marca Agilent, Modelo 83437A.
2. Circulador óptico de 3 puertos: Número de serie 4140003918[5].
3. Circulador óptico de 3 puertos: Número de serie 906221.
4. Conectores FC/FC.
5. Rejilla de Bragg: Marca Smart Fibres Modelo 136807.
6. Cabezas Micrométricas: Marca Mitutoyo, Modelo 148-811
7. Unidades de Desplazamiento: Marca Thorlabs, Modelo MT1-Z7.
8. Ranuras en V de 250 μm para sujetar la fibra óptica.
9. Placas de Acrílico para colocar y sujetar las ranuras en V a las unidades de desplazamiento.
10. Interrogador de Rejillas de Bragg: Marca Ibsen Photonics, Modelo I-MON 512 E-USB 2.0.
11. Software del interrogador de rejillas v. 2.0.
12. Computadora.

5.3.2. Metodología.

El estudio experimental de la respuesta espectral del OADM sintonizable mediante tensión se llevó a cabo obteniendo los espectros ópticos en diferentes puntos de éste dispositivo para diferentes valores de estiramiento, ΔL_{ax}, y tensión axial, ε_{ax}, de la fibra óptica, los cuales se observan en la Figura 5.1.

El punto A corresponde al espectro óptico obtenido en la entrada del dispositivo, el cual corresponde a la fuente óptica de amplio espectro Marca Agilent, Modelo 83437A.
El punto B corresponde al espectro óptico en transmisión de la rejilla de Bragg una vez que se ha realizado el filtrado de la longitud de onda de Bragg (proceso que corresponde a la extracción de un determinado canal a través del OADM sintonizable, al cual llamaremos "DROP"). El punto C corresponde al espectro óptico que se obtiene a la salida del OADM sintonizable mediante tensión una vez que se ha realizado el proceso de adición (el cual llamaremos "ADD") de la nueva señal óptica a la misma longitud de onda de la señal que fue extraída previamente en el proceso "DROP". Con la finalidad de añadir en el proceso ADD la misma señal óptica que se extrajo en el proceso DROP, se conectaron entre sí ambos puertos resultando así en el punto D, el cual corresponde al espectro óptico en reflexión de la rejilla de Bragg. Dicha señal óptica se extrajo en el puerto P3 del circulador óptico 1 y se añadió en el puerto P1 del circulador óptico 2 (ver Figura 5.1).

[5] Las especificaciones técnicas de dicho circulador óptico pueden consultarse en la Tabla B.2 del Anexo B de esta tesis.

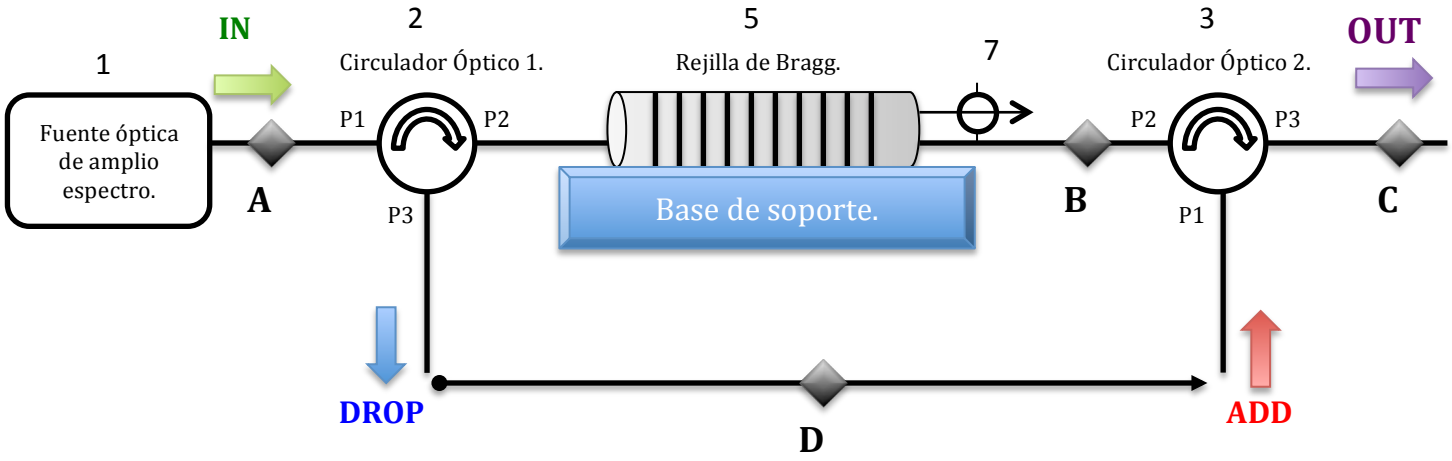


Figura 5.1. Esquema del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión (Los números corresponden a la lista del equipo usado en la sección 5.3.1).

Cabe mencionar que para la obtención de los espectros ópticos en cada uno de los puntos antes mencionados se utilizó el interrogador de rejillas de Bragg Marca Ibsen Photonics, Modelo I-MON 512 E-USB 2.0.

5.3.3. Descripción de la instalación.

El diagrama de la instalación montada para la construcción y caracterización del prototipo funcional del OADM sintonizable se muestra en la Figura 5.2.

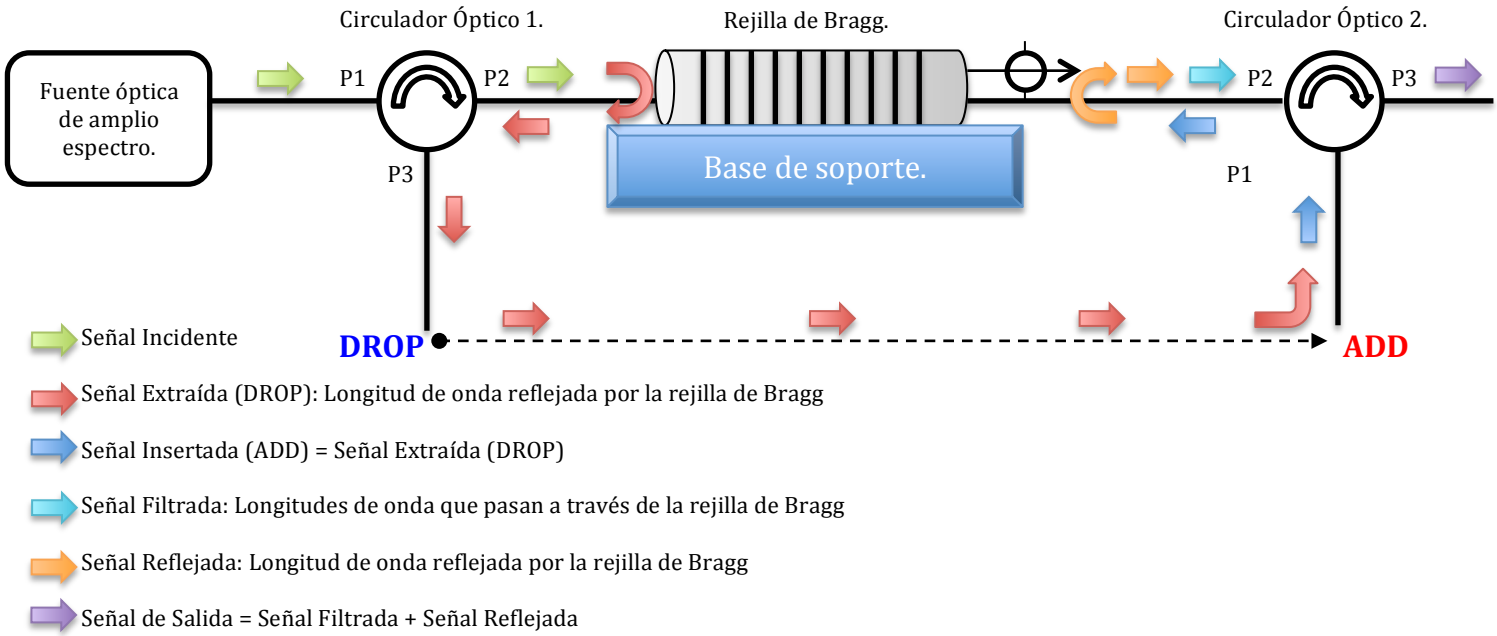


Figura 5.2. Diagrama descriptivo de la instalación montada para la construcción y caracterización del OADM sintonizable mediante tensión.

En la Figura 5.2 se observa que la señal proveniente de la fuente óptica de amplio espectro (Señal Incidente 1) se transmite del puerto P1 del circulador óptico 1 al puerto P2 del mismo, para después llegar a la rejilla de Bragg. El espectro en reflexión de la rejilla de Bragg (Señal Extraída) pasa del puerto P2 al puerto P3 del circulador óptico 1, llevándose a cabo así el proceso DROP. Por otro lado en el puerto P1 del circulador óptico 2 (Puerto ADD) se hace incidir la señal óptica previamente extraída (Señal Insertada), la cual pasará al puerto P2 de dicho circulador hasta llegar a la rejilla de Bragg. En este punto dicha señal será reflejada por la rejilla de Bragg (Señal Reflejada) y transmitida junto con el espectro en transmisión de dicha rejilla (Señal Filtrada), obteniendo finalmente la señal de salida en el puerto P3 del circulador óptico 2 (Señal de Salida).

En las Figuras 5.3 y 5.4 se muestran los dos circuladores ópticos empleados en la construcción del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión.

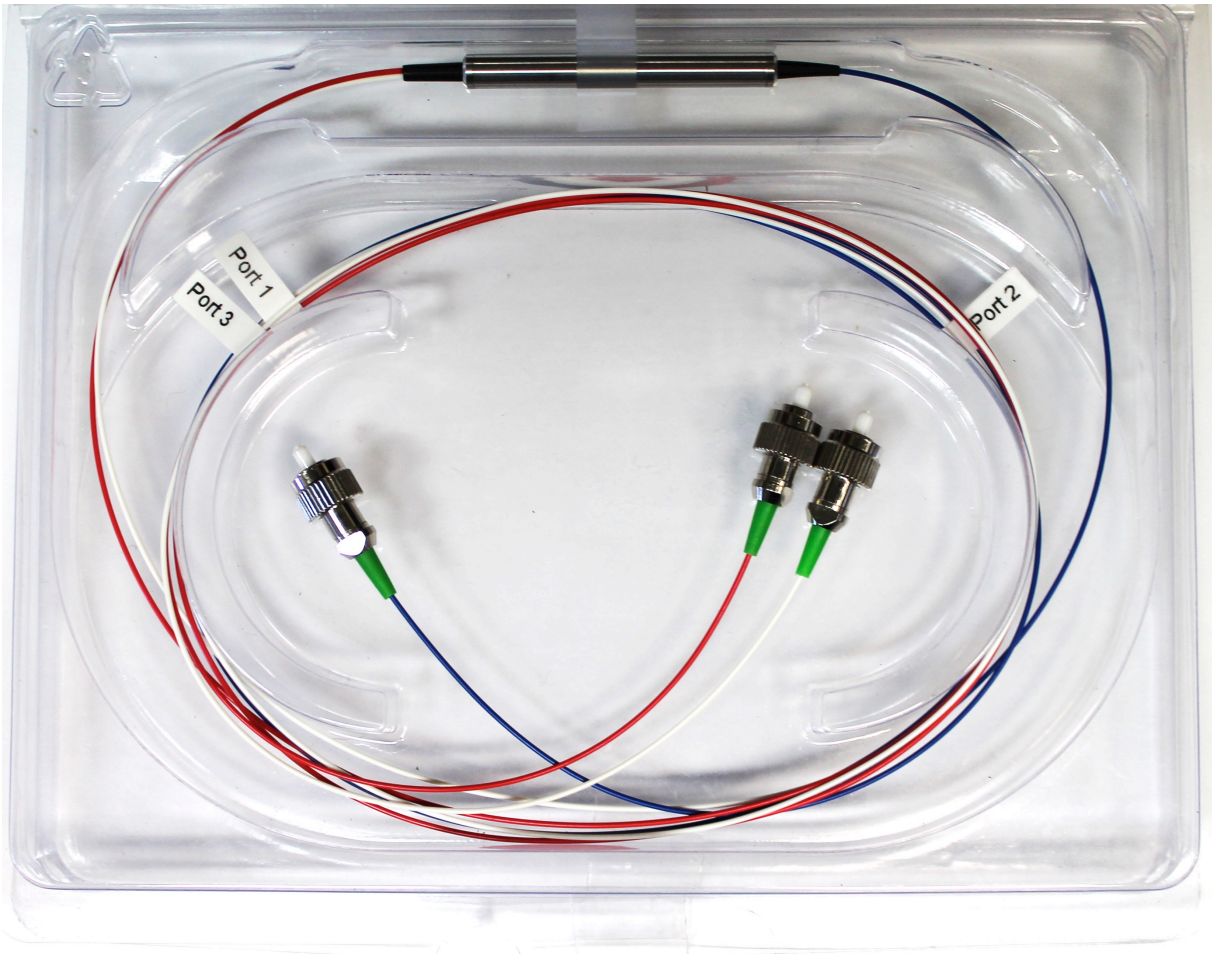


Figura 5.3. Circulador óptico Número de serie 4140003918.

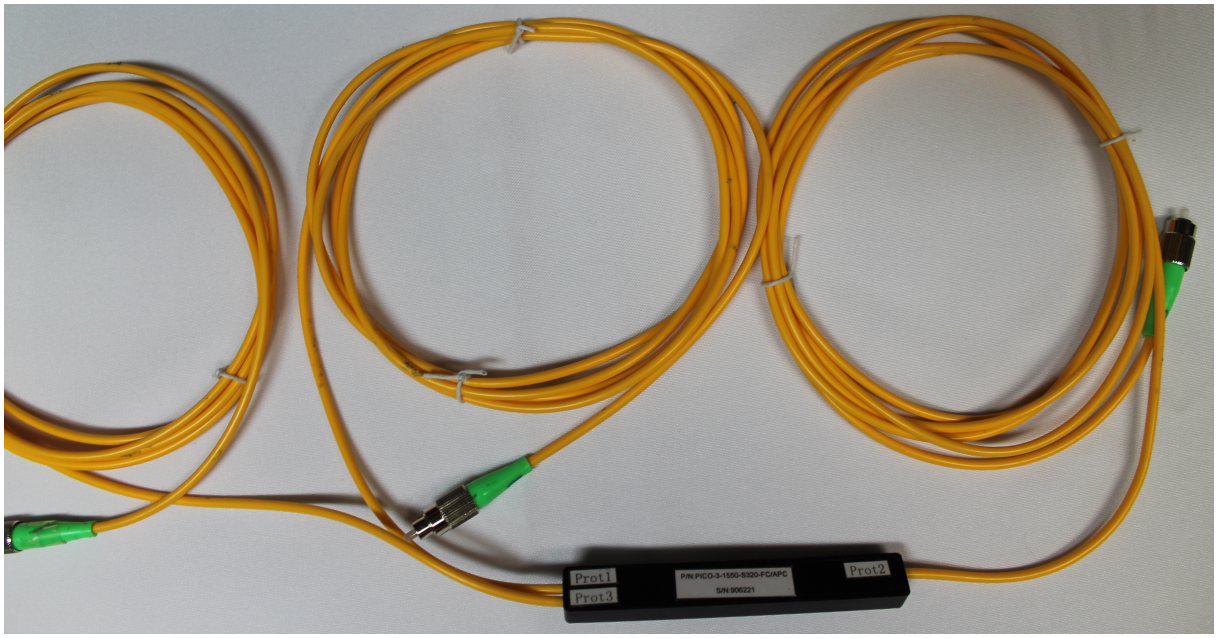


Figura 5.4. Circulador óptico Número de serie 906221.

En lo que respecta al arreglo de conexiones montado en este experimento, éste se muestra en la Figura 5.5.

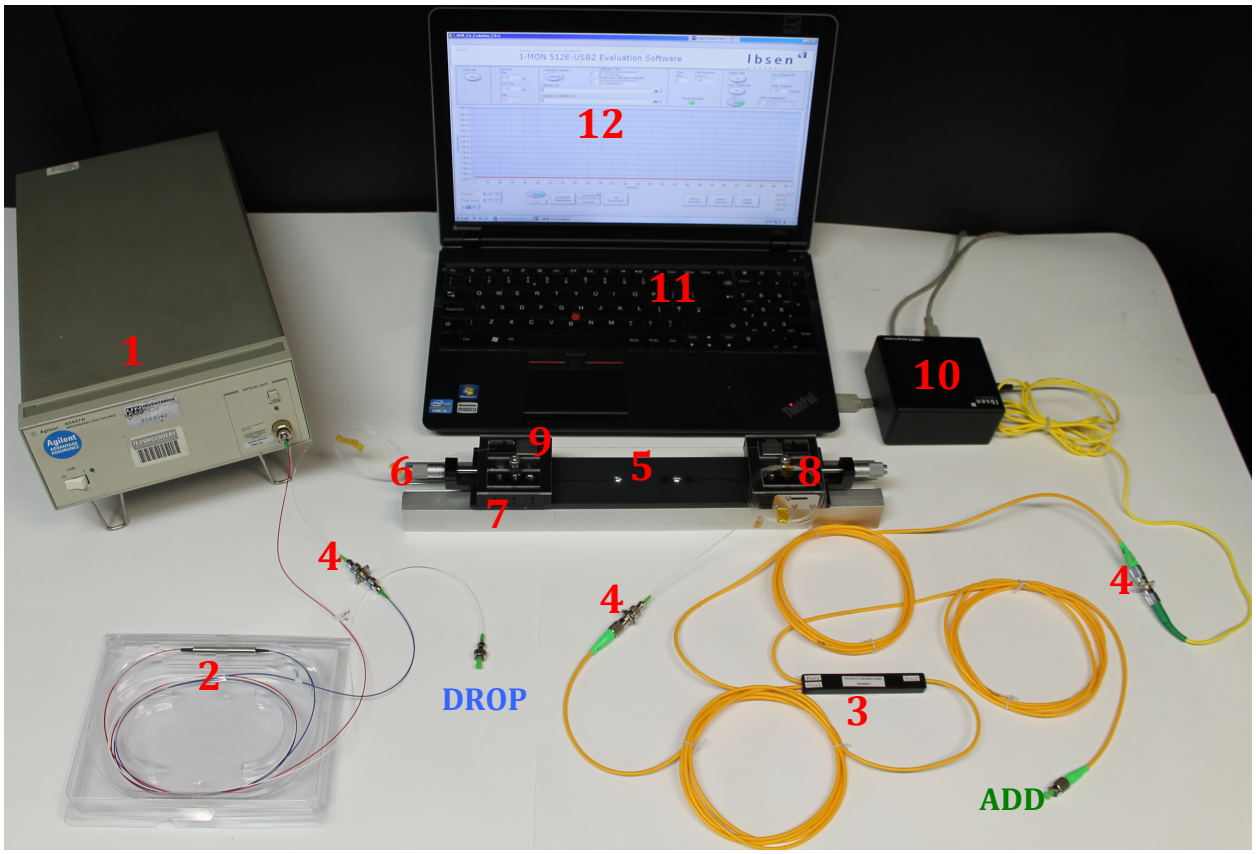


Figura 5.5. Arreglo de conexiones realizado para la construcción del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión (Los números corresponden a la lista del equipo usado en la sección 5.3).

5.3.4. Resultados.

En la Tabla 5.1 se muestran algunas de las longitudes de onda sintonizadas por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión según el valor de estiramiento, ΔL_{ax}, de la fibra óptica con la rejilla de Bragg.

Resulta importante mencionar que la longitud inicial de la fibra, L_0, fue de 177.8 [mm].

Tabla 5.1. Longitudes de onda sintonizadas por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión.

Estiramiento (ΔL_{ax}) [mm]	Tensión axial (ε_{ax}) [mε]	Longitud de onda de Bragg (longitud de onda sintonizada por el OADM sintonizable), (λ_B), [nm]	Cambio en la longitud de onda de Bragg ($\Delta\lambda_B$) [nm]
0.000	0.000	1550.164	0.000
0.381	2.143	1552.129	1.965
0.762	4.286	1554.076	3.912
1.143	6.429	1556.183	6.019
1.524	8.571	1558.269	8.105
1.905	10.714	1560.165	10.001
2.286	12.857	1562.215	12.050

Se observa que un aumento de 0.381 [mm] en el estiramiento aplicado a la fibra óptica, ΔL_{ax}, provoca un cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, de aproximadamente 2 [nm], teniendo así un rango de sintonización máximo de 12 [nm] cuando se aplica un estiramiento de 2.286 [mm] a la fibra óptica con la rejilla de Bragg. Se dice que es un rango de sintonización máximo debido a que se ha alcanzado la máxima tensión que se le puede aplicar a la rejilla de Bragg antes de que ésta se dañe parcial o totalmente.

En lo que respecta a los espectros ópticos obtenidos en los diferentes puntos mostrados en la Figura 5.1, es decir, los puntos A, B, C y D del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, para cada uno de los valores de estiramiento, ΔL_{ax}, aplicado a la fibra óptica se muestran a continuación.

Es importante mencionar que el espectro óptico extraído en el Puerto DROP será el mismo que se añadirá en el Puerto ADD con la finalidad de observar el comportamiento del dispositivo y mantener la integridad de la señal óptica que se está transmitiendo.

- $\Delta L_{ax} = 0\ [\mathrm{mm}]$, $\varepsilon_{ax} = 0\ [\mathrm{m}\varepsilon]$, es decir, con la fibra óptica estirada pero sin tensión axial.

En la Figura 5.6 se muestran los espectros ópticos en los diferentes puertos del dispositivo bajo estudio, en ausencia de estiramiento, ΔL_{ax}, y tensión axial, ε_{ax}.

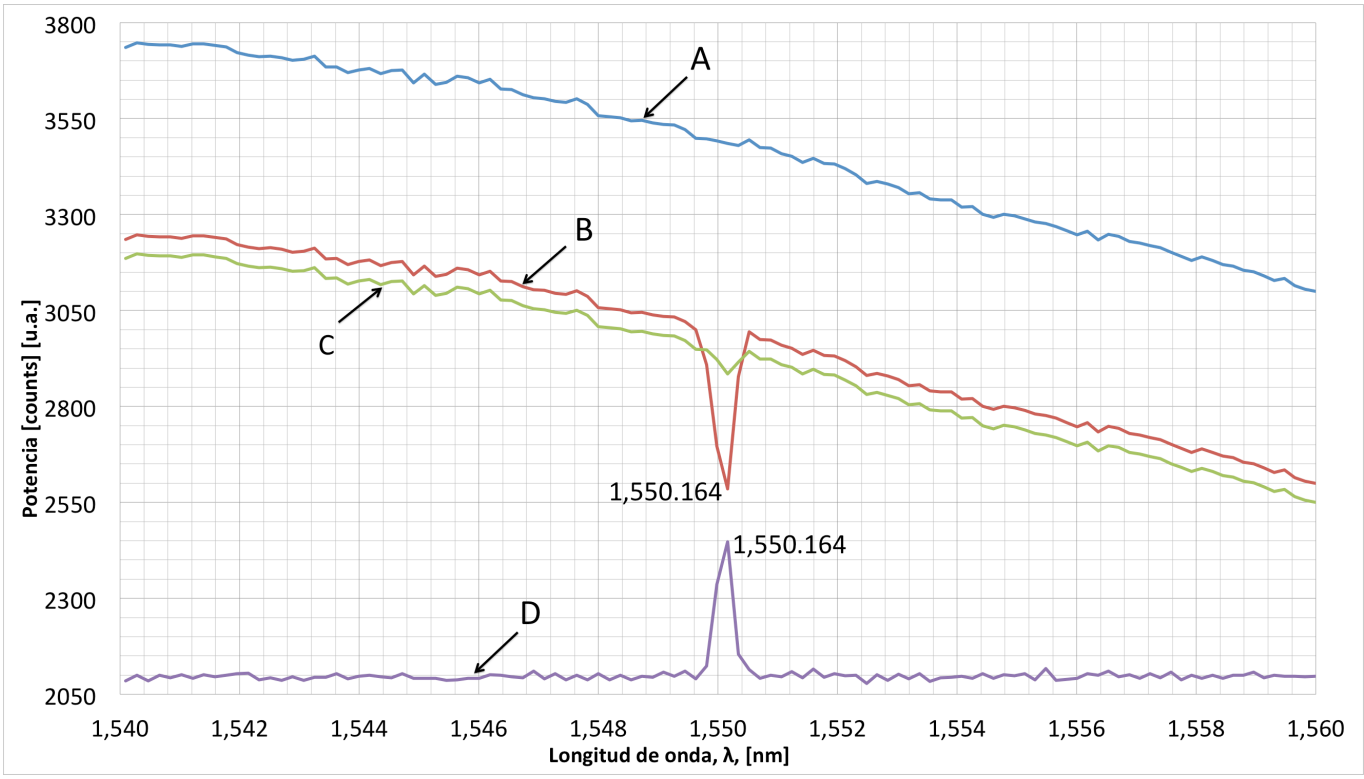


Figura 5.6. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros ópticos de los diferentes puertos del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, cuando no se aplica estiramiento a la rejilla de Bragg, $\Delta L_{ax} = 0\ [\mathrm{mm}]$. Los puertos A, B, C y D corresponden a los mostrados en la Figura 5.1.

En la Figura 5.6 se observa que la longitud de onda extraída (puerto B) e insertada (puerto D) por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, para un estiramiento de $\Delta L_{ax} = 0\ [\mathrm{mm}]$, fue $\lambda = 1550.164\ [\mathrm{nm}]$.

- $\Delta L_{ax} = 0.381\ [\mathrm{mm}]$, $\varepsilon_{ax} = 2.143\ [\mathrm{m}\varepsilon]$.

En la Figura 5.7 se observan los espectros ópticos en los diferentes puertos del dispositivo bajo estudio cuando se aplica un estiramiento a la fibra óptica con la rejilla de Bragg, ΔL_{ax}, de 0.381 [mm], provocando un cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, de 1.965 [nm].

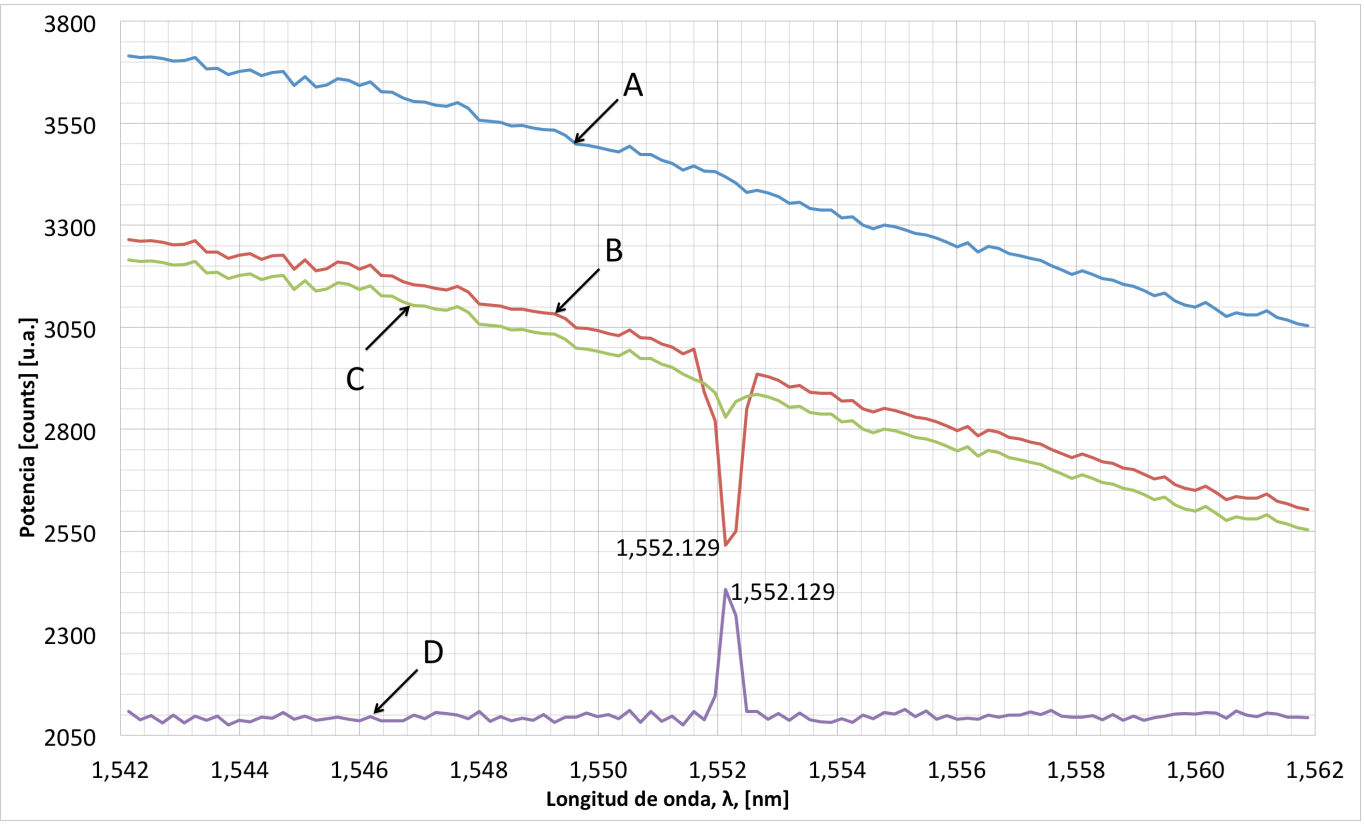


Figura 5.7. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros ópticos de los diferentes puertos del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, cuando se aplica un estiramiento a la rejilla de Bragg de $\Delta L_{ax} = 0.381$ [mm]. Los puertos A, B, C y D corresponden a los mostrados en la Figura 5.1.

En la Figura 5.7 se observa que la longitud de onda extraída (puerto B) e insertada (puerto D) por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, para un estiramiento de $\Delta L_{ax} = 0.381$ [mm], fue $\lambda = 1552.129$ [nm].

- $\Delta L_{ax} = 0.762$ [mm] , $\varepsilon_{ax} = 4.286$ [mε].

En la Figura 5.8 se observan los espectros ópticos en los diferentes puertos del dispositivo bajo estudio cuando se aplica un estiramiento a la fibra óptica con la rejilla de Bragg, ΔL_{ax}, de 0.762 [mm], provocando un cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, de 3.912 [nm].

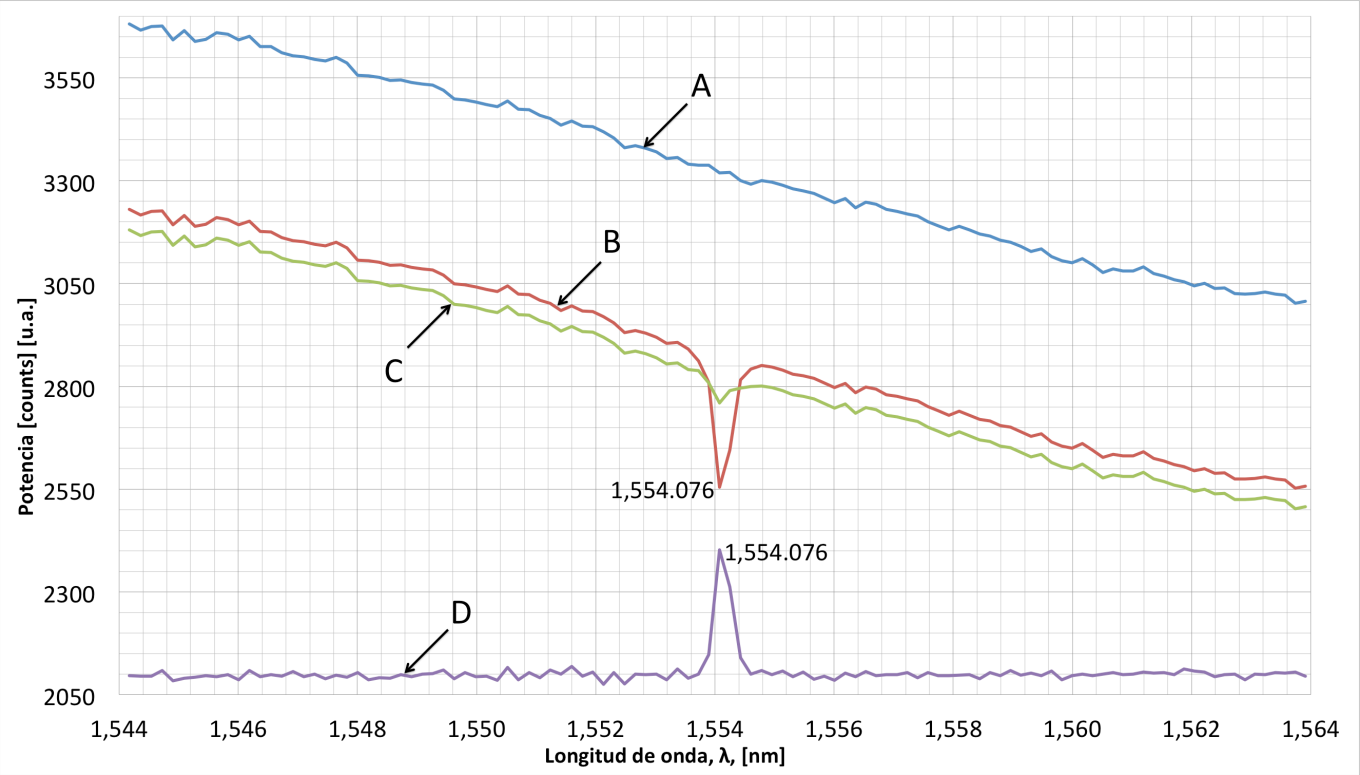


Figura 5.8. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros ópticos de los diferentes puertos del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, cuando se aplica un estiramiento a la rejilla de Bragg de $\Delta L_{ax} = 0.762$ [mm]. Los puertos A, B, C y D corresponden a los mostrados en la Figura 5.1.

En la Figura 5.8 se observa que la longitud de onda extraída (puerto B) e insertada (puerto D) por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, para un estiramiento de $\Delta L_{ax} = 0.762$ [mm], fue $\lambda = 1554.076$ [nm].

- $\Delta L_{ax} = 1.143$ [mm] , $\varepsilon_{ax} = 6.429$ [mε].

En la Figura 5.9 se observan los espectros ópticos en los diferentes puertos del dispositivo bajo estudio cuando se aplica un estiramiento a la fibra óptica con la rejilla de Bragg, ΔL_{ax}, de 1.143 [mm], provocando un cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, de 6.019 [nm].

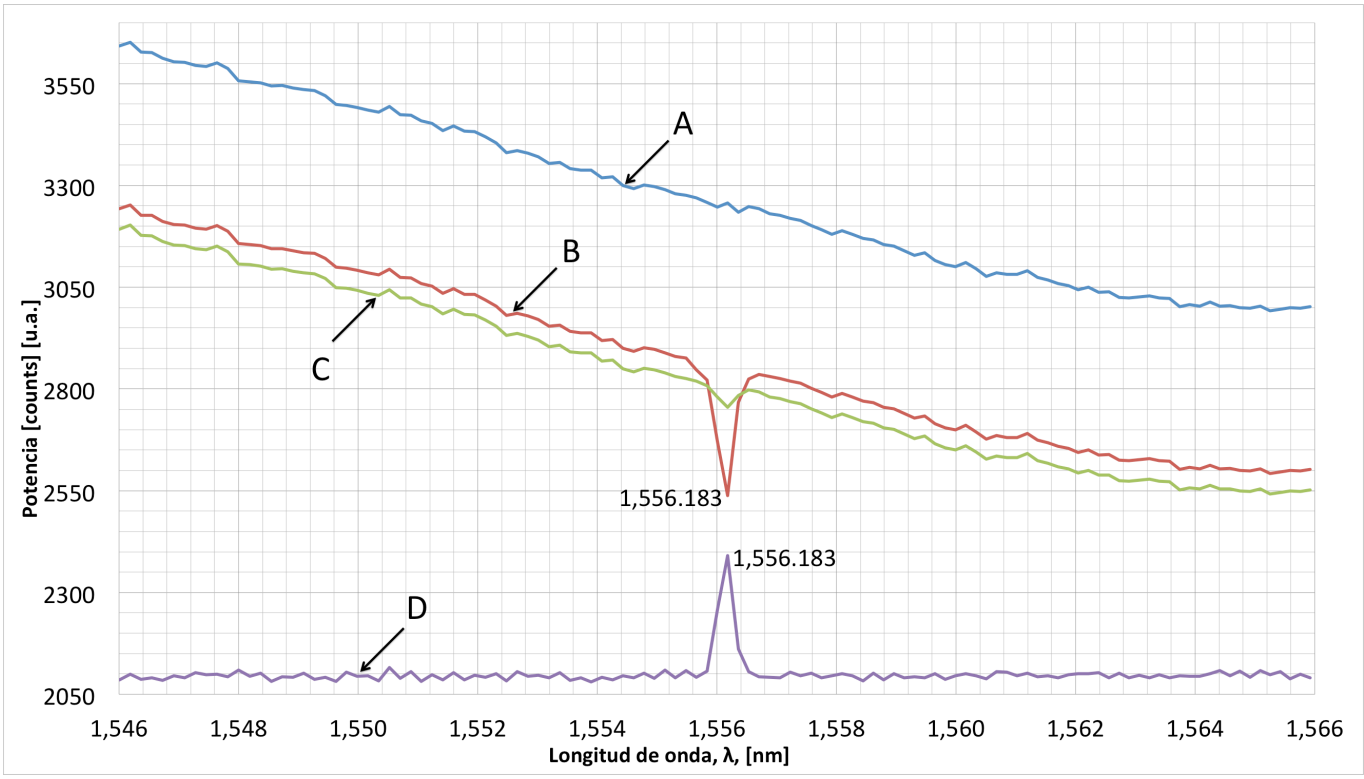


Figura 5.9. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros ópticos de los diferentes puertos del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, cuando se aplica un estiramiento a la rejilla de Bragg de $\Delta L_{ax} = 1.143$ [mm]. Los puertos A, B, C y D corresponden a los mostrados en la Figura 5.1.

En la Figura 5.9 se observa que la longitud de onda extraída (puerto B) e insertada (puerto D) por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, para un estiramiento de $\Delta L_{ax} = 1.143$ [mm], fue $\lambda = 1556.183$ [nm].

- $\Delta L_{ax} = 1.524$ [mm] , $\varepsilon_{ax} = 8.571$ [mε].

En la Figura 5.10 se observan los espectros ópticos en los diferentes puertos del dispositivo bajo estudio cuando se aplica un estiramiento a la fibra óptica con la rejilla de Bragg, ΔL_{ax}, de 1.524 [mm], provocando un cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, de 8.105 [nm].

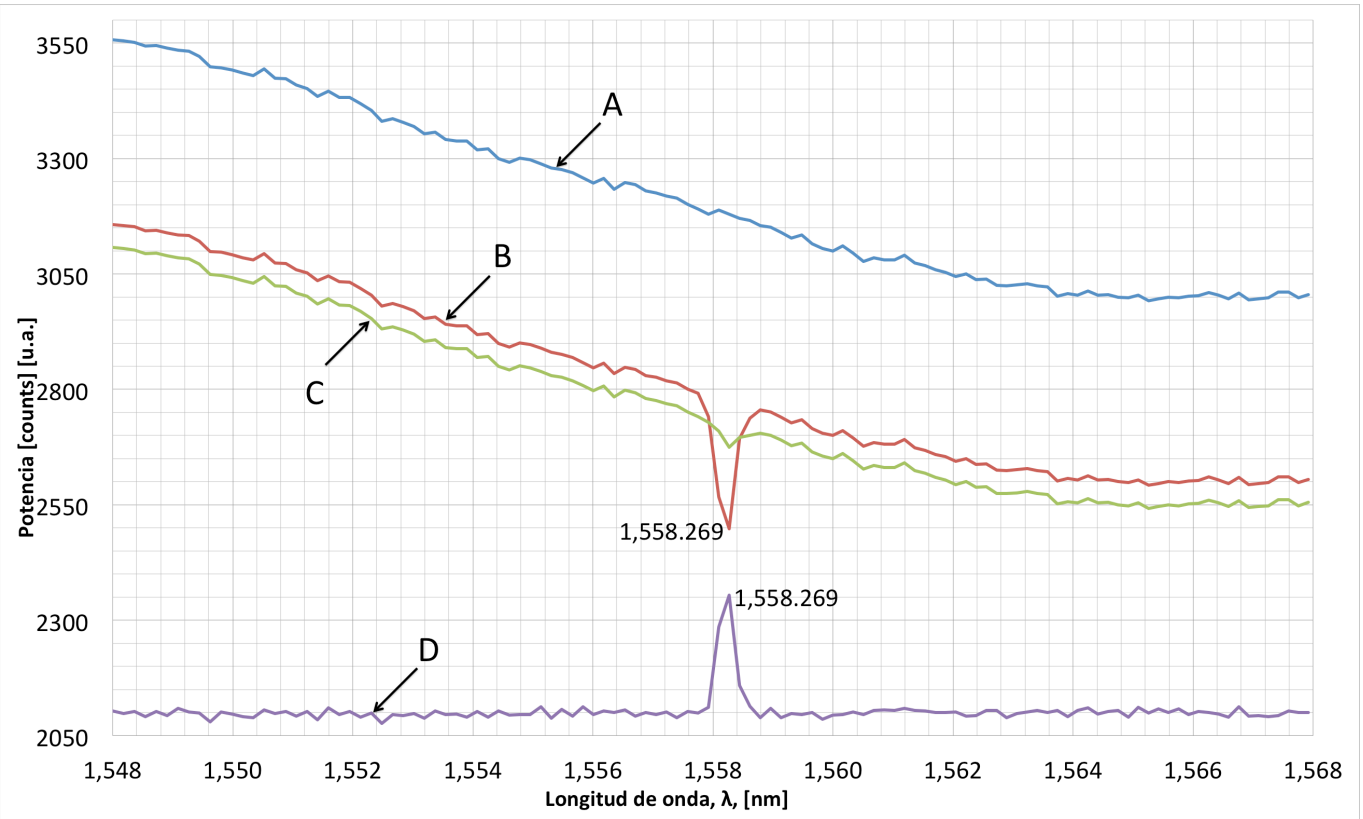


Figura 5.10. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros ópticos de los diferentes puertos del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, cuando se aplica un estiramiento a la rejilla de Bragg de $\Delta L_{ax} = 1.524$ [mm]. Los puertos A, B, C y D corresponden a los mostrados en la Figura 5.1.

En la Figura 5.10 se observa que la longitud de onda extraída (puerto B) e insertada (puerto D) por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, para un estiramiento de $\Delta L_{ax} = 1.524$ [mm], fue $\lambda = 1558.269$ [nm].

- $\Delta L_{ax} = 1.905$ [mm] , $\varepsilon_{ax} = 10.714$ [mε].

En la Figura 5.11 se observan los espectros ópticos en los diferentes puertos del dispositivo bajo estudio cuando se aplica un estiramiento a la fibra óptica con la rejilla de Bragg, ΔL_{ax}, de 1.905 [mm], provocando un cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, de 10.001 [nm].

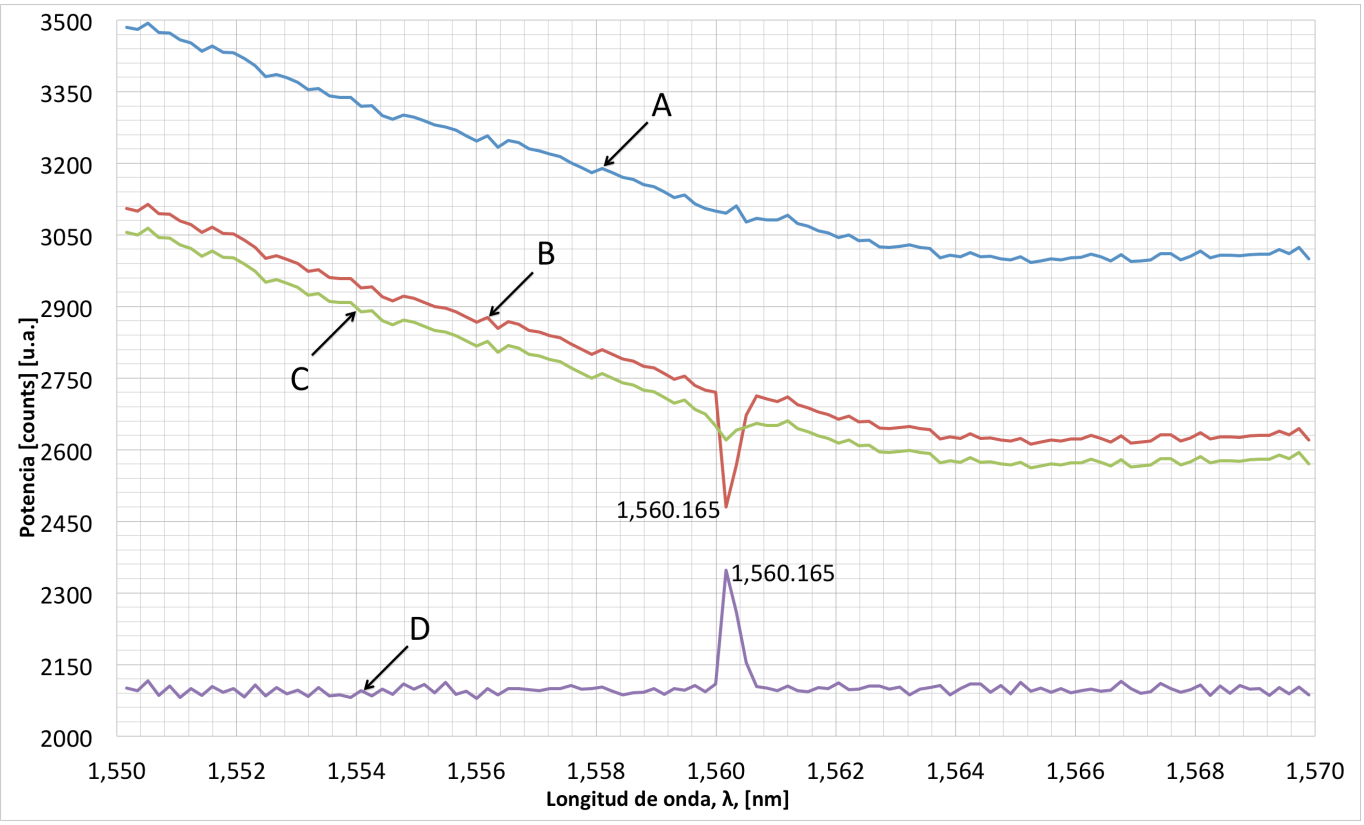


Figura 5.11. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros ópticos de los diferentes puertos del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, cuando se aplica un estiramiento a la rejilla de Bragg de $\Delta L_{ax} = 1.905$ [mm]. Los puertos A, B, C y D corresponden a los mostrados en la Figura 5.1.

En la Figura 5.11 se observa que la longitud de onda extraída (puerto B) e insertada (puerto D) por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, para un estiramiento de $\Delta L_{ax} = 1.905$ [mm], fue $\lambda = 1560.165$ [nm].

- $\Delta L_{ax} = 2.286$ [mm] , $\varepsilon_{ax} = 12.857$ [mε].

En la Figura 5.12 se observan los espectros ópticos en los diferentes puertos del dispositivo bajo estudio cuando se aplica un estiramiento a la fibra óptica con la rejilla de Bragg, ΔL_{ax}, de 2.286 [mm], provocando un cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, de 12.050 [nm].

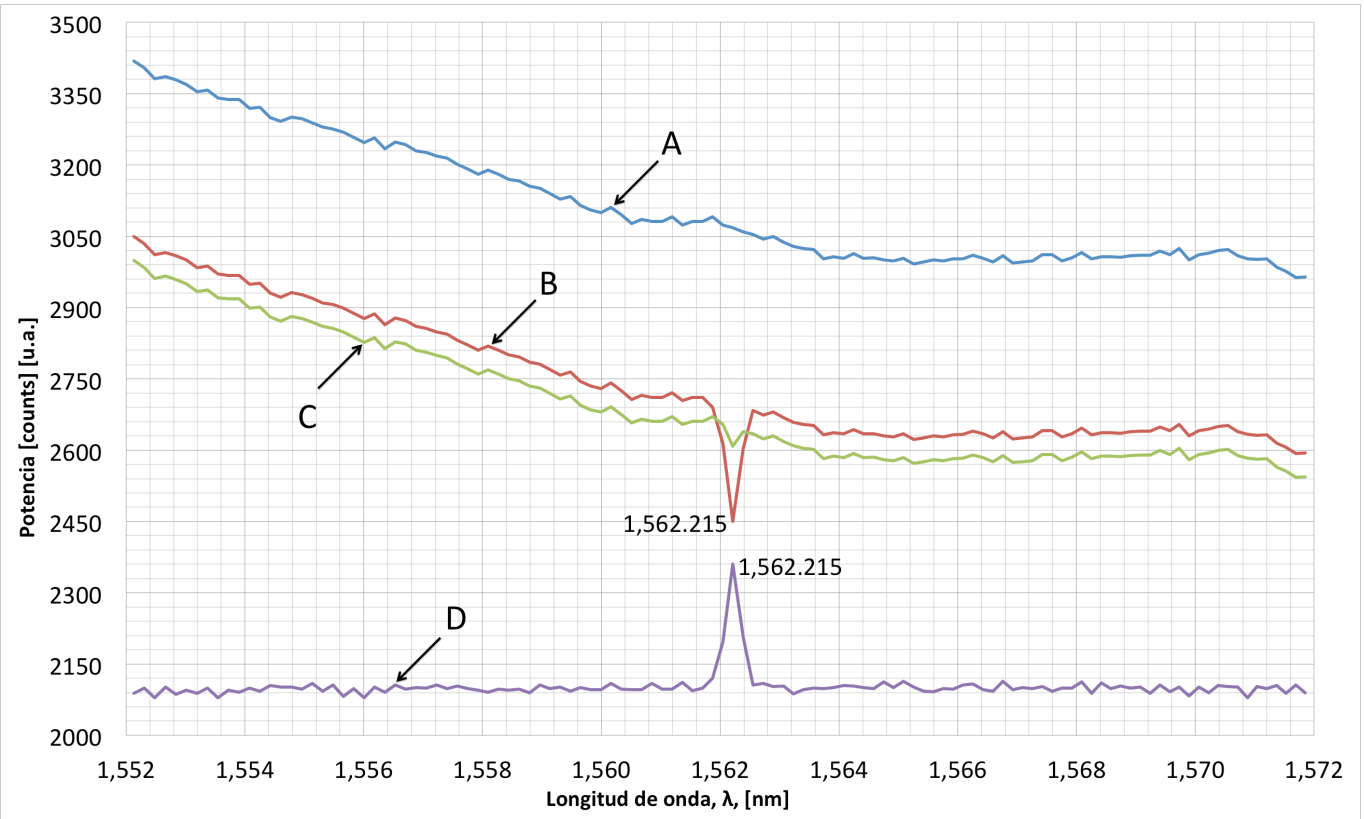


Figura 5.12. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros ópticos de los diferentes puertos del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, cuando se aplica un estiramiento a la rejilla de Bragg de $\Delta L_{ax} = 2.286\ [\mathrm{mm}]$. Los puertos A, B, C y D corresponden a los mostrados en la Figura 5.1.

En la Figura 5.12 se observa que la longitud de onda extraída (puerto B) e insertada (puerto D) por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, para un estiramiento de $\Delta L_{ax} = 2.286\ [\mathrm{mm}]$, fue $\lambda = 1562.215\ [\mathrm{nm}]$.

Por otro lado, en la Figura 5.13 se observan los espectros ópticos de los canales sintonizados en las longitudes de onda descritas en la Tabla 5.1.

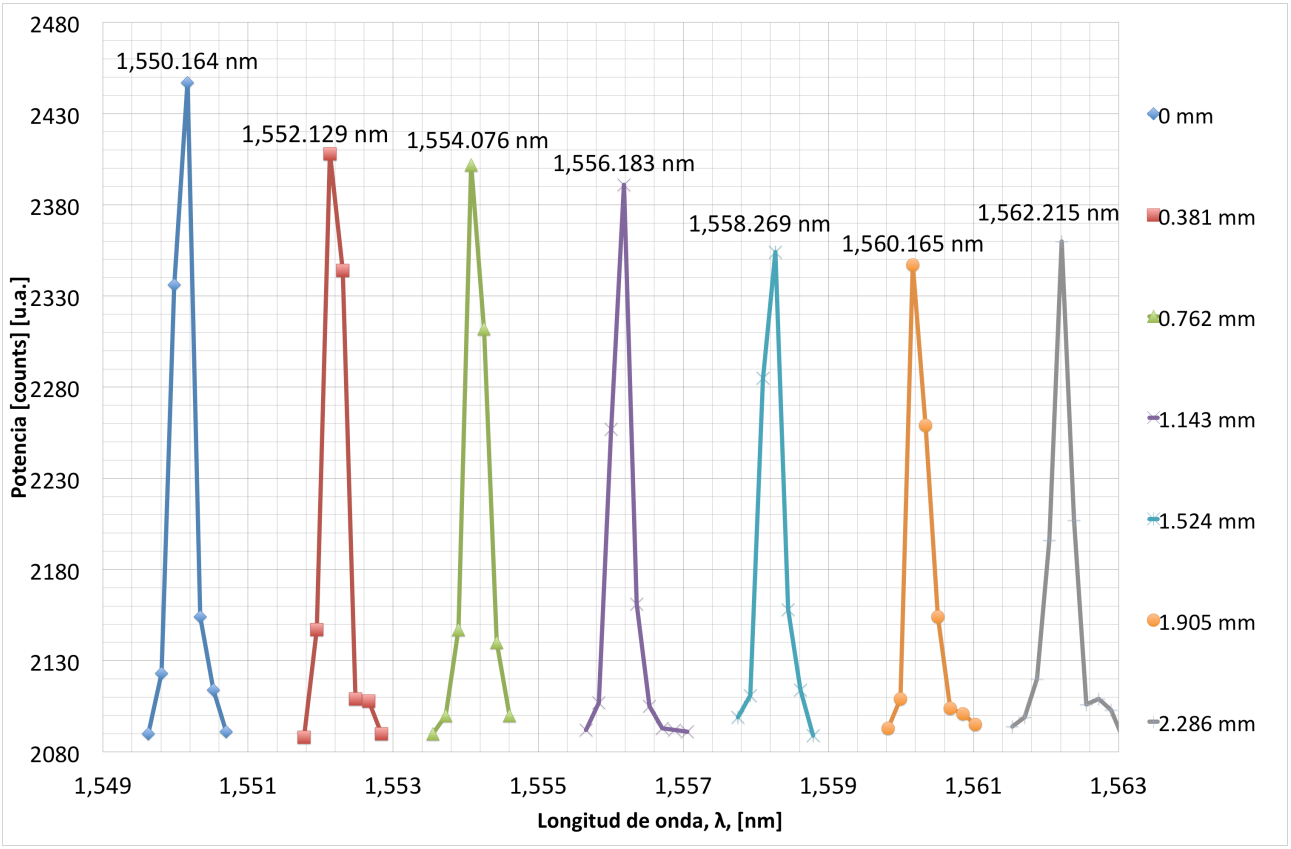


Figura 5.13. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros ópticos de los canales sintonizados por el OADM sintonizable mediante tensión.

En la Figura 5.13 se muestran los espectros de los canales ópticos sintonizados por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión. La longitud de onda de dichos canales con su respectivo estiramiento aplicado a la rejilla de Bragg se encuentran numerados en la Tabla 5.1 de este capítulo.

5.4. Efectos de la temperatura en el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión.

5.4.1. Equipo empleado.

El equipo empleado en este estudio experimental se enumera a continuación:

1. Fuente óptica de amplio espectro: Marca Agilent, Modelo 83437A.
2. Circulador óptico de 3 puertos: Marca Número de serie 4140003918.
3. Circulador óptico de 3 puertos: Marca Número de serie 906221.
4. Conectores FC/FC.
5. Rejilla de Bragg: Marca Smart Fibres Modelo 136807.
6. Cabezas Micrométricas: Marca Mitutoyo, Modelo 148-811
7. Unidades de Desplazamiento: Marca Thorlabs, Modelo MT1-Z7.

8. Ranuras en V de 250 μm para sujetar la fibra óptica.
9. Placas de Acrílico para colocar y sujetar las ranuras en V a las unidades de desplazamiento.
10. Termómetro: Marca, Resolución .
11. Placa de aluminio de 5 [mm] de grosor.
12. Parrilla eléctrica Marca.
13. Interrogador de Rejillas de Bragg: Marca Ibsen Photonics, Modelo I-MON 512 E-USB 2.0.
14. Software del interrogador de rejillas v. 2.0.
15. Computadora.

5.4.2. Metodología.

El estudio experimental de los efectos de la temperatura sobre el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión se llevó a cabo realizando variaciones conjuntas en la temperatura de la rejilla de Bragg, T_{FBG}, y en el estiramiento aplicado a la fibra óptica, ΔL_{ax}. Se registró el cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, debido al cambio en la temperatura de la fibra óptica con la rejilla de Bragg, ΔT, cuando ésta se encontraba sometida a diferentes valores de estiramiento, ΔL_{ax}, y tensión axial, ε_{ax}. También, se realizaron diferentes gráficas que muestran el comportamiento y la respuesta espectral del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión cuando éste se encuentra en diversos escenarios de temperatura y tensión axial.

5.4.3. Descripción de la instalación.

El diagrama de la instalación montada en la realización del estudio experimental de los efectos de la temperatura en el OADM sintonizable mediante tensión se observa en la Figura 5.14.

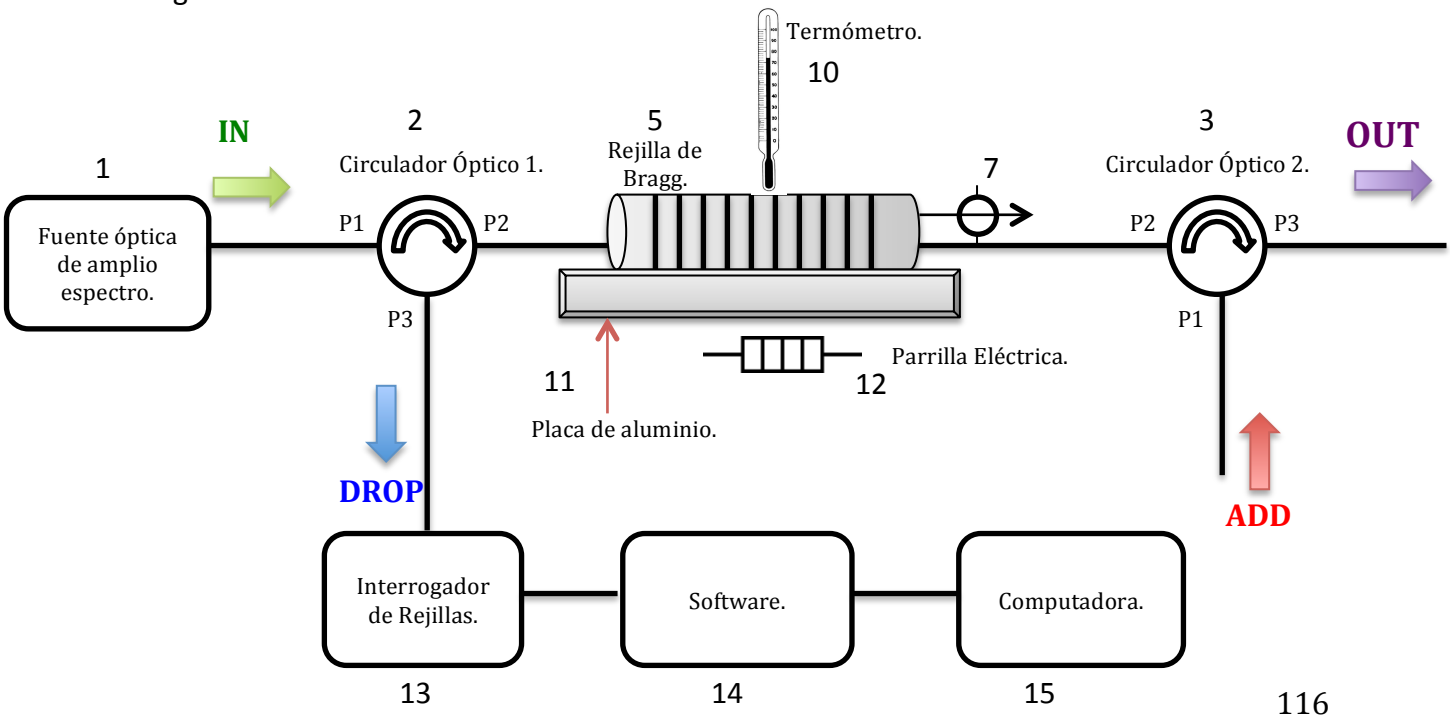


Figura 5.14. Diagrama de la instalación empleada en el estudio experimental de los efectos de la temperatura en el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión (Los números corresponden a la lista del equipo usado en la sección 5.4.1).

En la Figura 5.15 se observa la instalación física montada para llevar a cabo la realización de este experimento, mientras que en la Figura 5.16 se muestra el arreglo de conexiones del mismo.

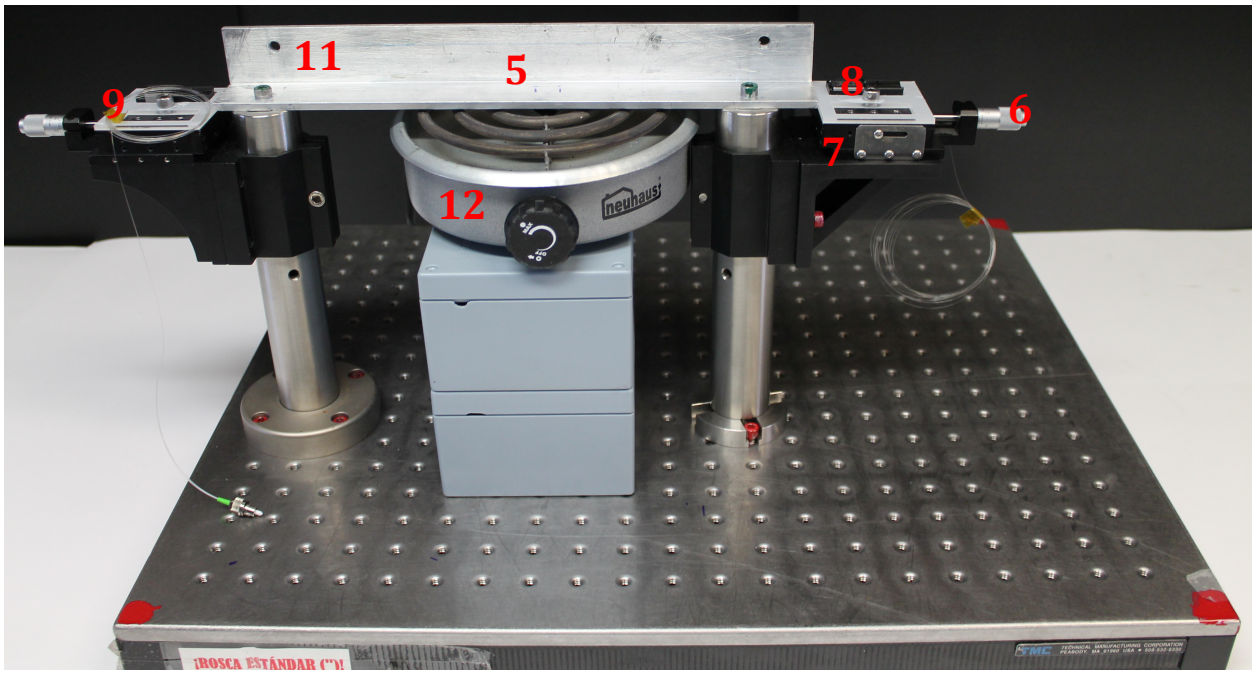


Figura 5.15. Instalación física empleada en el estudio experimental de los efectos de la temperatura en el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión (Los números corresponden a la lista del equipo usado en la sección 5.4.1).

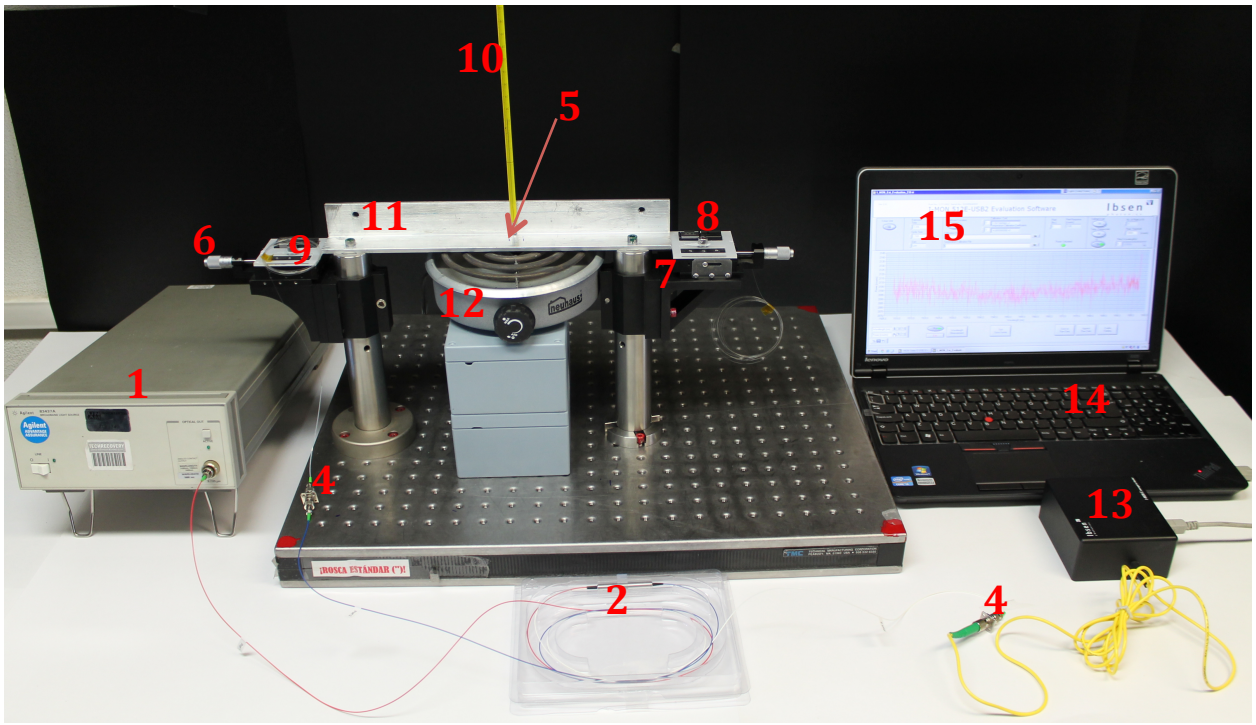


Figura 5.16. Arreglo de conexiones utilizado en el estudio experimental de los efectos de la temperatura en un OADM sintonizable mediante tensión (Los números corresponden a la lista del equipo usado en la sección 5.4.1).

5.4.4. Resultados.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de temperatura realizadas al prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión para diferentes valores de estiramiento de la fibra óptica con la rejilla de Bragg, ΔL_{ax}.

Resulta importante mencionar que la longitud inicial de la fibra, L_0, fue de 360.0 [mm], mientras que la temperatura ambiente, T_0, fue de 25 [°C].

- $\Delta L_{ax} = 0\ [\mathrm{mm}]$, $\varepsilon_{ax} = 0\ [\mathrm{m}\varepsilon]$, es decir, con la fibra óptica estirada pero sin tensión axial.

La longitud de onda sintonizada por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión para un valor de estiramiento, $\Delta L_{ax} = 0\ [\mathrm{mm}]$, $\varepsilon_{ax} = 0\ [\mathrm{m}\varepsilon]$ y a temperatura ambiente, T_0, fue de 1550.164 [nm].

En la Tabla 5.2 se encuentran registrados los resultados obtenidos para diferentes valores de temperatura y tensión axial constante.

Tabla 5.2. Cambio de la longitud de onda sintonizada por el OADM sintonizable mediante tensión debido a variaciones en su temperatura, para un estiramiento constante aplicado a la fibra óptica de 0 [mm].

Temperatura de la rejilla de Bragg que conforma al OADM sintonizable, T_{FBG}, [°C]	Diferencia de temperatura, $\Delta T = T_{FBG} - T_0$, [°C]	Longitud de onda de Bragg (longitud de onda sintonizada por el OADM sintonizable), λ_B, [nm]	Cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, [nm]
25	0	1550.164	0.000
30	5	1550.344	0.180
40	15	1550.523	0.359
50	25	1550.881	0.717
60	35	1551.238	1.074
70	45	1551.595	1.431

Al analizar los datos obtenidos, se observa que el cambio en la longitud de onda sintonizada por el OADM, provocado por la variación de temperatura de la rejilla de Bragg, es decir, elevar su temperatura de 25 [°C] a 70 [°C], es de 1.431 [nm], lo cual podría afectar al menos 3 canales DWDM de 50 [GHz].

Por otro lado, en la Figura 5.17 es posible observar el espectro óptico de las longitudes de onda correspondientes a cada valor de temperatura registrado en la Tabla 5.2.

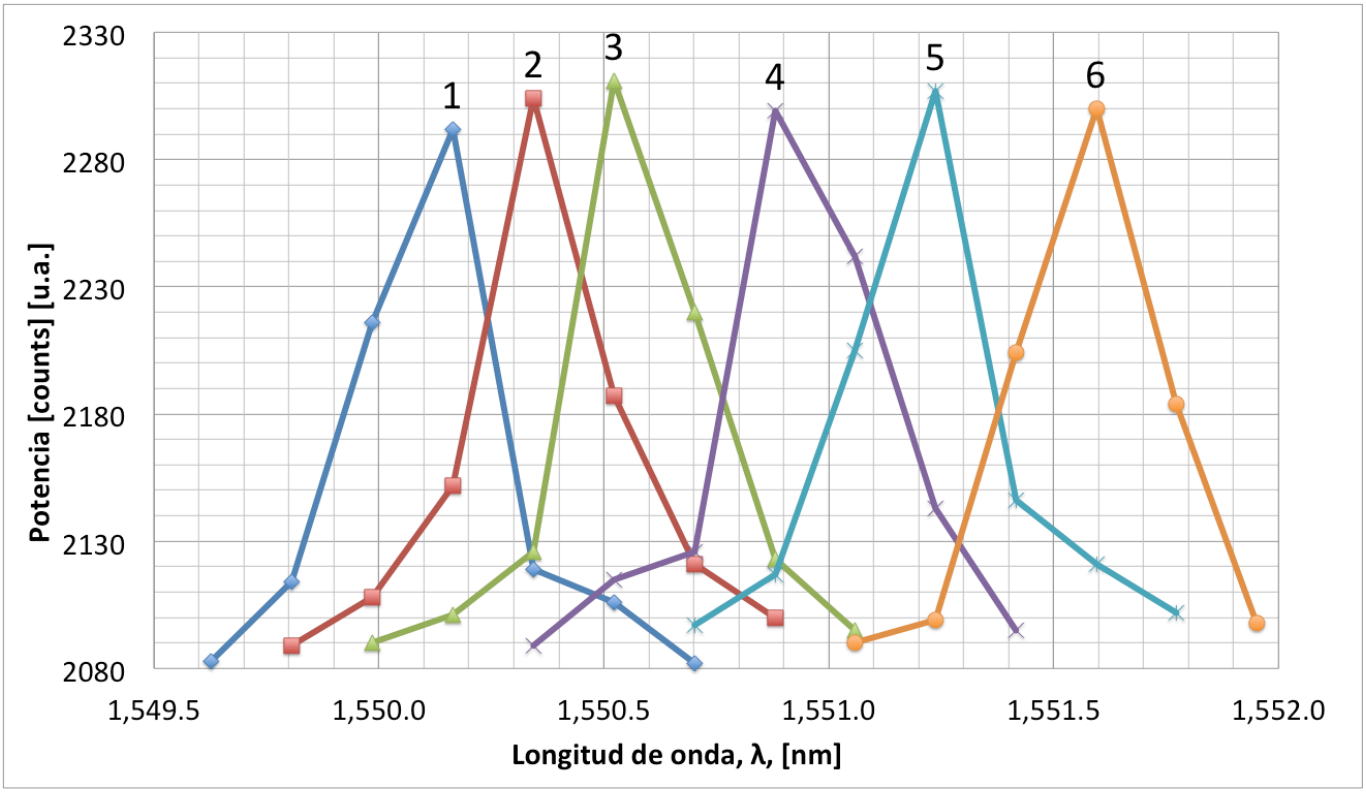


Figura 5.17. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros ópticos de las longitudes de onda resultantes de la variación de temperatura en el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, para un estiramiento de $\Delta L_{ax} = 0\ [\mathrm{mm}]$. Temperatura de la rejilla de Bragg, T_{FBG}, correspondiente a cada número en la gráfica: 1.- 25 [℃], 2.- 30 [℃], 3.- 40 [℃], 4.- 50 [℃], 5.- 60 [℃] y 6.- 70 [℃].

- $\Delta L_{ax} = 0.762\ [\mathrm{mm}]$, $\varepsilon_{ax} = 2.117\ [\mathrm{m}\varepsilon]$, es decir, con la fibra óptica estirada pero sin tensión axial.

La longitud de onda sintonizada por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión para un valor de estiramiento, $\Delta L_{ax} = 0.762\ [\mathrm{mm}]$, $\varepsilon_{ax} = 2.117\ [\mathrm{m}\varepsilon]$ y a temperatura ambiente, T_0, fue de 1551.951 [nm].

En la Tabla 5.3 se encuentran registrados los resultados obtenidos para diferentes valores de temperatura y tensión axial constante.

Tabla 5.3. Cambio de la longitud de onda sintonizada por el OADM sintonizable mediante tensión debido a variaciones en su temperatura, para un estiramiento constante aplicado a la fibra óptica de 0.762 [mm].

Temperatura de la rejilla de Bragg que conforma al OADM sintonizable, T_{FBG}, [°C]	Diferencia de temperatura, $\Delta T = T_{FBG} - T_0$, [°C]	Longitud de onda de Bragg (longitud de onda sintonizada por el OADM sintonizable), λ_B, [nm]	Cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, [nm]
25	0	1551.951	0.000
30	5	1552.306	0.355
40	15	1552.661	0.710
50	25	1552.839	0.888
60	35	1553.016	1.065
70	45	1553.370	1.419

Al analizar los datos obtenidos, se observa que el cambio en la longitud de onda sintonizada por el OADM, provocado por la variación de temperatura de la rejilla de Bragg, es decir, elevar su temperatura de 25 [°C] a 70 [°C], es de 1.419 [nm], lo cual podría afectar al menos 3 canales DWDM de 50 [GHz]. Por otro lado, en la Figura 5.18 es posible observar el espectro óptico de las longitudes de onda correspondientes a cada valor de temperatura registrado en la Tabla 5.3.

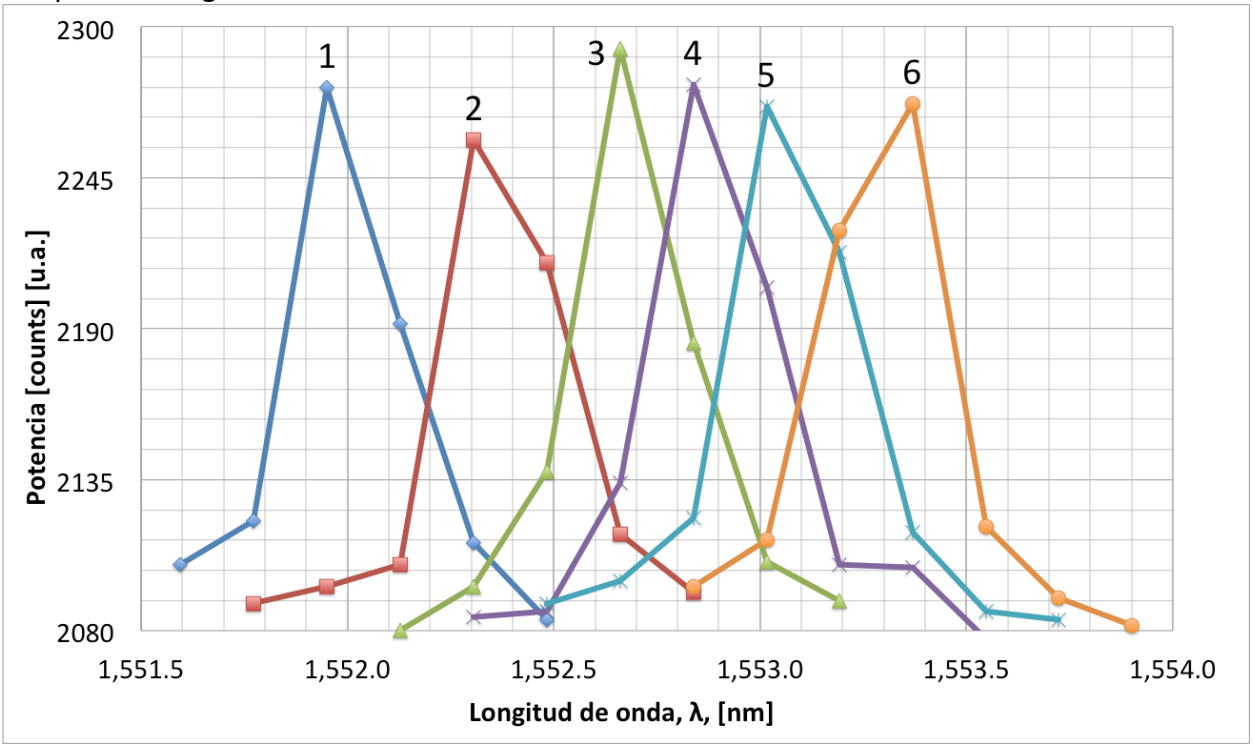


Figura 5.18. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros ópticos de las longitudes de onda resultantes de la variación de temperatura en el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, para un estiramiento de $\Delta L_{ax} = 0.762$ [mm]. Temperatura de la rejilla de Bragg, T_{FBG}, correspondiente a cada número en la gráfica: 1.- 25 [°C], 2.- 30 [°C], 3.- 40 [°C], 4.- 50 [°C], 5.- 60 [°C] y 6.- 70 [°C].

- $\Delta L_{ax} = 1.524\,[\mathrm{mm}]$, $\varepsilon_{ax} = 4.233\,[\mathrm{m}\varepsilon]$, es decir, con la fibra óptica estirada pero sin tensión axial.

La longitud de onda sintonizada por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión para un valor de estiramiento, $\Delta L_{ax} = 1.524\,[\mathrm{mm}]$, $\varepsilon_{ax} = 4.233\,[\mathrm{m}\varepsilon]$ y a temperatura ambiente, T_0, fue de 1553.723 [nm].

En la Tabla 5.4 se encuentran registrados los resultados obtenidos para diferentes valores de temperatura y tensión axial constante.

Tabla 5.4. Cambio de la longitud de onda sintonizada por el OADM sintonizable mediante tensión debido a variaciones en su temperatura, para un estiramiento constante aplicado a la fibra óptica de 1.524 [mm].

Temperatura de la rejilla de Bragg que conforma al OADM sintonizable, T_{FBG}, [℃]	Diferencia de temperatura, $\Delta T = T_{FBG} - T_0$, [℃]	Longitud de onda de Bragg (longitud de onda sintonizada por el OADM sintonizable), λ_B, [nm]	Cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, [nm]
25	0	1553.723	0.000
30	5	1553.900	0.177
40	15	1554.076	0.353
50	25	1554.429	0.706
60	35	1554.605	0.882
70	45	1554.781	1.058

Al analizar los datos obtenidos, se observa que el cambio en la longitud de onda sintonizada por el OADM, provocado por la variación de temperatura de la rejilla de Bragg, es decir, elevar su temperatura de 25 [℃] a 70 [℃], es de 1.058 [nm], lo cual podría afectar al menos 2 canales DWDM de 50 [GHz].

Por otro lado, en la Figura 5.19 es posible observar el espectro óptico de las longitudes de onda correspondientes a cada valor de temperatura registrado en la Tabla 5.4.

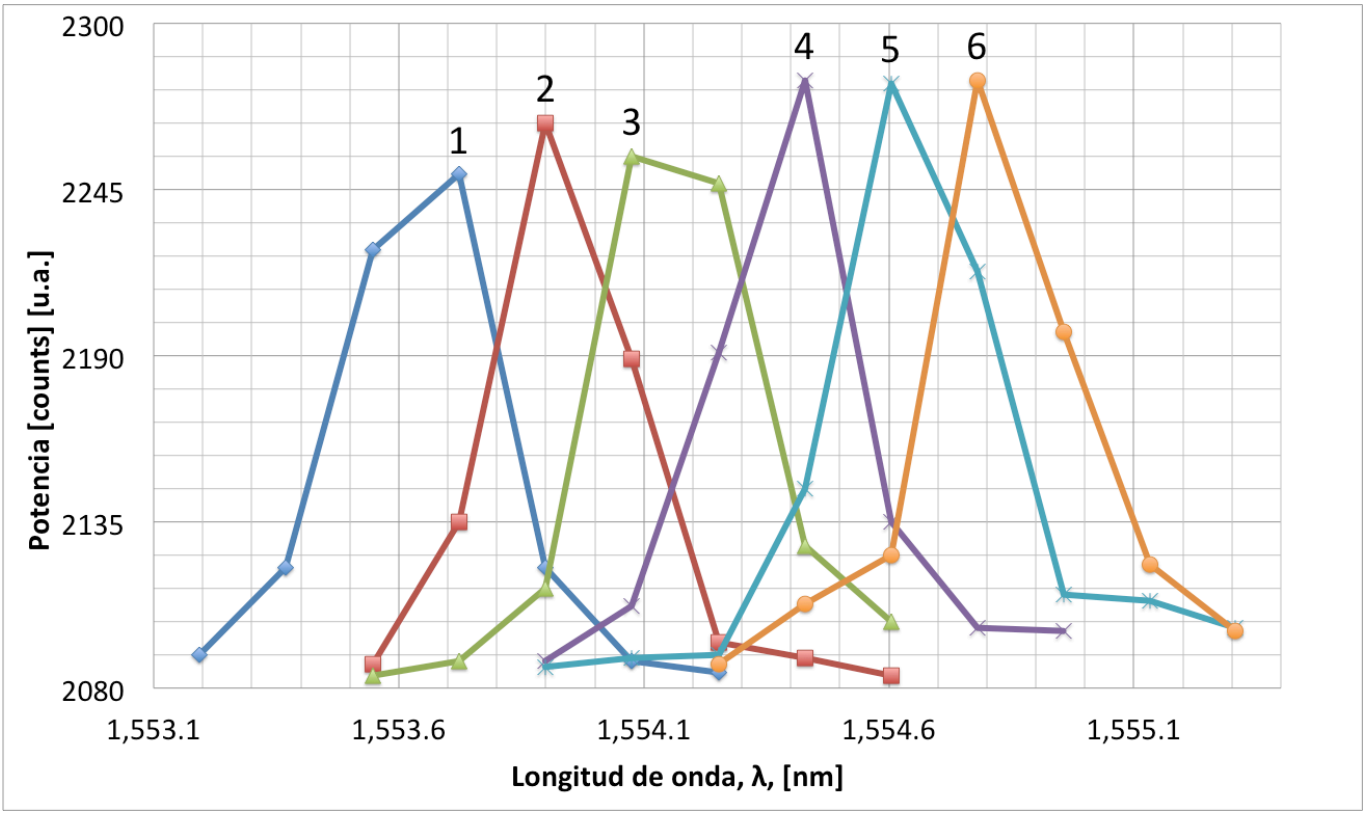


Figura 5.19. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros ópticos de las longitudes de onda resultantes de la variación de temperatura en el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, para un estiramiento de $\Delta L_{ax} = 1.524\ [\mathrm{mm}]$. Temperatura de la rejilla de Bragg, T_{FBG}, correspondiente a cada número en la gráfica: 1.- 25 [℃], 2.- 30 [℃], 3.- 40 [℃], 4.- 50 [℃], 5.- 60 [℃] y 6.- 70 [℃].

- $\Delta L_{ax} = 2.286\ [\mathrm{mm}]$, $\varepsilon_{ax} = 6.350\ [\mathrm{m}\varepsilon]$, es decir, con la fibra óptica estirada pero sin tensión axial.

La longitud de onda sintonizada por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión para un valor de estiramiento, $\Delta L_{ax} = 2.286\ [\mathrm{mm}]$, $\varepsilon_{ax} = 6.350\ [\mathrm{m}\varepsilon]$ y a temperatura ambiente, T_0, fue de 1556.008 [nm].

En la Tabla 5.5 se encuentran registrados los resultados obtenidos para diferentes valores de temperatura y tensión axial constante.

Tabla 5.5. Cambio de la longitud de onda sintonizada por el OADM sintonizable mediante tensión debido a variaciones en su temperatura, para un estiramiento constante aplicado a la fibra óptica de 2.286 [mm].

Temperatura de la rejilla de Bragg que conforma al OADM sintonizable, T_{FBG}, [°C]	Diferencia de temperatura, $\Delta T = T_{FBG} - T_0$, [°C]	Longitud de onda de Bragg (longitud de onda sintonizada por el OADM sintonizable), λ_B, [nm]	Cambio en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, [nm]
25	0	1556.008	0.000
30	5	1556.183	0.175
40	15	1556.532	0.524
50	25	1556.880	0.872
60	35	1557.228	1.220
70	45	1557.576	1.568

Al analizar los datos obtenidos, se observa que el cambio en la longitud de onda sintonizada por el OADM, provocado por la variación de temperatura de la rejilla de Bragg, es decir, elevar su temperatura de 25 [°C] a 70 [°C], es de 1.568 [nm], lo cual podría afectar hasta 4 canales DWDM de 50 [GHz]. En la Figura 5.20 es posible observar el espectro óptico de las longitudes de onda correspondientes a cada valor de temperatura registrado en la Tabla 5.5

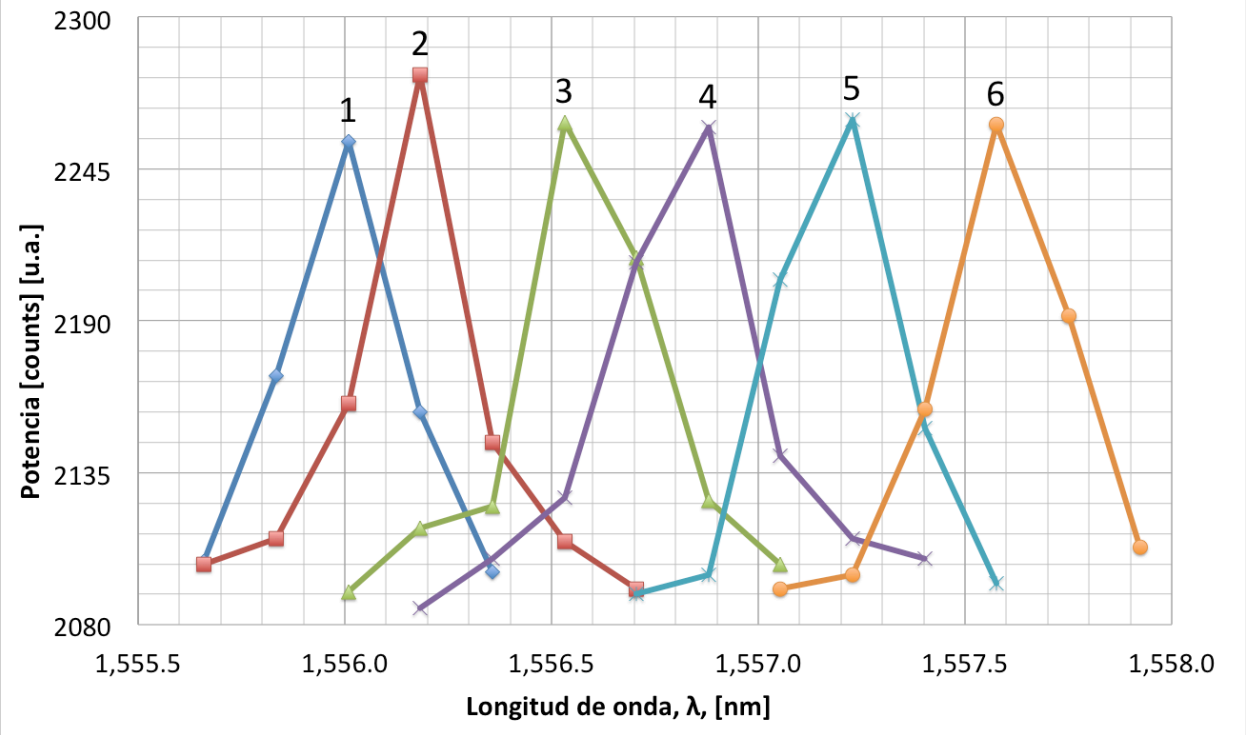


Figura 5.20. Potencia en [counts][u.a.] vs. Longitud de onda, λ en [nm]. Espectros ópticos de las longitudes de onda resultantes de la variación de temperatura en el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, para un estiramiento de $\Delta L_{ax} = 2.286$ [mm]. Temperatura de la rejilla de Bragg, T_{FBG}, correspondiente a cada número en la gráfica: 1.- 25 [°C], 2.- 30 [°C], 3.- 40 [°C], 4.- 50 [°C], 5.- 60 [°C] y 6.- 70 [°C].

Por otro lado, en la Tabla 5.6 se encuentran registrados todos los datos experimentales obtenidos durante el estudio experimental de los efectos de la temperatura en el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión.

Tabla 5.6. Cambio en la longitud de onda de sintonización del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión debido a cambios en la temperatura.

		Temperatura, T_{FBG}, [°C]					
Estiramiento, ΔL_{ax}, [mm]	Tensión axial, ε_{ax}, [mε]	25	30	40	50	60	70
0.000	0.000	1550.164	1550.344	1550.523	1550.881	1551.238	1551.595
0.762	2.117	1551.951	1552.306	1552.661	1552.839	1553.016	1553.370
1.524	4.233	1553.723	1553.900	1554.076	1554.429	1554.605	1554.781
2.286	6.350	1556.008	1556.183	1556.532	1556.880	1557.228	1557.576

En la Figura 5.21 se observa la respuesta experimental del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión ante cambios en la temperatura de la rejilla de Bragg y para diferentes valores de tensión.

En dicha figura se observa cómo cambia la longitud de onda de Bragg de la rejilla, λ_B, según el estiramiento aplicado a la fibra, ΔL_{ax}, y el valor de la temperatura que posee la rejilla, T_{FBG}; ya que conforme aumenta la magnitud de estos efectos externos también lo hace la longitud de onda de Bragg, la cual corresponde a la longitud de onda sintonizada por el OADM.

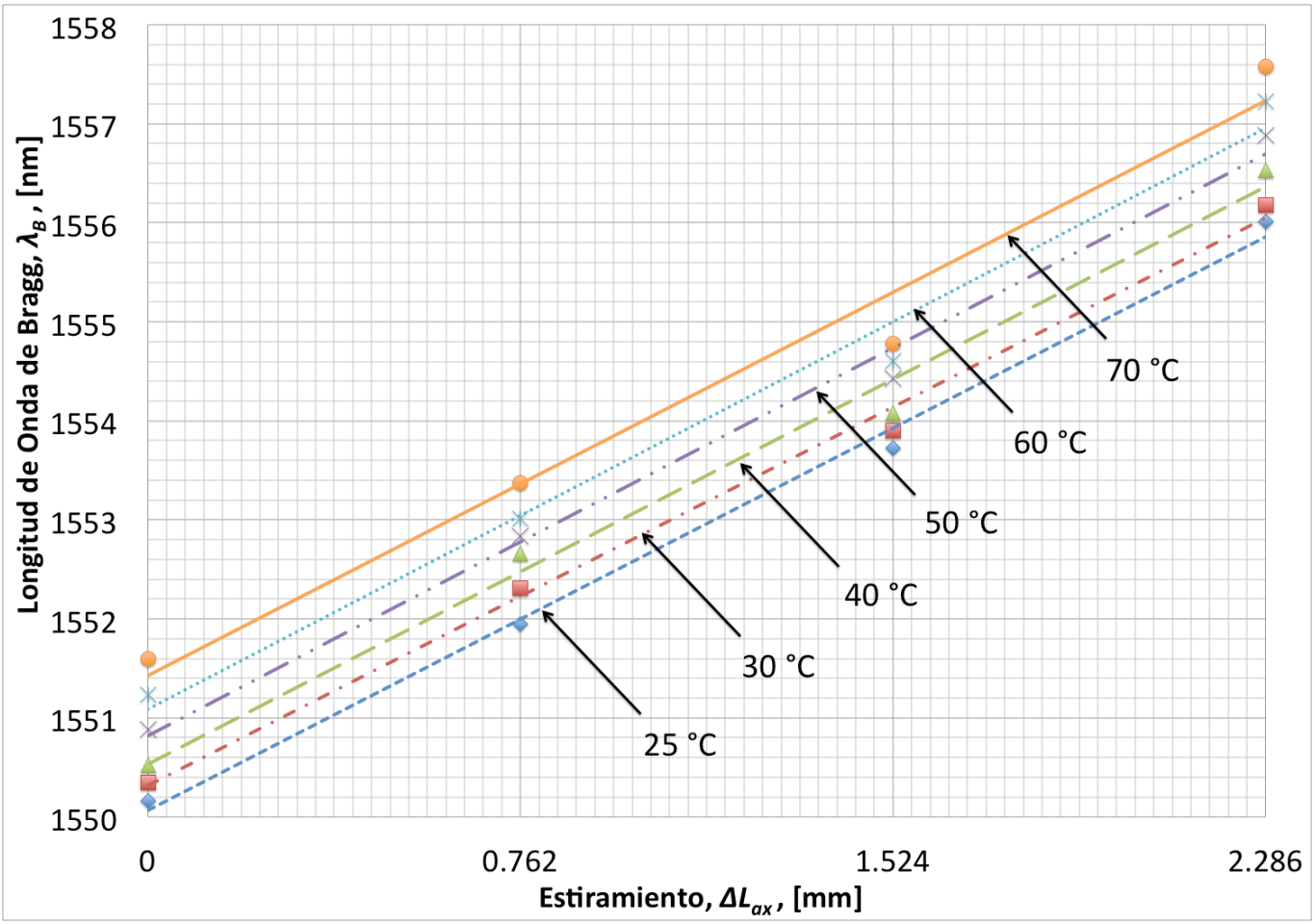


Figura 5.21. Longitud de onda de Bragg, λ_B en [nm] vs. Estiramiento, ΔL_{ax} en [mm]. Datos experimentales con su respectiva línea de aproximación. La longitud de onda sintonizada por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión presenta variaciones debido al estiramiento aplicado a la fibra y a la temperatura que presenta la rejilla de Bragg.

5.5. Conclusiones.

La construcción y caracterización del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión permitió obtener el valor del rango de sintonización máximo de este dispositivo, el cual tiene un valor de 12.050 [nm], pudiendo sintonizar hasta 30 canales DWDM con espaciamiento de 50 [GHz]. Dicho rango de sintonización se consiguió con un estiramiento de 2.286 [mm] a la fibra óptica con la rejilla de Bragg Modelo 136807, logrando así una tensión axial de $12.857\ [m\varepsilon]$. Cabe mencionar que dicho valor corresponde a la máxima tensión que se le puede aplicar a la rejilla de Bragg antes de que ésta se dañe, lo cual impediría el correcto funcionamiento del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión. Es por esto que los 12.050 [nm] son el rango máximo de sintonización que puede alcanzar este dispositivo.

Capítulo 5. Construcción y caracterización del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión basado en una rejilla de Bragg y dos circuladores ópticos.

En lo que respecta a las características físicas del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, este dispositivo no consume energía eléctrica alguna, ya que todos sus elementos son pasivos. El mecanismo de sintonización resulta sumamente sencillo ya que sólo se debe asegurar y fijar la rejilla de Bragg mediante las uniones en V para fibra óptica y aplicar tensión a través de las cabezas micrométricas y unidades de desplazamiento.

Si se desea modificar el método de estiramiento, con la finalidad de automatizar y aumentar la velocidad de sintonización de este dispositivo se podrían utilizar materiales piezoeléctricos[6], como el cuarzo, con la finalidad de aplicar tensión axial sobre la rejilla de Bragg. Esto a partir de la suposición de que si se adhiere la rejilla de Bragg a dicho material y después se aplica un campo eléctrico sobre éste, las deformaciones mecánicas que presentará dicho material permitirán que la rejilla de Bragg se estire y por lo tanto cambie su longitud de onda.

O bien, se podrían utilizar imanes programables en los extremos de la fibra óptica, los cuales se magnetizarían de manera controlable utilizando diferentes corrientes de entrada en cada uno de ellos, de tal manera que los dos imanes ejerzan fuerza de repulsión o atracción y se mueven más cerca o lejos el uno del otro. Esto a su vez generará una fuerza mecánica sobre la rejilla de Bragg, ya sea en forma de estiramiento o compresión según sea el caso, modificando así la longitud de onda de Bragg [3], [4].

Durante el desarrollo experimental se observó que el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión posee pérdidas de inserción en sus diferentes puntos (ver Figura 5.1), ya que la potencia de la señal de salida del dispositivo bajo estudio es menor a la potencia proporcionada por la fuente óptica de amplio espectro. Este efecto también está presente en el proceso de adición de nueva información a la longitud de onda del canal óptico que previamente se extrajo (proceso ADD), ya que se observa la presencia de un ligero valle a la longitud de onda sintonizada por el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión en la señal de salida del mismo. Dichas pérdidas de insercicón son introducidas por los diferentes dispositivos ópticos que conforman al OADM sintonizable, tales como, circuladores ópticos, rejilla de Bragg, conectores, acopladores, y tramos de fibra óptica, sin olvidar las pérdidas introducidas por el interrogador de rejillas.

Finalmente, se lograron estudiar los efectos que provocan las variaciones de temperatura en el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión.

[6] Los materiales piezoeléctricos son aquellos capaces de adquirir una carga eléctrica y por lo tanto presentar una diferencia de potencial al ser sometidos a deformaciones mecánicas, por ejemplo, estiramiento, tensión, compresión, entre otras. Este fenómeno también es inverso, es decir, al aplicar un campo eléctrico sobre el material, éste experimentará cambios en su forma y tamaño. Dada su capacidad de convertir la deformación mecánica en un voltaje, y un voltaje en movimiento mecánico, los materiales piezoeléctricos son usados como transductores [1], [2].

Si se modifica la temperatura de dicho dispositivo, su respuestra espectral cambiará lo cual repercute directamente en sus características y funcionalidad. Por ejemplo, si su temperatura cambia de 25 [℃] a 40 [℃] cuando se tiene la fibra óptica estirada pero sin aplicar tensión ($\Delta L_{ax} = 0\ [\mathrm{mm}]$, $\varepsilon_{ax} = 0\ [\mathrm{m}\varepsilon]$) en vez de sintonizar el canal situado a 1550.164 [nm] se estará sintonizando el canal correspondiente a 1550.523 [nm] provocando un error en la red óptica, ya que se estará manipulando la información de un canal distinto respecto en el que se desea trabajar. Esta situación empeora conforme aumenta la temperatura del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión, ya que cuando éste pasa de los 25 [℃] a los 70 [℃] la ventana de posibles longitudes de onda erróneas es de 1.431 [nm], lo cual afectaría al menos a 3 canales DWDM de 50 [GHz].

5.6. Referencias.

[1] W. Mason, “Piezoelectricity, its history and applications,” Journal of the Acoustical Society of America, vol. 70, pp. 1561–1566, 1981.

[2] Miguel Cúpich Rodríguez, y Fernando J. Elizondo Garza, “Actuadores piezoeléctricos,” *Revista Ingenierías de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León,* vol. 3, no. 6, pp. 22-28, Enero-Marzo 2000.

[3] Heba A. Fayed, Mohamed Mahmoud, A. K. AboulSeoud, and Moustafa H. Aly, “A Wide Range Tunable Fiber Bragg Grating Using Fast Changeable Electromagnetic Force,” *Proc. of SPIE, Photonics North 2010*, Vol. 7750, pp. 77501R-1 to 77501R-10, 2010.

[4] Heba A. Fayed, Mohamed Mahmoud, A. K. AboulSeoud, and Moustafa H. Aly, “Magnetically Tunable Fiber Bragg Grating Supported by Guiding Mechanism System,” *Proc. of SPIE, Photonics North 2010*, Vol. 7750, pp. 77501Z-1 to 77501Z-11, 2010.

Capítulo 6.

Conclusiones Generales.

En el desarrollo de esta tesis se realizó un análisis teórico y experimental de los efectos que provocan las variaciones de temperatura en un OADM sintonizable mediante tensión el cual se construyó utilizando una rejilla de Bragg.

El rango de sintonización teórico del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión fue de 13.766 [nm] cuando se utiliza la rejilla de Bragg Modelo 136807 como elemento principal de este dispositivo. Con este rango de sintonización teórico se podrían sintonizar hasta 34 canales DWDM con un espaciamiento entre canales de 50 [GHz]. Por otro lado, se observó que la longitud de onda de Bragg es directamente proporcional a la temperatura y tensión axial que posee la rejilla, mostrando una dependencia lineal en ambos casos.

Experimentalmente la respuesta de la rejilla de Bragg presento un rango de sintonización de 10.516 [nm] con un estiramiento máximo alcanzado de 2.032 [mm] en los experimentos de tensión, mientras que en los experimentos de temperatura presento un rango de sintonización de 1.787 [nm] con una variación de temperatura de 25 [℃] a 130 [℃]. Durante el desarrollo experimental se observó que la variación de la longitud de onda de Bragg de una rejilla es mayor cuando se tienen rejillas de Bragg en fibra óptica de menor longitud.

El rango de sintonización experimental obtenido a través de la caracterización del prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión fue de 12.050 [nm] a una temperatura ambiente constante de 25 [℃]. La rejilla de Bragg empleada fue la modelo 136807 con una longitud inicial de fibra óptica de 177.8 [mm], lo cual provocó que necesitáramos valores mayores de estiramiento comparados con los utilizados en la caracterización de la rejilla para obtener un cambio considerable en la longitud de onda de Bragg. Por otro lado el coeficiente de sintonización de este dispositivo será igual a la sensibilidad experimental al estiramiento de la rejilla de Bragg, la cual posee un valor de 5.271 [nm/mm], es decir, por cada milímetro que se estire la fibra óptica con la rejilla obtendremos un cambio de 5.271 [nm] en la longitud de onda de Bragg., mientras que el cambio promedio en la longitud de onda de Bragg es de 0.7 [nm] por cada estiramiento aplicado de 0.127 [mm].

El error relativo obtenido para los experimentos de tensión para la rejilla de Bragg Modelo 136807 fue 17.33 %, lo cual implicaría un error en el cambio de la longitud de onda de Bragg de 0.116 [nm] cuando la fibra se estira 0.127 [mm] y de 1.972 [nm] cuando la fibra se estira 2.159 [mm].

Capítulo 6. Conclusiones Generales.

En redes DWDM, es posible trabajar con diferentes espaciamientos entre canales, ya sean de 50 [GHz] (0.4 [nm]), 100 [GHz] (0.8 [nm]) o 200 [GHz] (1.6 [nm]), dentro de las bandas C (1525 – 1565 [nm]) y L (1565 - 1620 [nm]) según la recomendación ITU-T G.694.1. Comúnmente se utilizan hasta 40 canales de 100 [GHz] u 80 canales de 50 [GHz], sin embargo es posible alcanzar 160 canales si se utiliza un espaciamiento de 25 [GHz].
En relación a lo anterior, con el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión presentado en esta tesis se podrían sintonizar teóricamente hasta 30 canales DWDM con espaciamiento de 50 [GHz], lo cual permitiría tener una red óptica práctica y reconfigurable. Si se desean cubrir los poco más de 80 canales ópticos con espaciamiento de 0.4 [nm] que caben en banda la C, se podrían utilizar tres dispositivos sintonizables, asegurando así la cobertura total de dicha banda.

Finalmente, se estudiaron los efectos de la temperatura en el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión.

De acuerdo con la evolución de las recomendaciones térmicas de los centros de datos y cuartos de telecomunicaciones de la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés “The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers”) publicadas en Diciembre de 2011 por Robin A. Steinbrecher y Roger Schmidt, y considerando un centro de datos clase A4, el rango de temperatura permitido oscila entre los 5 y 45 $[°C]$ (41 – 113 $[°F]$). En relación a este rango de temperatura, dentro del desarrollo experimental de esta tesis, el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión presentó una variación promedio en la longitud de onda sintonizada real respecto a la longitud de onda sintonizada esperada de aproximadamente 0.8 [nm], esto cuando su temperatura cambio de 25 a 50 $[°C]$. Esto afectó completamente el funcionamiento del dispositivo, generando problemas hasta en 2 canales DWDM de 50 [GHz]. Por lo tanto, si la temperatura de este prototipo oscilara entre los 5 y 45 $[°C]$ el cambio en la longitud de onda de operación sería mucho mayor. Sin embargo es posible compensar los efectos de la temperatura sobre este dispositivo monitoreando la temperatura del mismo. Por ejemplo, es posible utilizar un sensor de temperatura para registrar el valor de la temperatura del OADM sintonizable mediante tensión justo antes del momento en que se requiera cambiar (sintonizar) la longitud de onda de trabajo de este dispositivo, con esto es posible conocer la longitud de onda actual en la cual esta sintonizado y apartir de ahí aplicar la tensión necesaria para generar el estiramiento sobre la fibra óptica con la rejilla de Bragg que asegure el cambio necesario en la longitud de onda de Bragg de la rejilla para llegar a la longitud de onda deseada, compensando y utilizando así los efectos de la temperatura en dicho dispositivo.

Concluyendo, las variaciones de temperatura en el prototipo funcional del OADM sintonizable mediante tensión de esta tesis provocan efectos indeseados en el correcto funcionamiento, estabilidad, características y desempeño en dicho dispositivo, lo cual repercute directamente en la red óptica sobre la cual se esté trabajando, ya que se podría modificar y/o alterar involuntariamente información valiosa que se transmite dentro de la red óptica, sin embargo es un efecto que se puede compensar.

Anexo A.

Programas de MATLAB

Programa “Simulación_Tensión_FBG”.

```
% Programa en MATLAB que permite obtener la respuesta de una rejilla de
% Bragg al aplicarle tensión mediante la expresión:
% delta_lambda = (coeficiente_tensión.*strain.*lambda_Bragg)+lambda_Bragg
clc
clear all
close all

% Ke es el coeficiente de tensión para la fibra SMF-28e
Ke = 0.7314;

lambda_inicial = 1550.048e-09;      % Longitud de onda de Bragg inicial.
longitud = 177.8;                   % Longitud inicial de la fibra [mm].
estiramiento = 0:0.127:2.159;       % Estiramiento de la fibra [mm].
tension = estiramiento./longitud;   % Tensión axial.

% La siguiente expresión permite obtener la longitud de onda sintonizada
% según el valor de tensión axial aplicado.
lambda_Bragg = (Ke.*tension.*lambda_inicial)+lambda_inicial;

% Para facilidad en el manejo de la información, los datos obtenidos a
% través de la simulación se migran a Excel.
xlswrite('Tension', estiramiento', 'b2:b19');
xlswrite('Tension', tension', 'c2:c19');
xlswrite('Tension', lambda_Bragg', 'd2:d19');

% Se grafica la respuesta de la rejilla.
% figure (1) corresponde a la “Figure 1” mencionada en la sección 2.3.1
% de esta tesis.
figure (1)
plot (tension, lambda_Bragg);
title('Longitud de Onda de Bragg vs. Tensión axial.');
ylabel('Longitud de Onda de Bragg[m]');
xlabel('Tensión axial [strain]');
grid

% figure (2) corresponde a la “Figure 2” mencionada en la sección 2.3.1
% de esta tesis.
figure (2)
plot (estiramiento, lambda_Bragg, 'r');
title('Longitud de Onda de Bragg vs. Estiramiento.');
ylabel('Longitud de Onda de Bragg[m]');
xlabel('Estiramiento [mm]');
grid
```

Anexo A. Programas de MATLAB.

Programa "Simulación_Temperatura_FBG".

```
% Programa en MATLAB que permite obtener la respuesta de una rejilla de
% Bragg ante cambios en la temperatura:
% delta_lambda=(coeficiente_temp.*temperatura.*lambda_Bragg)+lambda_Bragg

clc
clear all
close all

% Kt es el coeficiente de temperatura para la fibra SMF-28e
Kt = 7.09e-06;

lambda_inicial = 1550.048e-09;  % Longitud de onda de Bragg inicial.
temp_ambiente = 25;             % Temperatura ambiente 25 [°C]
delta_temperatura = 0:5:105;    % Arreglo Cambio de Temperatura.
temp_FBG = delta_temperatura + temp_ambiente; % Temperatura de la FBG.

% La siguiente expresión permite obtener la longitud de onda sintonizada
% a través del cambio en la temperatura aplicada a la rejilla de Bragg.
lambda_Bragg = (Kt.*delta_temperatura.*lambda_inicial)+lambda_inicial;

% Para facilidad en el manejo de la información, los datos obtenidos a
% través de la simulación se migran a Excel.
xlswrite('Temperatura', temp_FBG', 'b2:b23');
xlswrite('Temperatura', lambda_Bragg', 'c2:c23');

% Se grafica la respuesta de la rejilla para diferentes valores de
% temperatura.
figure (1)
plot (temp_FBG, lambda_Bragg);
title('Longitud de Onda de Bragg vs. Temperatura.');
ylabel('Longitud de Onda de Bragg [m]');
xlabel('Temperatura [°C]');
grid
```

Programa "Simulación_Tension_y_Temperatura_FBG".

```
% Programa en MATLAB que permite obtener la respuesta de una rejilla de
% Bragg ante cambios en la temperatura y en la tensión.
clc
clear all
close all

% Kt es el coeficiente de temperatura para la fibra SMF-28e
Kt = 7.09e-06;

% Primero se calcula el efecto de la temperatura en la rejilla de Bragg.
lambda_inicial = 1550.048e-09; % Longitud de onda de Bragg inicial a
25°C.
temp_ambiente = 25;            % Temperatura ambiente 25 [°C]
delta_temperatura = 0:25:100;  % Arreglo Cambio de Temperatura.
temp_FBG = delta_temperatura + temp_ambiente; % Temperatura de la FBG.
```

```
% La siguiente expresión permite obtener la longitud de onda sintonizada
% a través del cambio en la temperatura aplicada a la rejilla de Bragg.

lambda_Bragg1 = (Kt.*delta_temperatura.*lambda_inicial)+lambda_inicial;

% Una vez obtenido el arreglo "lambda_Bragg1", se calcula el efecto que
% produce el cambio en la tensión de una rejilla de Bragg expuesta a
% variaciones en la temperatura.

% Ke es el coeficiente de tensión para la fibra SMF-28e
Ke = 0.7314;
longitud = 177.8;                    % Longitud inicial de la fibra [mm].
estiramiento = 0:0.127:2.159;        % Estiramiento de la fibra [mm].
tension = estiramiento./longitud;    % Tensión axial.

i = length(lambda_Bragg1);       % Longitud del arreglo "lambda_Bragg1".
j = length(tension);             % Longitud del arreglo "tension".

% Con la finalidad de presentar los datos en forma matricial, se
% inicializa la matriz "lambda_Bragg2" con puros ceros.
% En dicha matriz, cada columa corresponde a un valor de temperatura
% determinado.
lambda_Bragg2 = zeros(j, i);

% El primer ciclo for coresponde a las columnas de la matriz
(temperatura),
% mientras que el segundo ciclo for corresponde a las filas (tension).
for k = 1:i
    for l = 1:j

lambda_Bragg2(l,k)=(Ke.*tension(l).*lambda_Bragg1(k))+lambda_Bragg1(k);
    end
    l = 1;
end

% Se exporta la matriz delta_lambda2 a Excel para tener un manejo más
% sencillo de los datos.
xlswrite('Temperatura_y_Tension',temp_FBG, 'c2:g2');
xlswrite('Temperatura_y_Tension',estiramiento', 'a3:a20');
xlswrite('Temperatura_y_Tension',tension', 'b3:b20');
xlswrite('Temperatura_y_Tension',lambda_Bragg2, 'c3:g20');

% Se grafica la matriz.
plot(tension, lambda_Bragg2);
ylabel('Longitud de Onda de Bragg [m]');
xlabel('Tensión axial [strain]');
grid
```

Anexo B.

Especificaciones técnicas de los dispositivos utilizados en el estudio experimental de esta tesis.

Tabla B.1. Especificaciones técnicas del circulador óptico de 3 puertos utilizado, número de serie 906221	
Rango de longitudes de onda de operación [nm]	1550 ± 20
Pérdidas de inserción [dB] (Puerto 1 a Puerto 2)	0.55
Pérdidas de inserción [dB] (Puerto 2 a Puerto 3)	0.49
Aislamiento [dB] (Puerto 2 a Puerto 1)	56
Aislamiento [dB] (Puerto 3 a Puerto 2)	58
PDL [dB] (Puerto 1 a Puerto 2)	0.01
PDL [dB] (Puerto 2 a Puerto 3)	0.02
PMD [ps]	$<= 0.10$
Pérdidas de retorno [dB] (Puerto 1)	61
Pérdidas de retorno [dB] (Puerto 2)	62
Pérdidas de retorno [dB] (Puerto 3)	62
Cross Talk (Puerto 1 a Puerto 3)	61
Potencia óptica [mW]	300
Longitud de la fibra [m]	2.0
Temperatura de operación	0 ºC a + 70 ºC
Tipo de fibra	Cable 3.0mm con FC/APC

Tabla B.2. Especificaciones técnicas del circulador óptico de 3 puertos utilizado, número de serie 4140003918	
Rango de longitudes de onda de operación [nm]	1550 ± 20
Pérdidas de inserción [dB] (Puerto 1 a Puerto 2)	≤ 0.8
Pérdidas de inserción [dB] (Puerto 2 a Puerto 3)	≤ 0.8
Aislamiento [dB] (Puerto 2 a Puerto 1)	≥ 45
Aislamiento [dB] (Puerto 3 a Puerto 2)	≥ 45
PDL [dB] (Puerto 1 a Puerto 2)	≤ 0.1
PDL [dB] (Puerto 2 a Puerto 3)	≤ 0.1
Pérdidas de retorno [dB]	≥ 45
Directividad	≥ 50
PMD [ps]	≤ 0.1
Tipo de fibra	SMF-28e, 900 um loose tube
Conector	FC/APC*3
Longitud de la fibra [m]	≥ 1
Potencia de operación [mW]	≤ 300
Temperatura de operación	- 5 ºC a + 70 ºC

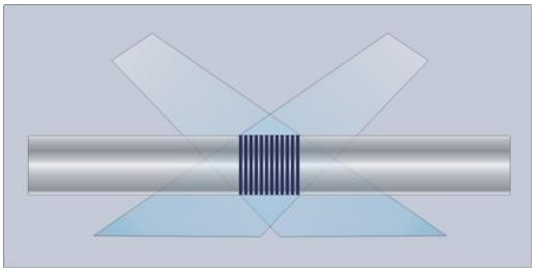
Anexo B. Especificaciones técnicas de los dispositivos utilizados en el estudio experimental de esta tesis.

SMART FIBRES
SENSE THE FUTURE

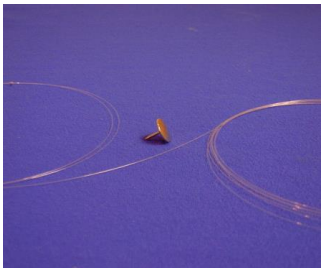
SmartFBG

Fibre Bragg Grating Sensor

- **Optical strain and/or temperature sensor**
- **Zero power, EMI immune**
- **Intrinsically safe**
- **Highly stable**
- **Multiple km signal integrity**
- **Available singly or in multiple FBG arrays**
- **Suitable for composite embedment**
- **Can be used to manufacture smart sensors and transducers**
- **Suitable for long-term SHM**



FBG recorded by interfering UV laser beams



FBG sensor in acrylate coated fibre

A Fibre Bragg Grating (FBG) is a novel optical sensor recorded within the core of a standard optical fibre. It reflects a narrow bandwidth of light, which responds faithfully to changes in temperature and strain. Many FBG sensors can be recorded onto a single optical fibre and interrogated simultaneously with a single instrument - the effect is a very low cost mechanism for distributed monitoring of strain and/or temperature within large structures, particularly suited to design validation and structural health monitoring

SmartFBG Specifications (typ):

	Unit	Standard				Options
Centre wavelength	nm	1528 – 1608				Alternative wavelength range
FBG length	mm	1	2	5	10	
Peak reflectivity	%	>=50	>=50	>=70	>=80	
3 dB bandwidth	nm	<1.5	<1.2	<0.7	<0.3	
SLSR single sensor	dB	15				> 15
Strain range	µstrain	+/- 9,000				> +/- 9,000
Strain sensitivity	pm/µstrain	1.20				
Strain resolution†	µstrain	0.4				
Temperature sensitivity‡	pm/°C	11				
Temperature resolution†	°C	0.05				
Fibre type		Single Mode SMF-28, 9/125 µm				
Fibre coating and FBG recoating options*		Acrylate		Polyimide		High temperature acrylate Other custom coatings
Temperature range‡	°C	-270 to +85		-270 to +300		
Cable and connections		To suit application				

† with 0.5 pm resolution interrogator
‡ decreased temperature sensitivity below -170 °C, no temperature sensitivity below -220 °C
* Polyimide recoating recommended for strain applications

All specifications are correct at the time of writing and may change without notice.
Certain specifications may be speculative or untested - please contact us to confirm the specification meets with your requirements.

S.001.105.04

Smart Fibres Ltd, UK | www.smartfibres.com | Tel: +44 (0) 1344 484111 | email: info@smartfibres.com

Anexo B. Especificaciones técnicas de los dispositivos utilizados en el estudio experimental de esta tesis.

Ibsen photonics



I-MON USB

Interrogation monitors for FBG sensor systems

High-resolution spectrometers ideally suited for a broad range of FBG sensing applications through a unique combination of high resolution, high speed, broad wavelength range and compact size

The I-MON 256/512 USB Interrogation Monitors offer kHz spectrum monitoring of Fiber Bragg Grating (FBG) sensors. High spectrometer resolution combined with broad wavelength range provides high resolution interrogation monitors allowing measurement of a large number of FBG sensors. High sensitivity allows high resolution also at very low light levels.

USB interface and data acquisition software provides easy setup with a laptop, and the I-MON can act as a stand-alone monitor in combination with a customer-selected light source. Additionally the I-MON USB Interrogation Monitors offer straightforward integration with the customer's interrogation system control PCB and meet industrial qualification standards.

Anexo B. Especificaciones técnicas de los dispositivos utilizados en el estudio experimental de esta tesis.

Features
High measurement frequency
Broad wavelength ranges
High resolution
Large dynamic range
Compact size
No moving parts

Applications
Stand-alone Interrogation monitor and/or
OEM Interrogation monitor modules:
- Vibration analysis
- Temperature measurements
- Pressure monitoring
- Strain measurements

I-MON software

The I-MON USB comes with LabVIEW based software providing plug-and-play operation. Driver software packages and DLL files allow the user to develop own measurement applications for OEM integration.

Operating principle

The Ibsen I-MON Interrogation Monitors build on patented (*) Ibsen high-resolution spectrometer technology, utilizing Ibsen fused silica transmission gratings. The I-MON splits the wavelength spectrum spatially to allow for parallel processing of the individual FBG sensor peaks. The FBG sensor peaks are measured by a diode array, and the embedded electronics provides USB interface.

(*) US patents no's.: 6,842,239 and 6,978,062

About Ibsen Photonics

Ibsen Photonics is building its portfolio of high resolution spectrometer modules on more than 20 years of experience in diffractive optics. Ibsen Photonics also has a leading position within phase masks for FBG manufacturing, holographic fused silica transmission gratings, and spectrometers.
Ibsen Photonics welcomes partnerships with original equipment manufacturers based on the Ibsen high resolution spectrometer technology. Ibsen Photonics is a privately held company.

Specifications

Parameter	Unit	I-MON 256 USB	I-MON 512 USB
Wavelength range	nm	1525-1570	1275-1345 / 1510-1595
Max no. of FBG's and spacing		> 37 at 1200 pm	>70 at 1000 pm / >70 at 1200 pm
Wavelength fit resolution	pm	< 0.5	
Repeatability (over any pol state)	pm	3 (5 max.)	
Wavelength linearity	pm	5 (typ.)	
Wavelength drift	pm/°C	1 (3 max.)*	
Dynamic range	dB	30	
Input optical power range	dBm	-80 to -20	
Measurement frequency	Hz	6000	3000
Interface		USB 2.0	
Current consumption	mA	< 250 **	
Temperature range	°C	0 - 50	
Size	mm	110 x 94 x 49	

(*) Note that by applying temperature control or temperature correction the wavelength accuracy over the entire temperature range can be improved.
(**) USB bus power.

Specifications are subject to change without prior notice. Design and specifications can be modified to suit a range of customer requirements.

Ibsen photonics

For further information you can contact us directly at:
Ibsen Photonics A/S Ryttermarken 15-21 DK-3520 Farum Denmark
Phone +45 4434 7000 Fax +45 4434 7001 www.ibsenphotonics.com E-mail inquiry@ibsen.dk