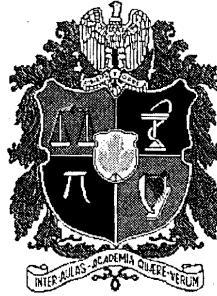




UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
DEPTO. DE BIBLIOTECAS
BIBLIOTECA "EFE" GÓMEZ



INFORME TÉCNICO FINAL

**SUBSISTEMAS FOTÓNICOS PARA LA
MULTIPLEXACIÓN DE SENSORES ÓPTICOS
Y SU INTERROGACIÓN REMOTA**
1118-330-18905, CONTRATO 224-2006

440

Pedro Torres Trujillo
Escuela de Física, Facultad de Ciencias
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
Tel: (+57-4) 4309327

Proyecto Financiado por COLCIENCIAS

Medellín, Agosto 21 de 2009

I
681-25
T67

Pedro "SUBSISTEMAS FOTÓNICOS PARA LA MULTIPLEXACIÓN DE SENSORES
Torres ÓPTICOS Y SU INTERROGACIÓN REMOTA", COLCIENCIAS 1118-330-18905

CONTENIDO

	Página
CONTENIDO	i
LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABLAS	iv
FICHA DEL PROYECTO	v
RESUMEN	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. TECNOLOGÍA DE LAS REJILLAS DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA	6
2.1. Rejillas de Bragg en fibra óptica	6
2.2. Principio e la tecnología basada en FBG	8
3. FUENTES DE LUZ LÁSER MULTILÍNEA	11
3.1 Modelo, diseño y configuraciones típicas	11
3.1. Construcción y caracterización	15
4. SENSORES DE FIBRA ÓPTICA Y SU OPTO-ELECTRÓNICA ASOCIADA	17
5. MUPLEXACIÓN Y DETECCIÓN REMOTA DE SENSORES ÓPTICOS	21
6. SÍNTESIS Y RELACIÓN DE RESULTADOS SENSORES ÓPTICOS	24
6.1 Relación de resultados de generación de conocimiento	26
6.2 Relación de resultados de fortalecimiento de la Comunidad científica	28
6.3 Relación de resultados de apropiación social del conocimiento	29
BIBLIOGRAFÍA	30
ANEXO 1: SOPORTES DEL INFORME TÉCNICO	34



LISTA DE FIGURAS

	Página	
FIGURA 2.1	Rejilla de Bragg escrita en una fibra óptica monomodo y los espectros de transmisión y reflexión para una fuente óptica de banda ancha.	7
FIGURA 2.2	Difracción de una onda de luz por una red.	7
FIGURA 2.3.	Funcionamiento cualitativo de una rejilla de Bragg en fibra óptica.	8
FIGURA 2.4	Cambio en la longitud de Bragg con las deformaciones de la fibra.	9
FIGURA 3.1.	Configuración de un láser de fibra óptica en anillo.	11
FIGURA 3.2	Longitud óptima de fibra dopada con Er^{+3} de la casa fabricante Liekki para el láser en anillo como una función de la potencia de bombeo.	13
FIGURA 3.3	Estimativa de la potencia de emisión del láser de fibra óptica en anillo en función de la potencia de bombeo.	13
FIGURA 3.4	Configuración del láser de fibra óptica lineal.	14
FIGURA 3.5	Longitud óptima de fibra dopada con Er^{+3} de la casa fabricante Liekki para el láser lineal como una función de la potencia de bombeo.	15
FIGURA 3.6	Estimativa de la potencia de emisión del láser de fibra óptica lineal en función de la potencia de bombeo.	15
FIGURA 3.7	Longitud de onda de sintonización del filtro F-P en función del voltaje aplicado.	16
FIGURA 3.8	Sintonización del láser de fibra óptica reportado. El nivel de potencia de acuerdo a la línea de emisión sigue el espectro ASE del sistema.	16
FIGURA 4.1	Sistema de detección doble filtro.	17
FIGURA 4.2	Lectura reportada por la unidad ópto-electrónica desarrollada de una FBG sujeta a cambios térmicos.	18

FIGURA 4.3	Respuesta espectral de una FBG grabada en una fibra PANDA con cargas entre 0 y 40 N/mm	20
FIGURA 4.4	Curvas de interrogación por DFF para un sensor de temperatura, cuya longitud de onda varía entre 0°C y 200°C.	20
FIGURA 5.1.	Diagrama de la plataforma para monitorear y controlar vía Web equipos de laboratorio.	23



LISTA DE TABLAS

		Página
TABLA 1.1	Acciones realizadas durante el desarrollo del proyecto	5
TABLA 2.1	Especificaciones de tres tipos de sistemas de instrumentación para FBG.	10

Pedro
Torres

"SUBSISTEMAS FOTÓNICOS PARA LA MULTIPLEXACIÓN DE SENSORES
ÓPTICOS Y SU INTERROGACIÓN REMOTA", COLCIENCIAS 1118-330-18905

FICHA DEL PROYECTO

TÍTULO	Subsistemas fotónicos para la multiplexación de sensores ópticos y su interrogación remota
CÓDIGO	1118-330-18905
NÚMERO DEL CONTRATO	224-2006
ENTIDAD EJECUTORA	Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Nit 899.999.063-3
INVESTIGADOR PRINCIPAL	Ph.D. Pedro Ignacio Torres Trujillo Escuela de Física - Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín-Unalmed. pitorres@unalmed.edu.co
COINVESTIGADORES	Dr.rer.nat. Román Castañeda S., Unalmed M.Sc. Sigifredo Solano, Unalmed M.Sc. Diego Luis Aristizábal, Unalmed M.Sc. Alcides Montoya Cañola, Unalmed
GRUPOS DE INVESTIGACIÓN	Grupo de Fotónica y Opto-electrónica, Grupo de Óptica, Grupo de Instrumentación Científica e Industrial
LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	Sensores de fibra óptica, Instrumentación científica
LUGAR DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO	Laboratorio de Óptica, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
TIEMPO DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO	24 meses + 6 meses
CONVOCATORIA	Gestión del Conocimiento y Tecnologías Convergentes Año 2006. Tema: Tecnologías Convergentes



RESUMEN

Con un alto nivel de integración de tecnologías, en este proyecto se genera conocimiento científico-técnico en sensores de fibra óptica, su multiplexación e interrogación remota, con miras a la incorporación de tecnologías modernas en el país. Para ello, se trabajó con la tecnología de sensores basados en rejillas de Bragg (FBG) que, además de estar incorporadas en la fibra (son micro-sensores térmicos y de deformación), se pueden interrogar mediante la técnica de división de longitud de onda.

Colombia no puede ser ajena a esta tendencia del mundo globalizado de migrar hacia sistemas distribuidos en donde cada elemento del sistema se conecta a una estación maestra mediante un canal de comunicación. En este contexto, la importancia de la fibra óptica es incuestionable, pues, además de su reconocida capacidad en sistemas de comunicaciones, desde hace más de dos décadas, diversas propuestas de sensores de fibra óptica se encuentran en condiciones de competir con los sensores convencionales. Los sensores de fibras suponen a menudo la única alternativa eficiente para nuevas aplicaciones, además de poder ofrecer ventajas específicas en relación a las soluciones más tradicionales.

Los subsistemas fotónicos abordados con miras a su integración tecnológica fueron: 1) Fuentes de luz láser multilínea; 2) sensores de fibra óptica y su opto-electrónica asociada; 3) multiplexación e interrogación remota de sensores ópticos.

1. INTRODUCCIÓN

El mundo de los sensores de fibra óptica está ligado a la industria de las comunicaciones y a la opto-electrónica (la cual ha impulsado el desarrollo de productos tales como reproductores de discos compactos e impresoras láser). Estos sensores toman ventaja de los componentes desarrollados para esos mercados, mostrando mejor desempeño que los sensores convencionales electrónicos y electro-mecánicos.

Muchas de estas ventajas provienen del hecho de que las fibras están hechas de vidrio (material no conductor), y a que los fotones, no los electrones, son utilizados como el elemento de propagación de señales. Aunque los subsistemas basados en fotodetectores de semiconductor y los láseres de diodo son más pequeñas y ligeros que los sistemas más tradicionales, la inmunidad del vidrio a la interferencia electromagnética (EMI) es una gran ventaja. Los sensores de fibra óptica se pueden colocar cerca de grandes fuentes EMI (por ejemplo, generadores de energía y motores eléctricos)¹ o sobre estructuras propensas a descargas de rayos (por ejemplo, puentes, torres y aviones)^{1,2}. Estos sensores son livianos, pueden funcionar en condiciones ambientales hostiles y son flexibles de instalar, permitiendo la detección discreta de parámetros físicos de interés.

Esta tecnología es conveniente, no solamente por las ventajas arriba mencionadas, sino porque además:

1. Son sensores que pueden ser interconectado fácilmente por telemetría y, por lo tanto, realizar la detección remota, localizando la electrónica de control para los LED/láseres y los detectores lejos de la cabeza del sensor. Por lo tanto, la electrónica es siempre accesible para reparar/actualizar; y, lo más importante, es solamente necesaria cuando se está realizando la medida, permitiendo que sea compartida a través de numerosas instalaciones de redes de sensores ópticos.
2. Su ancho de banda espectral es grande y por lo tanto se tiene la posibilidad de multiplexar una gran cantidad de sensores puntuales en una sola fibra, o de hacer sensado distribuido, es decir, hacer detección continua a lo largo de la longitud de la fibra.

Todas estas características, que no son factibles con tecnologías convencionales, han hecho que en las últimas dos décadas, los sensores de fibra óptica hayan pasado de la etapa experimental a los usos prácticos. El progreso ha sido tan grande, que hoy se reportan aplicaciones de sistemas ópticos capaces de supervisar el estado de edificios, puentes y, en

general, de grandes estructuras civiles^{3, 4}; en la industria naval^{5, 6}, aérea^{7, 8}, medioambiente^{9, 10}; como también en aplicaciones a pequeña escala como en las áreas bio-químicas^{11, 12}. En un estudio reciente¹³, se calcula que esta industria tendrá un potencial comercial que excederá los 1.2 billones de dólares en el año 2010, basado en gran medida a su compatibilidad con las redes de comunicaciones ópticas y a que los costes de estos sensores han estado cayendo constantemente.

Ellos se pueden categorizar como extrínsecos (cuando la fibra óptica actúa meramente como medio para transmitir señales de luz, ocurriendo la modulación de la señal óptica fuera de la fibra) o intrínseco (cuando la perturbación externa obra directamente sobre la fibra, modulando la señal óptica que viaja dentro de ella); cada uno ofrece sus ventajas y desventajas. Los extrínsecos son más fáciles de usar, pero son menos sensibles y se debe tener cuidado en la conexión de ingreso/salida de la señal óptica. Los intrínsecos, mientras tanto, son más sensibles y se deben blindar de perturbaciones externas indeseables; por su diseño completamente a fibra, se reducen/eliminan los problemas de conexión, pero generalmente requieren una demodulación más elaborada de la señal.

En cualquier caso, el diseño del sensor debe permitir que una perturbación externa varíe uno de los términos en la expresión del campo electromagnético. La manera más común de hacerlo es modular la intensidad de la señal de luz en la fibra. Alternativamente, se puede modular la frecuencia (la longitud de onda) o la fase de la luz. Los sensores por modulación de intensidad son más fáciles de desarrollar pero requieren alguna forma de auto-referencia para tener en cuenta las fluctuaciones de intensidad en la fuente de luz y las inducidas por pérdidas a lo largo de la conexión óptica. Los sensores por modulación de fase del campo electromagnético son un poco más difíciles de realizar y son propensos a problemas de estabilidad de la señal óptica. Los sensores por variación de la frecuencia (longitud de onda) han llamado mucho la atención en los últimos años por ser auto-referenciados (la longitud de onda es un parámetro absoluto), donde para saber si el parámetro de interés ha cambiado se debe hacer un análisis espectral de la luz a la salida.

A este último tipo de sensores pertenecen las rejillas de Bragg, que permiten hacer muchas funciones primarias como reflexión, filtrado y dispersión, con una alta eficiencia y con la ventaja de estar grabadas en la propia fibra. Las rejillas de Bragg en fibra (FBG por su sigla en inglés) están revolucionando la manera de procesar la luz, que en los últimos años se ha convertido en un elemento fundamental de la tecnología por fibra óptica.

El ancho de banda estrecho de la respuesta espectral de una rejilla de Bragg es útil en dos importantes áreas de aplicación: comunicaciones y sensores ópticos a fibra. Aplicaciones de las rejillas de Bragg que son de interés en comunicaciones ópticas, sea como componente auxiliar o como un elemento que desempeña funciones críticas, se pueden resumir en: 1) como "espejo de fibra óptica", para estabilizar la longitud de onda de láseres semiconductores¹⁴, reflejar la luz de bombeo en amplificadores ópticos^{15,16} y amplificadores Raman¹⁷; 2) como filtro pasa-banda, para aislar transmisiones bidireccionales en sistemas WDM¹⁸, demultiplexar señales WDM¹⁹, ecualizar el perfil de ganancia de amplificadores ópticos^{20,21}; 3) para compensar la dispersión cromática en fibras ópticas^{22,23}, implementar sistemas de seguridad ópticos²⁴, tecnología CDMA óptica²⁵ y líneas de retardo con potencial para compensar PMD²⁶.

Mientras que la estabilidad de la longitud de onda es fundamental en muchas aplicaciones, el efecto del medio ambiente local en la rejilla de Bragg puede ser usado para sensar cantidades físicas, midiendo el desplazamiento espectral de la longitud de onda de Bragg, eliminándose los problemas de amplitud o de variaciones de intensidad que afecta a los otros tipos de sensores a fibra óptica. Por su banda de reflexión estrecha, varias rejillas de Bragg pueden ser grabadas en una misma fibra sin que perturbe el desempeño de la otra, lo que permite el desarrollo de sensores ópticos distribuidos, es decir tecnología WDM.

El rango de longitudes de onda más popular para los sensores de FBG es 1520 – 1570 nm, que se utiliza comúnmente en telecomunicaciones; fuera de este rango, el costo del sensor es más alto debido a que la longitud de onda no es estándar. Programas de estudio del uso masivo de estas tecnologías se vienen adelantando, por ejemplo, en Australia, Europa y Estados Unidos, con miras a que los sensores se hagan con fibra óptica y que además estos queden integrados en una red que los comunique con la red de comunicaciones de cualquier usuario.

La síntesis anterior deja en claro la tendencia mundial de usar cada vez más técnicas y dispositivos, y en general, de subsistemas fotónicos en sistemas de sensado y control de estructuras y procesos productivos. Por lo tanto, este es un tema estratégico para el país, pues, no solamente se debe consolidar la capacidad nacional en I&D en esta área, sino que según un reciente estudio²⁷, ésta será la tecnología estándar en muchos sectores pertinentes como el mantenimiento de estructuras civiles (monitoreo); el sector eléctrico, particularmente en sistemas automatizados bajo la filosofía de sistemas distribuidos que operen en tiempo real; el sector de petróleo y gas, por el hecho de que la tecnología es óptica, lo que brinda mayor seguridad a menor precio; automotriz, dado que la fibra óptica puede trabajar en ambientes corrosivos y a elevadas temperaturas;

medioambiente, por ser la tecnología más idónea para hacer monitoreo distribuido en grandes áreas. Actualmente se disponen de soluciones estándar en la parte médica, bio-química, domótica.

Este proyecto apunta en esta dirección en donde convergen tecnologías de la información y comunicaciones con sensores ópticos. El objetivo general es el desarrollo de sensores de fibra óptica, su multiplexación e interrogación remota, con miras a la incorporación de tecnologías modernas en el país. Para ello, se formularon los siguientes objetivos específicos:

1. La realización y caracterización de láseres multilínea aptos para ser empleados en sensores ópticos y su multiplexación, para lo cual se trabaja con fibras amplificadoras.
2. Desarrollar sensores de fibra óptica con su opto-electrónica de procesamiento asociada para aplicaciones en mediciones térmicas y/o de deformación.
3. Realizar la multiplexación de sensores ópticos por longitud de onda y su interrogación remota.

Durante el tiempo de ejecución del proyecto se cumplieron las acciones relacionadas en el Tabla 1.1. Los resultados esperados consagrados en la minuta del contrato con Colciencias fueron los siguientes:

A. Resultados de formación:

- i. Formación de un (1) estudiante de posgrado a nivel de maestría.
- ii. Curso de extensión ofrecido a empresas colombianas en las cuales tiene pertinencia esta tecnología.

B. Resultados de publicaciones:

- i. Envío de un (1) artículo a una revista indexada por Colciencias, ISI, Scielo.

C. Otros resultados:

- i. Pasantía de cooperación científica internacional

D. Presentación de una ponencia (1) con resultados de la investigación en un evento preferiblemente de carácter internacional.

TABLA 1.1 Acciones realizadas durante el desarrollo del proyecto

ETAPAS \ MESES	3	6	9	12	15	18	21	24
Desarrollo de una primera unidad sensora de FBG con su opto-electrónica de procesamiento.								
Diseño y fabricación de rejillas de Bragg para la fase de multiplexación.								
a) Caracterización de fibras amplificadoras adquiridas. b) Diseño, desarrollo y caracterización de la fuente de luz láser multilínea								
Desarrollo de la multiplexación de sensores FBG para medición de temperatura y/o deformación con las dos metodologías propuestas.								
Interrogación remota de sensores ópticos distribuidos, para lo cual se cuentan con tarjetas TINI y el software de programación.								
Informe final y compromisos del proyecto de investigación.								

La estructura de este informe es la siguiente. En primera instancia, y para beneficio del lector, en el capítulo 2 se hace una presentación de los aspectos básicos referentes a las rejillas de Bragg en fibra óptica, como lo son su origen, el desarrollo que han presentado y sus potencialidades; aquí también se incluye una explicación muy sencilla del principio de funcionamiento de este componente, partiendo del concepto de las redes de difracción usado en óptica. Se presenta, además, una rápida revisión de los fundamentos de la tecnología de los sensores basados en FBG partiendo de los conceptos desarrollados en el capítulo.

En el capítulo 3 se cubre uno de los ejes del proyecto como lo fue la realización y caracterización de láseres multilínea aptos para ser empleados en sensores ópticos. Luego, en el capítulo 4, se aborda el segundo eje, consistente en el desarrollo de sensores de fibra óptica con su opto-electrónica de procesamiento asociada para aplicaciones en mediciones térmicas y/o de deformación. El tercer eje, el de mayor integración tecnológica, consistente en la multiplexación de sensores ópticos por longitud de onda y su interrogación remota, se trata en el capítulo 5.

En el capítulo 6 se presenta una síntesis y se relacionan los resultados del proyecto. Se hace un balance final de la investigación, demostrando su alcance y calidad.

2. TECNOLOGÍA DE LAS REJILLAS DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA

2.1. REJILLAS DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA

Las rejillas de Bragg en fibra óptica (FBG) son estructuras que se generan a partir de cambios periódicos en el índice de refracción del núcleo de una fibra óptica. Esta alteración es usualmente lograda por la exposición de la fibra óptica a un patrón de luz ultravioleta de alta intensidad. La formación de este tipo de estructuras permanentes en una fibra óptica fue logrado por primera vez en 1978 por Hill y sus colaboradores en el Centro Canadiense de Investigación en Comunicaciones (CRC, por su sigla en inglés)²⁸. El fundamento de su trabajo consistió en lanzar la radiación de un láser de iones de Argón en una fibra óptica dopada con Germanio, en la cual se observó el incremento de la intensidad de la luz reflejada que se transmitía por la fibra. Luego de exponer la fibra durante un período de tiempo se encontró que la luz reflejada tenía una frecuencia característica y que, además, la zona afectada por la radiación se comportaba como un filtro permanente en reflexión para una estrecha longitud de onda.

Posteriormente, se desarrollaron técnicas interferométricas que permiten la grabación de las FBG en el núcleo de las fibras óptica, haciendo incidir radiación UV desde fuera de la fibra²⁹. Gracias a este avance, fue posible desarrollar estructuras más complejas y de mayor interés desde el punto de vista tecnológico. Empleando el método holográfico es posible ejercer un control del ángulo de incidencia de los haces UV que forman el patrón de interferencia en el núcleo de la fibra y conllevando la modulación periódica del índice de refracción, mientras que el revestimiento, por no tener contenidos de dopantes como el Ge, será invisible a la radiación UV. El control del ángulo de incidencia permite obtener rejillas de Bragg en el rango de longitudes de onda de las telecomunicaciones, lo cual impulsó más el desarrollo y la investigación en este tipo de dispositivo intrínseco a fibra.

Las FBG actúan como filtros pasa-banda en reflexión, ya que al ser iluminadas con luz de un gran ancho de banda espectral, reflejan de manera preponderante una longitud de onda específica dentro del espectro de emisión de la fuente, mientras que las demás componentes espectrales pasan a través de la estructura de la rejilla sin presentar de forma

marcada atenuación alguna, como se ilustra en el esquema presentado en la Figura 2.1.

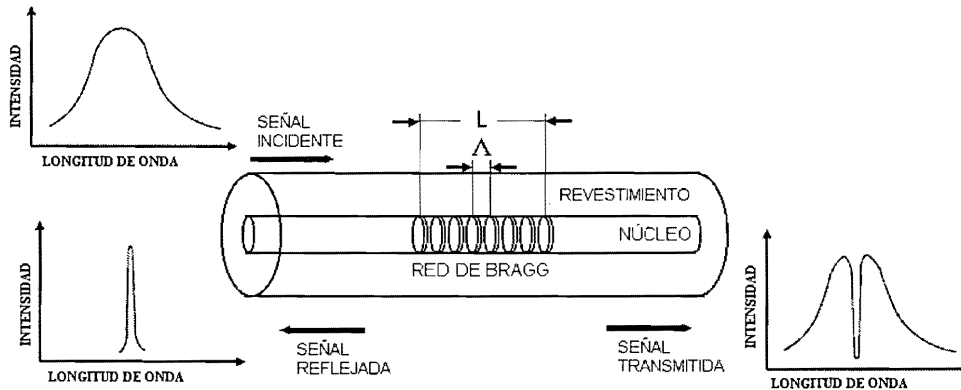


FIGURA 2.1 Rejilla de Bragg escrita en una fibra óptica monomodo y los espectros de transmisión y reflexión para una fuente óptica de banda ancha.

El principio de funcionamiento de una FBG puede explicarse, desde un punto de vista cualitativo, como una red de difracción simple; así, el efecto de la luz que incide con un ángulo θ_1 sobre la red de difracción se puede describir como

$$n \sin \theta_2 = n \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (2.1)$$

donde θ_2 es el ángulo de la luz refractada y Λ el periodo de la rejilla; el número entero m determina el orden de difracción, como se ilustra en la Figura 2.2

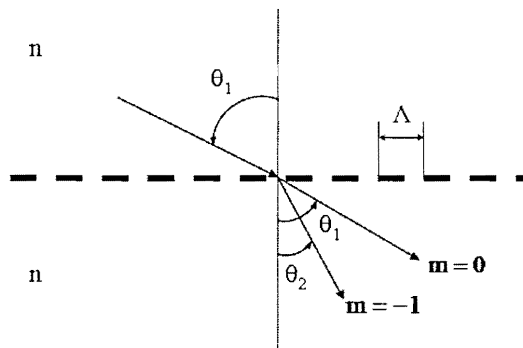


FIGURA 2.2 Difracción de una onda de luz por una red.

Las rejillas en fibra pueden clasificarse en dos tipos: rejillas de Bragg (o rejillas de periodo corto), en las cuales el haz incidente y el refractado viajan en sentidos opuestos; y las rejillas de transmisión (o rejillas de periodo largo), para las cuales los haces incidente y refractado viajan en la dirección de propagación. La Figura 2.3 ilustra la situación que se

presenta en una FBG, entre el haz incidente, con ángulo θ_1 , y haz refractado que se propaga en dirección opuesta con ángulo $\theta_2 = -\theta_1$.

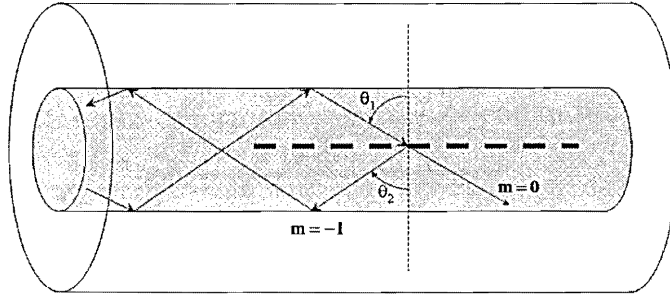


FIGURA 2.3. Funcionamiento cualitativo de una rejilla de Bragg en fibra óptica.

Ya que la constante de propagación a lo largo del eje de la fibra de la onda es $\beta = (2\pi/\lambda)n_{\text{eff}}$, con $n_{\text{eff}} = n_{\text{co}} \sin\theta$, es posible reescribir la Ecuación (2.1) como

$$\beta_2 = \beta_1 + m \frac{2\pi}{\Lambda}. \quad (2.2)$$

Para el primer orden de difracción, el cual predomina en una rejilla en fibra, $m=-1$. Como β_1 describe el haz de luz propagante y β_2 describe el haz de luz refractado por la rejilla, es decir, $\beta_2 < 0$, se puede encontrar, a partir de la ecuación (2.2), que la longitud de onda a la cual se presenta la condición de resonancia de la onda incidente con índice efectivo $n_{\text{eff},1}$, y que es refractada por la rejilla con un índice efectivo $n_{\text{eff},2}$, está dada por la expresión

$$\lambda = (n_{\text{eff},1} + n_{\text{eff},2})\Lambda. \quad (2.3)$$

Si, además, como es el caso de las rejillas de Bragg empleadas en el proyecto, que fueron grabadas en fibra óptica monomodo, sólo un modo de propagación puede estar presente en la fibra, lo cual convierte a la expresión (2.4) en la conocida condición de reflexión de Bragg, es decir,

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda. \quad (2.4)$$

2.2. PRINCIPIO DE LA TECNOLOGÍA BASADA EN FBG

El principio básico de operación de dispositivos basado en FBG consiste en el monitoreo del desplazamiento espectral asociado a los cambios en la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, debido a la acción de una magnitud externa³⁰. Como se puede ver en la ecuación (2.4), la λ_B es directamente proporcional al período de la rejilla y al valor del índice de refracción

efectivo, por lo tanto, cualquier cambio en alguno de estos parámetros causará un cambio directo en la longitud de onda de Bragg. Este principio es usado, por ejemplo, en sensores de deformación basados en FBG³¹⁻³⁷. Los cambios en las dimensiones de la fibra óptica a lo largo de su eje causan los mayores cambios en la respuesta espectral de la rejilla, como se ilustra en la figura 2.4. Estos cambios son producidos principalmente por expansión térmica o por deformaciones mecánicas inducidas³⁸.

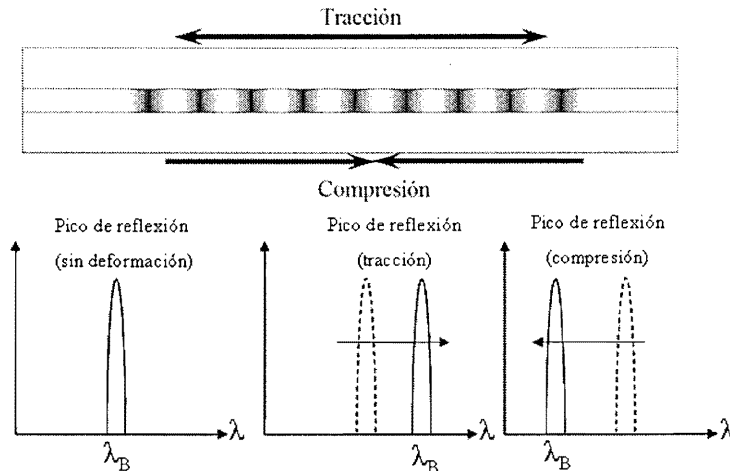


FIGURA 2.4 Cambio en la longitud de Bragg con las deformaciones de la fibra.

La expresión que determina el cambio de la longitud de Bragg debido a la acción de una perturbación externa es

$$\Delta \lambda_B = \left[2\Lambda \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial P} \right) + 2n_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial P} \right) \right] \Delta P + \left[2\Lambda \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \right) + 2n_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \right] \Delta T, \quad (2.5)$$

donde P es una carga externa que genera deformación del núcleo de la fibra y T es la temperatura a la cual es sometida la rejilla de Bragg.

Realizando un análisis a la expresión (2.5), puede notarse que el primer término corresponde al efecto de la deformación sobre la fibra óptica. Este término, mediante una rápida manipulación algebraica, se puede expresar de la siguiente manera

$$\Delta \lambda_B = (1 - p_e) \lambda_B \varepsilon, \quad (2.6)$$

donde ε es la deformación aplicada, y p_e es el coeficiente fotoelástico de la fibra³⁹.

El segundo término de la ecuación (2.5) representa el efecto de la temperatura sobre la fibra óptica. La variación de λ_B con la expansión térmica -cambios en el período de la rejilla y/o en el índice de refracción- pueden expresarse por medio de la siguiente ecuación³⁹:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_\lambda + \alpha_n)\Delta T, \quad (2.6)$$

donde $\alpha_\lambda = (1/\lambda)(\partial\lambda/\partial T)$ es el coeficiente de expansión térmica para una fibra óptica (aproximadamente $0,55 \times 10^{-6}$ para la sílice). $\alpha_n = (1/n_{\text{eff}})(\partial n_{\text{eff}}/\partial T)$ representa el coeficiente termoóptico y tiene un valor de $8,6 \times 10^{-6}$ para la sílice. Puede notarse que la variación de la longitud de onda de Bragg con la temperatura es principalmente debida al cambio del índice de refracción.

Hay varios esquemas para detectar el desplazamiento espectral de la longitud de onda de Bragg de una FBG. Un esquema consiste en inyectar luz de ancho de banda relativamente amplio en la fibra para determinar la longitud de onda λ_B de la luz reflejada. Otra forma es usar un láser sintonizable cerca da región espectral de la FBG. La detección de los pequeños desplazamientos de la longitud de onda (algunas decenas de picómetros) puede ser acompañada usando un analizador de espectros ópticos de alta resolución. En aplicaciones prácticas, esta función puede ser realizada con instrumentación compacta, por ejemplo, con espectrofotómetros miniaturizados⁴⁰, filtros ópticos⁴¹⁻⁴⁴ y subsistemas fotónicos con láser⁴⁵. La Tabla 2.1 exhibe una comparación de los valores típicos de la instrumentación entre los tres tipos de métodos. Las diferencias dominantes están en la tasa de muestreo y el número de canales/sensores ópticos. Estas diferencias dictan la selección del sistema apropiado del sensor de FBG para cualquier uso.

TABLA 2.1. Especificaciones de tres tipos de sistemas de instrumentación para FBG.

	Láser sintonizable	Filtro óptico	Espectrofotómetro
Tasa de muestreo	250 Hz	10 kHz	3 kHz/100 Hz
Resolución en la medición de deformación mecánica	1 $\mu\epsilon$	Variable	1 $\mu\epsilon$
Número máximo de sensores	40	1	8/200
Rango de longitudes de onda (nm)	1520-1570	~1310, ~1550	815-860

Es claro, entonces, que la pretensión de generar una plataforma de conocimiento científico-técnico para incorporar esta tecnología en el país, pasa por el desarrollo de este tipo de sensores de fibra óptica, las fuentes de luz para su detección, las componentes para la multiplexación óptica y su tele-interrogación remota.

3. FUNTES DE LUZ LÁSER MULTILÍNEA

3.1. MODELO, DISEÑO Y CONFIGURACIONES TÍPICAS

De acuerdo con lo propuesto para la construcción de una fuente de láser multilínea utilizando fibras dopadas con Er^{3+} , se procedió a hacer el respectivo estudio sobre el funcionamiento y características técnicas de cada uno de los dispositivos asociados a las configuraciones típicas utilizadas en este tipo de fuentes láser: configuración en anillo y configuración lineal.

La configuración en anillo se muestra en la Figura 3.1. A través del WDM (980/1550 nm) se ingresan la señal de bombeo y se realimenta el sistema con la señal emitida por la fibra amplificadora dopada con Er^{3+} ; como el dispositivo adquirido ya tiene integrado un aislador óptico, la luz emitida por la fibra amplificadora viaja en la dirección propagante. El anillo incluye, además, un filtro Fabry Perot (F-P) sintonizable, controlable mediante una señal de voltaje, para barrer el ancho de banda de emisión de la fibra amplificadora, y un acoplador direccional para dividir la señal de emisión en dos, una parte realimenta el sistema y la otra es tomada como la salida neta del sistema.

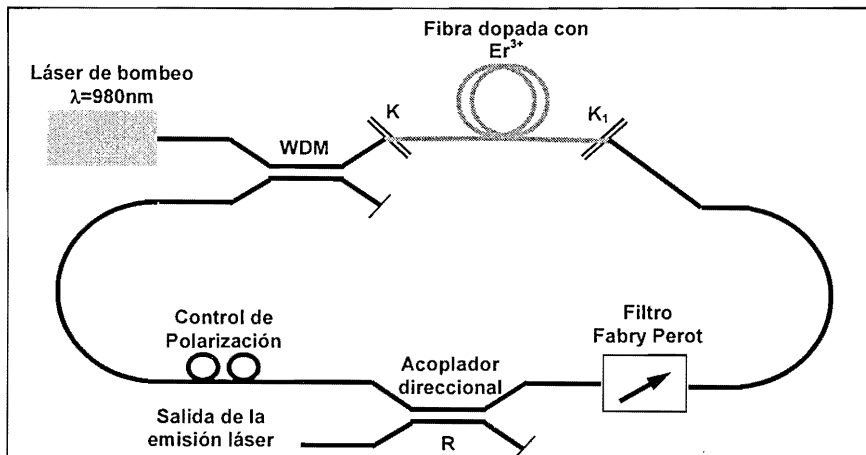


FIGURA 3.1. Configuración de un láser de fibra óptica en anillo.

La potencia óptica emitida por este láser se puede estimar con la siguiente expresión

$$P_L^{Salida} = \eta(P_B - P_L^{Umbral}), \quad (3.1)$$

donde P_B , P_L^{Umbral} y η son la potencia de bombeo, la potencia umbral del láser y el coeficiente de solapamiento, respectivamente, siendo estos dos últimos definidos como:

$$P_L^{Umbral} = \frac{\lambda_S}{\lambda_B} \frac{\alpha_S L - \ln(K \cdot R)}{1 - (K \cdot R \cdot G_{max})^{-\delta}} P_L^{Saturation}, \quad (3.2)$$

$$\eta = \frac{\lambda_S}{\lambda_B} K_1 \frac{1 - K}{1 - K \cdot R} (1 - (K \cdot R \cdot G_{max})^{-\delta}). \quad (3.3)$$

En estas ecuaciones, K y K_1 describen las pérdidas asociadas con las componentes pasivas presentes en el sistema, ver Figura 3.1; R es la relación de luz en el acoplador direccional; L es la longitud de fibra dopada con Er^{3+} ; $G_{max} = \exp((\alpha_B / \delta - \alpha_S)L)$ describe la ganancia máxima que se puede lograr a la longitud de onda de la señal λ_S si el sistema es bombeado con una señal de potencia muy alta; $\delta = (\lambda_S \cdot P_S^{Saturation}) / (\lambda_B \cdot P_B^{Saturation})$ es la razón de las potencias de saturación; $\alpha_{B,S}$ y $P_{B,S}^{Saturation}$ son los coeficientes de absorción y las potencias de saturación a las longitudes de onda $\lambda_{B,S}$, las cuales fueron medidas experimentalmente para la fibra amplificadora que se poseen -entre otras, Liekki, referencia Er20-4/125HC) mediante la metodología desarrollada por el Grupo de Fotónica & Opto-electrónica. Como se puede observar en estas ecuaciones, conociendo estos últimos factores se puede modelar fácilmente esta configuración.

Al realizar simulaciones numéricas usando las expresiones anteriores, se encuentra que hay una longitud de fibra amplificadora para la cual el proceso de emisión láser se maximiza para una determinada potencia de bombeo. (La pérdida de eficiencia ocurre ya sea porque el tramo de fibra amplificadora es corto como para absorber toda la luz de bombeo, o demasiado largo como para que la fibra reabsorba la energía emitida). De acuerdo con el resultado de la Figura 3.2, en el caso de la fibra referenciada de la casa fabricante Liekki, bajo las condiciones de bombeo de que se disponen ($P_B=100$ mW a $\lambda_B = 980$ nm), la longitud óptima está alrededor de 33 m.

Teniendo en cuenta todas las pérdidas asociadas con los dispositivos que componen la cavidad en anillo, se realizó también un estimativo de la potencia de emisión de este láser. De acuerdo con la curva de potencia de emisión en la Figura 3.3, el nivel de potencia óptica es adecuado para los intereses del proyecto, toda vez que para la interrogación de sensores basados en FBG se utilizan potencias de algunos μW .

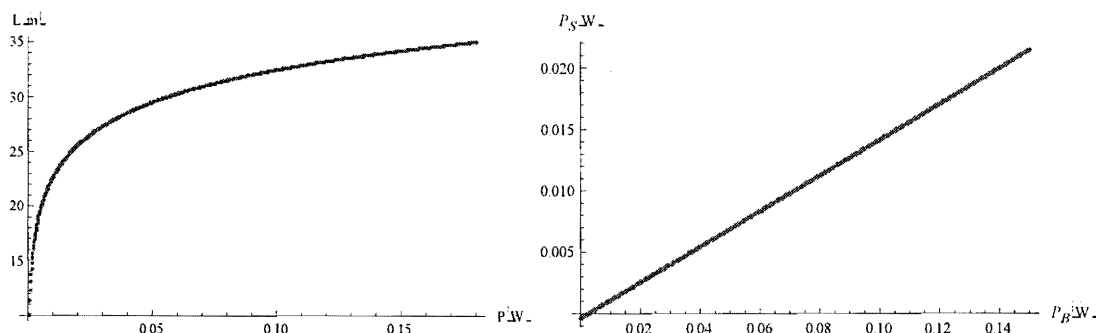


FIGURA 3.2. Longitud óptima de fibra dopada con Er^{3+} de la casa fabricante Liekki para el láser en anillo como una función de la potencia de bombeo.
FIGURA 3.3. Estimativa de la potencia de emisión del láser de fibra óptica en anillo como una función de la potencia de bombeo.

Por otra parte, en la cavidad proyectada del láser de fibra óptica en la configuración lineal de la Figura 3.4, el aislador óptico evita que llegue energía proveniente de la fibra dopada con Er^{3+} a la fuente de bombeo; de esta manera se impide inducir inestabilidades tanto en la longitud de onda de emisión como de intensidad de la luz de bombeo. En este diseño, las FBG actúan como los espejos reflectores de la cavidad, siendo la rejilla anterior diseñada para que parte de la energía de la cavidad salga la emisión láser y la otra pasa nuevamente por la fibra óptica dopada con Er^{3+} , realimentando el proceso de amplificación estimulada en la cavidad. Por su banda de reflexión estrecha, que puede ser de algunos picómetros hasta 1 nm, la FBG filtra una longitud de onda específica, permitiendo una emisión altamente monocromática. De aquí, ahora es claro que la sintonización en este tipo de configuración se logra perturbando la región de la fibra donde está inscrita la FBG. Esta perturbación se puede realizar mediante variaciones térmicas, efectos tracción o de compresión. Este es parte de las perspectivas de trabajo.

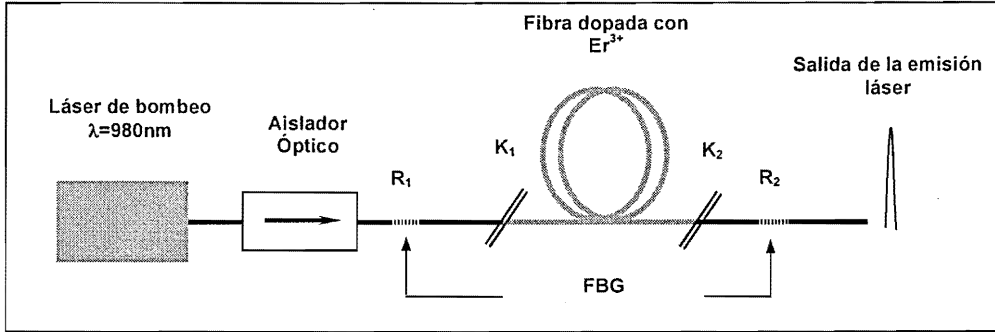


FIGURA 3.4. Configuración del láser de fibra óptica lineal.

El modelo sobre el cual se hizo el diseño de la cavidad es análogo al de la configuración en anillo; es decir, se aplica la ecuación (3.1), pero ahora se tiene en cuenta que el sistema se realimenta con la porción de luz que es reflejada por las FBG, con lo cual se tiene que

$$P_L^{Umbral} = \frac{\lambda_S}{\lambda_B} \frac{\alpha_S L - \ln(K \cdot R)}{1 - (K \cdot R \cdot G_{max})^{-\delta}} P_L^{Saturation}, \quad (3.4)$$

$$\eta = \frac{\lambda_S}{\lambda_B} K_1 \frac{1 - K}{1 - K \cdot R} (1 - (K \cdot R \cdot G_{max})^{-\delta}), \quad (3.5)$$

donde $R = R_1 \cdot R_2$, siendo R_1 y R_2 las reflectividades de las FBG.

Los resultados obtenidos con este modelo tanto para la longitud óptima de fibra amplificadora como para la potencia de emisión del láser se muestran en las Figuras 3.5 y 3.6, respectivamente. Se observa que la porción de fibra dopada con Er^{3+} necesaria para construir la cavidad es la misma a la de la configuración en anillo, lo que era de esperarse en vista de que la ganancia no depende de la configuración del láser sino de la absorción de la fibra amplificadora. En este caso, el nivel de potencia emitida por el láser es mejor al caso anterior, en vista de que hay menos dispositivos que induzcan pérdidas al sistema.

Para la implementación del láser de fibra óptica lineal, un elemento clave es el diseño y fabricación de las FBG, considerando la emisión multilínea que se quiere alcanzar. Para ello, el estudiante Jesús David Causado realizó una pasantía en un laboratorio de Brasil con el que se tiene colaboración, para adelantar la fabricación de rejillas de acuerdo con el sistema de grabación con el que cuentan. Este paso ha sido fundamental para definir el método de sintonización de la FBG.

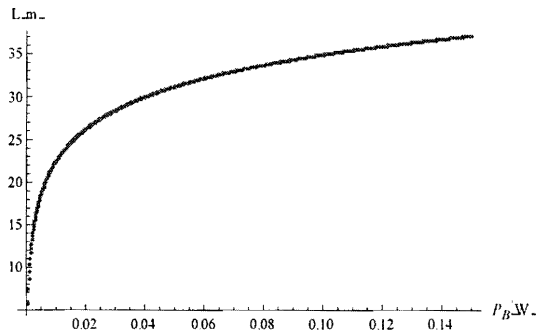


FIGURA 3.5. Longitud óptima de fibra dopada con Er^{+3} de la casa fabricante Liekki para el láser lineal como una función de la potencia de bombeo.

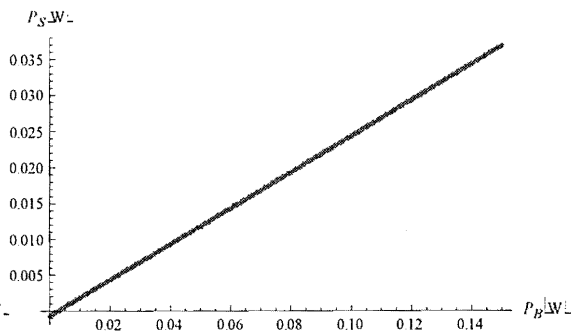


FIGURA 3.6. Estimativa de la potencia de emisión del láser de fibra óptica lineal en función de la potencia de bombeo.

3.2. CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN

Si bien se experimentaron con los dos tipos de configuraciones, en este informe se relaciona la cavidad esquematizada en la Figura 3.1 en vista de su aplicación en el capítulo 5. Siguiendo los modelos y criterios de diseño de la sección anterior, el láser se construyó con 15 m de una nueva fibra dopada con Erblio bombeado con un diodo láser con longitud de onda de emisión a 980 nm y potencia de emisión máxima de 140 mW. La señal que circula en la cavidad pasa por el filtro F-P sintonizable eléctricamente de un ancho de banda de 0.4 nm que, de acuerdo a una evaluación previa (ver Figura 3.7), tiene una respuesta espectral muy lineal con el voltaje, lo que es una gran ventaja para los intereses del proyecto.

En el punto de operación de bombeo máximo, la Figura 3.8 muestra que el láser construido presenta posibilidades de emisión multilínea que va desde 1540 nm hasta 1610 nm, cubriendo las bandas C y L de la telecomunicaciones, con potencias máxima y mínima de 14 mW y 4 mW, respectivamente. Estos resultados superan notablemente los previamente reportados para un láser lineal⁴⁶. Con este paso se posibilita la construcción de sistemas de interrogación de sensores basados en FBG multiplexados en la frecuencia, y se impulsa el desarrollo de la tecnología opto-electrónica nacional de bajo costo.

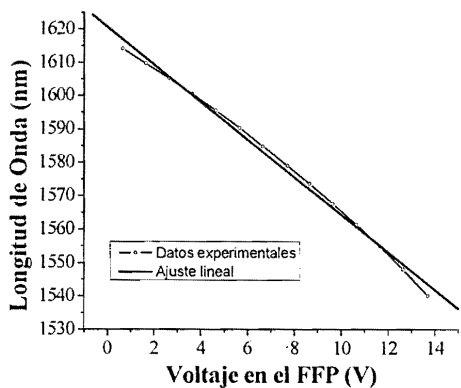


FIGURA 3.7. Longitud de onda de sintonización del filtro F-P en función del voltaje aplicado.

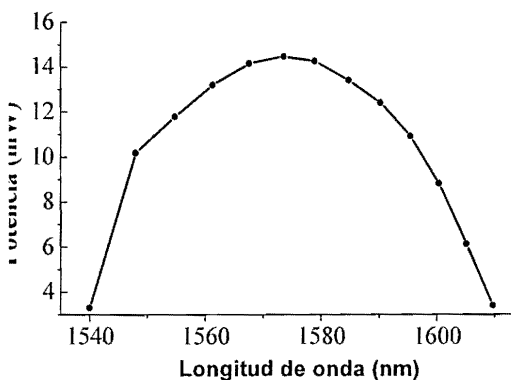


FIGURA 3.8. Sintonización del láser de fibra óptica reportado. El nivel de potencia de acuerdo a la línea de emisión sigue el espectro ASE del sistema.

Finalmente, vale decir que todo este trabajo motivó la publicación de un artículo en revista indexada y dos ponencias en eventos científicos.

4. SENSORES DE FIBRA ÓPTICA Y SU OPTO-ELECTRÓNICA ASOCIADA

Como ya está claro, en este proyecto se trabajan sensores ópticos basados en FBG, de ahí que con este eje se quiera, primero, avanzar en el desarrollo de una unidad opto-electrónica para detectar los desplazamientos de la respuesta espectral de la FBG bajo la acción de un parámetro físico a medir; segundo, y como complemento a un sistema de sensores distribuidos, es natural contar con unidades de sensores portátiles que permitan, en un momento dado, evaluar el desempeño de una cabeza sensora del sistema.

El trabajo aquí ha sido importante por cuanto se diseñó, construyó y calibró una unidad opto-electrónica que, mediante una llave óptica, permite monitorear dos FBG sensoras. Como se puede ver en el esquema de la Figura 4.1, la técnica implementada consiste en convertir las variaciones en la respuesta espectral de una FBG sensora en lecturas de potencia óptica, mediante la convolución de su espectro con el espectro de dos filtros ópticos fijos que, como se observa, los constituyen dos FBG debidamente aisladas de efectos externos. La lectura suministrada por la unidad, consiste del cociente de voltajes suministrados por los dos fotodetectores, de esta manera se compensan posibles variaciones en intensidad tanto en el circuito óptico como en el LED.

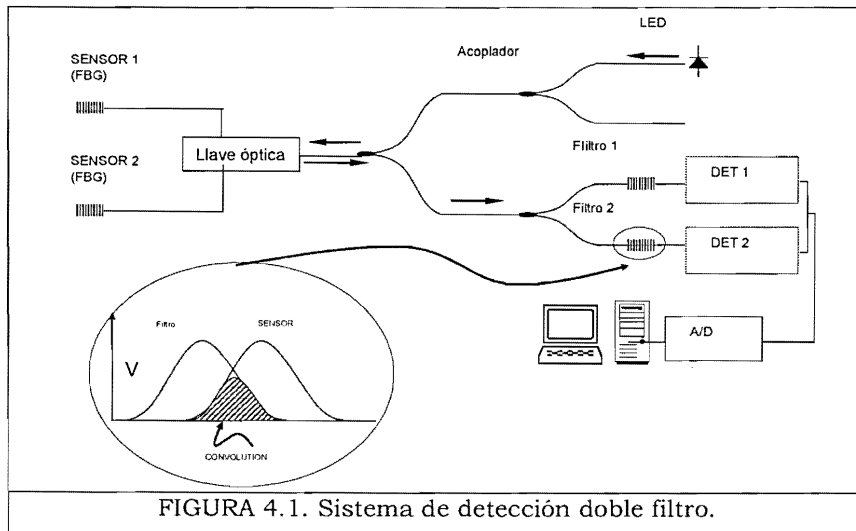


FIGURA 4.1. Sistema de detección doble filtro.

Vale decir que la incorporación de la llave óptica en la unidad optoelectrónica, permite explorar la posibilidad de multiplexar sensores en el dominio del tiempo, por cuanto existen en el mercado dispositivos de este tipo con más canales ópticos.

Para la unidad optoelectrónica construida se adecuaron todos los circuitos electrónicos para manejar el sistema de fuente de luz (LED, ancho espectral 60 nm centrado a 1550 nm), los fotodetectores para sensar las variaciones en potencia de la convolución entre los sensores (conectados a la llave óptica) y las rejillas filtro; adicionalmente, un sistema de conversión análogo-digital, empleando un PIC, para una interface al PC, y así monitorear las variaciones de los FBG sensores. Las FBG para los sensores y los filtros estaban centradas a una longitud de onda alrededor de 1532 nm y ancho espectral de 2 nm. Aquí se usaron acopladores direccionales para la interconexión de los diferentes elementos. Como un ejemplo de la utilidad de esta unidad, en la Figura 4.2 ilustra la curva de calibración de una de las FBG sensoras con la temperatura, donde en el eje horizontal corresponde a la razón de voltaje entre los detectores 2 y 1, y el eje vertical a las variaciones en temperaturas medidas con termocupla. Los resultados confirman que esta configuración es una buena alternativa para medir variables físicas de interés

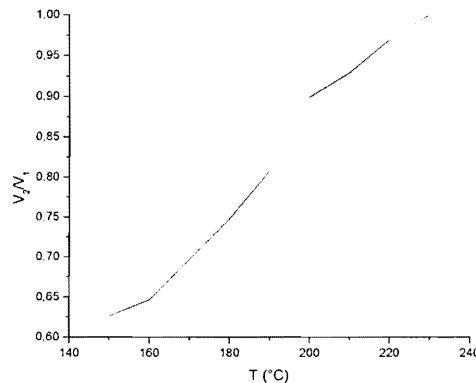


FIGURA 4.2. Lectura reportada por la unidad ópto-electrónica desarrollada de una FBG sujeta a cambios térmicos.

Si bien con la técnica doble filtro fijo (DFF) se tiene una buena señal/ruido y un rango dinámico mayor que con un solo filtro, su complejidad es mayor en la medida en que se necesitan dos filtros (FBG filtro) y dos fotodetectores, con lo que se aumentan los costos de la unidad de detección. Una alternativa a la necesidad de tener dos FBG filtro en el sistema de detección la exploró el estudiante Jean Pierre Jiménez en su tesis de Maestría en Física, la cual busca emular un sistema de doble filtro

fijo aprovechando las características espectrales y foto-elásticas de una sola FBG grabada en una fibra óptica de alta birrefringencia.

Para ello empleó un modelo que describe cómo debe ser el comportamiento del sistema. En primera instancia se aproximaron las respuestas espectrales de las FBG, filtros y sensora por curvas de tipo Gaussiano, dado que son curvas matemáticamente fáciles de manipular y presentan una buena aproximación a sus espectros.

En el modelo se adicionada una constante de "offset" a la expresión para representar el ruido en los detectores debido a la electrónica empleada. Las expresiones utilizadas para representar la respuesta espectral tanto del sensor S , como la de los filtros F_i , están dados por³⁹:

$$S(\lambda, \lambda_s) = y_0 + S_0 \exp\left[-\alpha_s (\lambda - \lambda_s)^2\right], \quad (4.1)$$

$$F_i(\lambda) = y_{oi} + F_{oi} \exp\left[-\alpha_{fi} (\lambda - \lambda_{fi})^2\right], \text{ donde } \alpha = \frac{4 \ln 2}{b^2}; \quad i = 1, 2, \dots, \quad (4.2)$$

donde λ es la longitud de onda, $\lambda_{s, fi}$ representan las longitudes de onda de Bragg del sensor y de los filtros; y_0 y y_{oi} son los valores de "offset" del sensor y de los filtros y b es el FWHM.

Una vez se realizan los ajustes a las curvas obtenidas, se calcula la convolución entre la respuesta espectral proveniente del sensor con cada uno de los filtros. De esta manera se llega a tener una lectura de potencia en el fotodetector asociada con cada una de ellas. Para cada filtro se expresa la convolución como:

$$\frac{P_i(\lambda_s)}{\beta} = 2ay_0y_{oi} + y_0F_{oi}\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{fi}}} + y_0S_0\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_s} + F_{oi}S_0\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{fi} + \alpha_s}}} \exp\left[-\frac{\alpha_{fi}\alpha_s}{\alpha_{fi} + \alpha_s}(\lambda_s - \lambda_{fi})^2\right] \quad (4.3)$$

donde a es una constante de límite de integración y β es una constante que lleva en cuenta las variaciones de potencia óptica emitidas por la fuente, las perdidas en el circuito óptico y en los foto-detectores.

Como ya se mencionó, en esta técnica se reporta el cociente entre los valores de potencia óptica obtenidos con el fin de eliminar el parámetro β del sistema interrogador. Por ende, el dato a reporta es la siguiente expresión

$$f = \frac{P_1}{P_2} \quad (4.4)$$

Dependiendo de cuál valor de potencia óptica es el que va en el denominador, el sistema ahora tiene una referencia o, mejor dicho, el sistema es auto-referenciado. Obviamente, se deben cumplir unas restricciones sobre el FWHM de las rejillas y la separación espectral de los picos centrales de los filtros, que logran que siempre se obtenga una potencia óptica asociada a cada filtro.

La posibilidad de aprovechar la respuesta espectral de una FBG grabada en una fibra de alta birrefringencia como elemento de interrogación para sensores ópticos, en este caso de temperatura, se demuestra en las Figuras 4.3 y 4.4, en la que se ve claramente que la técnica DFF está limitada, únicamente, por la separación de los picos de reflexión de la FBG asociados a los ejes rápido y lento de la fibra especial. Las pendientes de las curvas en la Figura 4.4 indican la sensibilidad del sistema de interrogación.

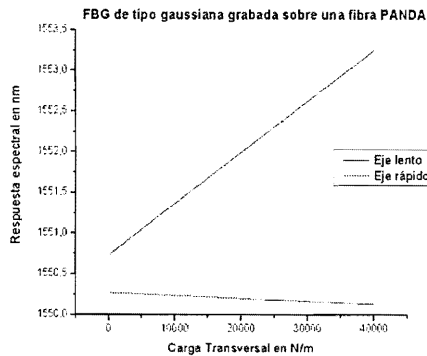


FIGURA 4.3 Respuesta espectral de una FBG grabada en una fibra PANDA con cargas entre 0 y 40 N/mm

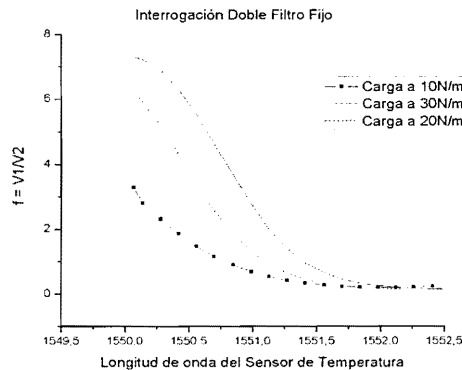


FIGURA 4.4 Curvas de interrogación por DFF para un sensor de temperatura, cuya longitud de onda varía entre 0°C y 200°C

Al igual que en capítulo anterior, estos resultados llevaron a la presentación de dos ponencias en un evento científico. La unidad opto-electrónica se relaciona en el trabajo titulado "Tecnología a fibra óptica: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, un referente Latinoamericano", ver en anexos.

5. MULTIPLEXACIÓN E INTERROGACIÓN REMOTA DE SENSORES ÓPTICOS

Este eje es el que conllevan mayor integración tecnológica, pues, se implica tanto la multiplexación como la interrogación remota de un conjunto de FBG sensoras, para lo cual se propuso dos alternativas: *i)* lectura espectral con un analizador de espectros ópticos (OSA); *ii)* interrogación con un sistema autocontenido basado en fuente de luz sintonizable.

Para interrogar varias FBG sensoras con el OSA, basta iluminarlas, ya sea través de un acoplador direccional o un circular óptico, a una fuente de luz banda ancha que cubra sus respuestas espectrales, de manera que la luz reflejada por cada rejilla se acopla a este equipo. Es claro que esta lectura espectral debe ser procesada para reducir la incertidumbre en la medida. Una clara demostración de esta alternativa de interrogación, así como de la potencialidad de la tecnología de los sensores de FBG, es en la construcción de perfiles térmicos, de gran interés en áreas estratégicas para el país como la de exploración de petróleo y gas, control de esfuerzos en puentes y vías de comunicación, medio ambiente, entre otros.

Un trabajo exploratorio en este tema apoyado con el OSA consistió en mostrar cómo a partir del uso de la técnica de multiplexación de FBG, es posible la construcción del perfil térmico sobre una barra de cobre. Se dispuso de un arreglo de tres FBG para evaluar los cambios en la respuesta de las rejillas ante los cambios de temperatura que experimentan tres puntos sobre la barra.

El trabajo, relacionado en el anexo de este informe, se muestra cómo, tras la calibración de los sensores, se realiza el monitoreo de los tres puntos de la barra durante el proceso de calentamiento. De esta manera se pudo conocer, de un lado, un perfil de temperaturas aproximado para diferentes tiempos y el proceso hacia el estado estacionario. El potencial de este ensayo tiene como escalado las aplicaciones en el sector de la construcción e ingeniería civil, para lo cual se viene cooperando con empresas del ramo.

Para la multiplexación de sensores ópticos de FBG usando un sistema auto-contenido basado en sistema sintonizable, se continuó con la filosofía de adelantar trabajos exploratorios que muestren la potencialidad de esta tecnología en sectores productivos para el País. Se realizó un análisis de la deformación que sufre una viga de concreto cuando es sometida a carga estática, para lo cual algunas FBG sensoras se embebieron y otras se

pegaron superficialmente a la estructura; y para detectar la respuesta espectral de las rejillas se apoyó tanto en lecturas de un analizador de espectros ópticos como de un sistema auto-contenido comercial. Detalles de este trabajo se pueden ver en el trabajo titulado "Análisis de deformaciones mecánicas en una viga empleando redes de Bragg en fibra óptica" (ver anexo).

Paralelamente a este trabajo de multiplexación de sensores ópticos, en este eje se contempla la posibilidad de acceder vía Internet a una de las unidades de interrogación, esto es, la unidad opto-electrónica desarrollada, el OSA o el sistema autocontenido basado en fuente de luz sintonizable.

Por el enfoque adoptado, esta fase implicó el desarrollo de una plataforma hardware-software para controlar vía Web equipos de laboratorio, dado que la propuesta es usar sistemas embebidos TINI que se comunican con un servidor de aplicaciones TOMCAT y un servidor de bases de datos MySQL, siendo este un gran paso en la consolidación de un sistema de sensado óptico distribuido monitoreado desde Internet por usar entornos de desarrollo (IDE) de libre distribución. El diagrama de la plataforma desarrollada se muestra en la Figura 5.1. Como una primera prueba, se consideró el control de un experimento de gran interés en óptica, el cual se publicó con el título "Web laboratory experiences for elearning: The Michelson interferometer" (ver anexo).

Con la experiencia adquirida en la multiplexación de sensores ópticos basados en FBG y evaluada la plataforma de monitoreo y control de equipos de laboratorio, se inició la integración de estas dos fases. Para el segundo año del proyecto se tenía el control vía Internet del OSA como del sistema auto-contenido sintonizable. No obstante, se encontró que la adquisición de datos desde estos equipos requiere de un tiempo un tanto prolongado, que si se piensa en la implementación a futuro de sistemas de monitoreo y control, o en los costos por el tiempo de conexión que un usuario necesitaría, no ofrece las mejores condiciones de operación. Esta integración bajo la filosofía anteriormente descrita queda como una tarea pendiente del proyecto.

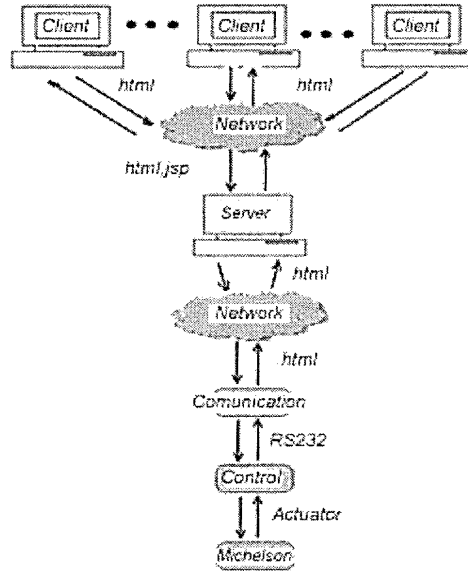


FIGURA 5.1. Diagrama de la plataforma para monitorear y controlar via Web equipos de laboratorio.

6. SÍNTESIS Y RELACIÓN DE RESULTADOS

Con los tres subsistemas fotónicos abordados en este proyecto, fuentes de luz láser multilínea, sensores de fibra óptica y su opto-electrónica asociada y multiplexación e interrogación remota de sensores ópticos, se tiene una plataforma de conocimiento científico-técnico para incorporar la tecnología de los sensores de fibra óptica en el país.

Por una parte, la realización exitosa de láseres de fibra óptica multilínea y su empleo en sensores ópticos y su multiplexación ya es una realidad en el País. De igual manera, se tiene la experiencia necesaria para desarrollar sensores de fibra óptica con su opto-electrónica de procesamiento asociada, en la cual se viene consolidando una nueva técnica de interrogación de FBG con la fibra Hi-Bi tipo PANDA. El balance de esta parte del proyecto es importante por su inmediata transferencia al sector productivo del País, como se comenta en las secciones 6.2 y 6.3 de este informe. Las experiencias de multiplexación e interrogación remota muestran que esta es una tecnología estratégica para el país por su compatibilidad con tecnologías basadas en fibras ópticas. En este punto se puede decir que ya se cuenta con un desarrollo tecnológico propio como para pensar en nuevas áreas productivas para el País; además, se cuenta con la experiencia y el recurso humano necesario como para enfrentar procesos de transferencia tecnología en esta temática.

De otro lado, los resultados del proyecto se han puesto al alcance de la comunidad científica a través de dos (2) publicaciones, además de presentaciones en eventos tanto nacionales como internacionales. Su desarrollo dio lugar a la formación de investigadores a través de un Trabajo Dirigido de Grado y una Tesis de Maestría.

Por último, el proyecto deja abiertas varias perspectivas de investigación y desarrollo interesantes, que se comentan a continuación:

1. Ante los desarrollos alcanzados en los últimos años en la tecnología de los láseres de fibra óptica, en la que se reportan potencias de emisión de decenas de vatios de potencia óptica, se tiene la perspectiva de trabajar en esta tecnología en aplicaciones industriales tales como marcado y grabado, soldadura, corte, perforación, procesos de revestimiento y limpieza. El atractivo es que estos láseres, por su estructura a fibra óptica son libres de mantenimiento, compactos y de bajo costo, lo que hace prever que su uso irá en aumento en un número muy importante de sectores productivos.

2. Para el grupo investigador en un gran compromiso liderar el uso cada vez mayor de técnicas y dispositivos, y en general, de subsistemas fotónicos en sistemas de sensado y control de estructuras y procesos productivos. Por lo tanto, esta será una preocupación permanente, pues no solamente se debe consolidar la capacidad nacional en I+D en esta área, sino que según un reciente estudio ésta será la tecnología estándar en muchos sectores pertinentes para el País.

6.1 RELACIÓN DE RESULTADOS DE GENERACIÓN DE CONOCIMIENTOS

OBJETIVOS	RESULTADOS ESPERADOS	ESTADO DE AVANCE	INDICADOR VERIFICABLE ESPERADO U OBTENIDO	OBSERVACIONES
<p>Viabilización de un sistema de sensores de fibra óptica distribuidos que utiliza tecnología FBG-WDM.</p> <p>(Nota: La viabilización arriba mencionada comprende tanto el trabajo en láseres con fibras amplificadoras como la incorporación de tecnologías de multiplexación WDM de los sensores ópticos).</p>	<p>Envío de un (1) artículo a una revista indexada por Colciencias, ISI, Scielo.</p>	<p>Cubierto plenamente</p>	<p><u>Artículo:</u> "Tecnología a fibra óptica en la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín", Revista DYNA, vol. 75, No. 156, pp. 231-239, 2008.</p> <p><u>Trabajos en eventos científicos:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. "Unidad opto-electronica para interrogar sensores basados en rejillas de Bragg en fibra óptica", <i>XXI Congreso Nacional de Física</i>, 2007. 2. "Técnica de interrogacion "doble filtro fijo" para sensores ópticos basado en rejillas de Bragg en fibras ópticas de alta birrefringencia", <i>XXI Congreso Nacional de Física</i>, Ibagué, 2007. 3. "Monitoreo cuasi-distribuido de temperatura mediante la multiplexacion de sensores opticos a fibra", <i>XXI Congreso Nacional de Física</i>, 2007. 4. "Láser sintonizable en anillo de fibra óptica dopada con Erbío", <i>XI Encuentro Nacional de Óptica y II Conferencia Andina y del Caribe en Óptica</i> 	<p>Los compromisos se superaron ampliamente.</p>

			<p>y sus Aplicaciones, 2008.</p> <p>5. "Análisis de deformaciones mecánicas en una viga empleando redes de Bragg en fibra óptica", <i>XI Encuentro Nacional de Óptica y II Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones</i>, 2008.</p>	
Interrogación remota de sensores ópticos.	Ponencia en un evento nacional o internacional.	Cubierto plenamente	<p>Capítulo de libro:</p> <p>R. Restrepo, D. Aristizábal, A. Montoya, Jean P. Jiménez H., Pedro Torres, "Web laboratory experiences for elearning: The Michelson interferometer", <i>Innovative Techniques in Instruction Technology, E-learning, E-assessment and Education</i>, Springer, pp. 19-23, 2008</p>	Este compromiso se superó ampliamente.

RESULTADO	COMPROMISOS ADQUIRIDOS	LOGROS
Formación de recurso humano a nivel de posgrado	Una (1) tesis de maestría	<ul style="list-style-type: none"> • Tesis de maestría del estudiante Jean Pierre Jiménez Herrera. El estudiante ha realizado publicación. Se tiene programada la defensa de su tesis a finales de 2009. • Trabajo de grado del estudiante Jesús David Causado Buelvas titulado "Unidad optoelectronica sensora basada en redes de bragg en fibra óptica", Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, Diciembre 2007.
Capacitación en tecnología de fibra óptica	Curso de extensión	<ul style="list-style-type: none"> • Se ha participado en encuentros empresa-universidad como la de TECNOVA. • Se ofreció un curso de extensión presentando la tecnología desarrollada en el proyecto.
Cooperación científica	Pasantía internacional	Un miembro del grupo investigador, Jesús David Causado, adelantó pasantía en un laboratorio de Brasil para coordinar la fabricación de FBG para el proyecto.

6.3 RELACIÓN DE RESULTADOS DE APROPIACIÓN SOCIAL DEL CONOCIMIENTO

RESULTADOS	COMPROMISOS ADQUIRIDOS	LOGROS
Apropiación de conocimiento en sensores ópticos	Estudiantes de pregrado que tomen la línea de Profundización en Óptica o la línea de Profundización en Instrumentación Científica e Industrial (énfasis en redes de sensores) que actualmente ofrece la Escuela de Física de la Universidad Nacional de Colombia.	En el último año, la línea de Profundización en Óptica acredita, en promedio, 15 estudiantes de pregrado, siendo que una buena proporción de ellos han participado en eventos científicos nacionales con ponencias relacionadas con en el tema de los sensores de fibra óptica.
Tecnología de multiplexación e interrogación remota de sensores ópticos	Presentación de esta tecnología a las empresas que lo soliciten y/o participación en un evento de desarrollo tecnológico.	Se ha participado en encuentros empresa-universidad como la de TECNOVA. Actualmente se adelanta una cooperación con una empresa del sector de la construcción civil y otra en el sector de petróleo y gas

BIBLIOGRAFÍA

1. Ver, por ejemplo, J. Dakin, B. Culshaw, *Optical Fibre Sensors: Principles and Components*, Boston: Artech House, 1988. También, G. Pitt, "Optical Fiber Sensors", *Fiber Optics Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1990.
2. En internet se pueden encontrar más de 8000 sitios relacionados con este tema.
3. Ver, por ejemplo, <http://www.bluerr.com/>
4. —, *Fiber Optic Sensor Technologies & Markets in Civil Structures*, Information Gatekeepers (<http://www.mindbranch.com/products/R403-0009.html>)
5. Ver, por ejemplo, http://www.spa.com/aedp_fodas.htm.
6. <http://www.sabeus.com>.
7. Borinski, J., Meller, S., Pulliam, W., Murphy, K., "Optical Flight Sensors for In-Flight Health Monitoring", *SPIE Proceedings*, vol. 3986, Newport Beach, CA, Mar. 6, 2000
8. R.L. Lopushansky, "All-Optical Shipboard Sensing System", 45th International Instrumentation Symposium, Albuquerque, NM, 1999.
9. Ramaier Narayanaswamy Otto S. Wolfbeis, *Optical Sensors: Industrial, Environmental & Diagnostic Applications*, Springer, 2004
10. B. J. Prince, M. J. Prince, N. T. Kaltcheva, T. A. Zembrowski, A. W. Schwabacher, P. Geissinger, "Optical Response of Fluorescent Chemosensors Embedded in a SPOCC-Resin Cladding of Optical Fibres to Changes in the Chemical Environment", *Conference on Physical Chemistry*, New Zealand, 2002.
11. Brian R. Eggins, *Chemical Sensors & Biosensors*, Chapter 6, John Wiley & Sons, 2002.
12. D. A. Krohn, *Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications*, 3th Edition, Chapter 13, Instrumentation Systems, 2002.
13. J. Dexheimer, R. Hannemann, *Investment opportunities in sensor networking: Dust, hype, fuzz, and reality*, First Analysis, 2005. (<http://www.facvc.com/index.asp?PID=18&CID=626>).
14. C. R. Giles, T. Erdogan, V. Mizrahi, "Reflection-induced changes in the optical spectra of 980 nm QW lasers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, pp. 903-906, 1994.
15. B. F. Ventrudo, G. A. Rogers, G. S. Lick, D. Hargreaves, T. N. Demayo, "Wavelength and intensity stabilization of 980 nm diode lasers coupled to fiber Bragg grating", *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 2147-2149, 1994.
16. A. Hamakawa, T. Kato, G. Sasaki, M. Higehara, "Wavelength stabilization of 1.48 μm pump laser by fiber grating", in *Proc. ECOC'96*, Oslo, Norway, 1996, paper MoC.3.6.

17. S. A. Grugg, "1.3 μm cascade Raman amplifiers", in *Topical Meeting Optical Amplifiers and Their Applications*, Davos, Switzerland, 1995, paper SaA1.
18. C. R. Giles, A McCormick, "Bidirectional transmission to reduce fiber FWM penalty in lightwave systems", in *Proc OAA'95*, Davos, Switzerland, 1995, paper Th D1-2.
19. V. Mirzrahi, T. Erdogan, D. J. DiGiovanni, P. J. Lemaire, W. M. MacDonald, S. G. Kosinski, S. Cabot, J. E. Sipe, "Four channel fiber grating demultiplexer", *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 780-781, 1994.
20. A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, P. J. Lemaire, N. S. Bergano, C. R. Davidson, "Long-period fiber-grating-based gain equalizers", *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 336-338, 1996.
21. P. F. Wysocki, J. Judkins, R. Espindola, M. Andrejco, A. Vengsarkar, K. Walter, "Erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period gratings", in *Proc OFC'97*, Dallas, 1997, postdeadline paper PD2.
22. W. H. Loh, R. I. Laming, A. D. Ellis, D. Arkinson, "Dispersion compensated 10 Gbit/s transmission over 700 km of standard single mode fiber with 10 cm chirped fiber grating and duobinary transmitter", in *Proc. OAA'96*, 1996, paper PD30-2.
23. R. Kashyap, A. Ellis, D. Maryon, H.-G. Froehlich, A. Swanton, D. J. Arnes, "Eight wavelength \times 10 Gb/s simultaneous dispersion compensation over 100 km single-mode fiber using a single 10 nanometer bandwidth, 1.3 meter long, super-step-chirped fiber Bragg grating with a continuous delay of 13.5 nanoseconds", in *Proc ECOC'96*, 1996, paper ThB3.2.
24. P. Torres, M. C. R. Carvalho, L. C. G. Valente, "Security system for optical communication signal with fiber Bragg gratings", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, vol. 50, pp. 13-16, 2002.
25. H. Fathallah, L. A. Rusch, S. LaRochelle, "Passive optical fast frequency-hop CDMA communication system," *J. Lightwave Technol.* Vol. 17, pp. 397-405, 1999.
26. L. C. G. Valente, A. L. C. Triques, P. Torres, L. C. B. Linares, J. P. von der Weid, "Optical Fiber Polarization Delay Line Based on Unchirped Fiber Bragg Grating", *Journal Microwave and Optoelectronics*, vol. 3, pp. 80-86, 2004.
27. —, "Intrinsically-Safe Fiber Optic Sensors Reduce Cost and Improve Process Control", ISA EXPO 2003, (http://www.isa.org/Template.cfm?Section=Shop_ISA&Template=/CustomSource/ISA/StoreIntro/AdvancedSearchDisplay.cfm).
28. K. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, 32, p. 647 (1978).
29. G. Meltz, W.W. Morey, W.H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Opt. Lett.*, 14, pp. 823-825, (1989).

30. I. Abe, (2004) *Redes de Bragg em fibras óticas de alta birrefringência: Produção, caracterização e aplicações*. Tese (Doutor em Ciências). Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.
31. G. Chen, L. Liu, H. Jia, J. Yu, L. Xu, W. Wang, "Simultaneous Strain and Temperature Measurements With Fiber Bragg Grating Written in Novel Hi-Bi Optical Fiber," *IEEE Phot. Technol. Lett.* 16, 221- (2004)
32. X. Dong, Y. Liu, Z. Liu, X. Dong, "Simultaneous displacement and temperature measurement with a cantilever-based fiber Bragg grating sensor," *Opt. Commun.* 192, 213-(2001)
33. C. Fernández-Valdivieso, I. Matías, F. Arregui, "Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermochromic material," *Sensors and Actuators A.* 101, 107- (2002)
34. M. Song, S. Lee, S. Choi, B. Lee, "Simultaneous measurement of temperature and strain using two fiber Bragg gratings embedded in a glass tube," *Opt. Fiber Technol.* 3, p. 194 (1997).
35. C. Caucheteur, F. Lhommé, K. Chah, M. Blondel, P. Mégret, "Simultaneous strain and temperature sensor based on the numerical reconstruction of polarization maintaining fiber Bragg gratings", *Opt. Lasers Engin.* (2006).
36. O. Frazão, R. Romero, F. Araujo, L. Ferreira, and J. Santos, "Strain-temperature discrimination using a step spectrum profile fibre Bragg grating arrangement", *Sensors and Actuators A.* 120, 490- (2005)
37. R. Cardoso, I. Abe, M. Santos, M. Pontes, H. Kalinowski, "Strain and temperature measurements in power systems with multiplexed fiber optics Bragg grating sensors," *J. Microwave Optoelect.* 2, 54- (2000)
38. S. A. Mastro, (2005) *Optomechanical behavior of embedded fiber Bragg grating strain sensor*. Thesis (Ph.D. in Materials Engineering). Drexel University.
39. L. C. S. Nunes (2004) *Análise da técnica de demodulação baseada em filtros fixos na interrogação de sensores a rede de Bragg em fibras ópticas*. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.
40. Systems Planning and Analysis, Inc., <http://www.spa.com/aedp.htm>.
41. C. G. Askins, M. A. Putnam, G. M. Williams, E. J. Doran, *Proc. SPIE*, vol. 2071, p. 12, 1993
42. M. G. Xu, H. Gieger, J.-L. Archambault, L. Reekie, J. P. Dakin, *Proc. SPIE*, vol. 2071, p. 59, 1993.
43. R. Leiderman, C. J. S. Matos, A. M. B. Braga, W. Margulis, C. L. G. Valente, "Interrogation methods for fiber Bragg grating sensors", *Proc. SPIE*, vol. 3666, pp. 4133-4144, 1999.
44. G. Wehrle, P. Nohama, H. J. Kalinowski, P. I. Torres, L. C. G. Valente, "A fiber optic Bragg grating strain sensor for monitoring ventilatory movements", *Measurement Science and Technology*, vol. 12, pp. 805-809, 2001.
45. Micron Optics, Inc., <http://www.micronoptics.com>.

46. Jorge Alberto Gómez López (2006) *Láser de fibra óptica sintonizable para caracterización de dispositivos de la banda C de telecomunicaciones*, Tesis (Maestría en Ciencias-Física) Universidad Nacional de Colombia.

ANEXO 1

SOPORTES DEL INFORME TÉCNICO DEL PROYECTO (Relación de documentos)

1. Copia del artículo titulado "Tecnología a fibra óptica en la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín", Revista DYNA, vol. 75, No. 156, pp. 231-239, 2008. (P1)
2. Copia de capítulo de libro "Web laboratory experiences for elearning: The Michelson interferometer", *Innovative Techniques in Instruction Technology, E-learning, E-assessment and Education*, Springer, pp. 19-23, 2008. (P2)
3. Copia del trabajo en ponencia con certificado "Unidad opto-electronica para interrogar sensores basados en rejillas de Bragg en fibra óptica", *XXI Congreso Nacional de Física*, 2007. (P3)
4. Copia del trabajo en ponencia con certificado "Técnica de interrogacion "doble filtro fijo" para sensores ópticos basado en rejillas de Bragg en fibras ópticas de alta birrefringencia", *XXI Congreso Nacional de Física*, Ibagué, 2007. (P4)
5. Copia del trabajo en ponencia con certificado "Monitoreo cuasi-distribuido de temperatura mediante la multiplexacion de sensores opticos a fibra", *XXI Congreso Nacional de Física*, 2007. (P5)
6. Copia del trabajo en ponencia con certificado "Láser sintonizable en anillo de fibra óptica dopada con Erblio", *XI Encuentro Nacional de Óptica y II Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones*, 2008. (P6)
7. Copia del trabajo en ponencia con certificado "Análisis de deformaciones mecánicas en una viga empleando redes de Bragg en fibra óptica", *XI Encuentro Nacional de Óptica y II Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones*, 2008. (P7)
8. Copia carátula del Trabajo de Grado del estudiante Jesús David Causado Buelvas titulado "*Unidad optoelectronica sensora basada en redes de bragg en fibra óptica*", Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, Diciembre 2007. (P8)
9. Certificado de participación en Encuentro Empresa-Universidad TECNNOVA 2008. (P9)
10. Copia del promocional "Curso teórico-práctico de sensores de fibra óptica", Universidad Nacional de Colombia. (P10)

TECNOLOGIA A FIBRA OPTICA: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLIN, “UN REFERENTE LATINOAMERICANO”

FIBER OPTIC TECHNOLOGY: NATIONAL UNIVERSITY OF COLOMBIA MEDELLIN CAMPUS, “A LATINOAMERICAN REFERENT”

RODRIGO ACUÑA

Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, racuna@unal.edu.co

JORGE GÓMEZ

Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, jagomez3@unalmed.edu.co

VICTOR ARISTIZABAL

Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, vharisti@unal.edu.co

PEDRO TORRES

Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, pitorres@unal.edu.co

Recibido para revisar Agosto 03 de 2007, aceptado Enero 28 de 2008, versión final Febrero 04 de 2008

RESUMEN: En este artículo se muestran algunos resultados de las investigaciones realizadas por el grupo de Fotónica y Opto-electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Se hace una breve reseña de la creación del grupo y se describen las principales aplicaciones desarrolladas, las cuales convierten al grupo en un referente Latinoamericano en el área. Se ilustran aplicaciones de las redes de Bragg en fibra óptica en sensores, simulaciones computacionales de guías de onda ópticas y la construcción de fuentes de luz láser a fibra óptica.

PALABRAS CLAVE: Fibra óptica, redes de Bragg, simulación, láser a fibra óptica.

ABSTRACT: In this paper some results concerning to researches completed by the Photonics and Opto-electronics Group of the National University of Colombia, Medellín campus, are shown. Firstly, a brief account of the creation of the group and the main applications in fiber optic technology are given, which situate to the Group as one of the most reputable University group in Latin-American. Applications of fiber Bragg gratings sensor technology, computational simulation of optical waveguide, and fiber laser are shown.

KEYWORDS: Fiber optics, fiber Bragg grating, computational simulation, fiber optic laser.

1. INTRODUCCION

El grupo de Fotónica y Opto-Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia- Medellín fue creado en el año 2000 como consecuencia del estudio sobre la pertinencia de desarrollar

una línea de investigación, desarrollo en innovación en sistemas a fibra óptica en Colombia. En sus inicios el grupo se concentró en el desarrollo de sistemas sensores basados en FBGs (Redes de Bragg en Fibra) debido a la

Cooperación internacional con el laboratorio de sensores a fibra óptica de la Pontificia Universidade Catolica do Rio de Janeiro- Brasil; de esta forma fue posible explorar diferentes aplicaciones en sensores a fibra óptica, al igual que diferentes técnicas de medición. Posteriormente el grupo incursionó en el desarrollo de herramientas de simulación computacional que permitieron el estudio de la forma en que se guía la luz en fibras especiales y guías de onda en general. Desde el año 2005 se viene trabajando en la construcción de fuentes de luz sintonizables basadas en fibras dopadas con iones de tierras raras con el ánimo de construir sistemas de multiplexación de sensores. El grupo está formado por Profesores y estudiantes asociados a la Escuela de Física con títulos de Ph.D y M.Sc. y cuenta con convenios de cooperación con instituciones de Ciencia y Tecnología Brasileñas y con ACREO-Suecia. El objetivo de este trabajo es entonces mostrar algunos de los resultados de los trabajos desarrollados por el grupo, que lo convierten en un grupo de vanguardia en Latinoamérica.

2 APLICACIONES DE FBGs

2.1 Generalidades

Una FBG es una fibra óptica en la cual el índice de refracción en cierta región del núcleo ha sido perturbado formando una modulación periódica o cuasi-periódica. Si luz con cierto espectro incide en la FBG parte del espectro es reflejado, y la máxima reflexión es dada en la llamada Longitud de Onda de Bragg, esto es;

$$\lambda_B = 2\lambda n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

donde n_{eff} es el índice efectivo y Λ la periodicidad de la variación del índice del núcleo. Como se puede observar de la ecuación anterior, la longitud de onda de Bragg depende del índice de refracción efectivo y la periodicidad de la red, los cuales pueden ser afectados externamente por alteraciones

mecánicas y térmicas del medio que la rodea; por lo tanto es posible cuantificar estas alteraciones con el simple hecho de medir los cambios en λ_B debido a las variaciones en n_{eff} , Λ ó en ambas.

2.2 Sensor de Campo Magnético

En condiciones isotérmicas es posible demostrar que el corrimiento espectral de la longitud de onda de Bragg, según la ecuación (1) está dada por [1]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \varepsilon_z \quad (2)$$

donde ε_z es la deformación de red y p_e es el coeficiente elasto-óptico efectivo para deformaciones mecánicas longitudinales. Si utilizamos un material magnetostrictivo como el terfenol, el cual responde a cambios lineales de deformación con el cuadrado del campo magnético en la dirección de este [2], para pequeñas intensidades de campo será posible escribir la ecuación (2) como [3,4,5]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) k \Delta B^2 \quad (3)$$

donde k es un parámetro relacionado con el magnetostrictivo. El montaje experimental utilizado se muestra en la Figura 1. El magnetostrictivo empleado es fabricado por la compañía Adaptronic y sus especificaciones se pueden encontrar en la referencia [6]. A una barra de dicho material se le adhirieron dos FBGs separadas una distancia de 1.4cm con el propósito de observar la deformación del terfenol en diferentes puntos de la muestra. La longitud de cada FBG era de aproximadamente 5mm y una reflectividad del 100%. Se utilizó un imán en forma de anillo para producir el campo magnético que afectaba el comportamiento del magneto-strictivo. Durante la experiencia se mantuvo las redes a temperatura de 20°C; por lo tanto podemos despreciar cualquier efecto de temperatura sobre las redes.

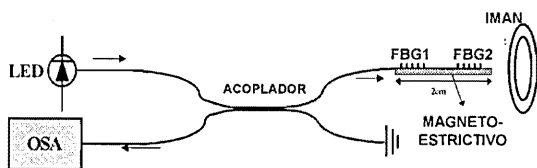


Figura 1. Configuración del montaje experimental realizado para medir campo magnético con redes de Bragg

Figure 1. Developed experimental setup to measure magnetic field using fiber Bragg grating

El comportamiento de λ_B en FBG₁ y FBG₂ en función del cuadrado del campo magnético para la región lineal cercana al origen se muestran en las Figura 2 y Figura 3 respectivamente.

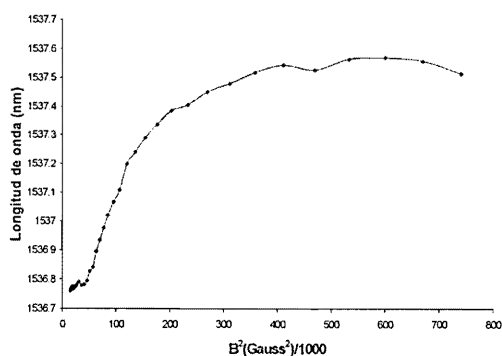


Figura 2. Respuesta FBG1 como sensor de campo

Figure 2. Response of the FBG1 sensor as a function of magnetic field

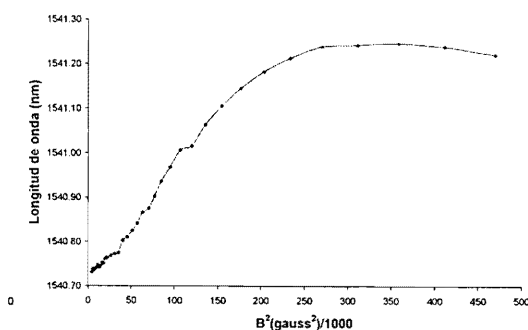


Figura 3. Respuesta FBG2 como sensor magnético de campo magnético

Figure 3. Response of the FBG2 sensor as a function of magnetic field

De las Figuras 2 y 3; las cuales tienen una incertidumbre de 2pm en la longitud de onda y $0.2G^2$ en B^2 ; se observan que para campos magnéticos pequeños, hasta aproximadamente 150000 Gauss^2 , el cambio en la longitud de onda de Bragg, es proporcional al cuadrado del campo, con sensibilidades alrededor de $4.07644 \times 10^{-6} \text{ nm}/(G^2 \times 1000)$. Además, es posible ver que la linealidad se conserva a pesar de estar las redes colocadas en posiciones diferentes. Por lo tanto, esta técnica resulta ser útil para el diseño de sensores de campo magnético; aplicación ésta de gran interés en sistemas eléctricos.

2.3 Sensor de Temperatura

En condiciones de no deformación mecánica es posible demostrar que el corrimiento espectral de la longitud de onda de Bragg, según la ecuación (1) está dada por [1]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha + \xi) \Delta T \quad (4)$$

donde α es el coeficiente de expansión térmica del silicio y ξ es el coeficiente termo-óptico. De aquí que es posible la construcción de un sensor de temperatura con el monitoreo del corrimiento espectral de la respuesta de la red de Bragg. Además es importante notar que se espera un comportamiento totalmente lineal con los cambios térmicos.

Para llevar a cabo la interrogación de la red se utilizó la técnica conocida como filtro fijo. El principio de la técnica se puede explicar considerando la Figura 4. La luz de un LED banda ancha ilumina mediante el acoplador direccional la FBG de referencia reflejándose parte del espectro del LED. La señal reflejada pasa nuevamente por el acoplador direccional iluminando la FBG sensora, que a su vez refleja parte del espectro proveniente de la FBG de referencia; así, la potencia óptica medida por un fotodetector resulta ser proporcional a la convolución (área de intersección) entre los espectros de las redes. De esta manera, cambios en la separación relativa de los espectros de las redes se traducen en cambios de lectura de potencia óptica en el fotodetector.

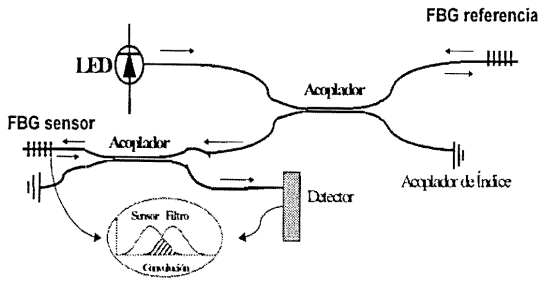


Figura 4. Montaje experimental de la técnica de filtro fijo
Figure 4. Experimental setup for the fixed filter technique

Siguiendo el montaje en la Figura 4, donde se utilizaron acopladores marca Newport 50/50, un medidor de potencia óptica marca EXFO, LED a 1550nm y ancho de banda de 50nm. Las redes de Bragg utilizadas como filtro y sensor poseen las siguientes características: Longitud de onda de Bragg 1550.49nm y 1549.27nm, respectivamente, ancho espectral de 2.7nm y 2.8nm y reflectividades del 40%. Para producir cambios de temperatura sobre la FBG sensora, la red se insertó en un calorímetro con agua, que inicialmente estaba a una temperatura de 7°C, la cual aumenta por medio de una bombilla insertada al calorímetro. La medida de temperatura se hizo por medio de una termocupla previamente calibrada. Los resultados obtenidos de curva de calibración e histéresis para el sensor de temperatura se muestran en las Figuras 5 y 6 respectivamente. La incertidumbre en las mediciones de potencias es de 0.1nw y 0.1°C en las mediciones de temperaturas.

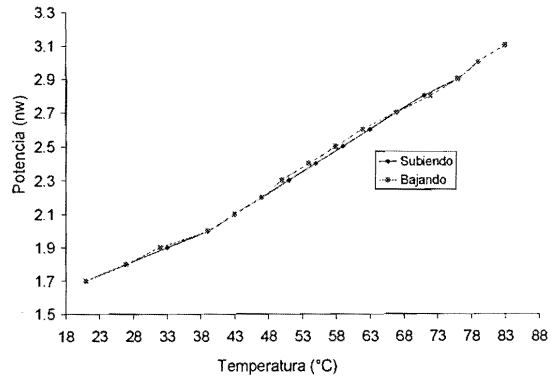


Figura 6. Análisis de histéresis para el sensor de temperatura
Figure 6. Hysteresis analysis of the temperature sensor

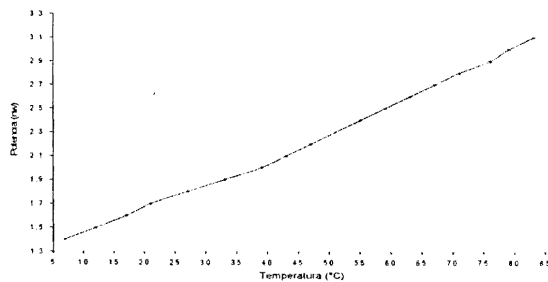


Figura 5. Curva de calibración para el sensor de temperatura
Figure 5. Calibration for the temperature sensor

3 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

3.1 Generalidades

El desarrollo acelerado de las computadoras y el estudio de los diferentes métodos numéricos han hecho de la simulación computacional una herramienta fundamental en procesos de investigación y desarrollo tanto en áreas de las ciencias básicas como de las ingenierías. Para problemas con estructuras complejas, como es el caso de las guías de onda ópticas microestructuradas, las soluciones analíticas se complican excesivamente, por lo que se hace imprescindible el desarrollo de un software que, por una parte, proporcione soluciones completas a partir de la discretización en problemas más simplificados y, por otra, que le sea posible la incorporación de nuevas herramientas de análisis a medida que se tienen nuevos desarrollos tecnológicos. Con esta filosofía se ha venido desarrollando el programa PHOENIX_{OWA} (Optical Waveguide Analysis) para analizar la propagación característica de la luz en guías de onda dieléctricas con cualquier estructura transversal. En esta sección se referencian resultados obtenidos con PHOENIX_{OWA} y se detalla algunas de las características del software en sí mismo, como también del proceso de discretización y de análisis de guías de onda en

general. En el programa se implementaron técnicas matemáticas bien conocidas, como el método de diferencias finitas, el método de los elementos finitos (FEM), técnicas para graficación, entre otras.

3.2 Descripción del software

PHOENIX_{OWA} incorpora varias técnicas numéricas, en particular, el método de los elementos finitos (FEM) para el cálculo de las constantes de propagación y las distribuciones de campo eléctrico (o magnético), y el método de diferencias finitas para evaluar el factor de corrección por efectos de polarización, el parámetro de dispersión y el inverso de la velocidad de grupo. En el caso del método de los elementos finitos, es deseable poder calcular las constantes de propagación y las distribuciones de campo con el menor número de operaciones posibles. Este objetivo se logra enumerando adecuadamente los nodos y discretizando con el menor número posible de elementos la sección transversal del guía de onda a analizar; lo que en parte se puede llevar a cabo mediante el uso de algunas herramientas que brindan programas comerciales basados en elementos finitos como son el Ansys® y Cosmos®.

PHOENIX_{OWA} proporciona un GUI (Graphic User Interface) para facilitarle al usuario la entrada de parámetros y el manejo de resultados de la simulación; además, integra un programa núcleo que se encarga de implementar la técnica de elementos finitos. El funcionamiento de PHOENIX_{OWA} se puede dividir en tres etapas principales: pre-proceso, proceso y pos-proceso. En el *pre-proceso* se define la malla de elementos finitos a utilizar, Figura 7, la cual se consigue mediante, por ejemplo, el programa comercial Ansys® que, además, puede brindar información de deformaciones termo-mecánicas cuando se requiera incorporar la parte estructural. Las propiedades de los materiales como son los índices de refracción de cada región del guía, la longitud de onda de la luz con la cual se va a trabajar, el número y tipos de modos de propagación a calcular, y otras opciones más de cálculo, se definen a través de las ventanas mostradas en la Figura 8. El *proceso* es la parte en la cual el programa núcleo

ejecuta el cálculo utilizando el método de los elementos finitos escalar, del cual se hablará en la siguiente sección. A este programa se le entrega una serie de archivos que poseen la información de la discretización de la estructura de la sección transversal del guía de onda, de los índices de refracción, de la longitud de onda y de otras opciones más. Luego, el programa entrega otra serie de archivos que poseen las constantes de propagación, la distribución de los campos y otros parámetros de interés. El *pos-proceso* es la parte final del análisis por elementos finitos. En él podemos hacer cálculos adicionales, como son las velocidades de grupo, la dispersión y las correcciones necesarias. También podemos ver los resultados en archivos de texto o gráficamente. En esta parte podemos ver la superficie o el degradado en intensidad de la distribución del campo, las curvas de índice efectivo, del inverso de la velocidad de grupo y de la dispersión, Figura 9.

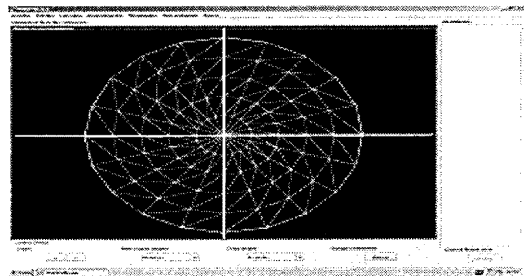


Figura 7. Malla de discretización típica de la sección transversal de un guía de onda, creada con Ansys®

Figure 7. Typical discretization of a waveguide cross section created by Ansys®

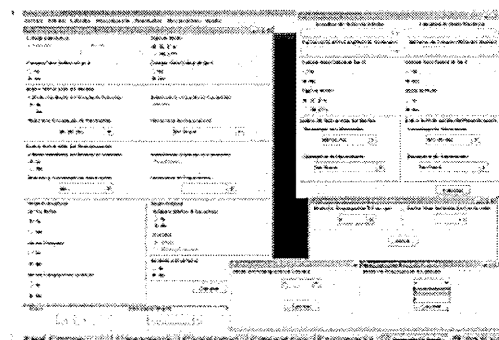


Figura 8. Ventana de opciones adicionales que ofrece PHOENIXOWA

Figure 8. Window of additional option displayed by PHOENIXOWA

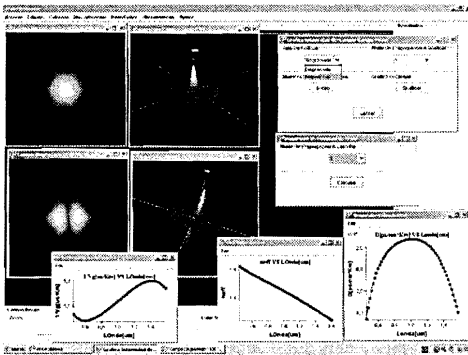


Figura 9. Representación gráfica de resultados que ofrece el programa PHOENIXOWA

Figure 9. Graphical representation offered by PHOENIXOWA for final results

3.3 Análisis de fibras ópticas micro-estructuradas

Desde la introducción de los cristales fotónicos a fibra [7], se han realizado diferentes estructuras que guían señales ópticas utilizando arreglos de huecos micro-estructurados [8]. En estas estructuras, el índice de refracción efectivo de los modos propagantes es un parámetro esencial, pues determina, entre otras, las propiedades de dispersión de la guía de onda.

La gran variedad de posibles formas y arreglos para los huecos demandan el uso de métodos numéricos que permitan modelar adecuadamente la sección transversal de estas estructuras para analizarlas. Adicionalmente, la existencia de interfaces con alto contraste en el índice de refracción entre el material con que se fabrican (generalmente Silicio puro) y los huecos, hace necesaria considerar una solución vectorial para tomar en cuenta los efectos de polarización del campo óptico. Entre las técnicas propuestas, el método de elementos finitos (FEM) se ha utilizado exitosamente, debido a que puede modelar cualquier geometría que tenga la guía de onda y a que se han desarrollado diferentes formulaciones vectoriales. Dentro de estas aproximaciones, existen las que se formulan en término de todas las componentes del campo eléctrico, o magnético, en donde se debe introducir una función de penalidad con coeficientes artificiales para eliminar las soluciones espurias que aparecen mezcladas con

las soluciones físicamente aceptables [9]; es decir, en estos esquemas la exactitud de la solución depende de dicha penalidad. Este problema fue recientemente resuelto con elementos de bode de orden superior [10,11], haciendo posible la solución de la ecuación de onda vectorial a costa del aumento de la complejidad del algoritmo, y por ende, demandando altos requerimientos computacionales y mayor tiempo de procesamiento.

Como una alternativa más eficiente a las soluciones vectoriales, algunos de los autores propusieron [12] mejorar la aproximación escalar para ampliar su rango de validez a longitudes de onda largas y fracciones de llenado de aire grandes en fibras cristal fotónico, incluyendo en el análisis por el método de elementos finitos escalar (SFEM), un término de corrección que da cuenta de los efectos de polarización generados por las interfaces material-hueco. Para este propósito se usaron elementos triangulares de primer orden, cuya región que delimitan es de índice de refracción homogéneo, y se aprovecha el hecho de que el SFEM provee directamente la distribución del campo sobre la sección transversal de la fibra para la corrección al análisis escalar.

Con este software, miembros del grupo han analizado exitosamente fibras de cristal fotónico [12,13], y otras más que incluyen efectos mecánicos y termo-mecánicos [14].

4 FABRICACION DE FUENTES DE LUZ A FIBRA OPTICA

4.1 Generalidades

Las fibras ópticas dopadas con Erblio (EDF) han sido ampliamente estudiadas por su emisión característica en la tercera ventana de transmisión por fibras ópticas, que las convierte en un elemento de sumo interés en la construcción de amplificadores ópticos y fuentes de luz láser [15].

Los modelos teóricos usados para el diseño y posterior construcción de dispositivos basados en fibras ópticas dopadas con Erblio se han basado tradicionalmente en parámetros

espectroscópicos cuya medición no es práctica por los altos requerimientos tecnológicos [16]; esto en algunos casos es un limitante para el diseño optimizado de dispositivos basados en estas fibras. En este trabajo se ilustra una técnica alternativa para el diseño de una cavidad láser lineal a fibra óptica basada en Redes de Bragg.

4.2 Modelo del Láser Lineal A Fibra Óptica

Previamente en la referencia [17] hemos mostrado que es posible expresar las ecuaciones básicas para un Amplificador Óptico a fibra como se muestra a continuación:

$$P_p^{out} = P_p^{in} \exp \left((-\alpha_p L + \frac{P_p^{in} - P_p^{out}}{P_p^{SAT}} + (\frac{P_s^{in} - P_s^{out}}{P_s^{SAT}}) \frac{V_p}{V_s}) \right) \quad (5)$$

$$P_s^{out} = P_s^{in} \exp \left((-\alpha_s L + \frac{P_s^{in} - P_s^{out}}{P_s^{SAT}} + (\frac{P_p^{in} - P_p^{out}}{P_p^{SAT}}) \frac{V_s}{V_p}) \right) \quad (6)$$

Las ecuaciones (5) y (6) representan el principal resultado de la teoría del amplificador óptico a fibra ya que su solución lleva a encontrar la potencia de salida a la longitud de onda de la señal para cada potencia de bombeo de entrada. Lo interesante de estas expresiones es que están dadas en términos de parámetros fácilmente medibles como se muestra en [18] lo que hace inmediato la identificación de parámetros de diseño certeros para un amplificador óptico. De otro lado si pensamos en un láser como un medio amplificador de luz realimentado podremos tener el modelo de un láser a fibra óptica.

El esquema típico de un láser lineal es mostrado en la Figura 10. Un láser a fibra óptica lineal está constituido básicamente por dos espejos de reflectividades R_1 y R_2 en los extremos de un tramo de fibra dopada con Erblio. Ambos espejos son transparentes a la longitud de bombeo así que el bombeo pasa una sola vez a través de la fibra. Para efectos de modelamiento se suponen dos regiones de pérdidas (ξ_1 , ξ_2) asociadas a elementos de sintonización y estabilización [19].

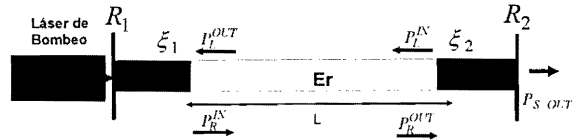


Figura 10. Esquema básico de un láser a Fibra óptica lineal

Figure 10. Basic configuration of a linear fiber laser

Si se evalúa el proceso de amplificación de luz después de un ciclo en la cavidad, es posible demostrar que la potencia de salida se puede escribir como:

$$P = \eta(P_p^{in} - P^{Threshold}) \quad (7)$$

donde la ecuación (7) tiene la forma de la potencia para una fuente láser y por lo tanto esta dada en términos de una eficiencia η y una potencia de bombeo umbral $P^{Threshold}$.

Las equivalencias en términos de los puntos fáciles de [20] para los parámetros de la ecuación (7) se pueden verificar en [19].

4.3 Resultados Experimentales Láser Lineal

La metodología de caracterización descrita en [19] se llevó a cabo con una fibra fabricada por Telebras-Brasil. En la Figura 11 se ilustra una de las curvas experimentales obtenidas para la caracterización a 1550nm.

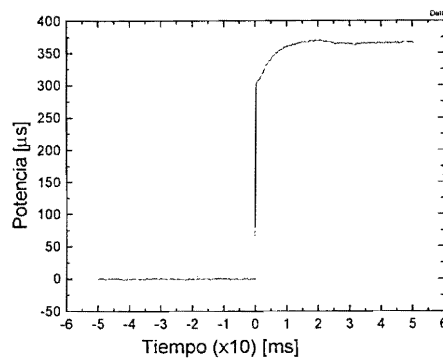


Figura 11. Resultado experimental para una fibra óptica dopada con Er

Figure 11. Experimental results for an Er-doped fiber optics

Con las curvas obtenidas a 1550nm y 980nm fue posible identificar los puntos fáciles y los tiempos característicos del sistema a 1550nm y a 980nm lo que permitió el cálculo directo de los parámetros de las ecuaciones (5) y (6).

Como la configuración lineal es una topología donde las pérdidas son bajas [21], se exploró experimentalmente una cavidad lineal donde los espejos reflectores fueron dos redes de Bragg de alta reflectividad. El esquema utilizado para el montaje se ilustra en la Figura 12.

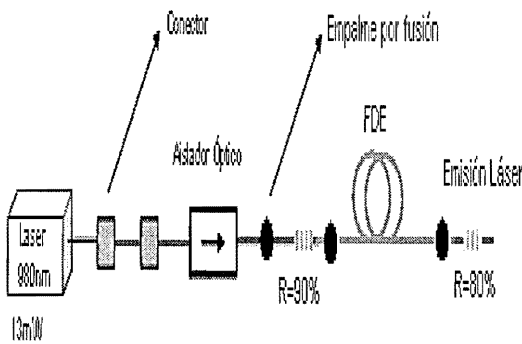


Figura 12. Montaje experimental desarrollado para la caracterización de fibras ópticas dopadas con Er
Figure 12. Developed experimental setup for the characterization of Er-doped fiber optics

Para el montaje experimental se dispuso de un láser Q-Photonics el cual ofreció una potencia de salida de 13mW para el que en condiciones óptimas se necesitaban 37m de FDE según el modelo

Con el montaje experimental descrito fue posible obtener 300 μ W de potencia de salida en 1551.5nm. En la Figura 13 se muestra el espectro de salida el cual fue medido con un Burleigh Multi-line Wavemeter WA-7600 que es un equipo de alta tecnología que tiene resolución de 1pm. Los resultados experimentales estuvieron de acuerdo con los modelos desarrollados con un error de 0,5 dB; de lo que se puede concluir que el modelo propuesto a pesar de ofrecer un camino muy simplificado desde el punto de vista del diseño de las cavidades ofrece resultados muy confiables.

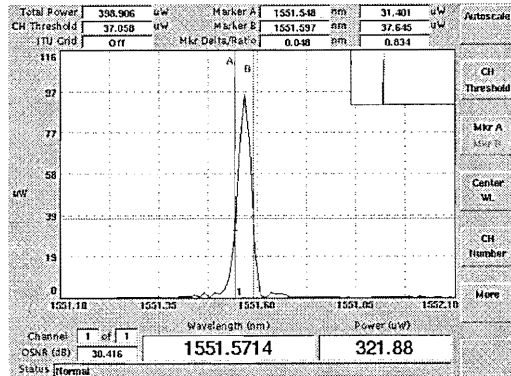


Figura 13. Espectro de emisión del láser a fibra óptica lineal

Figure 13. Spectral emission of the developed linear fiber laser

5 CONCLUSIÓN

En este trabajo se mostraron algunos de los desarrollos del Grupo de Fotónica y optoelectrónica. Se presentó la forma en que el Grupo lleva a cabo procesos de Ingeniería desde la Física en el ámbito de los sistemas a fibra óptica; lo que lo convierte en pionero en nuestro país y uno de los principales referentes latinoamericanos al lado de grupos de Brasil y Argentina.

6 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por Colciencias (Código: 1118-330-18905) y el proyecto DIME – Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, código 30802951.

REFERENCIAS

- [1] ANDREAS OTONOS, "Fiber Bragg Grating", Review Article, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS., pg 4309.1997.
- [2] SANDLUND, L., FAHLANDER, M., CEDELL, T., CLARK, A. E., RESTORFF, J. B., AND WUN-FOGLE, M., "Magnetostriction, elastic moduli, and coupling factors of composite Terfenol-D" ., Journal of Applied Physics, 75, pp. 5656-5658. 1994.

- [3] J. L. CRUZ, A. DÍEZ, M. V. ANDRÉS, A. SEGURA, B. ORTEGA, AND L. DONG, "Fiber Bragg gratings tuned and chirped using magnetic fields," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 3, pp. 235–236. 1997.
- [4] RACHID GAFFSI AND MAHMOUD A. EL-Sherif. "Analysis of Induced-Birefringence Effects on Fiber Bragg Gratings," *OPTICAL FIBER TECHNOLOGY* 6, pg 299.1999.
- [5] J. MORA, A. DÍEZ, J. L. CRUZ, AND M. V. ANDRÉS., "A Magnetostrictive Sensor Interrogated by Fiber Gratings for DC-Current and Temperature Discrimination," *IEEE Photonics Techn. Lett.*, vol. 12, Decembre 2000.
- [6] A study of active engine mounts. Available: <http://www.diva-portal.org/> [Julio 8 de 2007].
- [7] J. C. KNIGHT, T. A. BIRKS, P. S. J. RUSSELL, AND D. M. ATKIN, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding", *Opt. Lett.*, 21, 1547-1549, 1996.
- [8] P. RUSSELL, "Photonic Crystal Fibers", *Science*, 299, 358-362, 2003.
- [9] B. M. A. RAHMAN AND J. B. DAVIES, "Penalty function improvement of waveguide solution by finite elements", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-32, 922-929, 1984.
- [10] M. KOSHIBA AND Y. TSUJI, "Curvilinear hybrid edge/nodal elements with triangular shape for guided-wave problems", *J. Lightwave Technol.*, 18, 737-743, 2000.
- [11] M. KOSHIBA, S. MARUYAMA, AND K. HIRAYAMA, "A vector finite element method with the high-order mixed-interpolating-type triangular elements for optical waveguides problems", *J. Lightwave Technol.*, 12, 1547-1549, 1996.
- [12] V. H. ARISTIZABAL, F. J. VÉLEZ, AND P. TORRES, "Modelling of photonic crystal fibers with the scalar finite element method", *Proc. SPIE*, 5622, 849-854, 2004.
- [13] V. H. ARISTIZÁBAL, P. TORRES, "Analysis of photonic Crystal Fibers: Scalar Solution and polarization correction". *Optics Express* Vol. 14, pp. 11848-11854, 2007.
- [14] F. J. VELEZ, V. H. ARISTIZÁBAL AND P. TORRES, "Numerical model and analysis of optical fibers with internal electrodes". *Revista Colombiana de Física*, Vol. 38, No. 1, p.173-176 2006.
- [15] E. DESURVIRE, J. SIMPSON, "Amplification of spontaneous emission in Erbium-doped single-mode fibers", *Journal of Lightwave Technology*, 7, 835-845, 1989.
- [16] E. DESURVIRE, "Erbium-Doped Fiber Amplifiers - Principles and Applications", John Wiley & Sons, Inc. New York, 1994.
- [17] JORGE A. GÓMEZ, PEDRO TORRES, "Láser de fibra óptica en anillo: modelo basado en parámetros de transmisión". *Univesidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. IX ENO. Medellín 2005.*
- [18] H.L.FRAGNITO E C.MAZZALI, "Modelamento Analítico da Dinâmica de Ganho em Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio" - Relatório Técnico 12/96 - Contrato Unicamp-PADCT n°0730/91.
- [19] C. BARNARD, P. MYSLINSKY, J. CHROSTOWOSKY, "Analytical Model for Rare Earth Doped Fiber Amplifiers and Lasers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 30, 1817-1830, 1994.
- [20] JORGE A. GÓMEZ, PEDRO TORRES, ADRIANA C. TRIQUES, CARLA KATO, ALEXANDRE RIBEIRO "Erbium doped fibers: characterization through the "easy points" method." *Physics School, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Mechanical Engineering Department, Pontificia Universidade Católica do, Rio de Janeiro, Brazil* *Revista Colombiana de Física* Vol. 38, N° 2, p.p. 637-640.

Magued Iskander
Editor

**Innovative Techniques
in Instruction
Technology, E-learning,
E-assessment and
Education**

 Springer

Contents

Preface		xx
Acknowledgements		xvii
1. Development of Online Internet Laboratory (Online I-Lab)	1	
<i>Adnan Sahibbegovic, Samir Ribic</i>		
2. E-Assessment Tool: A Course Assessment Tool Integrated into Knowledge Assessment	7	
<i>A. M. Rashad et al.</i>		
3. Developing Educational Applications Using Adaptive E-Learning Model	13	
<i>Amir Balfo, Akila Saritrete</i>		
4. Web Laboratory Experiences for E-Learning: The Michelson Interferometer	19	
<i>R. Restrepo et al.</i>		
5. Development and Implementation of an Information Server for Web-based Education in Astronomy	24	
<i>A. Alegre et al.</i>		
6. Using Graphing Calculators for Teaching Advanced Calculus Courses	29	
<i>A. Y. Vainnyk</i>		
7. Systemic Design of Instruction on Achieving the Goals of Undergraduate Level Education in Universities: A Case Study of Makerere University	35	
<i>Alfred Kirigha, Neema Abooki</i>		
8. A Systems Model for Authentic Pedagogy: Conceptualizing a Scalable, University-wide Production Curriculum	41	
<i>Ames T. Brown III</i>		
9. Evaluating the Usability of the Mobile Interface of an Educational Website	47	
<i>E. Javier Diaz et al.</i>		
10. Enhancing High School Science Through Sensor-Based Lab Exercises	53	
<i>Andrew Popichak</i>		
11. Blackboard Adoption and Adaptation Approaches	59	
<i>Anji Narwani & Mahamoud Arif</i>		
12. An Empirical Study of Product Metrics in Software Testing	64	
<i>Yogesh Singh et al.</i>		
13. A Dual-Mode Collaborative Teaching and Learning Classroom Environment	73	
<i>C. N. Thai</i>		
14. Can Multicore Processing Learn from Arithmetic Concepts?	79	
<i>Conrad Mueller</i>		
15. Come Play	86	
<i>Craig Caulfield, S. P. Maj</i>		

Web Laboratory Experiences for E-Learning: The Michelson Interferometer

R. RESTREPO, D. ARISTIZÁBAL, A. MONTOYA, JEAN P. JIMÉNEZ H., PEDRO TORRES

Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín,
Medellín, COLOMBIA

A.A. 3840

amontoya@maimed.edu.co

ABSTRACT

This paper describes the design and the implementation of software-hardware solution that allow Web laboratory experiences with the Michelson Interferometer. The hardware has a TINI (Tiny InterNet Interface), a control system given by a PIC microcontroller and a IP camera. The software was implemented with JAVA and the operating system was LINUX. It's possible with this system to teach the principles and functionalities of the Michelson Interferometer via Web. The idea is that students of remote places can be use laboratory equipment using the Web.

KEYWORDS: E-Learning, TIC, Michelson Interferometer, Monitoring and Control via Web, TINI.

1. INTRODUCTION

This paper describes a hardware-software platform for monitoring and controlling via Web a laboratory equipment, because this experiences are not possible on Schools of higher costs of the equipment. It was implemented using new technologies in electronics, such as Embedded Maxim-Dallas microcontroller, TINI, and programming languages like JAVA of Sun Microsystems. The TINI Microcontroller is the heart of the system, can be programmed in JAVA, C++ and Assembler, allows the use of novel communication protocols and the cost is low; it is possible to be said that it is the smallest server of this time [1],[2],[3].

The growth of Internet has motivated the use of systems that use this great network for their operation. The new devices and their uses are being incorporated to take advantage of the opportunities given by the global communications [4],[5]. The network allow that the new technological developments fulfill the objective to

make the life easiest for the people. The developed platform lays in this direction, since it makes possible that very expensive equipment is used so much for scientific developments as for educative aims, from any site of the planet that is connected to Internet.

This experiment allows to the remote students, using learning, obtaining the objectives:

- To explain the interference phenomenon.
- Known the displacement the movable mirror to measure the wavelength of the used laser light.
- Well-known the wavelength of the laser light used to measure the displacement of the movable mirror

II. MATERIALS AND METHODS

The work was divided in two great areas, first the development of the hardware: design and implementation of the complementary electronics to connect the TINI server and the PIC Controller; second, the development of software: analysis, design and implementation of the programs for Web monitoring and controlling for the equipment, as example de Michelson Interferometer but the platform can be used with other experiments and other type of the laboratory equipment.

A. Hardware

1. TINI

This embedded small server (a 67 mm x 48 mm) is developed by Maxim-Dallas, view figure 1. One of the most important characteristics of this microcontroller is the compatibility with some of

the most important communication protocols such as TCP/IP, serial (RS-232), 1-Wire, CAN (Controller Area Network), [1], [2], [3]. It has a 1 MB flash memory to record applications and RAM of 512 Kb. A very useful function of this embedded system is the use as bridge for the devices that do not have connection to Internet. The TINI server can be supervised and controlled from any Web site remotely.

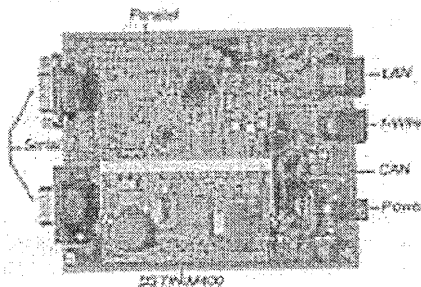


Figure 1. TINI Server (DSTIN1600 socket and DSTIN1600 board)

The designed platform use the serial communication of the TINI for the communication with the control system (PIC 16F87X Microcontroller). The LAN port of the TINI was used for connection between the TINI and an application Server.

2. PIC16F873A

Low cost Microchip® Microcontroller family 16F87X, is the controller for the Michelson Interferometer. Its function is to move the Interferometer, this PIC has:

- FLASH memory: 4K x words, 14 bits.
- RAM: 192 bytes
- EEPROM memory: 128 bytes, that allowing to program it with an application that manipulates the data.
- It has the hardware USART that allows sending and receiving information for the serial communication protocol RS-232.

3. IPCamera

The IP Camera is used for monitoring the system visually via Web. The Network Camera Axis 2100, it is allow the visualization through Internet using a Java applet. The camera has a rate of 10 frames/second.

4. Test equipment

To test the platform was connected the TINI and the PIC with the Michelson Interferometer. The next is a basic description of the Interferometer functionality.

– Michelson Interferometer

It is a interferometric system that uses the division by amplitude of the beam of originating light of the source through beams splitter, see figure 2, dividing it in two parts, using different ways before interfering. The light source is a laser (coherent light) so that a pattern of interference strips was generated on the screen of the experimental assembly. The experiment consists of micrometric moving the movable mirror of the interferometer, in such a way that in the interferometric pattern on the screen a gap between the dark strips and shiny is observed. In individual, when one goes of a shining center to another brilliant (happening through the one dark) obtains that the displacement D made by the movable mirror of the interferometer is given by the equation (1), [6], where N represents the number of changes between centers shining and λ_0 the wavelength in the emptiness of the used laser light.

$$D = N \frac{\lambda_0}{2} \quad (1)$$

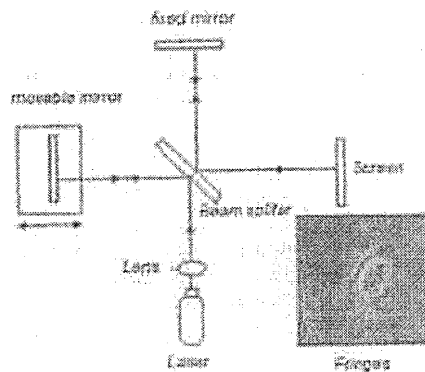


Figure 2. Michelson Interferometer Diagram and Interference pattern.

– Submicrometric positioner

This is the element used to move the mirror of the interferometer is an actuator model AD-30 with its source controller manufacturing for Newport.



Corporation, see figure 3, that allows to make submicrometric displacements of 40 nm).

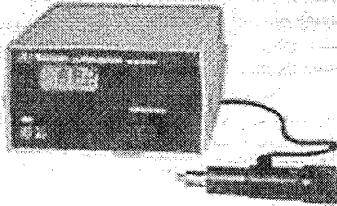


Figure 3. Driver Controller Model ESA-GSA with the actuator.

B. Software

The Software for the communication process (monitoring and control) was developed using the language JAVA of Sun Microsystems [7], [8] and JSP (Java Server Pages), and TOMCAT like container of applications JSP and servlets [9]. The IDE (Integrated Development Environment) used was Netbeans 5.0 of Sun Microsystems. Everything was developed to execute itself in LINUX like operating system. The software is of free distribution. One of the special characteristics of designed software, is that it was carefully used the powerful properties of the POO (Object-oriented programming), in addition to the serialization contributed by JAVA.

III. RESULTS

A. The system

The system is a set of elements that allow the communication between a Web user with the application executed on the application server TOMCAT. This application is connected with the TINI, the TINI send the orders to the device that controls, in this case, the positioning of the movable mirror of the interferometer, and to receive the answer to this request as it is outlined. See figure 4. Simultaneously the process it is monitoring by the IP camera.

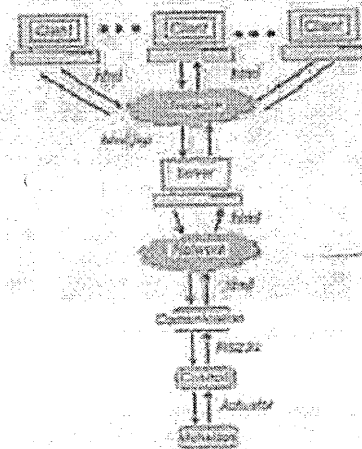


Figure 4. Platform Diagram.

B. Hardware description

The stages of the developed hardware include, among others, adaptation of the TINI to manage and connect it to the general system correctly, and the system of control of positioning of the movable mirror of the interferometer.

1. TINI adaptation

The design used a regulated source of DC voltage, provide the necessary energy for TINI system as for the fan that was added to avoid overheats and, therefore, to protect the processor voltage (DSTIN400). The TINI and the regulated source were contained in an acrylic box properly designed, fulfilling certain necessities, among them, the availability of all the ports possible with no need to expose dangerously the integrity of the system, to see figure 5.

IV. CONCLUSION

One of the most important results of this work is the use of a new technology as the microcontroller (MCU) and its multiple services of communication protocols. The great adaptability of the developed hardware-software system allows to his applicability for monitoring and remote control of other physical systems in the laboratory, allowing the development of remote laboratories. It is possible to do academic instruction via the Internet or the Intranet (e-learning) for other experiments and higher cost equipment. The system was developed using free software tools, which lower the development cost substantially.

Systems like these can be used so that universities with better laboratory equipment, and other institutions that have less resources. This facilitates the development of the poor countries and helps to generalize the education and the research in other institutions. This system can be duplicated, used or adapted for other experiments and other possibilities.

VI. GRATITUDE

This work was partially financed by DIMB (National University Colombia Medellin, code 3080295) and for COLCIENCIAS, project code 1115-130-18905. All the rights belong to the National University of Colombia.

VII. REFERENCES

[1] MAXIM, Dallas Semiconductor, *Text Brief 11 Micro160 Genes Code*. [Web] <http://pdfserv.maxim-ic.com/micro160.pdf> [Ultimo Acceso, 30 agosto 2006].

[2] LITCHFIELD, D. *The PIC® Specifications and Developer's Guide*, Micro & Motion, 2001.

[3] MAXIM, Dallas Semiconductor, *75N1 Frequency Liked (Quartz)*. [Web] <http://pdfserv.maxim-ic.com/micro75n1.pdf> [Ultimo Acceso, 30 agosto 2006].

[4] MONTOYA, N., GIRALDO, L., ARISTIZABAL, D., MONTOYA, A. "Remote Monitoring and Control System of Physical Variables of a Gravitone through a Wide Network", *International Conference on Telecommunications and Networking*, University of Pangasinan, diciembre 10-20, 2005, Sebbi, Tarek, Mhalla, Haded, *Circuit and System Journal in Circuit, Computing Science and Software Engineering*, XIV, 437 p., Springer, 2006, Hardcover ISBN: 1-4020-2625-6.

[5] MONTOYA, A. F., SALDARRIAGA, J. M., MONTOYA, A., ARISTIZABAL, D. "A Module for Monitoring and Remote Control of Physical Variables Using Mobile Devices", *International Conference on Telecommunications and Networking*, University of

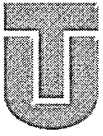
Pangasinan, diciembre 10-20, 2005, Haidaty, K., Sobh, T., Mohamed, A., Elshamir, M., Karim, M. (Eds.), *Circuit and System Journal in Circuit, Computing Science and Software Engineering*, XV, 489 p., Springer, 2006, Hardcover ISBN: 1-4020-2625-X.

[6] [6] RECHT, E., *Optics*, Addison-Wesley, Madrid, pp. 811, 2000.

[7] [7] TROITE, A., *Med 2 Manual de usuario y manual* AllGomez, Medellin, D.F., 2006.

[8] [8] FRANCO, A., *Programación en el lenguaje JFC*, [Web], <http://www.ia.edu.co/edu/financiarial/v-latin/edu/Ultimo Acceso, 30 agosto 2006>.

[9] [9] TREMBLETT, P., *Superintendentes para Amadores*, Engen, McGraw-Hill, México, D.F., 2002.



XXII CONGRESO NACIONAL DE FISICA



**Unidos contribuyendo al desarrollo científico y tecnológico del país
Ibagué, octubre 22-26 de 2007**

Ibagué, 27 de Julio de 2007

Señores

R. Acuña, J. D. Causado-Buelvas, J. A. Gómez, P. Torres

Código: OE-4

Estimados autores:

El resumen de su trabajo titulado:

**UNIDAD OPTO-ELECTRONICA PARA INTERROGAR SENSORES BASADOS EN
REJILLAS DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA**

Ha sido aceptado por el Comité Académico del XXII CNF en la modalidad de presentación:
ORAL.

La presentación oral tiene una duración de 14 minutos: 10 minutos de exposición y 4 minutos para preguntas. Toda exposición se debe hacer en video beam, por lo tanto con anterioridad de acuerdo a la programación, entregue su exposición al monitor de la sala correspondiente.

Para someter los artículos a la Revista de la SOCOFI, siga las orientaciones que se presentan en la página web de la revista y del Congreso.

Atentamente,

JOSÉ HERMAN MUÑOZ NUNGO

Director del XXII Congreso Nacional de Física

Vicepresidente de la Sociedad Colombiana de Física

UNIDAD OPTO-ELECTRONICA PARA INTERROGAR SENSORES BASADOS EN REJILLAS DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA

R. Acuña, J. D. Causado-Buelvas, J. A. Gómez, P. Torres
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Escuela de Física

RESUMEN

Los sensores basados en rejillas de Bragg en fibra óptica (FBG por su sigla en inglés) han asumido un rol protagónico en los diferentes campos de las ciencias y la ingeniería por sus características intrínsecas como peso reducido, inmunidad electromagnética, capacidad de multiplexación, precisión y velocidad de transmisión de la información. En la tarea de desarrollar de forma integral esta tecnología, uno de los aspectos más relevantes se encuentra en explorar técnicas de detección que ofrezcan elementos de valor en lo referente a número de sensores, velocidad y calidad de la medida. En este trabajo se presenta el diseño, construcción y caracterización de una unidad opto-electrónica que permite la interrogación de dos FBG sensoras. Para su construcción se utilizó una llave óptica que conmuta la señal proveniente de los sensores, llevándola a un sistema de doble filtro fijo que se encarga de realizar la convolución en potencia óptica entre la rejilla sensora y dos rejillas filtro, cuyas señales se envían a un sistema de procesamiento digital programable que permite la calibración para diferentes aplicaciones.

Palabras claves: Redes de Bragg en fibra óptica, multiplexación, llave óptica.

ABSTRACT

The fiber Bragg gratings have assumed an important roll in different field of sciences and engineering by their intrinsic characteristics like small size, electromagnetic immunity, multiplexing capacity, precise, and high rate of transmission of information. For developing in an integral way that technology, one important aspect is on exploring detection techniques which can offer elements related to quantity of sensors, velocity and quality for measuring. In this work is shown the design, construction and characterization of an optoelectronic device that permit to read two FBGs sensors. For constructing that device was used an optical switch which commute the signals of both sensors that pass after through of one double filter system in order to get the convolution between the optical power from the FBGs sensors and the FBGs filters, whose signals are sent toward programmable digital processing that allows the calibration for different applications.

Key Words: Fiber Bragg Grating, multiplexing, optical switch.

1. Introducción

El mundo de los sensores de fibra óptica está ligado a la industria de las comunicaciones y a la opto-electrónica. Estos sensores toman ventaja de los componentes desarrollados para esos mercados, mostrando mejor desempeño que los sensores convencionales electrónicos y electro-mecánicos. Muchas de estas ventajas provienen del hecho de que las fibras están hechas de vidrio (material no conductor), y a que los fotones, no los electrones, son utilizados como el elemento de propagación de señales. Aunque los subsistemas basados en fotodetectores de semiconductor y los láseres de diodo son más pequeñas y ligeros que los sistemas más tradicionales, la inmunidad del vidrio a la interferencia electromagnética (EMI) es una gran ventaja. Los sensores de fibra óptica se pueden colocar cerca de grandes fuentes EMI (por ejemplo, generadores de energía, motores eléctricos, líneas de transmisión y distribución) o sobre estructuras propensas a descargas de rayos [1]. Estos sensores son livianos, pueden funcionar en condiciones ambientales hostiles y son flexibles de instalar, permitiendo la detección discreta de parámetros físicos de interés, como es el caso de la temperatura para este proyecto.

Todas las características de los sensores a fibra óptica, que no son factibles con tecnologías convencionales, han hecho que en las últimas dos décadas, los sensores de fibra óptica hayan pasado de la etapa experimental a los usos prácticos. El progreso ha sido tan grande, que hoy se reportan aplicaciones de sistemas ópticos capaces de supervisar el estado de edificios, puentes y, en general, de grandes estructuras civiles [2]; en la industria naval [3], aérea [4], medioambiente [5]; como también en aplicaciones a pequeña escala como en las áreas bio-químicas [6]. En un estudio reciente [7] se calcula que esta industria tendrá un potencial comercial que excederá los 1.2 millardos de dólares en el año 2008, basado en gran medida a su compatibilidad con las redes de comunicaciones ópticas y a que los costes de estos sensores han estado cayendo constan-

temente. El diseño del sensor debe permitir que una perturbación externa varíe uno de los términos en la expresión del campo electromagnético.

Las rejillas de Bragg en fibra (FBG por su sigla en inglés) están revolucionando la manera de procesar la luz, que en los últimos años se ha convertido en un elemento fundamental de la tecnología por fibra óptica. Ellas consisten de una modulación periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra de algunos milímetros o centímetros de tamaño, inducida por luz ultravioleta, de manera que la luz guiada en el núcleo de la fibra será dispersada por cada plano de la rejilla. Si la condición de Bragg es satisfecha, $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$, siendo n_{eff} el índice de refracción efectivo del modo fundamental LP_{01} y Λ el periodo de la rejilla, luces reflejadas de planos subsecuentes estarán progresivamente en fase reforzándose. Luz que no coincida con la longitud de onda de resonancia de Bragg λ_B será muy poco reflejada.

El efecto del medio ambiente local en la rejilla de Bragg puede ser usado para sensar cantidades físicas, midiendo el desplazamiento espectral de la longitud de onda de Bragg, eliminándose los problemas de amplitud o de variaciones de intensidad que afecta a los otros tipos de sensores a fibra óptica. La aplicación más difundida de las rejillas de Bragg es en la medición de la temperatura y/o deformaciones mecánicas [8]. La sensibilidad con la temperatura de una rejilla de Bragg se debe principalmente al efecto sobre el índice de refracción y en un grado mucho menor a través del coeficiente de expansión térmica. El esfuerzo mecánico afecta la respuesta de la rejilla directamente a través de la expansión o contracción de la fibra, como también por las propiedades fotoelásticas de la fibra. Muchos parámetros físicos pueden ser medidos tales como presión, flujo, vibración acústica, aceleración, campos eléctricos y magnéticos, y algunos efectos químicos.

Hay varios esquemas para detectar el desplazamiento espectral de la longitud de onda de Bragg de una rejilla. Un esquema consiste en inyectar luz de ancho de banda relativamente amplio en la fibra para determinar la longitud de onda λ_B de la luz reflejada. Otra forma es usar una técnica conocida como doble-filtro [9] (Fig. 1.), que es una técnica basada en medición de potencia, el cual consiste en comparar (convolución) la respuesta espectral de la red sensora con las respuestas espectrales de dos FBGs (redes filtro), donde se realizan lecturas en potencia óptica empleando fotodetectores, y finalmente se procede a ejecutar el cociente de voltajes suministrado por ellos; y de esta forma compensar las variaciones que pueda presentar el esquema de medición frente a variaciones en este. Este trabajo presenta el diseño, construcción y calibración de una unidad optoelectrónica de dos sensores basados en redes de Bragg a fibra óptica para monitorear temperaturas utilizando una llave óptica de dos canales (ver Fig. 1.)

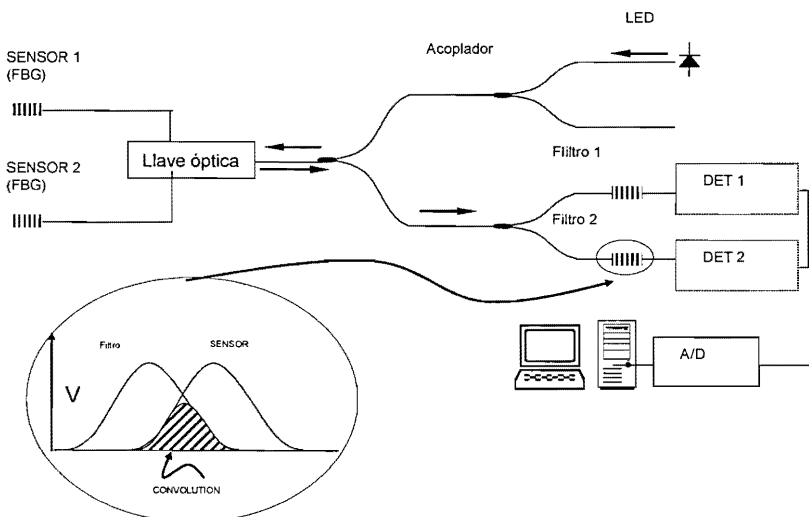


Fig.1 Sistema de detección de doble filtro.

2. Resultados

Para el diseño de la unidad optoelectrónica, se utilizó el esquema de detección mostrado en Fig. 1, donde se construyeron todos los circuitos electrónicos para manejar el sistema de fuente de luz (LED, ancho espectral 60 nm centrado a 1550 nm), los fotodetectores para sensar las variaciones en potencia de la convolución entre los sensores (conectados a un switch óptico o llave óptica) y las redes filtro; adicionalmente, un sistema de conversión análogo-digital, empleando un PIC, para una interface al PC, y así monitorear las variaciones de los sensores 1 y 2. Las FBG para los sensores y los filtros estaban centradas en una longitud de onda alrededor de 1532 nm y ancho espectral de 2 nm. Finalmente, fue necesario usar acopladores dirreccionales a 1550 nm para la interconexión de los diferentes elementos. Las Fig. 2 y 3 ilustran las curvas de calibración para los dos FBG sensoras, donde en el eje horizontal corresponde a la razón de voltaje entre los detectores 2 y 1, y el eje vertical a las variaciones en temperaturas medidas con termocuplas.

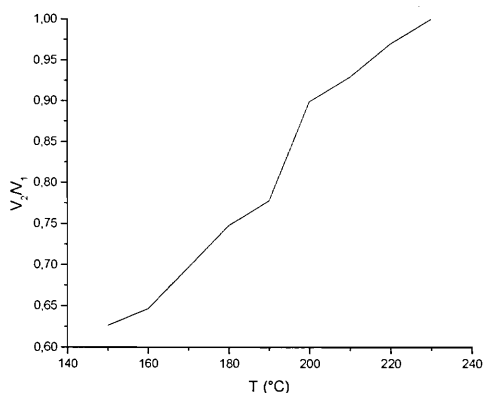


Fig.2 Curva de calibración sensor 1.

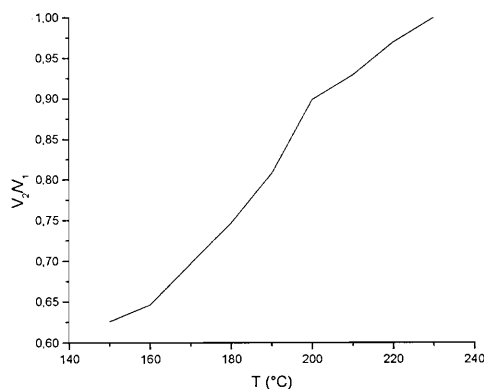


Fig.3 Curva de calibración sensor 2.

3. Conclusiones

De la figura 2 y 3 se puede observar, que la técnica de detección de doble filtro y los circuitos electrónicos construidos, son una buena alternativa para sensar variables físicas de interés, como lo es el caso de temperaturas, debida a su relativa linealidad en algunas regiones de temperaturas.

Este trabajo fue parcialmente financiado por Colciencias (código 1118-330-18905) y DIME – Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (código 30802951).

REFERENCIAS

- [1] J. Dakin and B. Culshaw, Optical Fibre Sensors: Principles and Components, Boston: Artech House, 1988. Ambient, G. Pitt, "Optical Fiber Sensors", Fiber Optics Handbook, McGraw-Hill, New York, 1990.
- [2] Fiber Optic Sensor Technologies & Markets in Civil Structures, Information Gatekeepers (<http://www.mindbranch.com/products/R403-0009.html>)
- [3] http://www.spa.com/aedp_fodas.htm.
- [4] Borinski, J., Meller, S., Pulliam, W., Murphy, K., "Optical Flight Sensors for In-Flight Health Monitoring", SPIE Proceedings, vol. 3986, Newport Beach, CA, Mar. 6, 2000
- [5] Ramaier Narayanaswamy Otto S. Wolfbeis, Optical Sensors: Industrial, Environmental & Diagnostic Applications, Springer, 2004
- [6] Brian R. Eggins, Chemical Sensors & Biosensors, Chapter 6. John Wiley & Sons, 2002.
- [7] J. Dexheimer, R. Hannemann, Investment opportunities in sensor networking: Dust, hype, fuzz, and reality, First Analysis, 2005. (<http://www.facvc.com/index.asp?PID=18&CID=626>).
- [8] Othonos and K. Kalli, Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. Norwood, MA: Artech House, 1999.
- [9] R. Leiderman, C. J. S. Matos, A. M. B. Braga, W. Margulis, C. L. g. Valente, "Interrogation methods for fiber Bragg grating sensors", Proc. SPIE, vol. 3666, pp. 4133-4144, 1999.

TÉCNICA DE INTERROGACION “DOBLE FLITRO FIJO” PARA SENSORES ÓPTICOS BASADA EN REJILLAS DE BRAGG EN FIBRAS ÓPTICAS DE ALTA BIRREBRINGENCIA.

J. P. Jiménez^{1*}, J. A. Gómez², P. Torres¹

¹*Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, A.A.3840 Medellín*

²*Grupo Física Básica y Aplicada, Politécnico Jaime Isaza Cadavid, Medellín*

RESUMEN

Los sensores basados en rejillas de Bragg en fibra óptica (FBG por su sigla en inglés) son de gran interés por sus ventajas competitivas frente a sistemas tradicionales tanto eléctricos como ópticos. Una de las principales técnicas de interrogación para estos sensores se basa en la convolución de la respuesta espectral de la rejilla sensora con dos filtros ópticos, técnica conocida como “doble filtro fijo”. En este trabajo se evidencia, mediante simulaciones computacionales, la posibilidad de emular un sistema de doble filtro fijo aprovechando las características espectrales y foto-elásticas de una rejilla de Bragg grabada en una fibra de alta birrefringencia (FBG-Hi-Bi) tipo PANDA.

Palabras claves: FBG, Hi-Bi, plain-strain, interrogación de sensores.

ABSTRACT

Sensors based on fiber Bragg gratings (FBG) are of great interest for their competitive advantages compared with optics and electronics traditional systems. One of the main interrogation techniques for these sensors is based on convolution of the spectral response of the FBG sensor with two optical filters, technique known as "two-fixed filters." In this study we have evidence, through computer simulations, the ability to emulate a two-fixed filter system by exploiting the spectral characteristics and photo-elastic of a FBG recorded into a high birefringence type PANDA fiber (Hi-Bi FBG).

Key Words: FBG, Hi-Bi, plain-strain, FBG sensors interrogation.

1. Introducción

Las redes de Bragg en fibra óptica, se definen como variaciones periódicas del índice de refracción del núcleo de la fibra. Su principio se basa en el acoplamiento entre modos que se propagan en sentidos contrarios, dando como resultado en el espectro de reflexión, una longitud de onda específica λ_B denominada longitud de onda de Bragg [1].

A partir de la respuesta espectral de las FBG grabadas en fibra, comenzó a verse la viabilidad de utilizar estos elementos como dispositivos de sensado, debido a las ventajas que presentan con respecto a los sensores comúnmente utilizados. Tales como: Inmunidad a interferencia electromagnética, bajo peso, facilidad de multiplexación, bajo costo, etc. [2].

Con el desarrollo de los sensores ópticos basados en FBG, se presenta la necesidad de saber cómo cambia la respuesta espectral del sensor; por ende, empiezan a utilizarse técnicas de interrogación. Dependiendo de lo que se mide directamente, estas técnicas se utilizan para medir fase o para medir cambios de potencia. Entre los sistemas de interrogación basados en cambios en potencia, se encuentran los filtros sintonizables, los filtros pasa-banda, el filtro fijo y el doble filtro fijo (DFF) [3]. En un filtro fijo, la longitud de onda empleada como elemento de filtrado permanece fija y para poder decir cómo cambia la respuesta espectral del sensor se mide en un fotodetector la potencia óptica obtenida por la convolución entre la longitud de onda del sensor y la del filtro utilizado. Mientras que la técnica de interrogación con doble filtro fijo, debido a que utiliza dos filtros fijos, es decir, dos FBG de diferentes longitudes de onda grabadas sobre diferentes fibras, se emplean como elementos de filtrado. Debido a que se realiza el cociente entre los valores obtenidos en dos fotodetectores (cada uno asociado a un filtro), se logra autoreferenciar el sistema, además de eliminar las pérdidas en potencia presentadas en el sistema [4].

Con la construcción de fibras óptica mantenedoras de la polarización (PM) [5], en especial las de alta-birrefringencia (Hi-Bi), siendo la más utilizada a nivel comercial la PANDA, cuando se graba una FBG en una de estas fibra, se observa en el espectro de reflexión de la FBG dos longitudes de onda específicas [6] asociados a la birrefringencia intrínseca de la fibra.

* Email: jppjimene@unalmed.edu.co

Haciendo uso de de las propiedades foto-elásticas que presentan las fibras ópticas Hi-Bi y aplicando el modelo plain-strain [7] cuando esta fibra es sometida a cargas transversales formando un ángulo de 90° con respecto al eje de los SAP's, se logra aumentar la separación entre las longitudes de onda específicas de la FBG, permitiendo de esta manera emplear este sistema como un elemento de interrogación DFF.

2. Marco Teorico

Cuando se aplica sobre un material isótropo una carga, se genera birrefringencia en el material. De acuerdo con la teoría elasto-óptica, el cambio presentado en los índices de refracción n_i del medio perturbado se puede expresar en notación compacta como [8]

$$\Delta\left(\frac{1}{n_i^2}\right) = p_{ij}\varepsilon_j \cong -\frac{2\Delta n_i}{n_i^3}, \quad (1)$$

donde ε_j la deformación unitaria inducida.

Al aplicar una carga transversal sobre una FBG grabada en una fibra óptica, bajo el modelo plain-strain y analizando únicamente el centro de la fibra donde principalmente se propaga la luz, se llega a que las variaciones de los índices efectivos asociados a los ejes lento y rápido de polarización para el modo fundamental están dados por:

$$\Delta n_{eff,x} = -\frac{n_{eff}^3 F}{2Y\pi r L} \left\{ (1-\nu^2)(-3p_{11} + p_{12}) - (\nu + \nu^2)(p_{11} - 3p_{12}) \right\} \quad (2)$$

$$\Delta n_{eff,y} = -\frac{n_{eff}^3 F}{2Y\pi r L} \left\{ (1-\nu^2)(p_{11} - 3p_{12}) - (\nu + \nu^2)(-3p_{11} + p_{12}) \right\} \quad (3)$$

donde F es la fuerza aplicada, Y el módulo de Young, ν la razón de Poisson, L la longitud de aplicación de la fuerza; p_{11} y p_{12} los coeficientes foto-elásticos de la fibra y r el radio de la fibra.

Esto nos permite separar los picos espectrales cuando se aplica un valor determinado de carga transversal sobre la fibra. Si modelamos las respuestas espectrales tanto de la FBG grabada sobre una fibra Hi-Bi y de la FBG grabada sobre un fibra estándar (utilizada como sensor) por medio de funciones gaussianas [4], y realizando la convolución entre las respuestas espectrales dadas por el sensor con cada uno de los filtros, se puede emular la técnica de interrogación DFF por medio del cociente entre las convoluciones asociadas a los filtros 1 y 2.

$$f = \frac{V_1}{V_2}, \quad (4)$$

donde V_i representa la convolución con el filtro i ($i=1, 2$).

3. Simulaciones

Para la realización de las simulaciones de la técnica DDF, se obtuvo inicialmente el índice de refracción efectivo del modo fundamental, por medio de un software desarrollado por el grupo de fotónica y optoelectrónica de la Universidad Nacional sede Medellín. Además se obtuvieron las deformaciones unitarias que sufre una fibra Hi-Bi de tipo PANDA al ser sometida a cargas transversales entre 0 N/mm y 40 N/mm, bajo el modelo plain-strain por medio del software de elementos finitos ANSYS. Con estos datos obtenidos y asumiendo una FBG de $\lambda_B = 1550$ nm grabada sobre la fibra Hi-Bi se hallaron, con ayuda del efecto elásto-óptico los cambios de los índices de refracción efectivos y, por ende, los cambios en las longitudes de onda de Bragg, asociadas a los ejes lento y rápido de propagación, ver Fig.1. Una vez realizado este trabajo, se tomaron las respuestas espectrales a valores de carga de 10, 20 y 30 N/m como elementos de interrogación DDF, con separaciones

entre los picos de 1.28, 2.03 y 2.79nm, para determinar cómo cambiaba la respuesta espectral de una FBG sensora. La FBG sensora se simuló grabada sobre una fibra estándar (SMF28) con una $\lambda_s = 1550$ nm y ante cambios de temperatura entre 0°C y 200°C, obteniéndose como curvas de interrogación DDF las curvas de la Fig.2. En estas curvas se puede observar cómo está cambiando la respuesta espectral del sensor ante los cambios de temperatura; además, las pendientes son un indicativo de cuál sistema de interrogación es más sensible. Se demuestra, también, que no todas las separaciones entre los dos picos mejoran la medición.

La tabla N°1., muestra algunas especificaciones utilizadas para las simulaciones de la FBG grabada sobre la fibra Hi-Bi y para la FBG grabada sobre la fibra SMF28

Tabla No.1 Especificaciones de las simulaciones

	Fibra PANDA			Fibra SMF28 utilizada para el sensado de temperatura		
	Núcleo	Revestimiento	SAP's	Núcleo	Revestimiento	
Material	$\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$	SiO_2	$\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$	SiO_2	
Y [GPa]	78,3	78,3	78,3	78,3	78,3	
ν	0,186	0,186	0,186	0,186	0,186	
α [°C ⁻¹]	$9,96 \times 10^{-7}$	$5,4 \times 10^{-7}$	3×10^{-6}	$9,96 \times 10^{-7}$	$5,5 \times 10^{-7}$	
Ind de refracción. n	1,460799	1,44439	1,434	1,460799	1,44439	
p_{11}	0,121	0,121	0,121	0,121	0,121	
p_{12}	0,270	0,270	0,270	0,270	0,270	
Radio [um]	4,36	62,5	36,8	4,36	62,5	

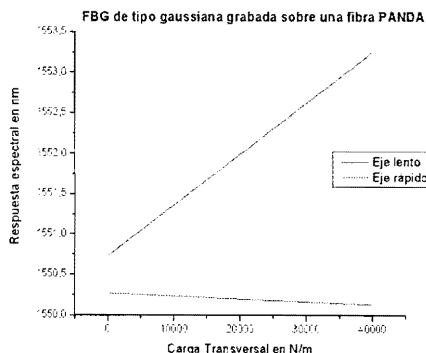


Fig.1 Respuesta espectral bajo el modelo plain-strain para una FBG grabada sobre una fibra PANDA con cargas entre 0 y 40 N/mm

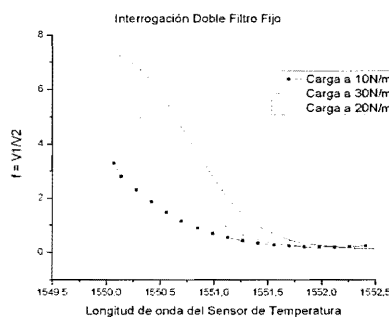


Fig.2 Curvas de interrogación por DDF para un sensor de temperatura, cuya longitud de onda varía entre 0°C y 200°C

4. Conclusiones

Este trabajo muestra la posibilidad de emplear las propiedades foto-elásticas de las fibras ópticas Hi-Bi y la respuesta espectral que presenta una FBG grabada sobre dicha fibra para ser utilizada como elemento de interrogación. La región de interrogación como sistema DFF está limitada, únicamente, a la separación espectral entre los picos.

Este trabajo fue parcialmente financiado por Colciencias (código 1118-330-18905).

REFERENCIAS

[1] R. Kashyap, Fiber Bragg Gratings, San Diego, CA: Academia, 1999

- [2] D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam and E. J. Friebele, *J. Lighthwave Technol.*, vol. 15, pp. 1442-1463, Aug. 1997
- [3] Y. Zhao and Y. Liao, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 41, pp. 1-18, Jan 2004.
- [4] L. C. S. Nunes, L. C. G. Valente and A. M. B. Bragg, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 42, pp. 529-542, Nov 2004.
- [5] M. Varnham, D. Payne, A. Barlow, and R. Birch, *J. of Lighthwavw Technol. LT-4*, 332-(1983)
- [6] J. F. Botero, Tesis (Magister en ciencias-Física), Universidad Nacional de Colombia (Medellín), Facultad de ciencias, 2006
- [7] J. Zhao, et al., *Opt. Común.*, vol. 229, pp. 203-207, Jan 2004
- [8] J. Nye, *Physical Properties of Crystals*. Oxford, U.K., pp. 243-257, 1967.

MONITOREO CUASI-DISTRIBUIDO DE TEMPERATURA MEDIANTE LA MULTIPLEXACION DE SENSORES OPTICOS A FIBRA

¹J. A. Gómez, ¹L.M. Castellanos, ²R. Acuña, ²J. D. Causado, ²P. Torres.

¹Grupo de Física Básica y Aplicada. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín.

²Escuela de Física. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

RESUMEN

En este trabajo se explora un método que permite la construcción de perfiles térmicos a partir de la medición simultánea y distribuida de temperatura usando Sensores Ópticos a Fibra Basados en Redes de Bragg (FBG). Para desarrollar esta técnica, tres redes de Bragg fueron ubicadas y calibradas térmicamente a lo largo de una barra de cobre de 0.8 cm de diámetro. Posteriormente se aplicó una perturbación térmica en un extremo de la barra y se hizo monitoreo del corrimiento espectral de las FBG usando un Analizador de Espectros Ópticos de Alta Resolución. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento similar al esperado de acuerdo con el modelo de transferencia de calor de Fourier.

Palabras claves: Perfil Térmico, Redes de Bragg, Sensado Distribuido

ABSTRACT

In this work a method to construct temperature profiles is studied. This method use Fiber Bragg Gratings and take advantage of its capacity to be multiplexed. In the experimental setup, three thermally calibrated gratings were located along a 0.8 centimeter diameter copper bar. Then a thermal disturbance was applied in a bar end, and the gratings spectral shifting were measured using a High Resolution Optical Spectrum Analyzer. Experimental Results agree with theoretical predictions given by the Heat Transference Fourier's Theory.

Key Words: Thermal Profile, Distributed Sensing, Fiber Bragg Gratings

1. Introducción

Una red de Bragg en fibra óptica (FBG = Fiber Bragg Grating) es una modulación periódica del índice de refracción de su núcleo y actúa como un espejo selector para una determinada longitud de onda que satisface la condición de Bragg [1]. El periodo de modulación de la rejilla, el tamaño y la estructura de modulación del índice determinan su respuesta espectral, es decir, su reflectividad, ancho de banda y longitud de onda central, llamada longitud de onda de Bragg, λ_B . Estas características hacen que la rejilla actúe como un filtro pasa-banda óptico. Por su ancho de banda estrecho (<1.5 nm) una red de Bragg es útil en dos importantes áreas de aplicación: comunicaciones y sensores ópticos a fibra.

Mientras que la estabilidad de la longitud de onda es fundamental en muchas aplicaciones, el efecto del entorno local en la red de Bragg puede ser usado para sensar cantidades físicas, midiendo el desplazamiento espectral de la longitud de onda de Bragg, eliminándose los problemas de amplitud o de variaciones de intensidad que afecta a muchos otros tipos de sensores a fibra óptica. Por su banda de reflexión estrecha, varias redes de Bragg pueden ser grabadas en una misma fibra sin que perturbe el desempeño de la otra, lo que permite el desarrollo de sensores ópticos distribuidos (multiplexación). La longitud de onda de Bragg depende del índice de refracción efectivo (n_{eff}) y la periodicidad Λ de la red, los cuales pueden ser afectados externamente por alteraciones mecánicas y térmicas del medio que rodea a la red; por lo tanto es posible cuantificar estas alteraciones con el simple hecho de medir los cambios en λ_B debido a las variaciones en n_{eff} o en Λ o en ambas [2].

Cabe destacar que las redes de Bragg en fibras ópticas han sido utilizadas en muchos campos como son: Medicina, para registro del comportamiento pulmonar y de temperatura; en Física, en medición de índices de refracción, curvaturas, presión, campos eléctricos y magnéticos; en Química, en concentración de soluciones, pH y discriminación de especies químicas; en Ingeniería Civil y Mecánica, en dilatación térmica, medición de esfuerzos mecánicos, análisis de vibraciones en puentes y aplicaciones en aeronáutica, entre otros [3,4,5].

El objetivo del presente trabajo es mostrar cómo a partir del uso de la técnica de multiplexación de FBGs (FBG-WDM), fue posible la construcción del perfil térmico sobre una barra de cobre. La solución de este problema abre una gran gama de aplicaciones, pues es expansible al monitoreo térmico en sectores como los previamente mencionados, donde por

características como tamaño, reactividad química, inmunidad electromagnética, y capacidad de multiplexación es posible dar solución a problemas hasta el momento insolubles con otras técnicas.

2. Marco Teórico.

Una barra metálica de longitud L , sometida a dos fuentes térmicas en los extremos, de modo que en un cierto tiempo la temperatura en estos es T_a y T_b respectivamente (ver Fig.1).

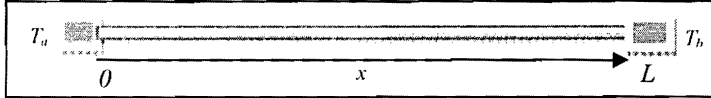


Fig.1 Barra sometida a dos fuentes térmicas en los extremos.

Mediante la ley de Fourier para la conducción de calor se obtiene la ecuación diferencial de transferencia de calor, la cual permite estimar en un cierto tiempo la distribución de temperaturas sobre el cuerpo. Esta ecuación aplicada a las condiciones del sistema descrito conduce a una función $T(x,t)$ que define la temperatura en cualquier punto x de la barra, en un instante t . Esta solución se compone de un término proporcional a x , relativo al estado estacionario, y de una serie convergente que describe el estado transitorio [6]:

$$T(x,t) = T_a + \frac{T_b - T_a}{L}x + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \exp\left(-\alpha \frac{n^2 \pi^2}{L^2} t\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right), \quad (1)$$

en donde los a_n son los coeficientes de la serie. Una representación del perfil de temperaturas según este modelo, es presentada en la Fig.2, donde se muestra una simulación de este para una barra de cobre, tras un tiempo de 3 minutos de exposición a las fuentes térmicas.

Si se evalúa el comportamiento térmico en un punto sobre la extensión de la barra, al cabo de cierto tiempo se establece un estado estacionario en el que la temperatura no varía con el tiempo, como se evidencia en la simulación presentada en la Fig.3. Si bien aquí se muestra un comportamiento exponencial sin ningún tipo de oscilación, cabe mencionar que el equilibrio térmico del sistema se da de manera dinámica, por lo cual es de esperar que se presenten fluctuaciones durante el proceso transitorio hacia el estado estacionario y, por ende, la curva para el proceso real ha de diferir respecto a la suavidad en el crecimiento.

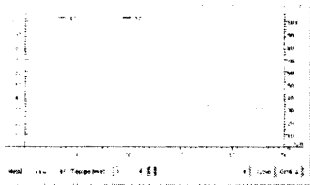


Fig.2 Simulación del perfil de temperaturas.

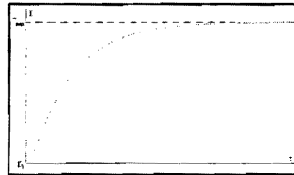


Fig.3 Simulación del tránsito hacia el estado estacionario.

3. Resultados Experimentales.

Como aplicación del sistema de sensado de redes de Bragg en la determinación de perfiles de temperatura de forma cuasi-distribuida, se procedió a llevar a cabo la experiencia cuyo modelo se describe en la sección anterior. Para tal fin se usó una barra de cobre de 71 cm de longitud, la cual fue sometida a una fuente térmica (un mechero de alcohol) en uno de los extremos de la barra, mientras que el otro se dejó expuesto al ambiente. Sobre la misma se dispuso un arreglo de 3 redes de Bragg escritas sobre una fibra óptica estándar conectada a un analizador de espectros ópticos (OSA) para evaluar los cambios en la respuesta de las redes ante los cambios de temperatura que experimentan tres puntos sobre la barra. Dicho montaje se ilustra en la Fig. 4.

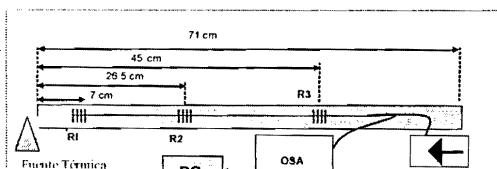


Fig.4 Esquema del montaje experimental para el sentido de temperaturas en la barra.

Con el fin de determinar la respuesta de los sensores individuales se procedió a calibrarlos mediante una toma de valores que fueron contrastados con un sistema de medición de temperatura de referencia (una termocupla de 0.1°C de precisión), verificándose el carácter lineal del sensor como lo predice la teoría, de acuerdo a la ecuación (2) [7]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n} \frac{\partial\lambda}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2)$$

De esta expresión se infiere que un cambio en temperatura ocasiona cambios tanto en el periodo de la red Λ debidos al coeficiente de expansión térmica, como en el índice de refracción n debidos al coeficiente termo-óptico; y en conjunto estos son los responsables del cambio en la respuesta espectral de la red, es decir de la longitud de onda de Bragg λ_B . Si interpretamos los términos el paréntesis como coeficientes de respuesta térmica de la red, la ecuación nos muestra una dependencia lineal con la temperatura para el cambio en λ_B .

La Fig.5 ilustra la curva de calibración que se obtuvo para una de las redes usadas, en la cual se observa un comportamiento bastante lineal tal como se esperaba.

Tras la calibración de los sensores, se procedió a realizar el monitoreo de los tres puntos de la barra durante el proceso de calentamiento. De esta manera se pudo conocer, de un lado, un perfil de temperaturas aproximado para diferentes tiempos (Fig.6) y, del otro, el proceso transiente hacia el estado estacionario (Fig.7).

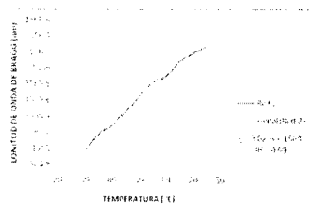


Fig.5 Calibración de la red 2.

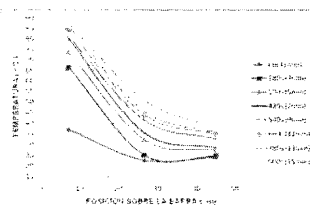


Fig.6 Evolución del perfil de temperaturas

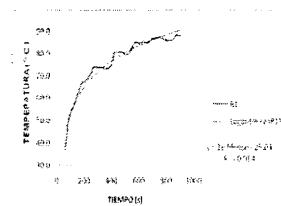


Fig.7 Transición hacia el estado estacionario.

4. Conclusiones y perspectivas

Observando las curvas de la Fig. 6 y comparándolas con la simulación de la Fig. 2 resulta clara la similitud en el comportamiento registrado en la barra, medido con la técnica de sentido cuasi-distribuida, con el modelo predicho en la teoría. Así mismo, con el paso del tiempo, empieza a vislumbrarse una tendencia hacia una distribución de temperaturas casi lineal, tal y como lo indica la ecuación (1) para un tiempo suficientemente grande. Adicionalmente, la Fig.7 nos permite verificar el proceso de transición al estado estacionario, con las fluctuaciones causadas por el proceso dinámico de la búsqueda del equilibrio térmico con el entorno.

Con los resultados arrojados en este trabajo, se abre la posibilidad experimental de construcción de perfiles térmicos continuos a partir de mediciones discretas, lo que puede resultar de interés en muchas áreas de aplicación, en sectores tales como el eléctrico, civil, petróleos, entre otros.

Este trabajo fue parcialmente financiado por Colciencias (código 1118-330-18905)

REFERENCIAS

- [1] Alan D. Kersey, "A review of recent developments in fiber optic sensor technology," *Optical Fiber Technology*, vol. 2, 291 (1996).
- [2] Y. J. Rao, "Recent progress in applications in-fiber Bragg grating sensors", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 31, p. 297 (1999).
- [3] C. J. S. de Matos, P. Torres, L. C. G. Valente, W. Margulis and R. Stubbe, "Fiber Bragg grating characterization and shaping by local pressure", *J. Lightwave Technol.*, vol. 19 pp. 1206-1211, 2001.
- [4] Y. J. Rao, P. J. Henderson, D. A. Jackson, I. Zhang, I. Bennion, "Simultaneous strain, temperature and vibration measurement using a multiplexed in-fibre Bragg grating/Fabry-Perot sensor system". *Electron. Lett.*, vol. 33, p. 2063 (1997).
- [5] J. Canning, M. Englund, K. Sommer, "Fiber Gratings for High Temperature Sensor Applications", *Proceeding SPIE*, vol. 4185, postdeadline papers, p 1 (2000).
- [6] M. Domínguez, Marta, R., Antonio, "Ingeniería Térmica" Mc Graw Hill 1985.

- [7] T.E Hammon, A.D. Stokes, , "Optical fibre Bragg grating temperature sensor measurements in a electrical power trnasformer usin a temperature compensated fibre Bragg grating as a reference". In: Proceeding of the 11th International Conference on Optical Fibre Sensors, Sapporo, Japan, 1996, pp. 566-569.

Láser Sintonizable en Anillo de Fibra Óptica Dopada con Erblio

Jesús D. Causado-Buevas¹, Nelson D. Gómez-Cardona¹, Pedro Torres^{1*}, Jorge A. Gómez^{2*}.

¹Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

²Grupo de Física Básica y Aplicada, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

RESUMEN

En el presente trabajo se ilustra el diseño y construcción de un láser a fibra óptica sintonizable con cavidad en forma de anillo. Para el diseño del láser, se usó el modelo basado en parámetros de transmisión construido previamente por los autores*, y se desarrolló la técnica de “puntos fáciles” para la caracterización de la fibra óptica dopada con Erblio (EDF por su sigla en inglés). Con el método de caracterización se obtuvo la respuesta atómica de primer orden de una EDF fabricada por la compañía Liekki Corporation, y se posibilitó el cálculo directo de las potencias intrínsecas de saturación y los coeficientes de absorción a las longitudes de onda de bombeo y emisión. Una vez obtenidos estos parámetros de transmisión y con el modelo del láser en anillo, se determinaron las condiciones constructivas óptimas para la cavidad. En el desarrollo del sistema experimental se usaron 15 m de EDF, un láser de retroalimentación distribuida (DFB por su sigla en inglés) de bombeo emitiendo a 980nm y un filtro Fabry-Perot (FFP) controlado eléctricamente para la sintonización. Con estas condiciones fue posible obtener una potencia máxima de salida de 14 mW y una sintonización en las bandas C y L de comunicaciones de más de 60 nm. Esta experiencia demuestra la efectividad de la técnica de diseño utilizada con fibras de mayor concentración de dopante que las utilizadas por los autores* en 2006, momento en que se evidenció la emisión láser con una Potencia máxima de salida de 0.3 mW en una cavidad lineal.

Palabra Clave: Teoría láser, láser a fibra, Fibra dopada con Erblio.

ABSTRACT

In this work we illustrate the design and construction of a Tunable Erbium Doped Fiber Optic Ring Laser. In the design a model based on transmission parameters has been used; furthermore we implemented the characterization of the (EDF) with the “easy points” technique. With this characterization method the first level atomic response of a commercial EDF manufactured by Liekki Corporation has been acquired, and the straight calculus of the intrinsic saturation powers plus the absorption coefficients at emission and pump wavelengths were done. Once these parameters and the model of the ring laser were known, the optimal conditions of the laser cavity were determined. In the experimental setup we used 15 m of EDF, a distributed feedback (DFB) laser with 140 mW of power at 980 nm and an electrically controlled Fabry-Perot (F-P) to the tuning. As a result, we acquired 14 mW of power at 1550nm and over 60 nm of tuning over the C and L bands.

Keywords: Laser theory, Erbium-doped fiber, All fiber laser.

1. INTRODUCCIÓN

Fuentes de luz láser de alta sintonización, cuyo medio activo es una Fibra Óptica Dopada con Erblio, han sido ampliamente estudiadas por sus características de emisión en la banda C y L de comunicaciones ópticas, que las constituyen en elementos de suma importancia en sistemas de Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM por sus siglas en inglés), los cuales presentan aplicaciones en importantes áreas de la instrumentación y las comunicaciones ópticas de última generación [1,2]. Las fuentes láser a fibra, tienen características como: ancho espectral estrecho, amplio rango de sintonización sobre la curva de Emisión Espontánea Amplificada (ASE, por sus siglas en inglés), baja potencia de umbral, alta relación señal ruido, alta eficiencia energética, entre otras; que las convierten en elementos muy importantes en el desarrollo de procesos de instrumentación óptica cuasi-distribuida, como los que configuran los sistemas de Redes de Bragg en Fibra Óptica (FBG por sus siglas en inglés) [3,4,5]. En el diseño de este tipo de fuentes de luz, se reportan múltiples modelos teóricos, los cuales utilizan parámetros espectroscópicos de la fibra tales como: secciones eficaces a las longitudes de onda de emisión y de bombeo, tiempos de vida, concentración de dopante, etc.; que en muchos casos son de difícil medición, ocasionando inconvenientes en el proceso optimización de

las cavidades láser [6,7]. En este trabajo, se usó para la caracterización de la Fibra Óptica Dopada con Erblio el modelo de “puntos fáciles”, en el cual, a través de mediciones de la potencia transmitida en una EDF sometida a pulsos de larga duración, es posible determinar las Potencias Intrínsecas de Saturación y los Coeficientes de Absorción a 980nm y 1550nm, que permiten modelar el sistema retroalimentado bajo el supuesto de una estructura de 2 niveles [8]. Con los resultados de la caracterización y del modelo matemático se construyó una cavidad en anillo donde se utilizó como elemento de sintonización un Filtro Fabry Perot, obteniendo potencias de salida pico de más de 14mW, y un rango de sintonización superior a los 60 nm.

2. MODELO LÁSER EN ANILLO

La configuración en anillo se muestra en la figura 1, a través del WDM se ingresan la señal de bombeo y se realimenta el sistema con la señal emitida por la fibra dopada con Er^{3+} , el aislador integrado en el WDM hace que la luz viaje sólo en dirección propagante, el filtro Fabry Perot sintoniza una longitud de onda y el acoplador divide la señal de salida en dos: una parte realimenta el sistema y la otra es tomada como la salida neta del sistema.

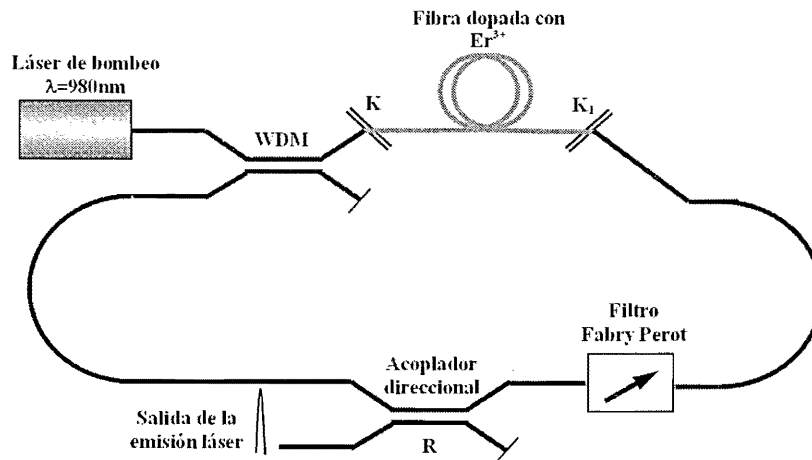


Figura 1. Configuración láser en anillo

Este modelo se rige por la ecuación [9],

$$P_L^{Salida} = \eta(P_B - P_L^{Umbral}), \quad (1)$$

donde P_B es la potencia de bombeo, la potencia umbral definida por [1],

$$P_L^{Umbral} = \frac{\lambda_S}{\lambda_B} \frac{\alpha_S L - \ln(K \cdot R)}{1 - (K \cdot R \cdot G_{\max})^{-\delta}} P_L^{SAT}, \quad (2)$$

y el coeficiente de solapamiento [9],

$$\eta = \frac{\lambda_S}{\lambda_B} K_1 \frac{1 - K}{1 - K \cdot R} (1 - (K \cdot R \cdot G_{\max})^{-\delta}) \quad (3)$$

En estas ecuaciones K y K_1 describen las pérdidas asociadas con los componentes pasivos presentes en el sistema, R es la relación de luz en el acoplador direccional, L es la longitud de fibra dopada con Er^{3+} , $G_{\max} = \exp((\alpha_B / \delta - \alpha_S)L)$ describe la ganancia máxima que se puede lograr a la longitud de onda λ_S si el sistema es bombeado con una señal de potencia muy alta, $\delta = (\lambda_S \cdot P_S^{SAT}) / (\lambda_B \cdot P_B^{SAT})$ y $\alpha_{B,S}$ y $P_{B,S}^{SAT}$ son los coeficientes de absorción y las potencias de saturación a las longitudes de onda $\lambda_{B,S}$, las cuales fueron medidas experimentalmente utilizando el “método de los puntos fáciles” [10]. Como se puede observar en estas ecuaciones conociendo estos últimos factores se puede modelar fácilmente esta configuración. Debido a las características de la EDF hay una longitud de fibra para la cual la eficiencia de emisión comienza a decaer ya que existe una reabsorción de la energía emitida; esta longitud es conocida como longitud óptima y es función de la potencia de bombeo. Para la configuración en anillo propuesta la longitud óptima puede expresarse como [10]:

$$L_{OPT} = \ln \left[\frac{P_B \left(\alpha_B - \alpha_S \frac{P_S^{SAT}}{P_B^{SAT}} \right)}{\left(\alpha_S P_S^{SAT} K \times K_1 \times R \right) \frac{P_S^{SAT}}{P_B^{SAT}}} \right] \frac{1}{\left(\alpha_B - \alpha_S \frac{P_S^{SAT}}{P_B^{SAT}} \right)} \quad (4)$$

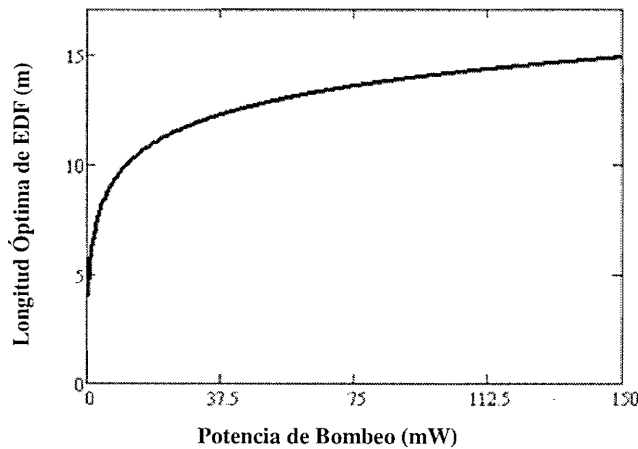


Figura 2. Longitud Óptima de EDF para cada potencia de bombeo.

Al realizar las simulaciones numéricas encontramos que en el modelo propuesto esta pérdida de eficiencia comienza al

rededor de los 15 metros, Figura 2.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como se indicó en el esquema experimental de la Fig.3, la EDF se bombea con un diodo láser de emitiendo a 980nm, a través de un multiplexor por división de longitud de onda integrado con un aislador óptico; en este caso el láser de bombeo utilizado ofreció una potencia máxima de 140 mW. La señal que sale de la EDF se hace pasar por el filtro F-P sintonizable eléctricamente con un ancho de banda cercano a los 0.4 nm de tal manera que el ruido debido a la emisión espontánea es prácticamente extinguido; la señal filtrada llega luego a un divisor de potencia con una relación 50/50, es decir, que el 50% de la potencia de la señal que sale del filtro F-P sale del anillo y el 50% restante sigue circulando por este, con el fin de que la emisión estimulada no se detenga. Como el láser de bombeo disponible tiene una potencia nominal de 140mW, y de acuerdo con la Fig.4, se insertaron a la cavidad 15m de EDF Liekki. Con el ánimo de evaluar el potencial de sintonización de la cavidad y el punto de máxima densidad espectral de potencia en la banda C, cuando se incide con el bombeo máximo (140mW), se analizó el comportamiento del sistema en lazo abierto. El espectro ASE del sistema se muestra en la Fig. 5.

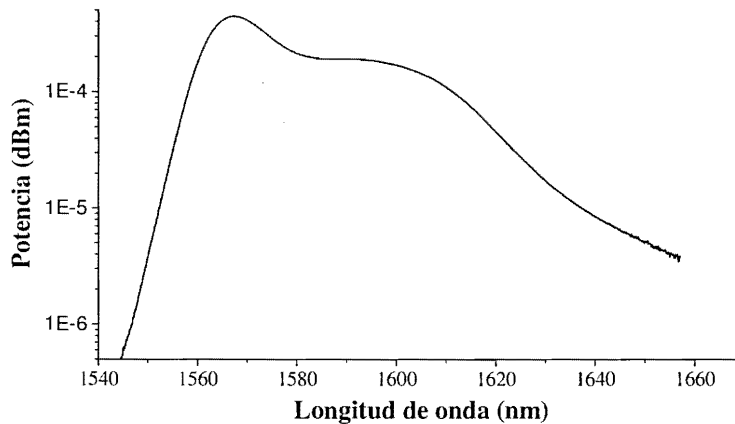


Figura 5. Curva ASE del sistema

En este gráfico se observa que la longitud de onda de mayor densidad de potencia está alrededor de los 1570nm, y se presume una banda de sintonización desde los 1550nm a los 1640nm. El sistema en lazo cerrado que constituye la cavidad en anillo, fue bombeado con potencias variables desde 0-140mw, obteniendo un umbral de 50mW para la emisión láser. En la Fig. 6 se muestra el espectro de potencia óptica que sale de la cavidad en varios puntos de operación por debajo del umbral, en ella se ilustra la dinámica del sistema antes de ser una radiación láser, y se observa como se privilegian las componentes espectrales de mayor densidad de potencia a medida que se aumenta el bombeo.



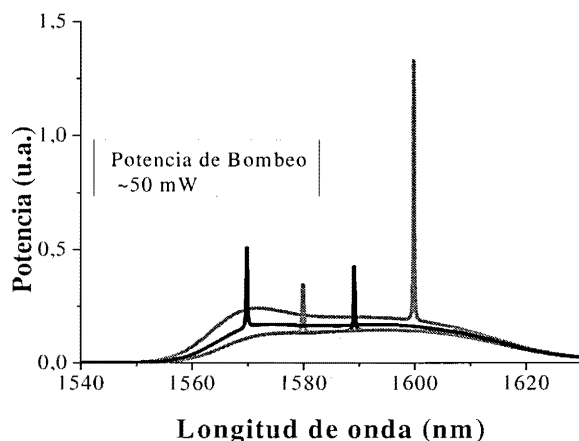


Figura 6. Emisión ASE en la fibra óptica dopada con Erblio

Para determinar la máxima potencia de salida del sistema y la máxima sintonización posible, se desarrollo la caracterización espectral y en potencia para un bombeo de 140mW. En la Fig. 7 se muestra la curva de potencia de óptica de salida en las bandas C y L de comunicaciones, cuando la sintonización se realizó controlando eléctricamente la frecuencia de resonancia del filtro F-P y en la Fig. 8, se ilustra la respuesta espectral del sistema ante diferentes voltajes de excitación del filtro F-P.

Como se observa en las figuras 7 y 8 en el punto de operación de bombeo máximo, la emisión láser presentó una capacidad de sintonización que va desde 1540 nm hasta 1610 nm, con una potencia mínima de salida de 4 mW y una potencia máxima de 14mW, lo que representa una eficiencia cuántica cercana al 10%. De otro lado la sintonización del filtro F-P tiene un comportamiento muy lineal con el voltaje, lo que ofrece grandes ventajas en la consolidación de sistemas de instrumentación ópticos.

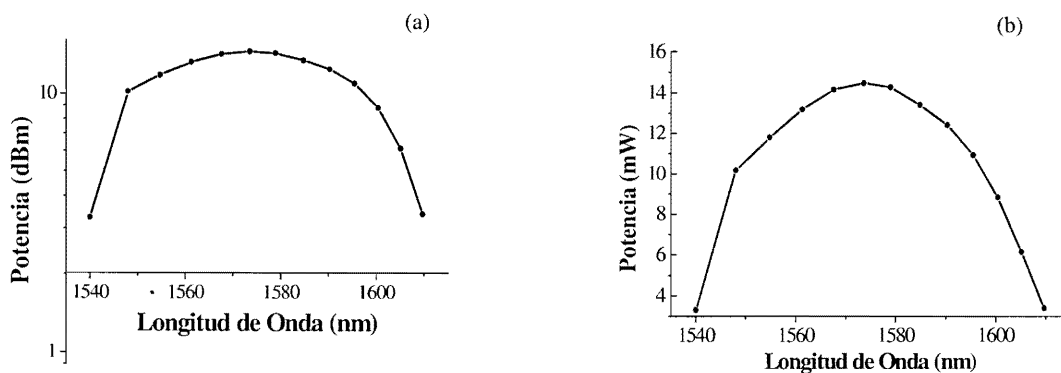


Figura 7 Sintonización del láser en configuración en anillo
 (a) Longitud de onda (nm) vs. Potencia (dBm). (b) Longitud de onda (nm) vs. Potencia (mW).

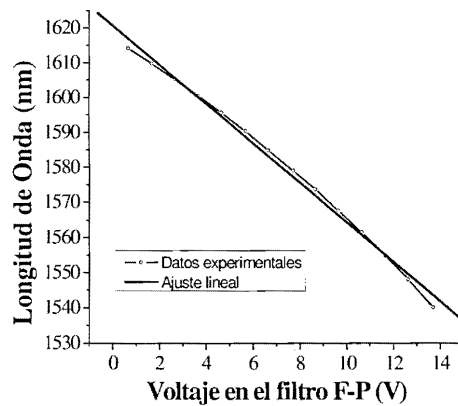


Figura 8 Voltaje en el Filtro F-P vs. Longitud de onda de salida

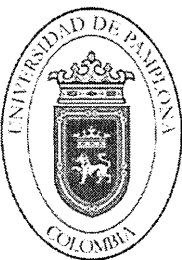
4. CONCLUSIÓN

Se diseñó y se construyó un láser a fibra óptica en anillo y sintonizable, utilizando como herramienta de diseño el modelo basado en parámetros de transmisión ópticos previamente reportado por los autores*. Usando una Fibra Óptica Dopada con Erblio fabricada por Liekki Corporation, se obtuvo una potencia de salida pico de 14mW y una sintonización de un poco mas de 60nm con una respuesta lineal al voltaje aplicado al Filtro Fabry Perot que sintonizó la cavidad. Los resultados obtenidos en este trabajo superan notablemente los previamente reportados para un láser lineal, en el que se obtuvieron 0.3mW y 12.5nm de sintonización. Con estos resultados se posibilita la construcción de sistemas de interrogación de sensores basados en Redes de Bragg en fibra óptica multiplexados en la frecuencia, y se impulsa el desarrollo de la tecnología opto-electrónica nacional de bajo costo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Y. T. Chieng, G. J. Cowle, and R. A. Minasian, "Optimization of wavelength tuning of Erbium-doped fiber ring lasers," *Journal of Lightwave Technol.* **14**, pp. 1730-1739, 1996.
2. C. Z. Shi, N. Zeng, C. C. Chan, Y. B. Liao, W. Jin, and L. Zhang "Improving the Performance of FBG Sensors in a WDM Network Using a Simulated Annealing Technique". *IEEE Photonics Technology Letters*, **Vol 16**, No 1, pp. 227, 2004.
3. M. Xu, H. Geiger, P. Daking, "Modeling and performance analysis of a Fiber Bragg Grating interrogation system using a acousto-optic tunable filter". *Journal of Lightwave Technology*, **Vol 14**, No 3, pp. 391, 1996
4. J. Gong, J. MacAlpine, C. Chan, W. Jin, M. Zhang, Y. B. Liao "A Novel Wavelength Detection Technique for Fiber Bragg Grating Sensors" *IEEE Photonics Technology Letters*, **Vol 14**, No 5, pp. 678, 2002.
5. B. Childers, E. Froggatt, G. Allison, C. Moore. "Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four eight-meter optical fibers during static load tests of a composite structure" *NASA Langley Research Center*, Hampton, VA, **23681**
6. E. Desurvire, J Simpson, "Amplification of spontaneous emission in Erbium-doped single-mode fibers", *Journal of Lightwave Technology*, **Vol. 7**, pp. 835-845, 1989.
7. P. Urquhart, "Review of rare earth doped fiber lasers and amplifiers", *IEE Proceeding*, **135**, pp. 385-407, 1998.
8. C. Mazzali, H.L.Fraguito, E.Palange and D.C.Dini, "Fast method for obtaining erbium-doped fibre intrinsic parameters", *IEEE Electronics Letters*, **Vol. 32**, No 10, pp. 921-922, 1996

9. Th. Pfeiffer, H. Schmuck, and H. Biilow , “Output Power Characteristics of Erbium-Doped Fiber Ring Lasers,” *Photonics Technology Letters*, **Vol. 4**, pp. 847, 1992
10. J. A. Gómez, P. Torres, A. C. Triques, C. Kato, A. Ribeiro , “Erbium Doped Fibers: Characterization through the “Easy Points Method,” *Revista Colombiana de Física*, **Vol. 38**, No. 2, pp. 617, 2006
- 11 .J. A. Gómez, P. Torres, “Erbium Doped Fiber Ring Laser: A Comprehensive Model based on Transmisión Parameters” *Revista Colombiana de Física*, **Vol. 38**, No. 2, pp. 621, 2006.



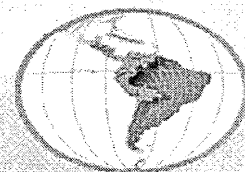
XI Encuentro Nacional de Óptica II Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones

Escuela Regional de Óptica

“Óptica Aplicada en el Siglo XXI”

Universidad de Pamplona, Noviembre 10 – 14, 2008. Pamplona, Colombia

Red Colombiana de Óptica



Pamplona, 31 de julio de 2008

Señor(a)
Jesús D. Causado-Buelvas

Estimado(a) Señor(a),

Me es grato comunicarle que el trabajo:

ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MECÁNICAS EN UNA VIGA EMPLEANDO REDES DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA

Autor(es): Jesús D. Causado-Buelvas, Nelson D. Gómez-Cardona, Juan F. Botero-Cadavid, Pedro Torres

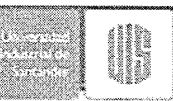
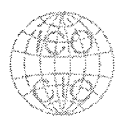
Fue aceptado para ser presentado en el XI Encuentro Nacional de Óptica y II Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y Sus Aplicaciones, del 10 al 14 de noviembre de 2008, a realizarse en la Universidad de Pamplona, en Pamplona – Colombia.

Modalidad de la Presentación: **ORAL**

Para gestionar el manuscrito de la ponencia descargue la plantilla publicada en el portalweb del evento. En el menú ViupSoftEvents, ingrese al aplicativo GestSoftEvents con el Usuario y *Password* utilizados en su inscripción; allí seleccione el *Role* Ponente, así podrá subir el manuscrito de su ponencia.

Cordialmente,


Prof. JORGE ENRIQUE RUEDA PARADA – Phd Física-
Presidente XI ENO y II CANCOA



“ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MECÁNICAS EN UNA VIGA EMPLEANDO REDES DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA”

Autores: Jesús D. Causado Buelvas, Nelson D. Gómez-Cardona, Juan F. Botero-Cadavid, Pedro Torres

Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín



“ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MECÁNICAS EN UNA VIGA EMPLEANDO REDES DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA”

CONTENIDO

- ❖ Introducción
- ❖ Redes De Bragg Como sensores
- ❖ Montaje experimental
- ❖ Resultados Experimentales
- ❖ Conclusiones





“ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MECÁNICAS EN UNA VIGA EMPLEANDO REDES DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA”

CONTENIDO

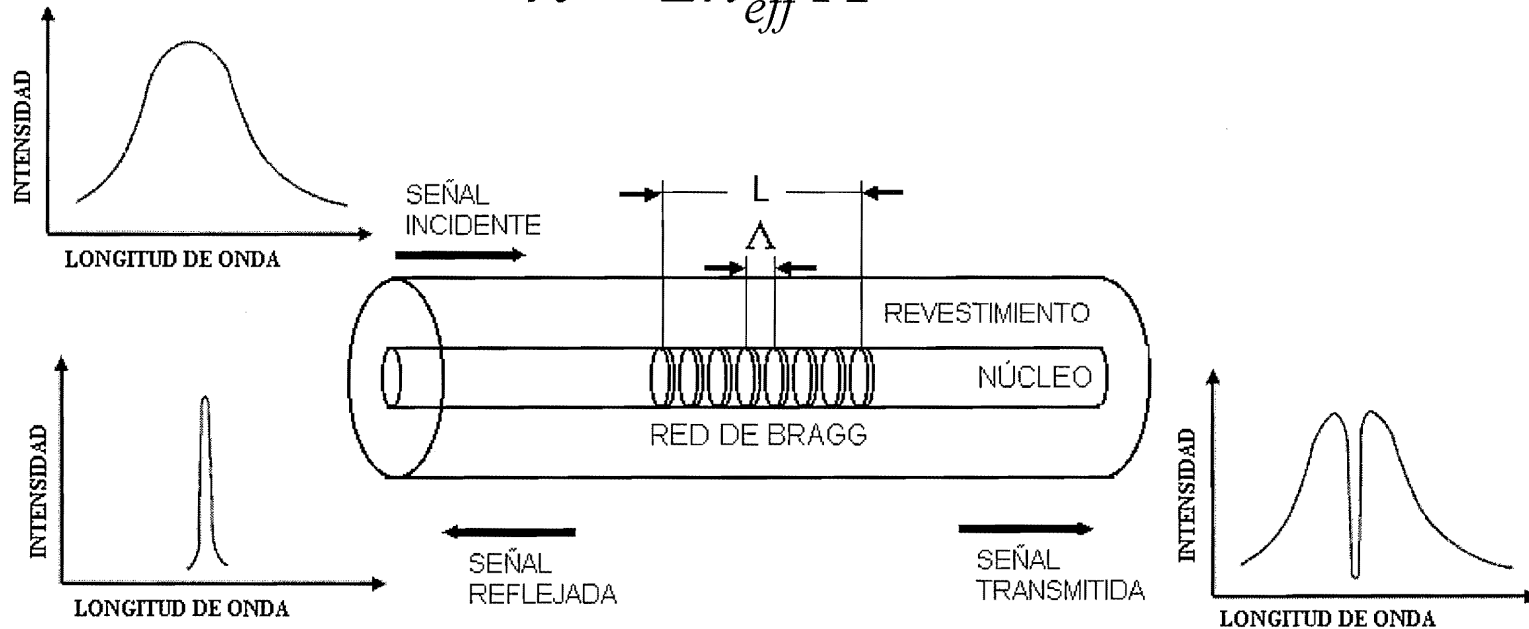
- ❖ Introducción
- ❖ Redes De Bragg Como sensores
- ❖ Montaje experimental
- ❖ Resultados Experimentales
- ❖ Conclusiones



Introducción

Una red de Bragg en fibra óptica (FBG = Fiber Bragg Grating) es una modulación periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra que actúa como un espejo selector para una determinada longitud de onda que satisface la condición de Bragg.

$$\lambda = 2n_{eff} \Lambda$$





Introducción

Ventajas de los sensores basados en FBG

- ❖ Alta Sensibilidad y larga vida útil.
- ❖ Bajo peso, tamaño reducido, alta flexibilidad, gran resistencia mecánica.
- ❖ Baja reactividad química del material, aislamiento eléctrico, inmunidad electromagnética.
- ❖ Multiplexación: En una misma fibra se pueden tener decenas de sensores.
- ❖ Multifuncionalidad: en una misma fibra pueden medir diferente parámetros físicos



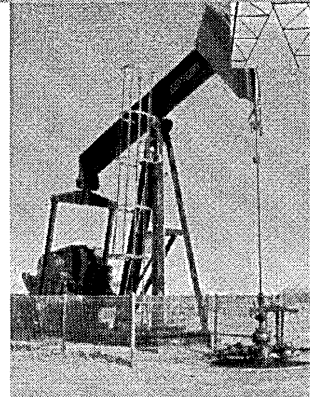
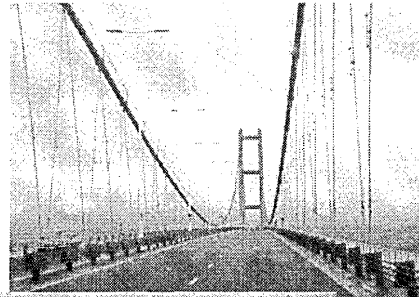
Introducción

Sectores de aplicación:

- ❖ Petróleo y Gas
- ❖ Civil
- ❖ Energía
- ❖ Aeronáutica

¿Que se puede medir con FBG?

- ❖ Temperatura
- ❖ Deformación
- ❖ Desplazamiento
- ❖ Aceleración
- ❖ Presión
- ❖ Índice de refracción





“ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MECÁNICAS EN UNA VIGA EMPLEANDO REDES DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA”

CONTENIDO

- ❖ Introducción
- ❖ Redes De Bragg Como sensores
- ❖ Montaje experimental
- ❖ Resultados Experimentales
- ❖ Conclusiones



Redes De Bragg Como sensores

Las redes de Bragg pueden ser utilizadas como sensores, debido a que la longitud de onda reflejada es sensible a cambios de temperatura y deformación.

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial l} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T$$

$\Delta\lambda_B$ Representa los cambios en la longitud de onda de Bragg

T Representa la temperatura

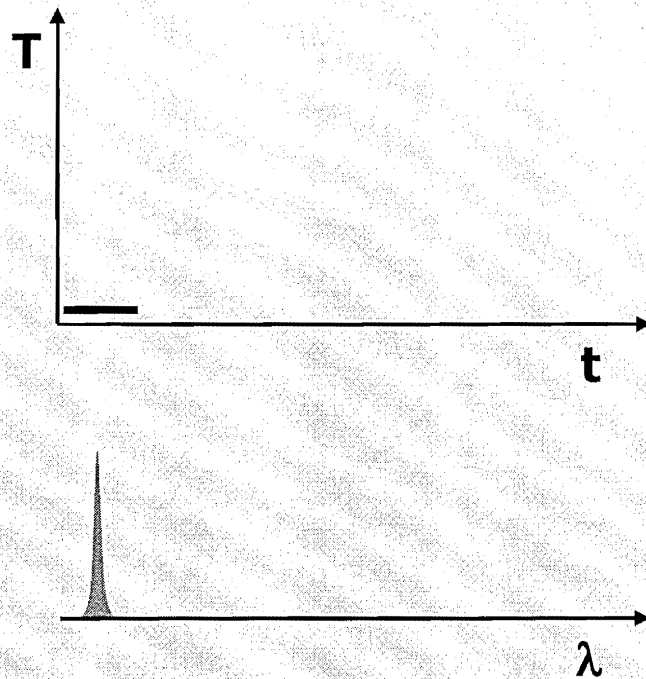
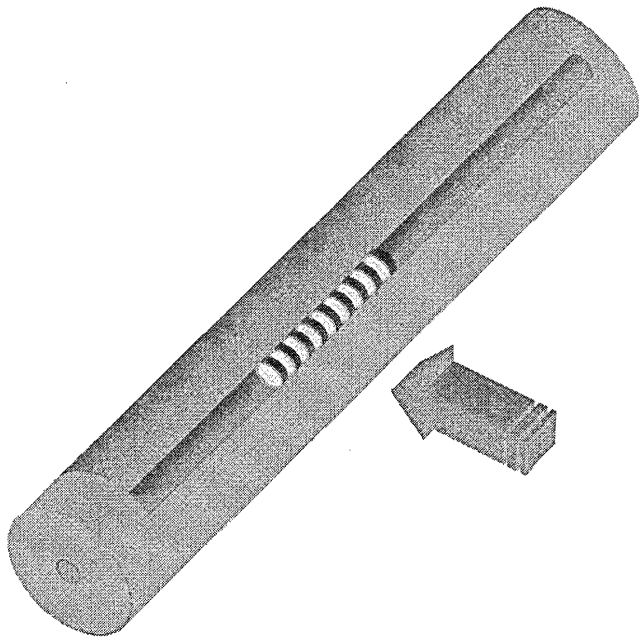
l Representa la perturbación mecánica



Redes De Bragg Como sensores

Temperatura

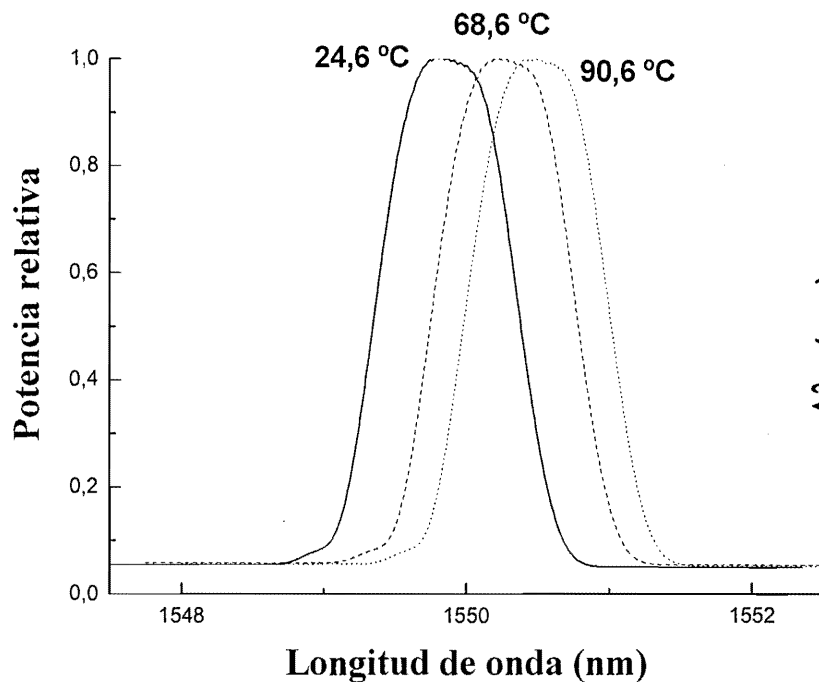
$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \longrightarrow \Delta l = 0$$



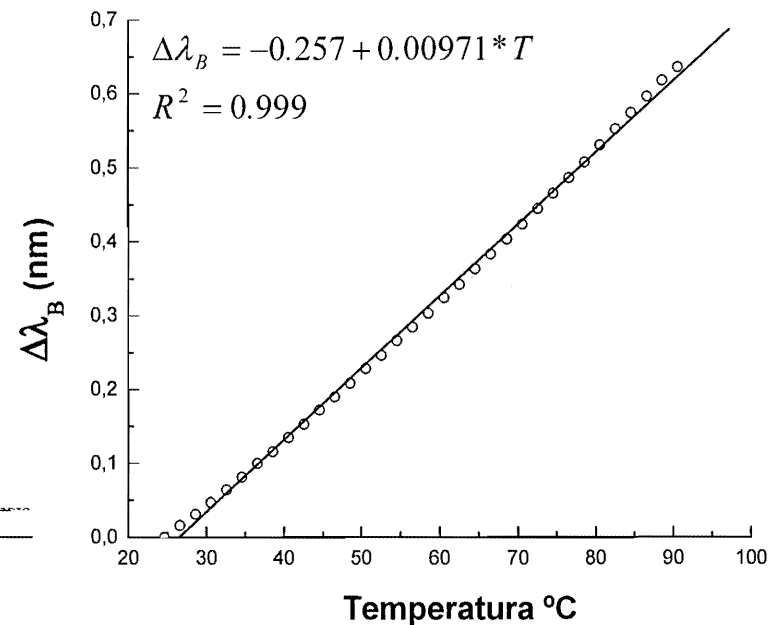


Redes De Bragg Como sensores

Espectro de la FBG cuando es sometida a cambios de temperatura



Curva de calibración de la FBG



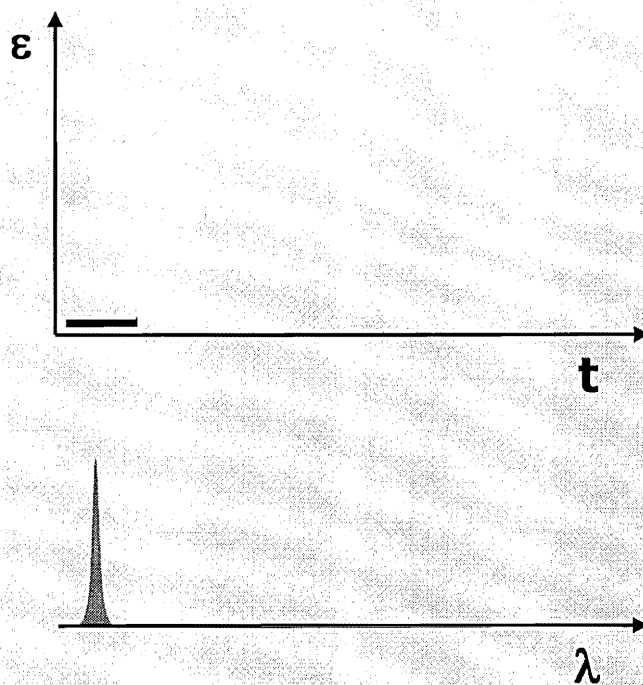
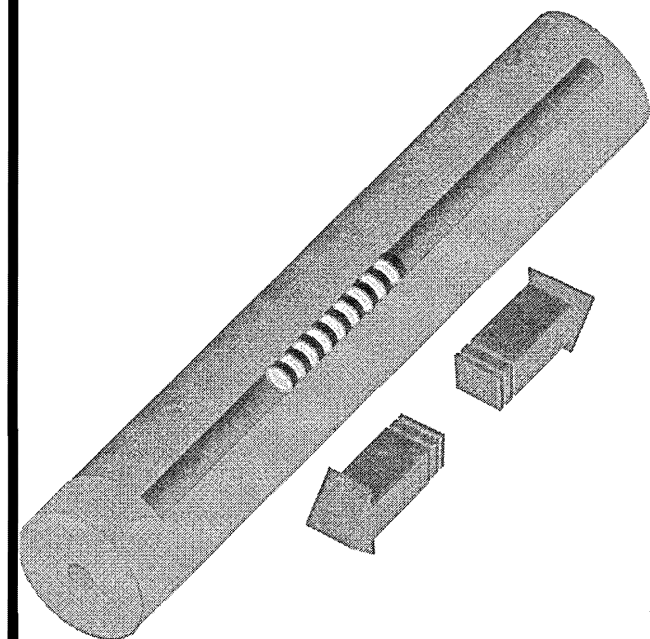
Rodrigo Acuña, Jesús Causado, Jean P. Jiménez, Pedro I. Torres, "Multiplexación de sensores basados en redes de Bragg en fibra óptica", Ponencia X Encuentro Nacional de Óptica, Cali, Colombia, Noviembre 2006.



Redes De Bragg Como sensores

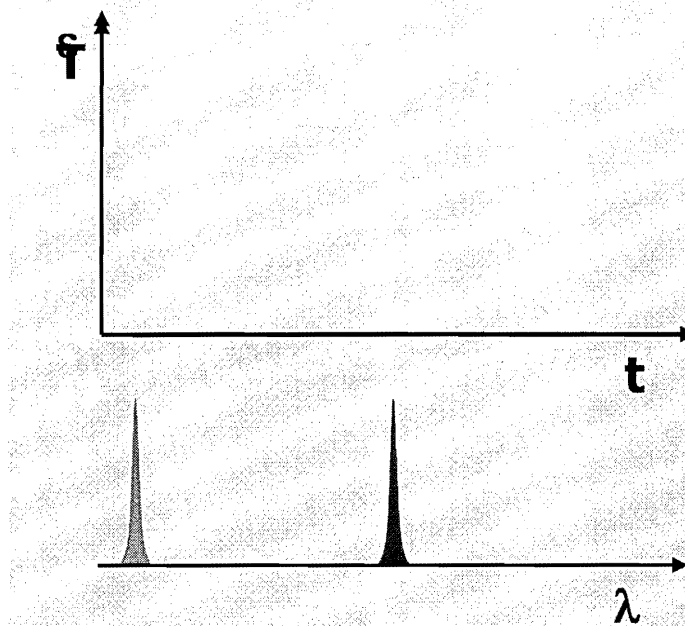
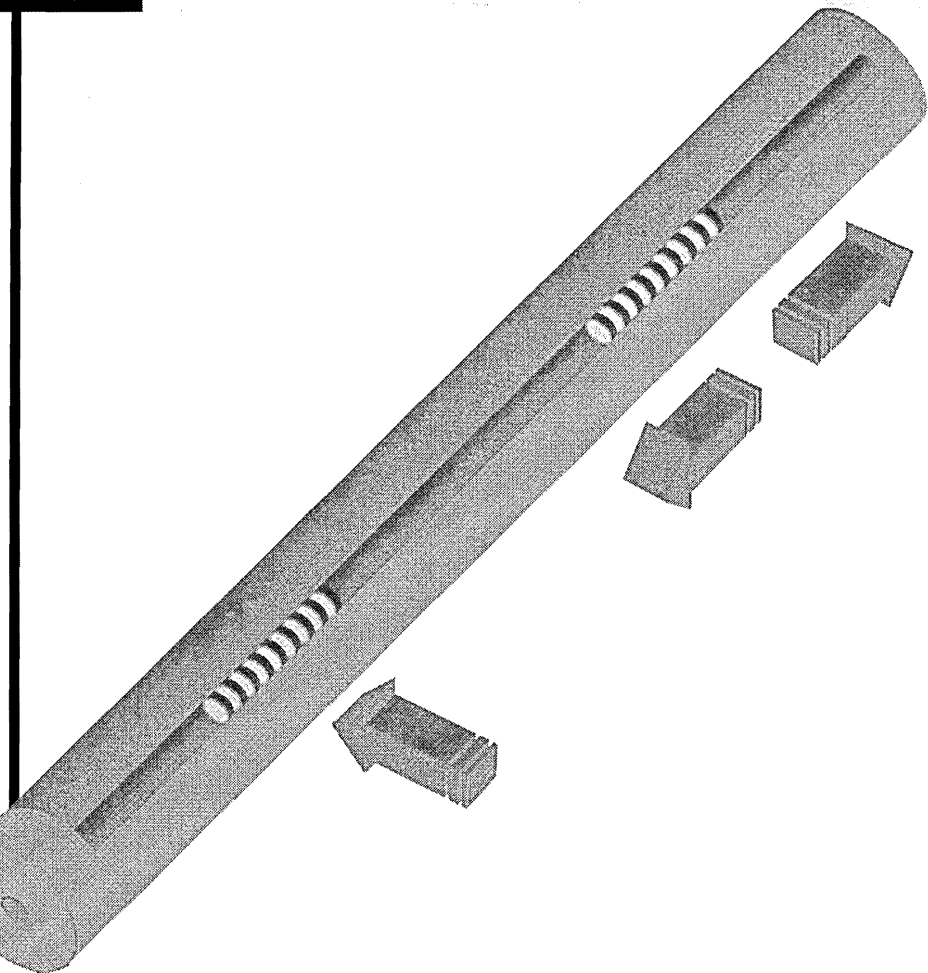
Deformación

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial l} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l \longrightarrow \Delta T = 0$$





Redes De Bragg Como sensores





“ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MECÁNICAS EN UNA VIGA EMPLEANDO REDES DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA”

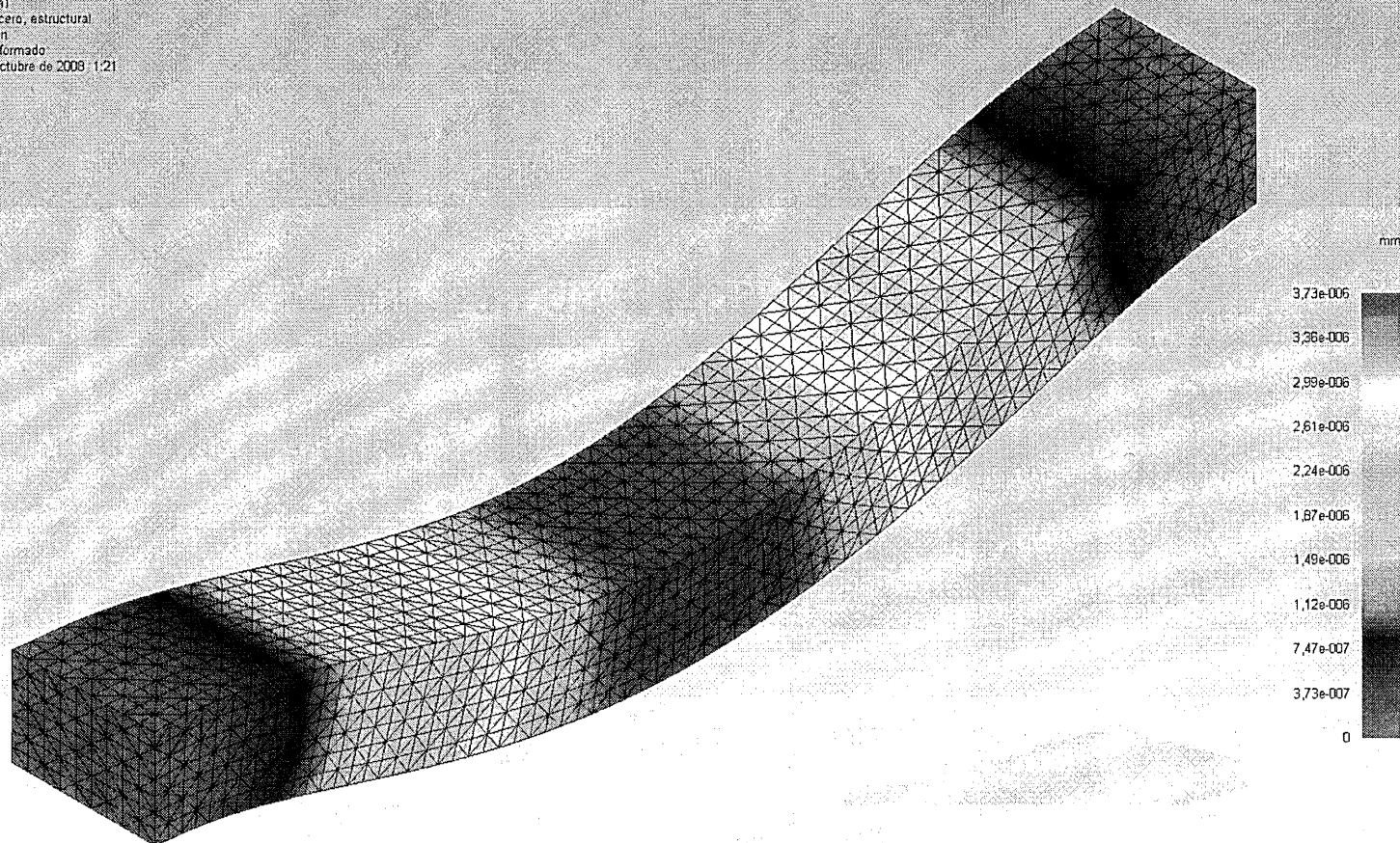
CONTENIDO

- Introducción
- Redes De Bragg Como sensores
- Montaje experimental
- Resultados Experimentales
- Conclusiones



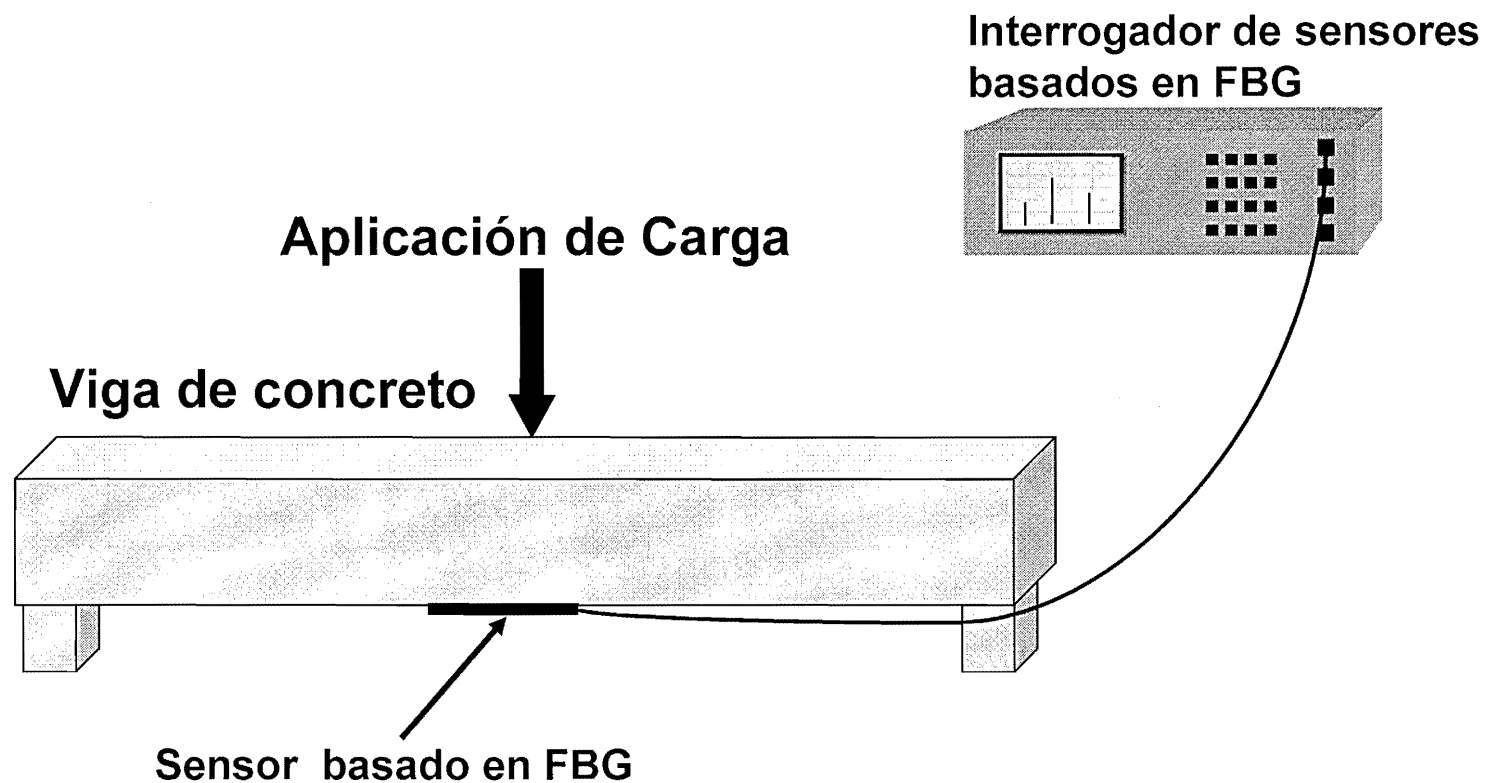
Montaje experimental

Nombre de pieza: Pieza1
Nombre del material: Acero, estructural
Tipo de análisis: Tensión
Visualizado: Modelo deformado
Fecha: martes, 21 de octubre de 2008 1:21



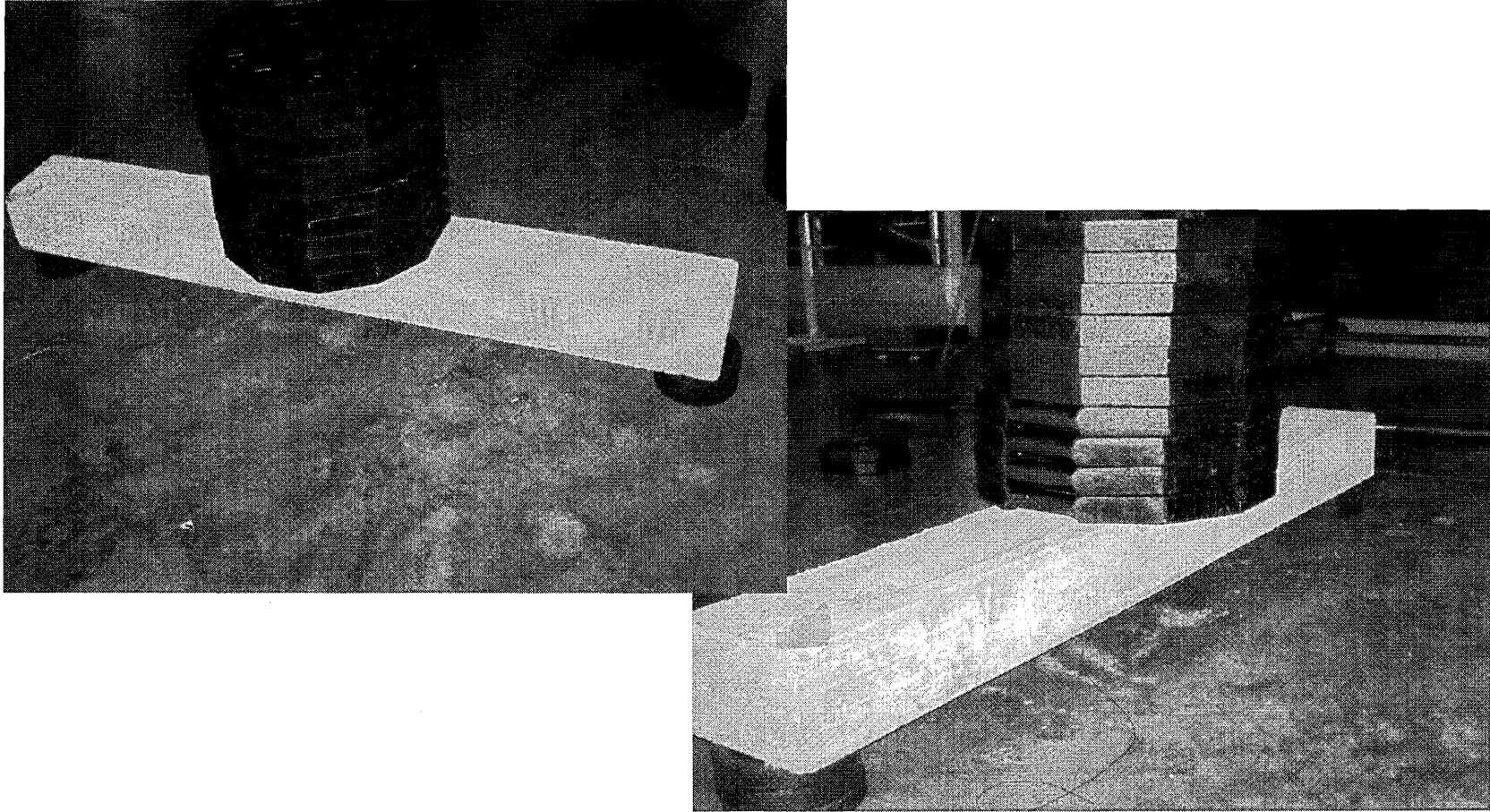


Montaje experimental



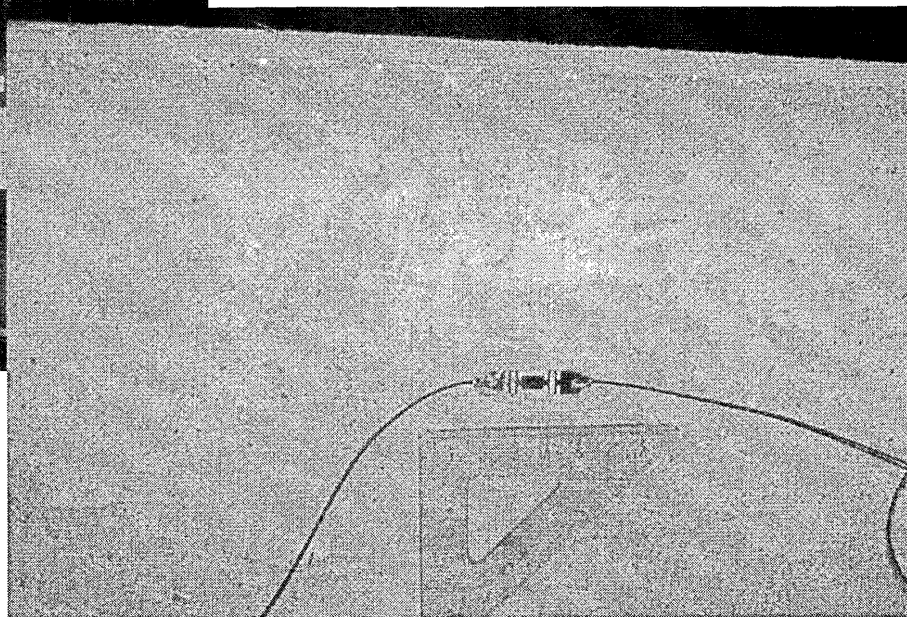
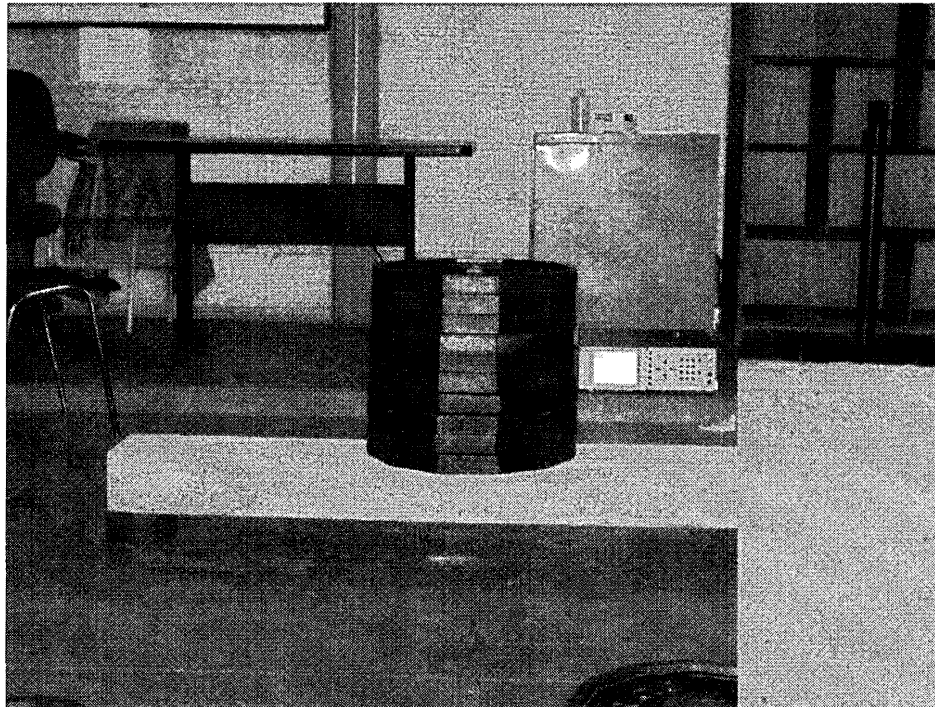


Montaje experimental





Montaje experimental





“ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MECÁNICAS EN UNA VIGA EMPLEANDO REDES DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA”

CONTENIDO

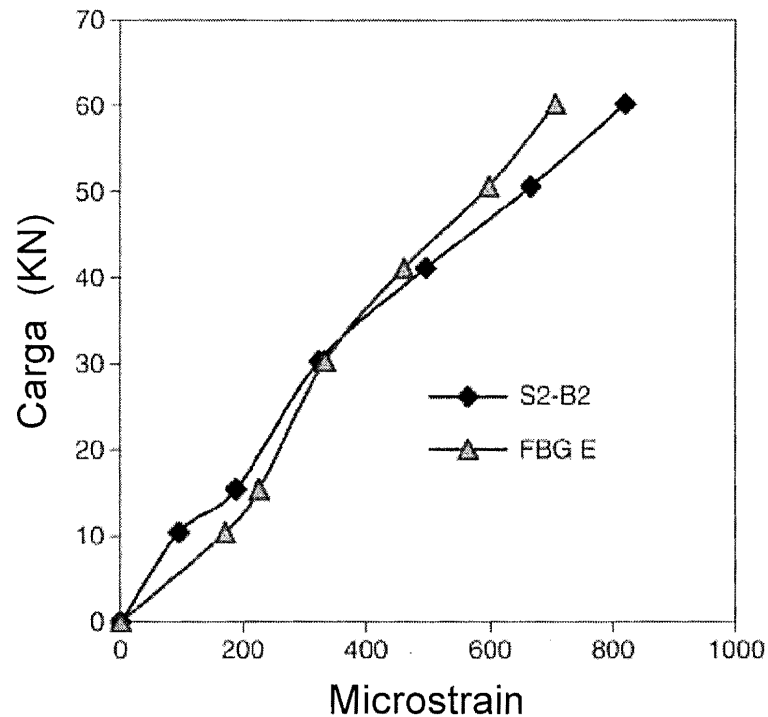
- ❖ Introducción
- ❖ Redes De Bragg Como sensores
- ❖ Montaje experimental
- ❖ Resultados Experimentales
- ❖ Conclusiones





RESULTADOS

Comparación entre un sensor óptico (FBG) y un sensor eléctrico (Galga extensiométrica)

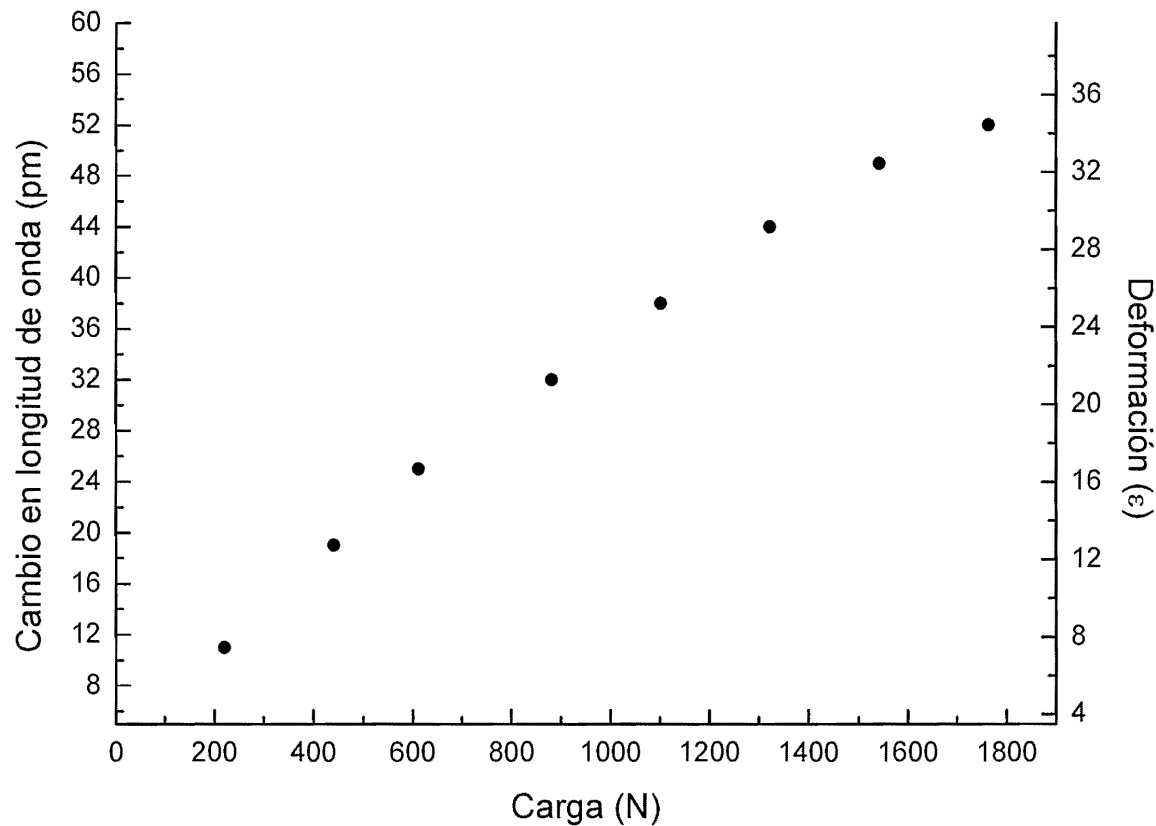


P. Moyoa, J.M.W. Brownjohnb, R. Sureshc, S.C. Tjinc, "Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure", Engineering Structures



RESULTADOS EXPERIMENTALES

Respuesta del sensor en cambios de longitud de onda cuando la viga es sometida a deformación





“ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MECÁNICAS EN UNA VIGA EMPLEANDO REDES DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA”

CONTENIDO

- ❖ Introducción
- ❖ Redes De Bragg Como sensores
- ❖ Montaje experimental
- ❖ Resultados Experimentales
- ❖ Conclusiones





Conclusiones

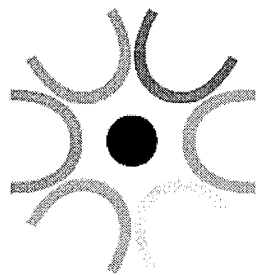
Los sensores a fibra óptica tienen una alta potencialidad en la medición de muchos parámetros físicos. En especial las FBG son una herramienta muy útil en ingeniería, en este trabajo se demostró una solución alternativa y confiable para la medición de deformaciones mecánicas en estructuras civiles.



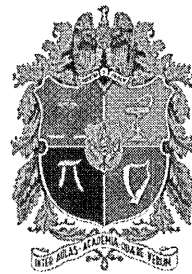
AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por COLCIENCIAS, mediante el proyecto (código 1118-330-18905).

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín



COLCIENCIAS
C O L O M B I A



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN

**UNIDAD OPTO-ELECTRÓNICA SENSORA
BASADA EN REDES DE BRAGG EN FIBRA
ÓPTICA**

Jesús David Causado Buelvas

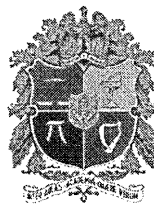
**Trabajo Presentado Como Requisito
Parcial Para Optar al Título de
Ingeniero físico**

Director:

Ph.D. Pedro Ignacio Torres Trujillo

Co-director:

Msc. Rodrigo Acuña Herrera



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN**

2007

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos:

A PEDRO IGNACIO TORRES TRUJILLO, Ph.D, Profesor de la Escuela de Física de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y Director del Trabajo Dirigido de Grado.

A RODRIGO ACUÑA HERRERA, M.Sc., Profesor de la Escuela de Física de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por la asesoría en el diseño de los circuitos electrónicos para la unidad opto-electrónica.

A JORGE ALBERTO GÓMEZ Y NELSON GÓMEZ, miembros del grupo de investigación y con quienes compartí muchas horas de trabajo de laboratorio. Su amistad y acompañamiento fueron fundamentales para el éxito de este Trabajo de Grado.

A COLCIENCIAS y DIME. Este Trabajo de Grado formó parte del proyecto de investigación "Subsistemas Fotónicos para la Multiplexación de Sensores Ópticos y su Interrogación Remota", financiado por Colciencias, código 1118-330-18905, y DIME (Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín), código 030802746.

A todas aquellas personas que en una u otra forma colaboraron en la realización del presente trabajo.

CERTIFICADO RUEDA DE NEGOCIOS TECNOVA 2008

La Corporación Tecnova UEE certifica al Grupo de Investigación Fotónica Y Opto – Electrónica de la Universidad Nacional, como uno de los oferente a la Rueda de Negocios Tecnova 2008 realizada en el Centro de Convenciones Plaza Mayor los días 1 – 2 de Septiembre del 2008, cumpliendo con la siguiente agenda:

Empresa	Actividad Económica	Sector	Expectativa	Posibilidad de trabajo Conjunto	Acuerdo	Tiempo Firma	Monto Estimado
Argos	Cemento	Industrial	Investigación		Otro		
Calorcol	Fabricación de Aislamientos	Industrial	Conocer el grupo		Nada		
Comando Aéreo de Combate n° 5		Público	Investigación		Otro		
Concreto	Construcción	Otro	Investigación		Otro		
Conhydra	Gestión de Servicios de Acueducto		Conocer el Grupo		Nada		
Ecopetrol - ICP	Investigación Petróleo, Gas, Energía		Conocer el Grupo		Nada		
EPM Energía	Servicios Públicos	Minero y Energético	Investigación		Otro		
Ministerio de Defensa	Seguridad y Defensa Nacional	Público	Investigación		Otro		
Centro Aceros S.A	Sistemas de Transporte Agrícola e Industrial	Industrial	Conocer el Grupo		Nada		
Componentes Electrónicas LTDA		Servicios	Conocer el Grupo		Nada		
Marca Registrada			Conocer el Grupo		Nada		
Cryogas	Producción y comercialización de gases industriales y medicinales	Industrial	Conocer el Grupo		Nada		


 Leonor Hidalgo Ciro

Coordinadora Rueda de Negocios

CURSO TEORICO-PRÁCTICO DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

** Fecha

3 al 5 de septiembre
de 2009

Lugar

Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín
Núcleo el Volador

Horario

8:00 am. a 12:00 m. y
1:00 pm. a 5:00 p.m.

invita

con el apoyo de



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN



COLCIENCIAS

a través de

Grupo de investigación Fotónica & Opto-electrónica
Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
Programa Nacional de Fotónica para el desarrollo de sensores ópticos y sistemas de medición
en el rango micro y nanométrico - Universidad Nacional de Colombia

preinscripción

Hasta el 28 de agosto de 2009

a través de:

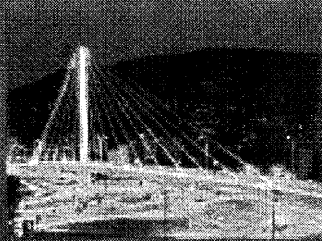
labfoton@unalmed.edu.co

Asunto: "Curso SFO"

Recibirá un correo de vuelta con
el formulario donde se le
pedirán los datos de contacto.

costo de inversión

\$475.000



info & contacto

Calle 59A N°63 - 20
Autopista Norte - Bloque 19A Laboratorio 110
Tel. +57(4)4309000 ext. 9370
e-mail: labfoton@unalmed.edu.co
Ing. Diego Jessie Martínez - Cel. 3007749860

* Énfasis en el área de Instrumentación Geotécnica

** Sujeto a completar como mínimo de 10 personas