

## Fabricación local de sensores de fibra óptica aplicables al sensado de magnitudes relevantes en ingeniería civil

Diego H. Alustiza<sup>1,2,✉</sup>, Marcos Mineo<sup>1</sup>, Daniel Aredes<sup>1,3</sup>, Nélide A. Russo<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Ópticas, CIOp (CIC-CONICET-UNLP), La Plata, Argentina

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, La Plata, Argentina

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina

<sup>4</sup> Investigador CICBA

✉ [dalustiza@frlp.utn.edu.ar](mailto:dalustiza@frlp.utn.edu.ar); [dalustiza@ciop.unlp.edu.ar](mailto:dalustiza@ciop.unlp.edu.ar)

### Resumen

En este artículo se reportan los resultados obtenidos en la fabricación local de una estructura óptica conocida como *red de período largo*, en una fibra óptica estándar empleada para telecomunicaciones. Dicha red se logró mediante el empleo de una técnica en la que se genera una sucesión periódica de reducciones en el diámetro de la fibra (*microtapers*) mediante el ataque con un arco eléctrico de características controladas. A la estructura óptica mencionada se la conoce como LPG (por su sigla en inglés) y puede ser empleada como elemento de transducción en sistemas de sensado de diversas magnitudes fisicoquímicas. El proceso de fabricación se realizó mediante un arreglo experimental recientemente implementado en el CIOp. Las LPG generadas constituyen uno de los elementos básicos en el estudio y desarrollo de técnicas ópticas aplicables en la caracterización de materiales cementíceos, en el contexto de un proyecto de trabajo conjunto entre el LEMIT y el CIOp. Se reportan las características que describen el comportamiento óptico de las LPG generadas y se las compara con dispositivos comerciales de igual naturaleza fabricados en el exterior.

### Abstract

This article reports the results obtained in the local manufacture of an optical structure known as a *long period grating*, in a standard optical fiber used for telecommunications. It was achieved through the use of a technique in which a periodic sequence of reductions in fiber diameter ( $\mu$ -tapers) is generated by means of the attack with an electric arc of controlled characteristics. Mentioned optical structure is known as LPG and can be used as a transduction element in sensing systems of various physicochemical magnitudes. The manufacturing process was carried out through an experimental arrangement that was recently implemented at CIOp. The manufactured LPGs constitute one of the basic elements in the study and development of optical techniques applicable in the characterization of cement-based materials in the context of a joint work project between LEMIT and CIOp. In the present work, characteristics describing the optical behavior of the generated LPGs are reported and they are compared with commercial devices of the same nature manufactured abroad.

### Palabras clave

Sensores ópticos, fibra óptica, ingeniería civil, redes de período largo.

### Keywords

Optical sensors, optical fiber, civil engineering, long period gratings.

*Recibido:* 13 de Mayo de 2019  
*Aceptado:* 17 de Julio de 2019  
*Publicado:* 15 de Agosto de 2019



Esta obra está bajo licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional [http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es\\_AR](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_AR)

## Introducción

Luego de su advenimiento en la década del setenta y con el avance de las tecnologías asociadas en los años siguientes, las aplicaciones científico-tecnológicas y posteriormente las comerciales de las fibras ópticas han aumentado significativamente. La fibra óptica es utilizada actualmente en dos grandes campos, a saber, el de las comunicaciones ópticas y el de sensado de magnitudes fisicoquímicas. Los sensores de fibra óptica evolucionaron fuertemente en los últimos 15 años (Lou, et al., 2014) dando la posibilidad a los estudiosos de muchas y diferentes áreas de la ciencia de acceder a mecanismos de medición alternativos (Lecler & Meyrueis, 2012). La aplicación de sensores de fibra óptica en sistemas de medición se fundamenta en una serie de ventajas que los transforman en una solución muy competitiva. Entre ellas vale la pena mencionar: reducido peso y tamaño (de fundamental importancia por ej. en aplicaciones aeroespaciales), posibilidad de sensado remoto, pueden ser embebidos en diferentes materiales sin modificar las características de los mismos (ej. en hélices de aerogeneradores o en estructuras de hormigón), poseen inmunidad a interferencias electromagnéticas (lo que permite su instalación en redes de alta tensión o centrales de generación eléctrica), pueden operar en ambientes corrosivos o con riesgo de explosión (tuberías de gas o petróleo, reactores nucleares, etc.). Además, ofrecen la posibilidad de multiplexado de un gran número de sensores en una misma fibra, simplificando de esta forma la instalación y posterior monitoreo utilizando un único sistema interrogador, a la vez de reducir el cableado necesario en comparación con los sensores eléctricos convencionales. También, por tratarse de sensores absolutos, una vez instalados en la estructura no necesitan ser calibrados nuevamente en ninguna circunstancia y todas las mediciones realizadas pueden ser contrastadas con la condición inicial de la estructura al momento de su entrada en servicio. Esta característica es de vital importancia cuando se necesita evaluar cambios graduales que ocurren a lo largo de muchos años. Por todo esto, el área concerniente al estudio de materiales de uso civil no es ajena al incremento del uso de esta tecnología (Leung, et al., 2015), (Majumder, et al., 2008), (López-Higuera, et al., 2011), (Li, et al., 2004). Existen reportes de resultados de la aplicación de tales sensores en experiencias de monitoreo del ingreso de agua en el hormigón (Zheng, 2015), en la determinación de la concentración de agentes químicos deletéreos como cloruros y sulfatos (Tang & Wang, 2007), en la determinación del avance del proceso de corrosión en armaduras (Leung, et al., 2008), etc. En virtud de esta tendencia, el uso de sensores de fibra óptica se ha posicionado como una práctica de vanguardia en todo el mundo en lo que se refiere a instrumentación de laboratorio transferible al campo de la obra civil. Pero el principal condiciona-

miento a la generalización de la aplicación de este tipo de sensores en nuestro país, es el alto costo que implica su adquisición, dado que se trata de una tecnología que debe importarse.

En este contexto, resulta de especial importancia e impacto para ampliar su utilización, la posibilidad de desarrollar esta tecnología a nivel local mediante la realización de investigaciones y ensayos como los discutidos en este trabajo. Esto permitirá no sólo la sustitución de importaciones en todos los niveles del emprendimiento (transductores ópticos, montajes de sensores, equipamiento de interrogación, procesamiento de datos, servicio de monitoreo de las estructuras) sino también una interacción más fluida con el usuario final, de manera tal de lograr soluciones que mejor se adapten a las necesidades de cada proyecto. Este artículo describe un estudio realizado en el CIOP (CONICET-CIC-UNLP) en el que se adaptó y depuró una técnica que permite la generación de un tipo de estructura (llamada LPG, *Long Period Fiber Grating*) grabada en una fibra óptica. Este elemento resulta de fundamental importancia en el desarrollo de una serie de sensores para aplicaciones de ingeniería civil, entre otras, ya que son sensibles en forma directa a tres magnitudes, a saber: temperatura, tensión mecánica e índice de refracción del medio que rodea a la zona de la fibra en la que se encuentra grabada la LPG. Luego, a través de una interfaz química o un arreglo mecánico es posible usar una LPG como sensor de otras magnitudes (Consaes, et al., 2014).

El objetivo del estudio se centró en la confección y el ajuste de un arreglo experimental que permitiera la construcción de LPGs usando una técnica conocida como "ataque por arco eléctrico" (Mendes do Rego, 2006). La técnica fue adaptada para que sea factible su implementación mediante la utilización de las herramientas disponibles en el Laboratorio de Fibras Ópticas del CIOP. Además, esto permitió adquirir un profundo entendimiento del efecto producido por las diferentes variables que intervienen en la generación de estos dispositivos, y así realizar el ajuste adecuado de los parámetros involucrados.

Los emergentes de este trabajo sientan las bases para la construcción a demanda de sensores de fibra óptica del tipo LPG para lograr soslayar el obstáculo económico que su adquisición en el exterior implica, marcando un camino pionero en Argentina en lo que a desarrollo nacional de este tipo de sensores ópticos se refiere, a la vez de permitir el diseño de los mismos en función de las necesidades de la aplicación a desarrollar.

## Marco teórico

Una fibra óptica es un dispositivo que posee la capacidad de guiar radiación lumínica sin degradar significativamente la intensidad del haz transmitido por ella. Se presenta como un filamento muy delgado consti-

tuido por un material transparente a la luz en un rango de longitudes de onda determinado. Está compuesta fundamentalmente por dos zonas o regiones de índice de refracción levemente diferente: un cilindro interno llamado núcleo (*core*) y una corteza cilíndrica concéntrica con el primero llamada revestimiento (*cladding*). En una fibra óptica la luz normalmente se propaga en el interior del núcleo mediante un mecanismo denominado reflexión total interna.

Una LPG es una estructura óptica generada en un segmento longitudinal de una fibra (típicamente de unos pocos centímetros de longitud) que consiste en una modulación periódica del índice de refracción del núcleo y a veces también del revestimiento de la misma (Martinez-Rios, et al., 2012). Cuando el modo luminoso fundamental que se propaga por el núcleo se encuentra en su camino con una LPG, parte de su energía se acopla a modos del revestimiento si se cumple la llamada "condición de ajuste de fase" dada por la ecuación (1).

$$\lambda_n = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},n}) \Lambda \quad (1)$$

en donde,  $\lambda_n$  es la longitud de onda de resonancia del acoplamiento al  $n$ -ésimo modo de propagación del revestimiento,  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  y  $n_{\text{eff}}^{\text{cl},n}$  son los índices de refracción efectivos del núcleo y del revestimiento respectivamente, y  $\Lambda$  es el período de la modulación de índice. Entiéndase por modulación periódica del índice de refracción a una variación repetitiva del valor del mismo cuando es evaluado a lo largo del eje longitudinal de la fibra.

Las LPG acoplan modos con la misma dirección de propagación (el modo fundamental del núcleo y uno o más modos del cladding, que se atenúan rápidamente debido a pérdidas por absorción y scattering en la interface cladding-coating, siendo el coating un recubrimiento polimérico que le otorga rigidez mecánica y protección a la fibra). Esto genera en el espectro de transmisión de la LPG una serie de bandas de atenuación centradas en longitudes de onda discretas, correspondiendo cada una de estas bandas al acoplamiento a un modo diferente del revestimiento.

Estas redes tienen períodos de decenas o cientos de micrones y longitud de unos pocos cm. Cualquier modificación de las propiedades de guiado del núcleo y del cladding, modifica la respuesta espectral de las LPGs, lo que las hace aptas para aplicaciones de sensado. A diferencia de lo que ocurre con las redes de Bragg en fibra (FBGs), la respuesta de una LPG es altamente dependiente del entorno o medio ambiente que las rodea, lo que permite su utilización para la determinación de una gran variedad de especies químicas.

La Fig. 1 muestra una estructura óptica típica que define una LPG, indicándose la forma en que la energía de la radiación incidente en la red, se distribuye no

sólo en un modo que se propaga por el núcleo sino también en otros modos que lo hacen por el revestimiento de la fibra óptica. Las zonas verticales de diferente coloración representan la variación periódica del índice de refracción efectivo (que en el caso de este esquema abarcan sólo al núcleo de la fibra). Puede observarse que los cambios en el índice se encuentran equiespaciados (a  $\Lambda$  intervalos) a lo largo de una cierta longitud llamada longitud de la LPG o simplemente longitud de la red.

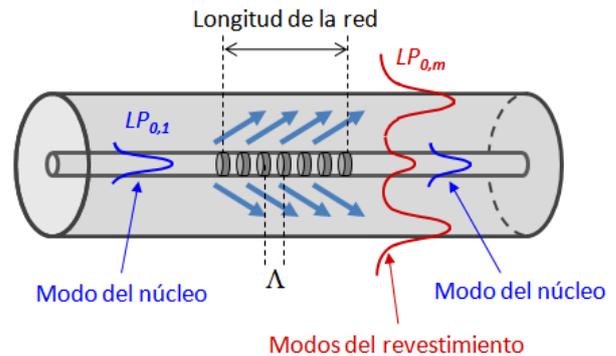


Figura 1. Esquema de una LPG en fibra óptica.

Como se mencionó anteriormente, la longitud de onda  $\lambda_n$  es dependiente del contraste existente entre los índices de refracción efectivo del núcleo y del revestimiento de la fibra, siendo éste último dependiente del entorno que la rodea. Por ello, si el medio que rodea la fibra cambia sus propiedades ópticas, también cambiarán los valores de las longitudes de onda correspondientes al acoplamiento con diferentes modos que se propagan por el revestimiento. Este principio físico es el fundamento que se utiliza cuando una LPG es empleada como elemento sensible de un sistema de medición. Por ejemplo, el cambio de concentración de algún agente químico en el entorno que rodea la fibra va a propiciar un corrimiento de  $\lambda_n$  conforme a lo establecido por la ecuación (1). En actividades vinculadas a la tecnología del hormigón, esta clase de determinación es muy atractiva al momento de explorar el ingreso de agentes agresivos en el material. Un comportamiento semejante ocurre cuando cambian las condiciones térmicas en el entorno a la red, o si se aplica una deformación mecánica sobre ella.

La respuesta óptica en transmisión de una LPG puede obtenerse mediante la implementación del arreglo experimental mostrado en la Fig. 2. Allí se observa que un elemento emisor de luz de banda ancha (SLD - *Superluminescent Diode*) inyecta su radiación a una fibra óptica que contiene una LPG. La luz transmitida es detectada por un instrumento que permite determinar la composición espectral de la radiación recibida (*Optical Spectrum Analyzer, OSA*), siendo esta distribución conocida como espectro de transmisión de la LPG.

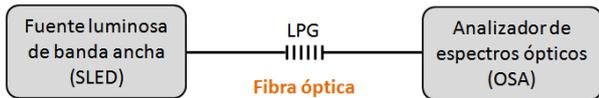


Figura 2. Arreglo experimental para la determinación del espectro de transmisión de una LPG.

La Fig. 3 (a) muestra el espectro de la radiación luminosa incidente en la LPG, pudiendo observarse cómo se distribuye la energía de la fuente de luz para cada longitud de onda que la compone. En la Fig.3 (b) se observa el espectro de la radiación emergente, apreciándose la existencia de un pico de atenuación producido por el acoplamiento de luz hacia un modo del revestimiento (el  $n$ -ésimo, caracterizado por  $\lambda_n$ ) debido a la presencia de la LPG. Esto hace que la radiación luminosa contenida en esa banda de longitudes de onda no llegue al detector. El eje vertical de ambas gráficas denota la potencia óptica detectada por el OSA, mientras que el eje horizontal indica la longitud de onda.

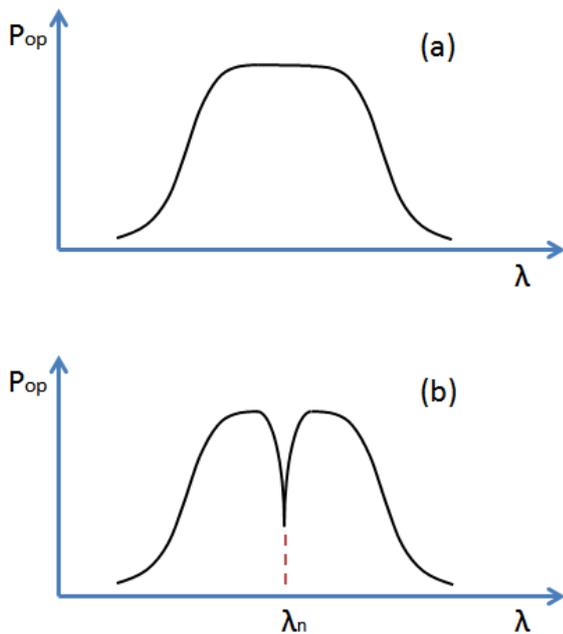


Figura 3. Espectro de la radiación luminosa: (a) antes y (b) después de atravesar la LPG.

La conformación de una LPG ocurre si existe una sucesión de cambios de índice de refracción efectivo como se indicó en la Fig. 1. Una forma de obtener esos cambios de índice en una región de la fibra, es mediante la generación de lo que se conoce como *microtaper* (de ahora en más,  $\mu$ -*taper*). Un  $\mu$ -*taper* consiste en una disminución en el diámetro de la fibra a lo largo de una dada longitud, normalmente unas cuantas dece-

nas de micrómetros (por ejemplo  $100\mu\text{m}$ ). En el caso de la técnica que aquí se emplea para generar los  $\mu$ -*tapers* (técnica de fusión y estiramiento controlado de la fibra), se reduce tanto el diámetro del núcleo como el del revestimiento. La Fig. 4 muestra esquemáticamente una sección longitudinal de fibra óptica donde se generó un  $\mu$ -*taper*.

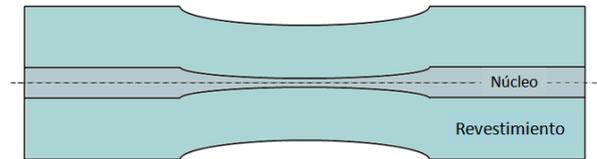


Figura 4. Esquema de un  $\mu$ -*taper*.

Luego, una LPG puede obtenerse mediante la generación de un determinado número de  $\mu$ -*tapers* equidistantes, en donde la distancia entre ellos es igual al período de la red ( $\Lambda$ ) que se desea fabricar.

### Desarrollo, materiales y métodos

En primer lugar se realizó una revisión bibliográfica sobre el conocimiento básico del estado del arte en los procesos asociados a la obtención de LPGs.

La fibra óptica elegida para el trabajo fue del tipo monomodo estándar aplicable a comunicaciones ópticas (SMF-28) de  $125\mu\text{m}$  de diámetro.

En segundo lugar se ejecutaron los procesos para generar LPGs a partir de una sucesión de  $\mu$ -*tapers* obtenidos por fusión y estiramiento simultáneo de la fibra óptica. Para ello, se utilizó un arco eléctrico de características controladas producido mediante una empalmadora de fibra óptica, a la vez que se aplicó sobre la fibra una tensión mecánica de duración e intensidad adecuadas. El objetivo de esto fue obtener un perfil longitudinal que muestre un angostamiento de la fibra en la zona en la que el arco eléctrico actuó. Para ello se aplicó un esfuerzo de tracción en tiempo de ataque eléctrico que fue ajustado al valor adecuado junto con la potencia del arco y los lapsos de tiempo en los que se realizan las acciones mecánica (de tracción) y eléctrica (de ataque usando el arco). La Fig. 5 muestra un esquema en el que se compara el perfil axial de la fibra antes (a) y durante el proceso de aplicación del arco eléctrico (b).

Durante el tiempo que se aplica el arco eléctrico y en la zona de influencia del mismo, la fibra óptica sufre una elevación de temperatura que supera el punto de fusión del material que la constituye (sílice). Como consecuencia de la aplicación de la tensión axial en simultáneo con la aplicación del arco eléctrico, la fibra sufre un estiramiento que resulta en el ahusamiento de su perfil longitudinal. Luego de que se alcanza nuevamente la temperatura ambiente la fibra óptica conserva en forma permanente la deformación generada, observándose una reducción del diámetro que debe oscilar entre un 6 y un 9% respecto del diámetro origi-

nal para que el ahusamiento genere el comportamiento esperado al paso de la luz.

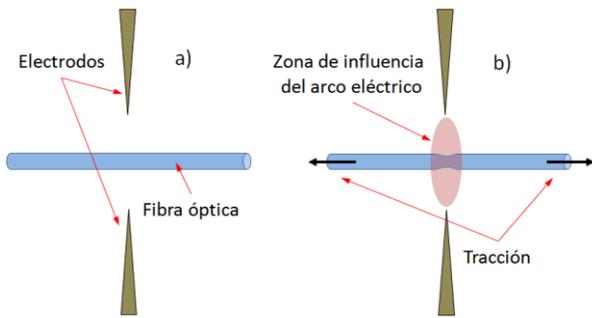


Figura 5. Perfil de la fibra antes y durante la formación del  $\mu$ -taper.

La acción de tracción necesaria en la fibra durante la aplicación del arco eléctrico debe ser tal que genere un incremento de longitud que se condiga con la disminución del diámetro deseado. La Fig. 6 muestra las dimensiones de un fragmento de fibra óptica antes y después de ser aplicado el arco eléctrico, de forma que se verifique la reducción necesaria del diámetro.

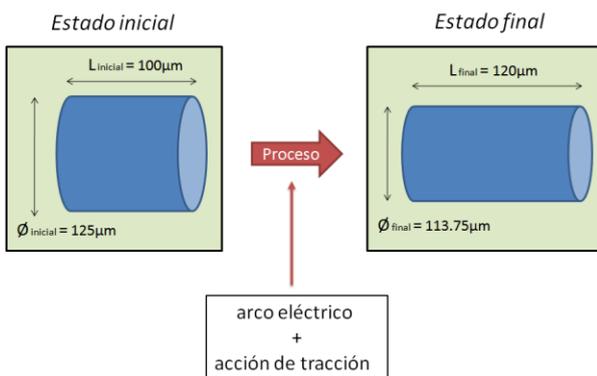


Figura 6. Modelo geométrico simple para el cálculo del estiramiento conforme a la reducción del diámetro.

El uso de este modelo geométrico simple permite determinar el estiramiento necesario para obtener la reducción porcentual del diámetro que permita lograr el comportamiento óptico deseado en el dispositivo fabricado.

La Fig. 7 muestra como luce un  $\mu$ -taper logrado en el laboratorio luego de la aplicación del arco eléctrico.



Figura 7.  $\mu$ -taper logrado en el laboratorio.

La excursión axial del  $\mu$ -taper que se obtuvo de esta forma osciló entre 100  $\mu$ m y 120  $\mu$ m aproximadamente, dependiendo de las condiciones ambientales presentes durante el proceso de formación (temperatura y humedad relativa). Para completar la formación de una LPG, este procedimiento debe ejecutarse el número de veces necesario para lograr una sucesión longitudinal de  $\mu$ -tapers equidistanciados que responda al comportamiento espectral requerido de la LPG.

La Fig. 8 muestra un esquema del arreglo experimental montado para la generación de LPGs. La fibra óptica está dispuesta horizontalmente de modo tal que un extremo (el izquierdo) se encuentra vinculado a una masa (M) y el otro extremo (el derecho) hace lo propio respecto a un trasladador con control micrométrico de posición (T). Éste permite mover la fibra óptica en  $\Lambda$  unidades de longitud hacia la derecha luego de cada aplicación del arco eléctrico. La uniformidad en las características dimensionales de los  $\mu$ -tapers se logró manteniendo inalterados los parámetros "potencia de arco", "tiempo de ataque" y "acción de tracción" en cada  $\mu$ -taper de la red, así como un adecuado sincronismo entre estas acciones. La forma en la que se garantizó la igualdad de la tracción mecánica de un ataque a otro, fue mediante la inclusión de la masa (M).

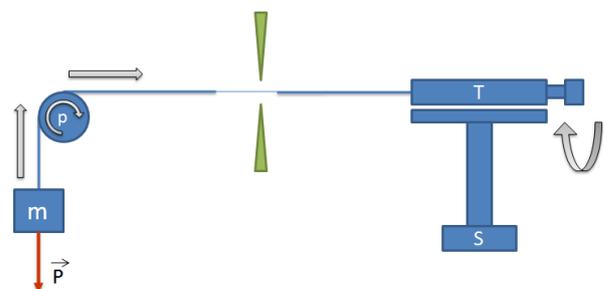


Figura 8. Esquema del montaje utilizado para la fabricación de LPGs.

Luego, la polea (p) permitió el accionar del trasladador con el objetivo de reposicionar la fibra después de generar cada  $\mu$ -taper. Las flechas denotan el movimiento de la fibra y del control de posición del trasladador. Por último el sistema fue alineado mediante el uso de un pedestal de altura variable, de forma tal que la fibra óptica mantenga una horizontalidad que garantice que el movimiento de la misma no haga que la zona de influencia del arco eléctrico genere un ataque asimétrico a la fibra (esto podría provocar microdobles que distorsionen la uniformidad geométrica de  $\mu$ -taper en  $\mu$ -taper).

La Fig. 9 muestra la implementación del arreglo esquematizado en la Fig. 8. El elemento central es una empalmadora de fibra óptica (marca Fujikura modelo FSM-100PM) que cuenta con los electrodos para generar el arco eléctrico. Además permite ajustar tanto la potencia como el tiempo de acción del arco.

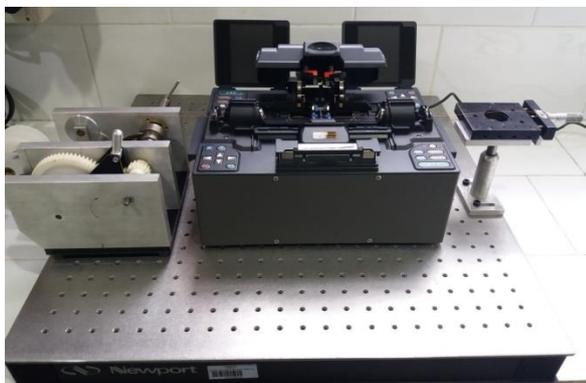


Figura 9. Arreglo experimental de generación de LPGs.

Cabe aclarar que tal máquina fue diseñada para unir dos extremos de fibra y no para fabricar LPGs. Por ello, cada paso del proceso de generación de LPG descrito en este trabajo fue pensado para compatibilizar la función original de la máquina con la necesaria para la ejecución del proceso de grabado de estas redes.

Como puede observarse en la Fig. 9 todo el montaje fue realizado sobre una plataforma de alta estabilidad mecánica (mesa óptica) de la firma NewPort.

En la Figura 10 se observa la imagen obtenida mediante un microscopio, de una fibra óptica que contiene una LPG generada con la técnica descrita. Se observan zonas de diferente luminosidad, correspondientes a los diferentes  $\mu$ -tapers que conforman la red.



Figura 10. Fotografía de una fibra óptica conteniendo una LPG.

Mediante la implementación del esquema de medición mostrado en la Fig. 2 se observó la respuesta espectral de todas las LPGs durante el proceso completo de su generación. Esto permitió determinar la cantidad de  $\mu$ -tapers necesarios a partir del análisis de la respuesta óptica de la LPG a medida que se la iba conformando.

#### Resultados obtenidos y discusión

La adaptación y depuración de la técnica usada para la generación de sensores de fibra óptica del tipo LPG resultó en la obtención de dispositivos sensores cuyo comportamiento espectral fue el esperado conforme a las consideraciones teóricas. La Fig. 11 muestra una captura de pantalla del instrumento analizador de espectros ópticos utilizado (OSA Yokogawa AQ6370B), en la que se observa la respuesta en transmisión de una de las LPGs generadas, obtenida utilizando el arreglo experimental de la Fig.2. Como puede verse, dentro de la banda de emisión ( $\approx 1450$ - $1650$ nm) de la fuente luminosa empleada (Superluminescent Diode Exalos EXS210066-01) es posible observar un único pico de atenuación (centrado en  $1587$  nm) lo que indica el acoplamiento del modo fundamental del núcleo a un único modo del cladding en esta región. Esta LPG fue construida con una periodicidad en la modulación de índice (período o distancia entre  $\mu$ -tapers) de  $580$  micrones.

Desde el punto de vista geométrico, las redes generadas presentan una extensión longitudinal no mayor a  $1,5$ cm. En ninguna de las pruebas realizadas se necesitaron más de  $30$   $\mu$ -tapers para lograr una buena característica de transmisión óptica.

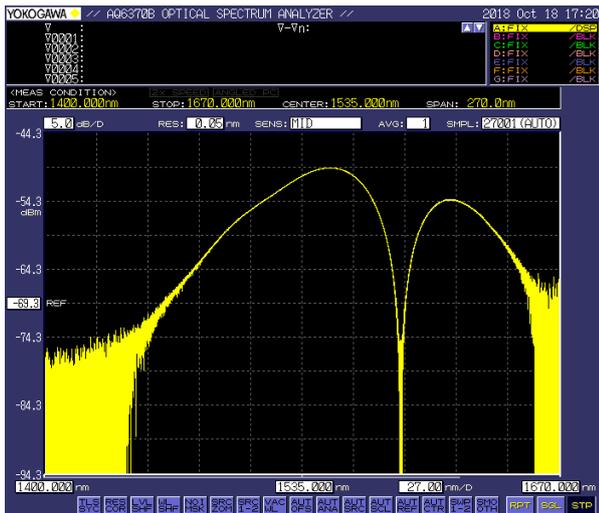


Figura 11. Captura de pantalla del instrumento analizador de espectros.

Desde el punto de vista óptico, se logró predecir la posición del pico de atenuación más profundo (en el caso de lograr acoplamiento con diferentes modos del cladding) en el rango de 1490nm a 1620nm, seleccionando adecuadamente el valor del período de red (entre 500 $\mu$ m y 600  $\mu$ m aprox.). La profundidad de atenuación de los picos fue superior a 20dB en la mayoría de los casos mientras que el ancho espectral se mantuvo en el rango de los 25nm a 30nm (FWHM).

La Fig. 12 muestra la respuesta a la transmisión de una fibra óptica antes de grabar la LPG (trazo rojo) y con la LPG grabada (trazo azul) con el objeto de exhibir el efecto de inserción que impone la presencia de la LPG en la fibra. Se aprecia el pico de atenuación en 1587nm y una atenuación general de unos 2,5dB en toda la banda del emisor de luz.

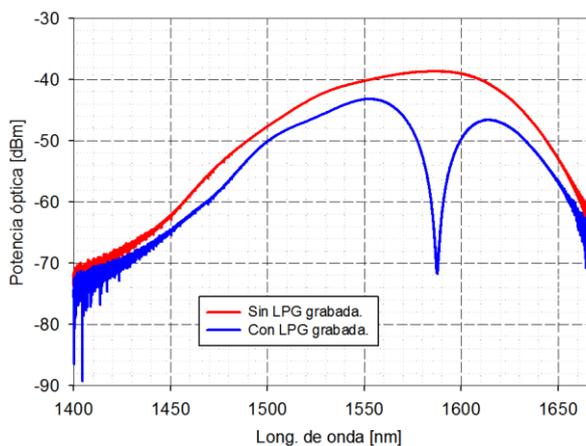


Figura 12. Respuesta a la transmisión de una fibra con y sin LPG grabada.

Las características de transmisión de la red pueden ser medidas (empleando el arreglo experimental muestra-

do en la Fig. 2) a medida que se lleva a cabo el proceso de inscripción de la misma sobre la fibra. En la Fig. 13 se puede observar el ciclo de crecimiento del pico de atenuación de una LPG debido al incremento de la modulación de índice de refracción generada en la fibra al aumentar la longitud de la red cuando se incrementa la cantidad de “marcas” o  $\mu$ -tapers realizados. Se observa que la eficiencia de acoplamiento modal se incrementa rápidamente al aumentar el número de  $\mu$ -tapers de la red. En el gráfico se muestran distintos trazos correspondientes a la transmisión de una LPG de 520 micrones de período entre “marcas”, luego de realizar la cantidad de  $\mu$ -tapers indicada para cada caso. La longitud de onda de resonancia para la red inducida es de 1567.57nm, con una atenuación cercana a -30dBm luego de efectuar 19  $\mu$ -tapers.

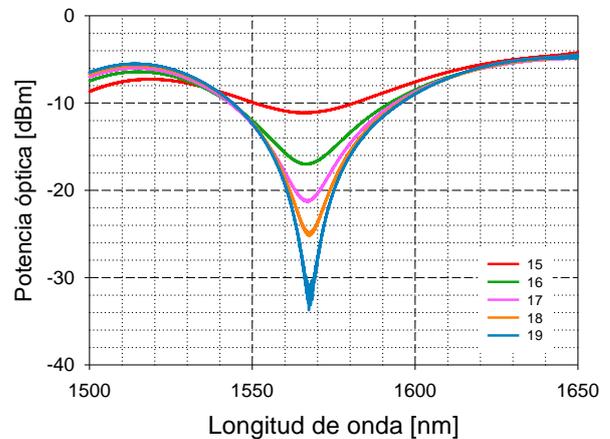


Figura 13. Ciclo de crecimiento del pico de atenuación durante la fabricación de una LPG.

Finalmente, la Fig. 14 muestra cómo cambia la longitud de onda del acoplamiento resonante al variar el período de la LPG o distancia entre  $\mu$ -tapers, pero manteniendo constante la amplitud de la modulación de índice al dejar constante la potencia del arco eléctrico aplicado.

En la Tabla 1 se muestran las características de desempeño óptico de algunas de las LPG generadas en el CIOp (resultado típico) en comparación con las de otros dispositivos comerciales del mismo tipo y de origen extranjero (O/E Land Inc.). Se aprecia que se lograron redes de prestaciones similares a las de encontradas en el mercado, con la ventaja de reducir notablemente los costos necesarios para disponer de estos transductores al evitar la necesidad de importación de los mismos. Además, al poder controlar los parámetros del proceso de fabricación, es posible diseñar los dispositivos de acuerdo a las necesidades de la aplicación particular que sea necesario implementar.

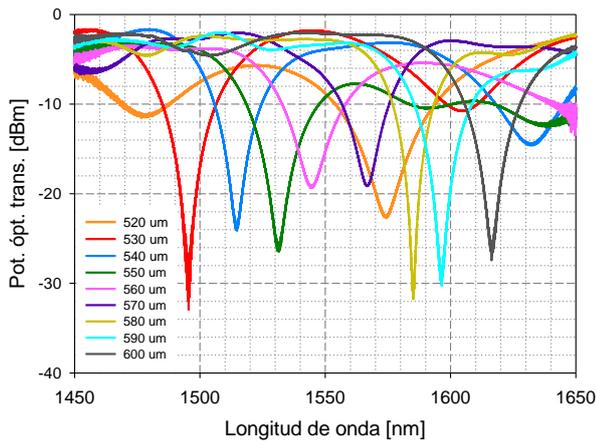


Figura 14. Sintonización del pico de atenuación de una LPG al cambiar el periodo de la red.

Unidad	Long de onda del pico de atenuación principal [nm]	Ancho espectral [nm]	Profundidad [dB]
LPG O/E Land nº1	1519,80	30,8	17,82
LPG O/E Land nº2	1521,48	17,00	36,19
LPG O/E Land nº3	1522,08	7,60	16,10
LPG O/E Land nº4	1525,29	8,60	25,70
<b>LPG CIOp nº1</b>	<b>1587,40</b>	<b>25,00</b>	<b>35,00</b>
<b>LPG CIOp nº2</b>	<b>1567,40</b>	<b>37,80</b>	<b>25,00</b>
<b>LPG CIOp nº3</b>	<b>1595,75</b>	<b>16,20</b>	<b>21,00</b>
<b>LPG CIOp nº4</b>	<b>1583,60</b>	<b>20,25</b>	<b>30,00</b>

Tabla 1. Cuadro de comparación LPG de mercado vs LPG generadas en el CIOp.

Cabe destacar que para realizar una caracterización de las LPG fabricadas con vistas a su utilización en la implementación de sensores ópticos, deben evaluarse las sensibilidades de las mismas con respecto a los cambios de: temperatura, índice efectivo del revestimiento respecto del medio que lo rodea, y tensión mecánica que se aplique sobre la fibra. Este estudio se encuentra actualmente en curso.

Así mismo, a partir de los resultados alcanzados en la generación de LPGs con picos de atenuación en la banda espectral de 1500nm, se analiza actualmente las modificaciones a realizar con la finalidad de lograr iguales resultados en la región espectral cercana a 800nm, donde se pretende implementar cierto tipo de sensores basados en LPGs recubiertas con nanopartículas metálicas.

### Conclusiones

En este trabajo se describe la implementación de una técnica para inscribir redes de periodo largo (LPGs) en fibra óptica. La misma consiste en la generación de una sucesión de reducciones del diámetro de la fibra o  $\mu$ -tapers, realizados mediante la aplicación de un arco eléctrico capaz de fundir la sílice mientras la fibra es tensionada de manera controlada. Se discuten las características de las redes fabricadas, así como la influencia de diferentes parámetros en el desempeño óptico de los dispositivos fabricados.

Se concluye que actualmente y como consecuencia de las actividades descritas en este trabajo, en el CIOp se cuenta con los conocimientos e infraestructura necesarios para generar LPGs cuyas características ópticas de transmisión son altamente satisfactorias y comparables a las de dispositivos comerciales equivalentes. Además, dado que estos elementos no se fabrican en otro laboratorio o empresa en el país, este desarrollo permitirá realizar la sustitución de importaciones con las ventajas que ello conlleva.

Los emergentes de este trabajo establecen los cimientos necesarios para la fabricación de LPGs a demanda y con posibilidad de lograr las características de desempeño requeridas según la aplicación a desarrollar.

Por otro lado, como las LPGs constituyen el elemento transductor básico en el desarrollo de innumerables esquemas de sensado de gran cantidad de variables fisicoquímicas, la disponibilidad de estos elementos contribuirá a la concreción de líneas de investigación como aquellas tendientes a la caracterización de materiales cementíceos que se está realizando en colaboración entre grupos de investigación del CIOp y del LEMIT.

### Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. de Buenos Aires – CIC, a través de los subsidios para investigadores otorgados a la Dra. Nélide A. Russo por Resoluciones N° 602/16 y 195/17.

Los resultados del presente trabajo forman parte del Proyecto de Investigación Científico-Tecnológica PICT 2017-0091 (“Hormigones de Bajo Impacto Ambiental Resistentes a Carbonatación”) dirigido por el Dr. Yury Villagrán Zaccardi.

Los autores agradecen al Dr. Yury Villagrán Zaccardi y a la Dra. Anahí López, docentes de la UTN FRLP e investigadores del LEMIT, por su asistencia y colaboración en la realización de actividades vinculadas a las líneas de investigación conjunta. También se agradece a las autoridades de las instituciones patrocinantes (CIOp, LEMIT, UTN FRLP) por el apoyo brindado y por la excelente predisposición a dar respaldo a los lazos colaborativos entre el personal de las distintas dependencias involucradas.

### Referencias bibliográficas

- Consales, M., Berruti, G., Borriello, A., Giordano, M., Buontempo, S., Breglio, G., ... & Cusano, A. (2014). Nanoscale TiO<sub>2</sub>-coated LPGs as radiation-tolerant humidity sensors for high-energy physics applications. *Optics Letters*, 39(14), 4128. doi: 10.1364/ol.39.004128
- Lecler, S., & Meyrueis, P. (2012). Intrinsic Optical Fiber Sensor. En *Fiber Optic Sensors*. InTech. doi: 10.5772/27079
- Leung, C., Wan, K., & Chen, L. (2008). A Novel Optical Fiber Sensor for Steel Corrosion in Concrete Structures. *Sensors*, 8(3), 1960–1976. doi: 10.3390/s8031960
- Leung, C. K. Y., Wan, K. T., Inaudi, D., Bao, X., Habel, W., Zhou, Z., ... & Imai, M. (2015). Review: optical fiber sensors for civil engineering applications. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(4), 871–906. doi: 10.1617/s11527-013-0201-7
- Li, H. N., Li, D. S., & Song, G. B. (2004). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering Structures*, 26(11), 1647–1657. doi: 10.1016/j.engstruct.2004.05.018
- López-Higuera, J. M., Quinquela Incera, A., & Cobo, A., 2011. Fiber Optic Sensors in Structural Health. *Lightwave Technology*, 29(4), 378-402.
- Lou, J., Wang, Y., & Tong, L. (2014). Microfiber optical sensors: A review. *Sensors*, 14(4), 5823–5844. doi: 10.3390/s140405823
- Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K., & Bhattacharya, D. K. (2008). Fibre Bragg gratings in structural health monitoring. En *Sensors and Actuators A: Physical* (vol. 147, pp. 150–164)
- Martínez-Ríos, A., Monzon-Hernandez, D., Torres-Gomez, I. & Salceda-Delgado, G. (2012). Long Period Fiber Gratings. In *Fiber Optic Sensors*. (pp. 275-294)
- Mendes do Rego, G. (2006). *Arc-Induced Long-Period Fibre Gratings. Fabrication and Their Applications in Optical Communications and Sensing (tesis doctoral)*. Universidade do Porto, Praça Gomes Teixeira, Portugal. Recuperado de <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/12213>
- Tang, J. L., & Wang, J. N. (2007). Measurement of chloride-ion concentration with long-period grating technology. *Smart Materials and Structures*, 16(3), 665–672. doi: 10.1088/0964-1726/16/3/013
- Zheng, S. (2015). Long-period fiber grating moisture sensor with nano-structured coatings for structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, 14(2), 148–157. doi: 10.1177/1475921714560069