

## Sensor de temperatura de fibra óptica con procesamiento digital de señales

Nancy Martínez-González, Flavio César Guzmán-Niño, José Francisco Estrada-Segura, Víctor Manuel Cisneros-González, Roberto Martínez-Martínez, Ruth Ivonne Mata-Chávez, Carlos Rodríguez-Doñate<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Estudios Multidisciplinarios, División de Ingeniería, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

### Resumen

En este trabajo se estudia la evolución de la respuesta de un sensor de temperatura, fabricado con rejillas engrosadas de fibra óptica de dispersión desplazada, arco eléctrico y luz blanca, usando técnicas de procesamiento digital de señales. Las señales se obtienen exponiendo la fibra óptica a temperaturas en un rango de 0-500 grados Celsius cuyo efecto es el desplazamiento de las bandas de atenuación en el espectro hacia la derecha. Los datos que se obtienen de este desplazamiento del espectro se analizan con técnicas DSP aplicando inicialmente un filtro pasa-bajas, para después obtener la derivada y conocer los máximos y mínimos del espectro, así a partir de una discriminación de estos parámetros y de un ajuste polinomial se estima la temperatura ubicando las longitudes de onda central de las bandas de atenuación. Estos resultados iniciales harán posible la fabricación y calibración de sensores de fibra óptica, de bajo costo, no voluminosos y que compitan con sus contrapartes mecánicas y electrónicas a nivel comercial e industrial. Además de obtener un modelo lineal del sensor de temperatura tanto teórico como experimental con lo que se podrán obtener información de las características ópticas del dispositivo.

**Palabras clave:** Analizador de espectros óptico; procesamiento digital de señales; rejillas engrosadas de fibra óptica.

### INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de fibra óptica se ha visto en gran variedad de aplicaciones sobre todo en las redes de telecomunicaciones, ya que al hacer uso de ellas se tienen grandes ventajas como transmisión de datos a alta velocidad, mejoras en el ancho de banda, evita interferencias, mejora la seguridad de red, entre otras (Pool & Nagel, 1997). No obstante, el rápido desarrollo de la tecnología y científico referente a fibras ópticas y optoelectrónica ha permitido explorar el diseño de sensores como una alternativa práctica para aplicaciones médicas, al medio ambiente, al sector industrial, de uso cotidiano, entre muchas más.

Particularmente, el uso de fibras ópticas para diseñar e implementar sensores de temperatura en el sector industrial, se ha caracterizado por la capacidad que tienen para soportar altas temperaturas, inmunidad al ruido, tamaño reducido, alta sensibilidad, interferencia anti-electromagnética [2] (Wang, Huang, Zhu, Yang & Lewis, 2019). Por ejemplo, la propuesta desarrollada por [3] (Wei, Xiaotian & Ying, 2015) donde proponen un sensor de temperatura con fibra óptica de zafiro que está basado en la ley de radiación de cuerpo negro y combinan técnicas de termometría, radiometría y medición de temperatura basada en óptica. En el trabajo presentado por [4] (Navas, Echeverry & Cadavid, 2013) donde se utiliza la fibra óptica para determinar la temperatura de un transformador inmerso en aceite, utilizando la técnica de evaluación térmica mediante carga simulada, cortocircuito y carga real a dos niveles. El trabajo presentado por [2] (Wang, Huang, Zhu, Yang & Lewis, 2019) enfocado en un sensor de fibra óptica basado en resonancia de plasmón superficial (SPR), utilizando la técnica de sensibilidad por índice de refracción. Por otro lado, el uso de sensores de rejillas de Bragg de fibra óptica los cuales se encuentran entre los elementos más populares para las redes de sensores de fibra óptica que son usados para obtener mediciones directas de temperatura y deformación [6] (Tosi, 2017), Anteriormente ya se han fabricado rejillas de periodo largo (RPL) con arco eléctrico por el método de engrosado del diámetro de la fibra [7] (Mata, Martínez, Torres, Selvas & Estudillo, 2008) por lo que es posible diseñar sensores con rejillas de periodo largo engrosadas con el método de arco eléctrico mediante una empalmadora comercial. Regularmente, los métodos propuestos en la literatura han utilizado directamente la señal del analizador de espectros

ópticos (OSA) para realizar la estimación de la variable a medir; sin embargo, como se ha demostrado en el trabajo propuesto (Ferreira & Santos, (1998) el uso de técnicas de procesamiento digital de señales mejora la visibilidad de las franjas y facilitan la localización de picos.

En este trabajo se propone el diseño de un sensor de temperatura a partir de una RPL de fibra óptica, la metodología parte de la señal espectral que proporciona el OSA la cual se adquiere de forma experimental como se propone por (Mata, Martínez, Torres, Selvas & Estudillo ,2008), con este espectro y técnicas de procesamiento digital de señales se logra estimar la temperatura donde la sensibilidad depende directamente de la resolución del espectro que proporciona el OSA.

## MARCO TEÓRICO

En esta sección se darán a conocer las técnicas de procesamiento digital de señales que se utilizan para la solución del problema.

### Derivada

El concepto básico de la derivada de una señal digital  $x(n)$  es el cambio que tiene por unidad de tiempo, a partir de esto la derivada se puede estimar por la ecuación (1).

$$xd(n) = x(n) - x(n - 1) \quad (1)$$

Donde,  $xd$  indica la señal derivada y  $n$  las muestras. A hora bien, con la señal  $xd$  se pueden estimar los máximos y mínimos de la señal los cuales ocurrirán cuando  $xd = 0$ .

### Filtro digital

La función de transferencia de un filtro en el dominio de la frecuencia queda definida por la siguiente ecuación:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (2)$$

Particularmente la respuesta en frecuencia de un filtro pasa bajas se muestra en la figura 1, como se puede observar su ganancia solo ocurrirá cuando las componentes sean menores a la frecuencia de corte  $\omega_c$ . Así, la banda de paso está dada para  $0 < \omega < \omega_c$ , donde  $\omega_c$  corresponde a la frecuencia en la cual la ganancia cae  $-3dB$ , y posterior a esta frecuencia la ganancia comenzara a disminuir lo que indica que todas las componentes de alta frecuencia se atenuaran.

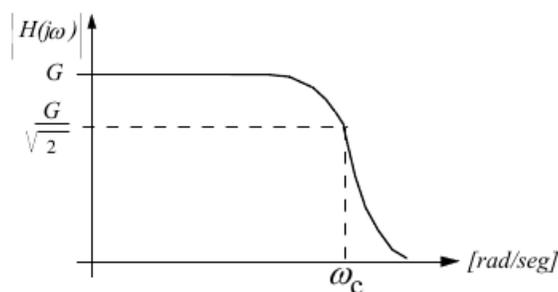


Figura 1. Respuesta en frecuencia de un filtro pasa bajos.

Por lo tanto, la implementación de un filtro de respuesta al impulso finito (FIR) queda definida por la ecuación (3), que indica la convolución de los coeficientes que definen al filtro  $h(n)$  con la señal a filtrar  $x(n)$ .

$$y(n) = h(n) \otimes x(n) \quad (3)$$

donde  $y$  será la señal filtrada.

## Interpolación lineal

Con frecuencia se encuentra con que tiene que estimar valores intermedios entre datos definidos por puntos. El método más común que se usa para este propósito es la interpolación polinomial. Donde la formula general para una función polinomial de  $n$ -ésimo grado es queda definido por la siguiente ecuación:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (4)$$

Dados,  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ , son los coeficientes del ajuste para el polinomio.

## DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La fibra óptica de cuatro capas (LEAF) monomodo de dispersión desplazada es una fibra con una estructura de 4 capas. Los perfiles de índice de refracción de las diferentes regiones anulares se obtienen al dopar con fluoro y con germanio. La RPL se pueden clasificar por el tipo de deformación inducido en la fibra óptica, la cual sirve para generar la RPL en una fibra óptica con deformación permanente o deformación temporal. Específicamente la RPL con deformación permanente mediante arco eléctrico tiene una resistencia a temperaturas altas en comparación con las demás técnicas que conforme la temperatura sobrepasa los 300 grados centígrados la forma comienza a borrarse. Para poder diseñar un sensor de temperatura con la RPL, se utiliza el experimento que se muestra en la figura 2, donde se tiene un generador de luz blanca, una parrilla para controlar la temperatura y un analizador de espectros óptico (OSA). A partir de esto se puede ver el comportamiento del espectro al pasar la luz blanca por la RPL conforme la temperatura aumenta.

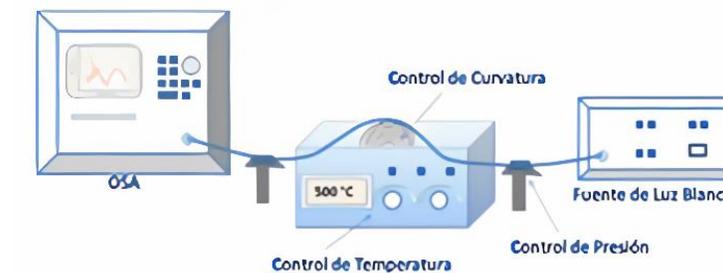


Figura 2. Experimento para observar el comportamiento de la RPL conforme aumenta la temperatura.

Mediante el OSA se obtiene el comportamiento de la longitud de onda con forme la temperatura aumenta, dicho comportamiento se puede observar en la figura 3.

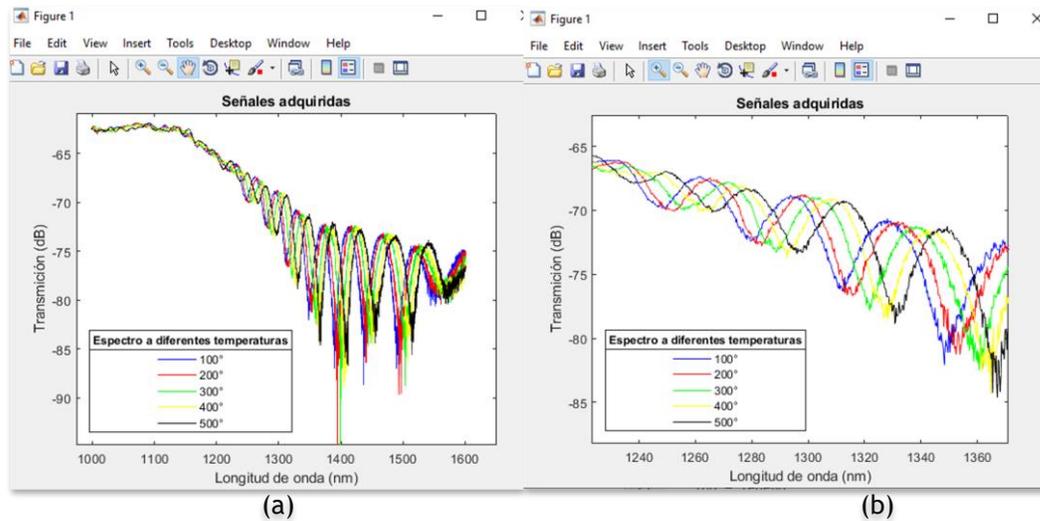


Figura 3. Comportamiento del espectro con una fibra RPL al variar la temperatura, (a) Variación de temperatura de 100°C a 500°C, (b) Acercamiento del espectro al varía la temperatura.

Como se muestra en la figura 3(a), al aumentar la temperatura en la fibra RPL el espectro tiene un comportamiento similar, sin embargo, al observar con más detalle como se muestra en la figura 2(b) se puede ver claramente como se desplaza el espectro hacia la derecha al incrementar la temperatura en la fibra RPL. Bajo este principio se fundamenta la metodología de esta propuesta.

## METODOLOGÍA

La propuesta de la metodología para diseñar el sensor mediante técnicas de procesamiento digital de señales requiere el espectro que proporciona el OSA cuando al sensor se le introduce luz blanca, la cual se muestra en la figura 4. Por lo tanto, a esta señal se le aplica un filtro pasa-bajas, se obtiene la derivada para conocer los máximos y mínimos del espectro, y a partir de una discriminación de estos parámetros y un ajuste polinomial se estima la temperatura.

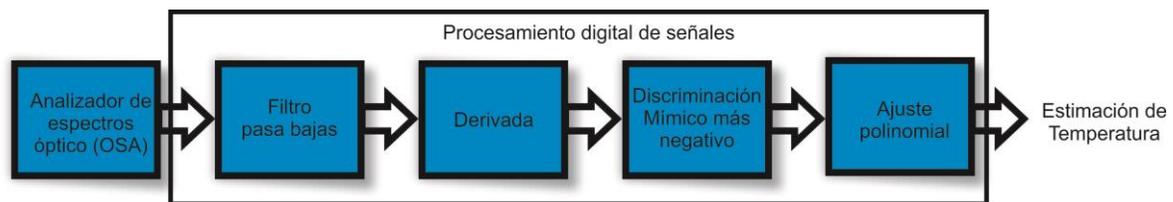


Figura 4: Propuesta de metodología

Ahora bien, a partir del principio descrito en la sección anterior, donde el espectro de la señal se desplaza al incrementar la temperatura en este trabajo se propone identificar el pico más negativo del espectro, a partir del cual se estimará la temperatura. Para poder realizar este proceso, es necesario eliminar el ruido que se genera al pasar la señal del dominio continuo al dominio discreto ya que en este proceso se generan componentes de alta frecuencia, que afectaran la medición. Por lo tanto, la señal se filtrará con un filtro pasa bajas, con lo que se obtiene una señal que permite realizar el análisis con mejor precisión, esta etapa se muestra en la figura 5.

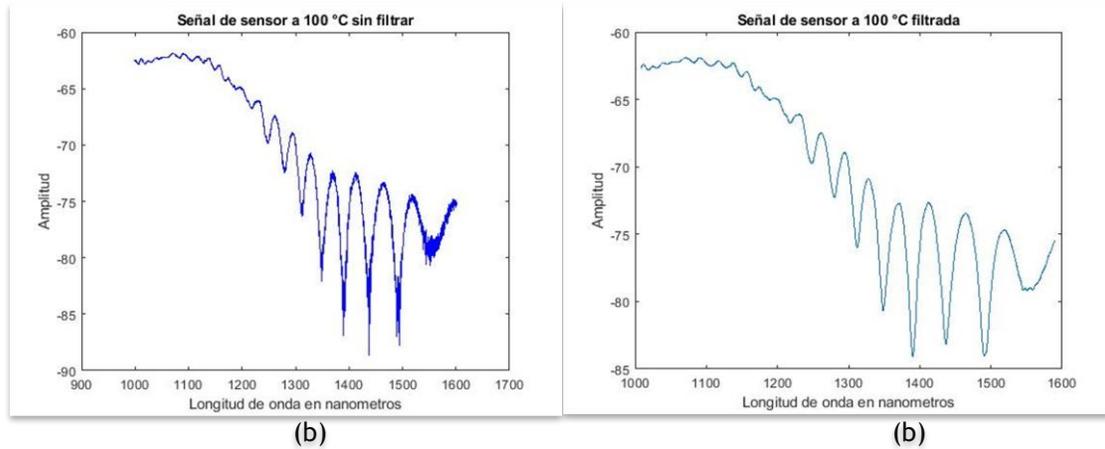


Figura 5. Espectro entregado por el OSA, (a) Espectro sin filtrar, (b) Espectro filtrado.

Una vez filtrada la señal se calcula la derivada con la finalidad de conocer los máximos y mímico de la señal filtrada, para obtener la amplitud más negativa del espectro que se toma como región de estudio, esto ocurrirá cuando en la región de análisis se obtenga un cero en la derivada de la señal, este punto se tomará como parámetro para conocer el desplazamiento al cambiarse la temperatura. De este análisis se obtiene que las señales del espectro a 100°C, se desplazó en 19 nanómetros al aumentar a los 500°C. La figura 6(a) muestra la longitud de onda de los puntos de cruce por cero de la señal derivada en la región de análisis, cada punto corresponde a la amplitud del espectro conforme se aumentó la temperatura en la fibra RPL a 100°C, 200°C, 300°C, 400°C y 500°C. Con estos puntos se realiza el ajuste polinomial con la herramienta de 'curve fitting' de Matlab lo cual se muestra en la Figura 6(b) con los cuales se obtiene la ecuación matemática que modela el comportamiento que determinará la temperatura a partir de la longitud de onda con amplitud más negativa.

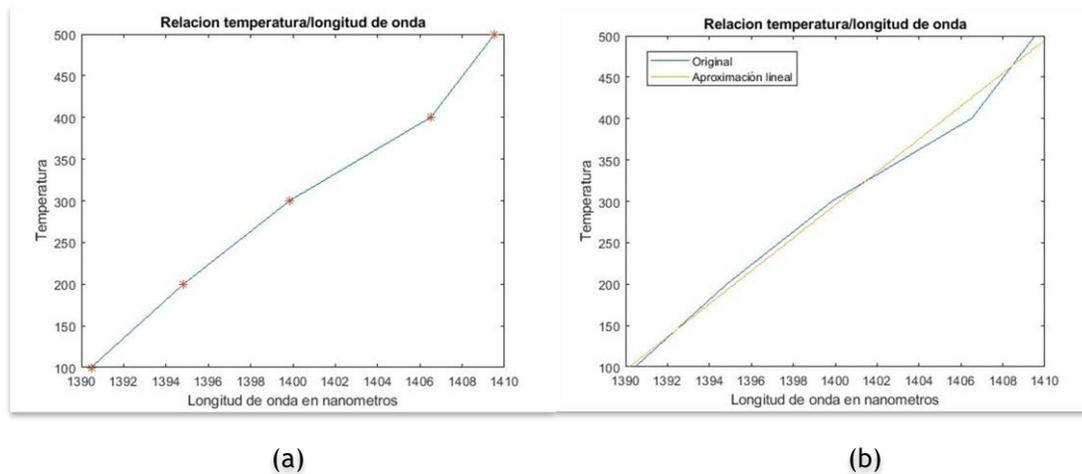


Figura 6. Estimación de la temperatura, (a) Longitud de onda que ocurre cuando en la amplitud más negativa del espectro, (b) Curva con ajuste polinomial.

Finalmente, para obtener la temperatura se debe ingresar la longitud de onda dada en el cruce por cero en la región de trabajo de entre 1390 nm y 1410 nm en la ecuación obtenida mediante la aproximación polinomial definida por la siguiente expresión:

$$T(\lambda)=19.916*\lambda - 27587 \quad (5)$$

Donde, la variable  $T$  indicará la temperatura que estimará el sensado y  $\lambda$  es la longitud de onda cuando ocurre el cruce por cero de la señal derivada.

## RESULTADOS

La etapa de resultados se realizó con cinco pruebas adicionales donde nuevamente se varió la temperatura del sensor RPL de  $100^{\circ}\text{C}$  a  $500^{\circ}\text{C}$  con un intervalo de  $100^{\circ}\text{C}$  entre cada prueba. Al aplicar la etapa de filtrado se obtienen las gráficas que se presentan en la figura 7, con las cuales se detecta el valle más bajo para poder identificar la longitud de onda que requiere la ecuación (5) con la que se estimará la temperatura de cada prueba.

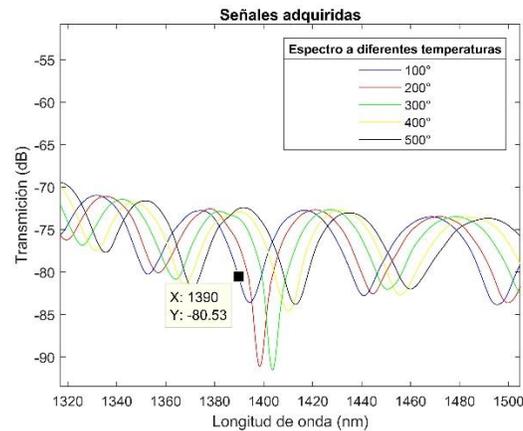


Figura 6. Longitud de onda considerada para una temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$  (tomada del espectro de las señales adquiridas del comportamiento del sensor).

Para mayor claridad en la figura 6, se indica el valor de longitud de onda de la señal del sensor a  $100^{\circ}\text{C}$ , donde al sustituirla en la ecuación (5) y se obtuvo que  $T = 19.916(1390) - 27587 = 96.24^{\circ}\text{C}$ , de esta forma se hizo el mismo procedimiento con todos los valles más bajos de las pruebas realizadas, teniendo como resultados las temperaturas que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Tabla comparativa entre aproximación lineal respecto a la temperatura deseada

TEMPERATURA	PRIMERA APROXIMACIÓN
$100^{\circ}\text{C}$	$96.24^{\circ}\text{C}$
$200^{\circ}\text{C}$	$175.90^{\circ}\text{C}$
$300^{\circ}\text{C}$	$275.484^{\circ}\text{C}$
$400^{\circ}\text{C}$	$414.896^{\circ}\text{C}$
$500^{\circ}\text{C}$	$474.644^{\circ}\text{C}$

## CONCLUSIONES

La fabricación de dispositivos para el sensado de temperatura, en base a rejillas de periodo largo de fibra óptica, necesita respaldarse con un sistema de medición compacto y de bajo costo que al final pueda medir la variable deseada. La interacción de dos áreas diferentes como la óptica y la electrónica muestra que se pueden combinar estas áreas del conocimiento para obtener dispositivos más económicos y viables de utilizar a nivel comercial e industrial. Este trabajo muestra como se pueden usar los métodos de procesamiento digital de señales para diseñar un sistema compacto y de bajo costo para la medición de variables físicas ya sea en campo o en laboratorio. Se muestra el comportamiento lineal del sensor de temperatura tanto experimental como teórico, con lo que se puede obtener información de las características ópticas del dispositivo. Es necesario seguir mejorando estos dispositivos para obtener altas sensibilidades a diferentes parámetros y puedan calibrarse con resoluciones más bajas. El método funciona para que el sistema indique la temperatura aproximada a la que se encuentra la medición de la temperatura. Finalmente, con esta

propuesta la estimación de la temperatura dependerá directamente de la resolución que tiene la señal de espectro que entrega el OSA. Como prospectivas del trabajo, se buscará el uso de técnicas de procesamiento digital de señales que mejoren la respuesta obtenida, además de buscar que la nueva propuestas sea capaz de realizar la medición de la variable de forma autónoma.

## Referencias

- Fernando-Navas, D., Cadavid Ramírez, H. & Echeverry Ibarra, D. F., 2013. Implementación de un sistema de temperatura empleando fibra óptica para el estudio térmico de un transformador de distribución inmerso en aceite mineral y vegetal. *Revista EIA*, 10 (19), pp. 23-31.
- Jorge, P., Ferreira, L., & Santos, J., 1998. Digital signal processing technique for white light based sensing systems. *Review Of Scientific Instruments*, 69(7), pp. 2595-2602.
- Mata-Chávez, R., Martínez-Ríos, A., Torres-Gómez, I., Selvas-Aguilar, R., & Estudillo-Ayala, J. 2008. Mach-Zehnder all-fiber interferometer using two in-series fattened fiber gratings. *Optical Review*, 15(5), pp. 230-235.
- Poole, C. D., & Nagel, N., 1997, Polarization effects in lightwave systems, in: *Optical Fiber Communications IIIA*, Academic Press, 1(1), pp. 115-161.
- Tosi, D., 2017. Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors*, 17(10), pp. 2368.
- Wang, Y., Huang, Q., Zhu, W., Yang, M. & Lewis, E., 2019. Novel optical fiber SPR temperature sensor based on MMF-PCF-MMF structure and gold-PDMS film: erratum. *Optics Express*, 27(8), pp.10813.
- Wei, W., Xiaotian, S., & Ying, W., 2015. Sapphire Fiber-optic Temperature Sensor Based on Black-body Radiation Law. *Procedia Engineering*, 99(1), pp.1179-1184.