

Bibliografía

Arenas, Jenny Patricia. Transferencias de embriones en el Criadero "La Luisa": Influencia de la calidad y desarrollo del embrión y del sincronismo Donante – Receptora en las tasas de preñez. Medellín, Universidad de Antioquia, Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia. Trabajo de grado de medicina veterinaria, 2001.

Betteridge KJ. Equine embryology: An inventory of unanswered questions. Theriogenology, No. 68S, pp. S9-S21, 2007.

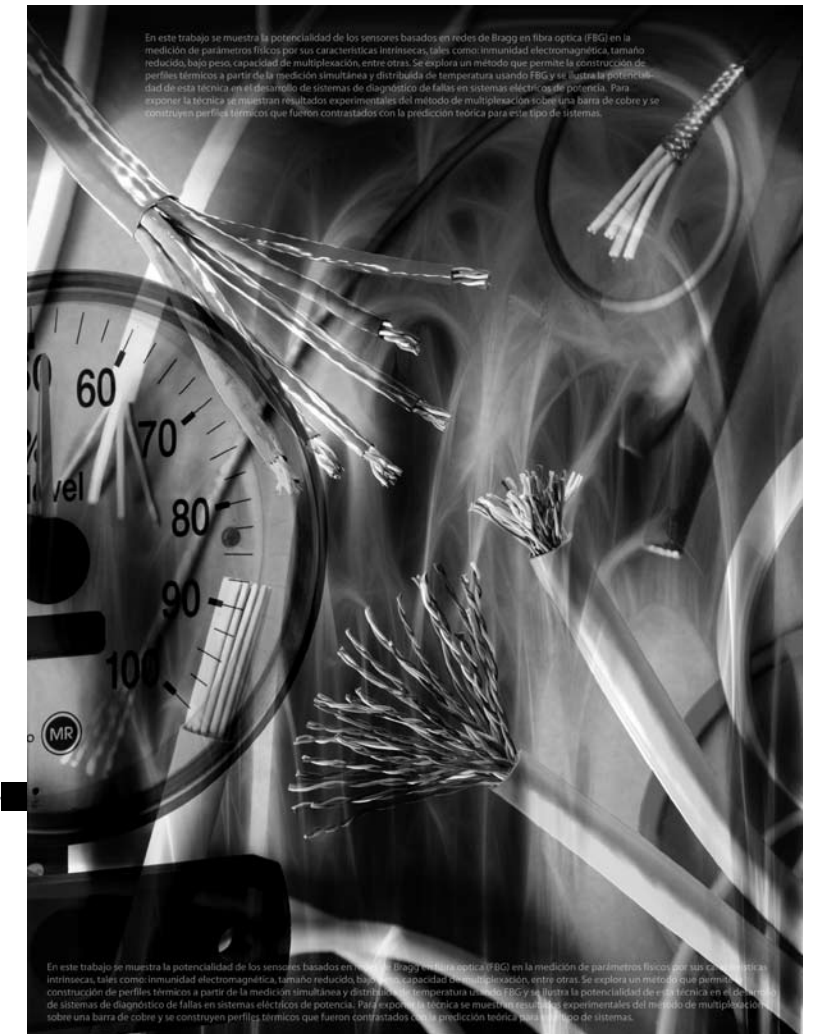
Otálvaro, Francisco Javier. Evaluación de un programa de inseminación artificial en equinos con semen fresco. Medellín, Universidad de Antioquia, Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia. Trabajo de grado de medicina veterinaria. 1996.

Ramos, José Hernando. Técnicas actuales de la transferencia embrionaria en el equino. En: Revista FEDEQUINAS, Bogotá, No. 25, pp. 84 – 87, septiembre - octubre de 2002.

Samper, Juan Carlos. Equine Breeding Management and Artificial Insemination. Toronto, W.b. Saunders, 2000.

Suárez, José Bolívar. Algunas condiciones que afectan la fertilidad de las yeguas de paso colombiano. En: Revista FEDEQUINAS, Bogotá, No. 34, pp 112 – 114, julio - agosto de 2004.

7. Vanderwall, D. Técnicas Actuales de Transferencia Equina. En: www.ivis.org/advances/reproduction_ball/embryo_transfer_vanderwall_es/chapter_frm.asp, 2008.



Multiplexación de sensores ópticos de fibra: Una oportunidad en la medición de parámetros de interés al sector eléctrico colombiano.

Jorge A. Gómez
Francisco J. Vélez
Rodrigo Acuña

Autores

JORGE A. GÓMEZ,^{1,2} FRANCISCO J. VÉLEZ,^{1,2} RODRIGO ACUÑA².

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

²Grupo de Fotónica y Opto-Electrónica. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Recibido: 5 de diciembre de 2007

Aprobado: 25 de febrero de 2008

Resumen

En este trabajo se muestra la potencialidad de los sensores basados en redes de Bragg en fibra óptica (FBG) en la medición de parámetros físicos por sus características intrínsecas, tales como: inmunidad electromagnética, tamaño reducido, bajo peso, capacidad de multiplexación, entre otras. Se explora un método que permite la construcción de perfiles térmicos a partir de la medición simultánea y distribuida de temperatura usando FBG y se ilustra la potencialidad de esta técnica en el desarrollo de sistemas de diagnóstico de fallas en sistemas eléctricos de potencia. Para exponer la técnica se muestran resultados experimentales del método de multiplexación sobre una barra de cobre y se construyen perfiles térmicos que fueron contrastados con la predicción teórica para este tipo de sistemas.

Palabras clave

Perfil térmico, redes de Bragg, sensado distribuido

Abstract

This paper shows the potential of Optical Fiber Bragg Gratings (FBG) based sensors in the measurement of physical parameters, by its intrinsic characteristics such as: Electromagnetic immunity, small size, low weight, multiplexing capacity, among others. It explores a method that allows creating thermal profiles by using simultaneous and distributed temperature measurements with FBGs and illustrates the potentiality of this technique in the failures diagnosis systems development in power electric systems. To expose the technique some experimental results that show the multiplexing method on a copper bar and the thermal profiles were contrasted with the theoretical prediction for this type of systems.

Key Words

Thermal Profile, Fiber Bragg Gratings, Distributed Sensing

Multiplexación de sensores ópticos de fibra: Una oportunidad en la medición de parámetros de interés al sector eléctrico colombiano.

Jorge A. Gómez

Francisco J. Vélez

Rodrigo Acuña

POLITÉCNICA No. 6

enero - junio de 2008, pp.75 - 84

1. Introducción

El mundo de los sensores de fibra óptica está ligado a la industria de las comunicaciones y a la optoelectrónica. Estos sensores toman ventaja de los componentes desarrollados para esos mercados y muestran mejor desempeño que los sensores convencionales electrónicos y electromecánicos en aplicaciones de alta exigencia. Muchas de estas ventajas provienen del hecho de que las fibras están hechas de vidrio (material no conductor), y de que los fotones, no los electrones, son los encargados de la propagación de las señales. La inmunidad de la luz a la interferencia electromagnética (EMI) es una gran



ventaja en sistemas de alta contaminación electromagnética, como es el caso de los sistemas eléctricos de potencia (Dakin y Culshaw, 1988). 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. Estos sensores son livianos, pueden funcionar en condiciones ambientales hostiles y son flexibles en cuanto a su instalación, lo que permite la detección discreta de parámetros físicos de interés.

Todas las características de los sensores de 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 (Fiber Optic Sensor Technologies & Markets in Civil Structures, 2008); en la industria naval, aérea (Borinsk, *et al*, 2000) del medio ambiente (Narayanaswamy y Wolfbeis, 2004); como también en aplicaciones a pequeña escala como en las áreas bio-químicas (Brian, 2002). En un estudio reciente se calcula que esta industria tendrá un potencial comercial que excederá los 1.2 billones de dólares en el año 2008 (Dexheimer y Hannesmann, 2005), basado en gran medida en su compatibilidad con las redes de comunicaciones ópticas y en que los costos de estos sensores han estado cayendo constantemente.

Una de las estructuras sensoras de fibra más utilizadas, son las llamadas redes de Bragg en fibra óptica (FBG = *Fiber Bragg Grating*), que corresponde a una modulación periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra, que va desde algunos milímetros a unos pocos centímetros de tamaño, y que ha sido inducida por un patrón de interferencia de luz ultravioleta, de

manera que la luz guiada en el núcleo de la fibra será dispersada por cada plano de la red. Si la condición de Bragg es satisfecha,

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1)$$

siendo n_{eff} el índice de refracción efectivo del modo fundamental (LP_{01}) y Λ el periodo de la red, luz reflejada de planos subsecuentes estará simultáneamente en fase reforzándose; luz que no coincida con la longitud de onda de resonancia de Bragg, λ_{Bragg} , será muy poco reflejada. En la figura 1 se esquematiza todo este proceso. El coeficiente de reflexión de la FBG depende de la profundidad de modulación del índice de refracción y del tamaño de la red (Hill y Meltz, 1997).

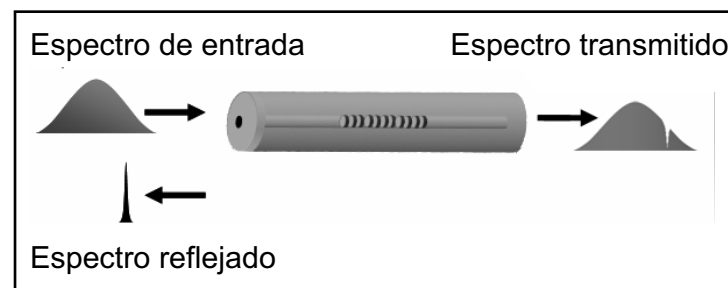


Figura 1. Principio de funcionamiento de una FBG

Cuando la red es expuesta a una perturbación externa como, por ejemplo, tensión, presión, temperatura, curvaturas, la longitud de onda de Bragg cambia. Para ver esto, basta retomar la expresión (1) de λ_{Bragg} y especificar su dependencia con estas variables físicas de la siguiente forma:

$$\Delta\lambda_{BRAGG} = 2 \left[\left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial F} \right) \Lambda + \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial F} \right) n_{eff} \right] \Delta F + 2 \left[\left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \Lambda + \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) n_{eff} \right] \Delta T \quad (2)$$

donde el primer término da cuenta del corrimiento espectral de la red de Bragg a causa a los efectos de deformación mecánicos y el segundo de los efectos térmicos.

De lo anterior, se ve claramente la posibilidad de medir directamente variables mecánicas o térmicas con una FBG, simplemente monitoreando el corrimiento espectral de su respuesta cuando se le somete a una perturbación externa de este tipo, eliminándose los problemas de amplitud o de variaciones de intensidad que afectan a muchos otros tipos de sensores de fibra óptica. Por su banda de reflexión estrecha, varias redes de Bragg pueden ser grabadas en una misma fibra sin que se perturbe el desempeño de la otra (Kersey *et al*, 1993), lo que permite el desarrollo de sensores ópticos distribuidos (multiplexación); es decir, sobre una sola fibra óptica es posible tener múltiples puntos de medida, cada uno con respuesta a variables diferentes y con grandes distancias entre ellos. Figura 2.

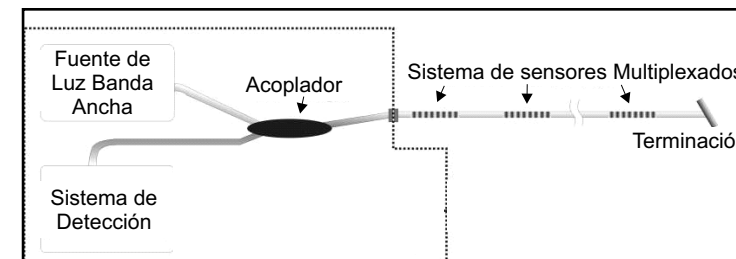


Figura 2. Sistema de sensores ópticos multiplexados

Existen varias técnicas para medir cambios en la longitud de onda de Bragg, las cuales podrían ser comparadas en exactitud, estabilidad, proceso de calibración, respuesta temporal y costos. Las técnicas pueden ser divididas en dos grupos: unas en las cuales se obtiene el espectro de reflexión completo de la red (Leblanc *et al*, 1996) y otras donde la potencia de la luz reflejada por la red se mide a través de un filtro, indicando los cambios en λ_B (técnica llamada de filtro fijo) (Nunes *et al*). En el primer caso, donde se utilizan elementos costosos como analizadores de espectros ópticos (OSA), filtros de Fabry-Perot y láseres sintonizables, una unidad

de proceso opto-electrónico hace la lectura de una o más FBG. La desventaja de este tipo de técnica es que es fundamentalmente una técnica estática, aunque en algunos casos especiales se puede llegar a medir cambios del valor de λ_{Bragg} de hasta unas pocas decenas de Hertz (Yao *et al*, 1997). Por otro lado, la técnica de filtro fijo tiende a ser rápida, con respuestas del orden de varios kilohertz, y que, combinada con las técnicas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) y por división en el dominio del tiempo (TDM), podría, en principio, permitir considerar sistemas con cientos de sensores en una misma fibra (Wehrle y *et al*, 2001).

El objetivo del presente trabajo es mostrar cómo, a partir del uso de la técnica FBG-WDM, y utilizando OSA, es posible la construcción del perfil térmico sobre una barra de cobre. La solución de este problema abre una gran gama de aplicaciones en el sector eléctrico colombiano, en el tema de diagnóstico de fallas y además es expandible al monitoreo en sectores como el civil, el petrolero, y el médico, entre otros (Torres *et al*, 2000; Canning *et al*, 2000; Hammon y Stokes, 1996).

2. Marco teórico.

Consideremos 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 figura 3).

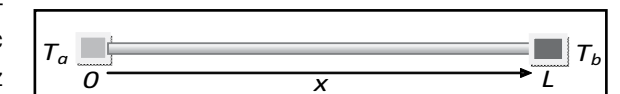


Figura 3 Barra sometida a dos fuentes térmicas en los extremos

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 , y esta solución se compone de un término proporcional a x , relativo al estado estacionario, y de una serie convergente que describe el estado transitorio (Domínguez, 1985)

$$T(x,t) = T_a + \frac{T_b - T_a}{L} x + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \exp\left(-\alpha \frac{n^2 \pi^2}{L^2} t\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \quad (3)$$

en donde los a_n son los coeficientes de la serie. Una representación del perfil de temperaturas según este modelo se presenta en la figura 4, donde se muestra una simulación del sistema tras un tiempo de tres minutos para una barra de cobre.

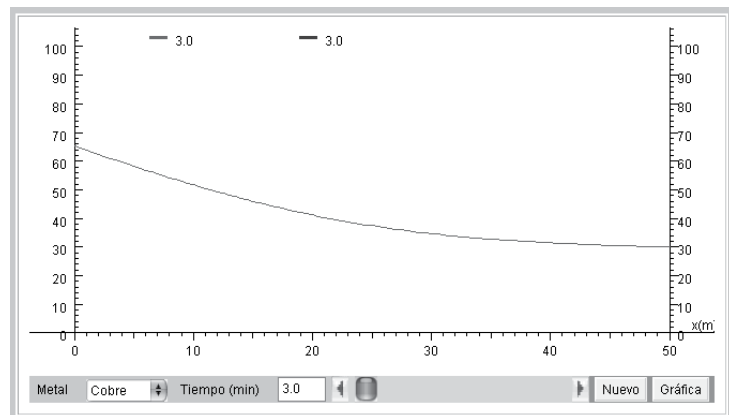


Figura.4 Simulación del perfil de temperaturas en la barra.

Si se evalúa el comportamiento térmico de un punto de coordenadas "x" 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 figura 5.

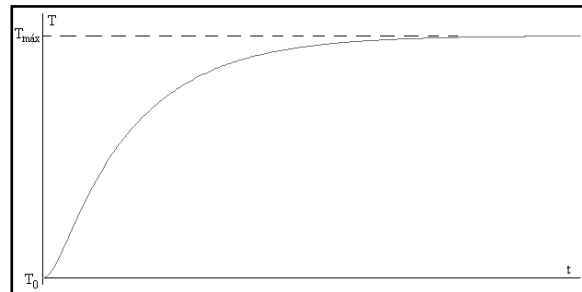


Figura 5 Simulación del tránsito hacia el estado estacionario de la barra.

Si bien en la figura 5 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 su crecimiento y se verá más seguramente como el caso ilustrado en la figura 6, en donde se ha simulado la transición hacia un equilibrio térmico de dos sistemas en contacto.

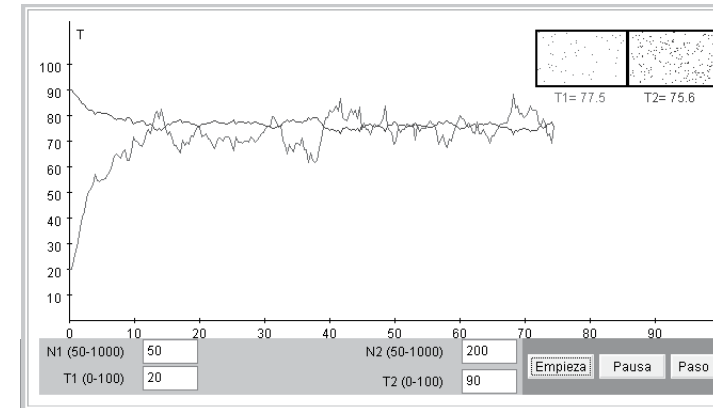


Figura 6 Simulación de la transición dinámica hacia el equilibrio térmico entre dos sistemas.

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 modelamiento 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 tres redes de Bragg grabadas sobre una fibra óptica estándar; ésta, a su vez, se conectó 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 figura 7.

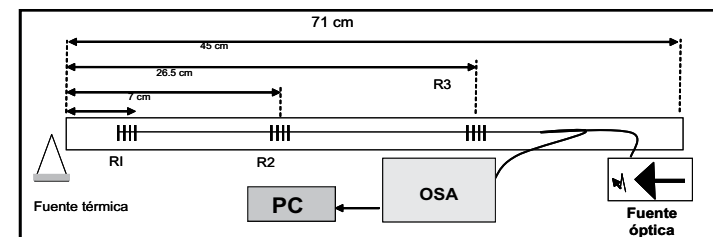


Figura 7. Esquema del montaje experimental para el sensado de temperaturas en la barra.

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), para verificar el carácter lineal del sensor como lo predice la teoría, de acuerdo con la ecuación (2):

$$\frac{\Delta \lambda_{Bragg}}{\lambda_{Bragg}} = \left(\frac{1}{n} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T \quad (4)$$

De esta expresión se infiere que un cambio en temperatura ocasiona cambios tanto en el período 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 éstos son los responsables del cambio en la respuesta espectral de la red, es decir de la longitud de onda de Bragg, λ_{Bragg} . Si interpretamos los términos del paréntesis como coeficientes de respuesta térmica de la red, la ecuación nos muestra una dependencia lineal con la temperatura para el cambio en λ_{Bragg} .

La figura 8 ilustra la curva de calibración que se obtuvo para una de las redes usadas, en la cual se observa un comportamiento muy cercano al lineal, tal como se esperaba.

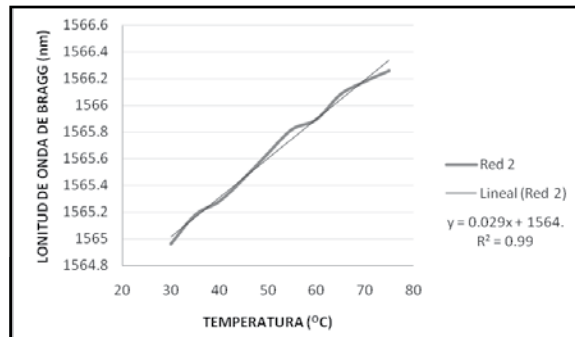


Figura 8 Curva de calibración de la red 2.

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 (Figura 9), y del otro, el proceso transitorio hacia el estado estacionario en cada punto. En la figura 10 se muestran los resultados para la red más cercana a la fuente térmica.

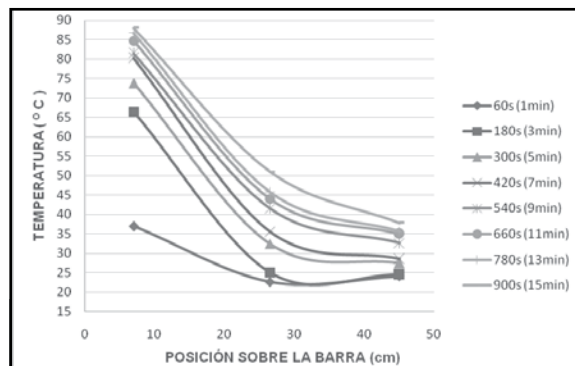


Figura 9 Evolución del perfil de temperaturas.

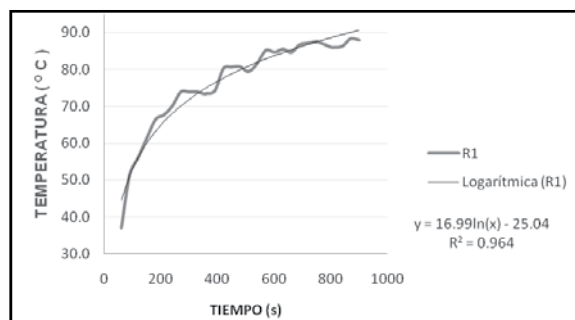


Figura 10 Transición hacia el estado estacionario.

4. Conclusiones y

perspectivas

Si se hace una comparación entre las curvas de la figura 9 con la simulación de la figura 4, resulta clara la similitud en el comportamiento registrado en la barra, medido con la técnica de sensado 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 figura 10 nos permite verificar el proceso de transición al estado estacionario, con las fluctuaciones causadas por sucesivas etapas en la búsqueda del equilibrio térmico con el entorno.

Se demostró la posibilidad experimental de construcción de perfiles térmicos continuos a partir de mediciones puntuales, lo cual puede ser escalable por las características propias de la fibra, posibilitando la medición y construcción de perfiles térmicos dentro de generadores, transformadores, cables y demás elementos del sistema que requieran esta medida y de cuyo buen funcionamiento dependa la continuidad y calidad del servicio.



Bibliografía

Borinski, J. Meller, S. Pulliam, W. Murphy, K. Optical Flight Sensors for In-Flight Health Monitoring, SPIE Proceedings, vol. 3986, Newport Beach, CA, 6 de Marzo, 2000.

Brian, R. Chemical Sensors & Biosensors, Chapter 6, John Wiley & Sons, 2002.

Canning, J. Englund, M. Sommer, K. "Fiber Gratings for High Temperature Sensor Applications", Proceeding SPIE, vol. 4185, postdeadline papers, p 1. 2000.

Dakin, J. Culshaw, B. Optical Fibre Sensors: Principles and Components, Boston: Artech House, 1988.

Dexheimer, J. Hannemann, R. Investment Opportunities in Sensor Networking: Dust, hype, fuzz, and reality, First Analysis, (<http://www.facvc.com/index.asp?PID=18&CID=626>), 2005.

Domínguez, M. Antonio, R. "Ingeniería Térmica" México, Mc Graw Hill, 1985.

Fiber Optic Sensor Technologies & Markets in Civil Structures, Information Gatekeepers (<http://www.mindbranch.com/products/R403-0009.html>), 2008.

Hammon, T. Stokes, A. "Optical Fibre Bragg Grating Temperature Sensor Measurements in an Electrical Power Transformer Usin a Temperature Compensated Fibre Bragg Grating as a Reference". En: Proceedings of the 11th International Conference on Optical Fibre Sensors, Sapporo, Japan, pp. 566-569, 1996.

Hill, K. Meltz, G. "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview". Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 8, p. 1263, 1997.

Kersey, A. Berkoff, T. Morey, W. Multiplexed Fiber Bragg Grating Strain-Sensor System with a Fiber Fabry - Perot Wavelength Filter, Opt. Lett. 18, 1370 - 1993.

Leblanc, M. Huang, S. Ohn, M. Measures, R. Guemes, A. Othonos, A. "Distributed Strain Measurement Based on a Fiber Bragg Grating and its Reflection Spectrum Analysis," Opt. Lett. 21, 1405 - 1996.

Narayanaswamy, R. Wolfbeis, S. Optical Sensors: Industrial, Environmental & Diagnostic Applications, Springer, 2004.

Nunes, L. Valente, L. Braga A. Analysis of a Demodulation System for Fiber Bragg Grating Sensors Using Two Fixed Filters";. Ph.D. Thesis. Department Of Mechanical Engineering, Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro.

Rao, Y. Henderson, P. Jackson, D. Zhang, I. Bennion, I. Simultaneous Strain, Temperature and Vibration Measurement Using a Multiplexed in-Fibre Bragg Grating/Fabry-Perot Sensor System. Electron. Lett., vol. 33, p. 2063, 1997.

Torres, P. Matos, C. Valente, L. y Margulis. W. "Fiber Grating Characterization and Shaping by Local Pressure: A Numerical Analysis." Annals of the Brazilian Commission for optics, vol.2, 2000.

Wehrle, G. Nohama, P. Kalinowski, H. Torres, P. Valente, L. A fiber Optic Bragg Grating Strain Sensor For Monitoring Ventilatory Movements, Meas. Sci. Technol., vol. 12, pp. 805-809, 2001.

http://www.spa.com/aedp_fodas.htm, 2008.



Cambio de paradigma en la organización de la información en la sociedad de la información y el conocimiento.

Yudayly Stable R.
Jorge E. Giraldo P.
Sandra P. Mateus S.