

Sensor de fibra óptica basado en el salto de intensidad de un láser lineal con dos rejillas de Bragg

M.A. Basurto-Pensado¹, E.A. Kuzin², C. Archundia-Berra, E. Marroquín, M. May-Alarcón, H.H. Cerecedo-Nez y J.J. Sánchez-Mondragón

*Departamento de Fotónica y Física Óptica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)
Apartado postal 51 y 216, 72000 Puebla, Pue., Mexico
e-mail: ¹mbasurto@inaoep.mx, ²ekuzin@inaoep.mx*

D. Tentori-Santa-Cruz, I. Marquez-Borbon, M. Shliagin y S. Miridonov
Centro de Investigación CESE

Recibido el 2 de junio de 1998; aceptado el 6 de diciembre de 1999

En este trabajo se propone una nueva configuración para un sensor de temperatura, basada en un láser de fibra óptica. La cavidad láser consiste de una sección de fibra con impurezas de erbio y dos rejillas de Bragg idénticas (que se utilizan como espejos) en los extremos de la fibra. La idea principal consiste en medir la intensidad de la radiación láser emitida a través de una de las rejillas de Bragg cuando la temperatura de la otra rejilla varía. El cambio de temperatura en una rejilla se traduce en un cambio en su longitud de onda de reflexión y por tanto en la variación de su transmitancia. Se presenta un análisis del origen del salto abrupto de intensidad que se observa, cuando la diferencia de temperatura entre las dos rejillas es de 26 o 30°C (esto se dará dependiendo de cual sea la rejilla que se utilice como punta del sensor). Aquí se muestra cómo este efecto permite el desarrollo de sensores que tengan como función detectar si se exceden los límites de temperatura deseables para el objeto bajo control, con una sensibilidad alta y utilizando un sistema de interrogación sencillo.

Descriptores: Fibras ópticas; rejillas de Bragg; sensores de fibras ópticas

In this work we propose a new configuration for an optical fiber temperature sensor, based on a linear type Er-doped fiber laser. The laser cavity consists of an Er-doped fiber and two identical Bragg gratings at the fiber ends (working as reflectors). Temperature changes are detected by measuring, through one of the gratings, the intensity variations at the system's output. When the temperature of one of the Bragg gratings is modified, a wavelength shift of its spectral reflectivity is observed. Hence, the laser emission intensity of the system is modified. We present experimental results of the intensity switch observed when the temperature difference between the gratings detunes their spectral reflectances. Making use of this effect it is possible to develop limit comparators to bound the temperature range for the object under supervision. This limiting work can be performed with a high sensitivity using a very simple interrogation procedure.

Keywords: Optical fiber; Bragg gratings; optical fiber sensors

PACS: 42.81.Pa; 42.55.Wd; 42.62.Hk

1. Introducción

La investigación en el área de sensores de fibra óptica ha ido en aumento debido a la gran variedad de parámetros que es posible medir haciendo uso de los fenómenos físicos que exhibe la luz al propagarse a través de una fibra óptica [1, 2]. La reciente incorporación de las rejillas de Bragg a los sensores de fibra óptica, ha favorecido el desarrollo de este campo [3]. Existen diversos sensores de fibra óptica que basan su funcionamiento en la utilización de dos rejillas de Bragg idénticas [4], o de varias de ellas. En algunas de estas configuraciones una de las rejillas es utilizada como la punta de referencia y las demás como puntos de muestreo; la lectura de la señal se realiza por medio de un espectrómetro [5]. Otra aplicación importante de dos rejillas de Bragg idénticas es la construcción de cavidades para láseres de fibra. Este tipo de cavidades se usa en láseres de fibra: de onda continua, de doble longitud de onda [6] y de pulsos cortos [7]. En este artículo se combinan las dos primeras aplicaciones, ya que se hace uso de las propiedades de los láseres de fibra óptica que utilizan dos rejillas de Bragg como reflectores, para desarrollar un sensor de temperatura.

En los trabajos reportados en la literatura, la interrogación del sensor se realiza midiendo el corrimiento de la longitud de onda de Bragg, lo cual implica por lo menos el uso de un monocromador. En el sistema que se propone en este trabajo, la lectura de la señal sólo requiere de la medida de los cambios de intensidad de la señal que sale por uno de los brazos de la cavidad. Este cambio simplifica considerablemente la complejidad de operación del sistema.

2. Propuesta

El arreglo que se propone como sensor, es un sistema láser lineal, el cual se puede dividir en tres bloques: la parte de bombeo, el medio activo y la cavidad (ver Fig. 1). La cavidad en este arreglo se encuentra formada por dos rejillas de Bragg, las cuales están situadas en los extremos de la fibra con impurezas de erbio. La idea principal en este sensor radica en detectar a la salida de alguna de las rejillas, las variaciones de intensidad de la señal debidas a la modificación de alguno de los parámetros del sistema. El parámetro que se modifica en este caso, es la reflectancia de una de las rejillas. Para ello

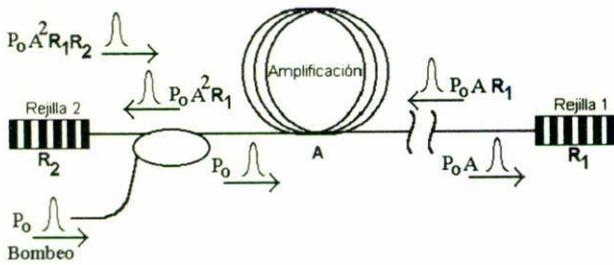


FIGURA 1. Representación de una cavidad láser utilizando dos rejillas de Bragg.

se introduce un cambio en la temperatura de una de ellas y se observa la variación de la intensidad en la señal que sale a través de cualquiera de las rejillas.

A continuación se analizará someramente el arreglo (sin la intervención de la temperatura) para un solo ciclo de amplificación, de izquierda a derecha comenzando por la introducción del bombeo P_0 (Fig. 1). Al introducir el bombeo en el arreglo, éste pasa por el medio activo donde se genera una amplificación (A) de la señal en la fibra. Al llegar a la rejilla 1 la señal experimenta una reflexión (R_1), posteriormente, debido a la reflexión la señal se amplifica de nuevo (A) y finalmente se presenta otra reflexión (R_2) por la rejilla 2. La longitud de onda de la emisión láser para este arreglo, está relacionada con el producto de $A A R_1(\lambda_1) R_2(\lambda_2)$, donde en gran medida el valor de la longitud de onda de la señal estará determinada por el producto de las reflectancias $R_1 \times R_2$. El ancho de banda de reflexión de las rejillas de Bragg utilizadas es del orden de 1 nm. En esta banda espectral se puede considerar que la amplificación no depende de la longitud de onda, ya que el funcionamiento de la cavidad está relacionado principalmente con el valor del producto de las reflectancias $R_1 \times R_2$. Si la longitud de onda de reflexión máxima de la rejilla 1 (λ_1) coincide con la longitud de onda de reflexión máxima de la rejilla 2 (λ_2), la longitud de onda del láser coincidirá con la máxima reflexión de las longitudes de onda de las rejillas de Bragg ($\lambda_1 = \lambda_2$), y por lo tanto podemos considerar que $R_1 = R_2 \approx 1$, con lo cual no habrá transmisión de la señal a través de estas rejillas. Cuando las longitudes de onda de reflexión no son iguales ($\lambda_1 \neq \lambda_2$), el láser emite a una longitud de onda distinta a las longitudes de onda centra-

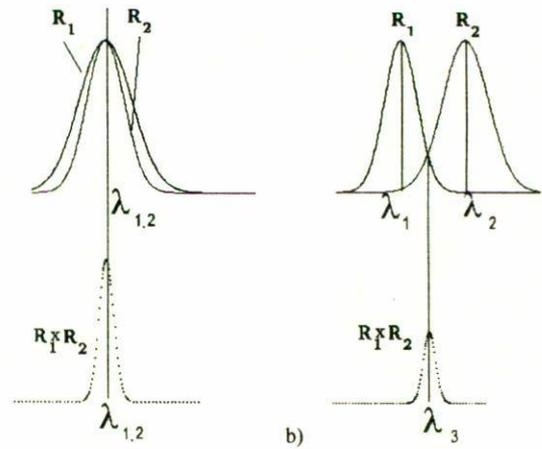


FIGURA 2. a) Dos rejillas cuando se encuentran superpuestas y su producto $R_1 \times R_2$; b) dos rejillas, una desplazada con respecto de la otra y su producto.

les λ_1 y λ_2 ; esto implica que el arreglo tiene una fuga, que es la parte de la señal que dejan transmitir las rejillas. Esta deficiencia es la que se aprovecha para detectar los cambios relativos de temperatura entre las dos rejillas.

La Fig. 2a, muestra los espectros de las rejillas superpuestas a la misma longitud de onda de reflexión y el producto de las reflectancias $R_1 \times R_2$, el cual no sufre ningún desplazamiento en su longitud de onda central. La Fig. 2b, muestra a una de las rejillas desplazadas con respecto a la otra, con lo que el producto de las reflectancias de estas dos rejillas genera una nueva longitud de onda de láser para el sistema. Esto significa que la cavidad ya no trabaja al máximo de reflexión, debido a que ahora se tiene una transmisión de la señal, la cual puede medirse en alguno de los extremos de las rejillas 1 ó 2.

3. Arreglo Experimental

La configuración del láser de fibra óptica que se muestra en la Fig. 3 tiene la peculiaridad de que al ser bombeada la fibra con impurezas de erbio con luz de 980 nm, se logra obtener una emisión láser en la banda de 1530–1560 nm.

En este sistema, el bombeo lo suministra un diodo láser de 980 nm y se introduce a la fibra activa a través de un multi-

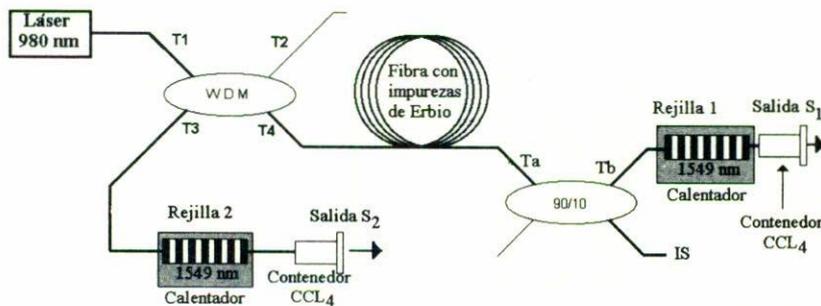


FIGURA 3. Vista general del sistema láser. La cavidad en este arreglo está formada por las rejillas 1 y 2, que funcionan como espejos y por la fibra con impurezas de erbio que servirá como el medio activo.

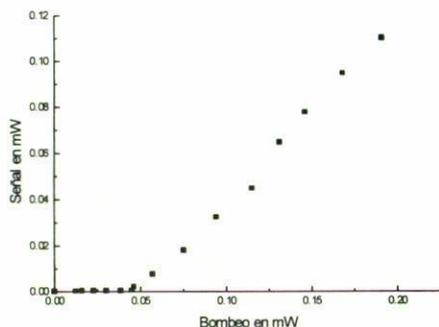


FIGURA 4. Dependencia del bombeo a la salida contra la señal a la salida del sistema.

plexor por división de longitud de onda o WDM (*Wavelength Division Multiplexor*, de sus siglas en inglés). La luz de bombeo se transporta por la terminal T1 y sale por la terminal T4 (el cruce de T1 a T4 sólo funciona para el bombeo). Esta terminal se encuentra empalmada en serie a una fibra con impurezas de erbio, un acoplador 90/10 y una rejilla de Bragg 1 que tiene una longitud de onda de reflexión de 1549.05 nm. La función de la fibra con impurezas de erbio es la de ser el medio amplificador del sistema dentro de la banda de 1530–1560 nm. El acoplador de 90/10 deja pasar a través de él, el 90% (de Ta a Tb) de la señal hacia la rejilla de Bragg, la cual funciona como un espejo para la longitud de onda de 1549.05 nm. Al final de esta rejilla se encuentra un contenedor cilíndrico en donde se coloca la terminal saliente de la rejilla, para ser sumergida en tetracloruro de carbono (CCl_4 , este líquido evita la reflexión de Fresnel de la señal en la cara de salida de la fibra). Esta salida se denota como la terminal S_1 . El acoplador antes mencionado también desvía el 10% restante de la señal generada (de Ta a IS) dentro de la cavidad hacia la terminal IS. Por otro lado, de la terminal T4 a la T3 sólo pasa la señal generada; la cual está acoplada con la rejilla de Bragg 2 que tiene una longitud de onda de reflexión de 1549.03 nm y a otro contenedor cilíndrico que tiene la misma función que el anterior (a esta terminal se le denota como S_2). En este arreglo el sistema láser lineal se encuentra conformado principalmente por dos espejos (rejillas de Bragg 1 y 2) y un medio activo (fibra con impurezas de erbio).

4. Resultados experimentales y discusión

El equipo que se utilizó, constó de un detector de silicio para medir las señales de 980 nm, tres detectores de germanio para la detección de señales de alrededor de 1550 nm, 3 espejos dicróicos para 1550 nm, un termopar para determinar la temperatura ambiente de cada rejilla de Bragg y una interfaz de computadora para monitorear visualmente la salida de cada terminal.

En la Fig. 4 se presenta el comportamiento de la potencia de bombeo, contra la potencia de la señal de salida en el arreglo láser, ambas medidas se tomaron en la terminal IS. Esta medición se realizó manteniendo las dos rejillas a temperatura ambiente.

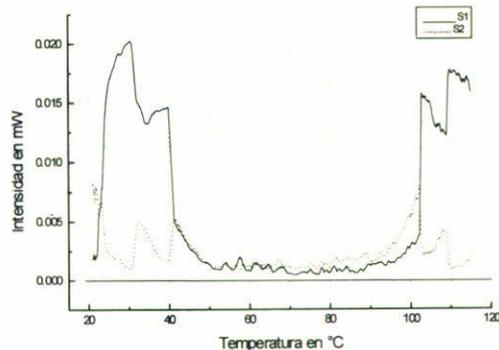


FIGURA 5. Potencias de salida a través de las terminales S_1 y S_2 contra la temperatura de las rejillas 1 y 2. La temperatura de la rejilla 1 se mantiene estable a 73°C, mientras que la rejilla 2 es calentada desde 23°C hasta 120°C.

A continuación, en la Fig. 5, se muestra el comportamiento de las señales que emergen por las terminales S_1 y S_2 cuando la rejilla 1 permanece a una temperatura estable de 73°C y la temperatura de la rejilla 2 varía desde 23°C hasta 120°C. La intensidad de la señal que sale por la terminal S_1 y dentro del intervalo de 21°C hasta 65°C, corresponde a la de dos rejillas desplazadas (donde la rejilla 1 tiene mayor temperatura que la rejilla 2 y por lo tanto se encuentra a unas fracciones de nanómetros más adelante que la rejilla 2). El corrimiento va disminuyendo la intensidad de salida de la señal hasta presentar una potencia muy baja, esto es entre 60°C y 85°C, lo cual se debe a que las dos rejillas tienen casi la misma longitud de onda de reflexión de Bragg; esto implica que la señal se encuentra casi en su totalidad confinada dentro de la cavidad y por lo tanto que tienen la misma temperatura las dos rejillas. De 85°C a 102°C la longitud de onda de reflexión de la rejilla 2 comienza a desplazarse hacia una longitud de onda mayor y por lo tanto se empieza a observar de nuevo un incremento de la intensidad a la salida de la rejilla 2 (S_2); aproximadamente a 103°C, se tiene un salto abrupto en la intensidad de la señal. De los 103°C en adelante el comportamiento de la señal es parecido al caso de 21°C a 65°C.

En la Fig. 6 se analiza el caso contrario, cuando la temperatura de la rejilla 2 permanece constante y se modifica la temperatura de la rejilla 1. El comportamiento es muy parecido, ya que al inicio se tiene una fuga de señal, posteriormente las longitudes de onda de Bragg de ambas rejillas se superponen haciendo que la señal que se fuga sea mínima y finalmente se desacoplan dejando que parte de la señal salga.

Lo que se ha observado en estas dos gráficas es la formación de dos saltos rápidos consecutivos, uno más grande que otro (Fig. 6 de 95°C a 110°C), de estos dos saltos, sólo nos interesa el primero (de 95°C a 100°C). La Fig. 7, nos muestra la región amplificada del salto abrupto, cuando la rejilla 2 está abajo de la temperatura de la rejilla 1 (53.5°C a 53.8°C) y cuando la rejilla 2 rebasó a la rejilla 1 (de 97°C a 97.4°C). De estas gráficas se puede notar que estos saltos no muestran una pendiente infinita, sino ocurren en un rango de temperatura de aproximadamente 0.08°C.

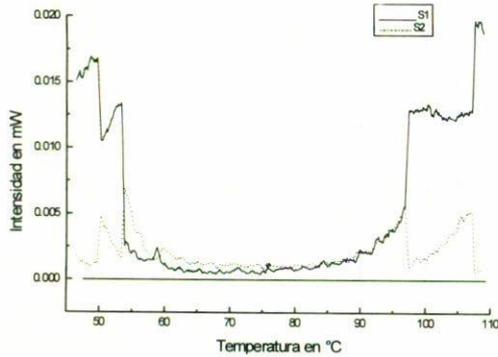
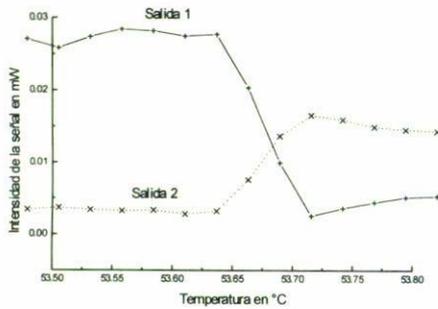
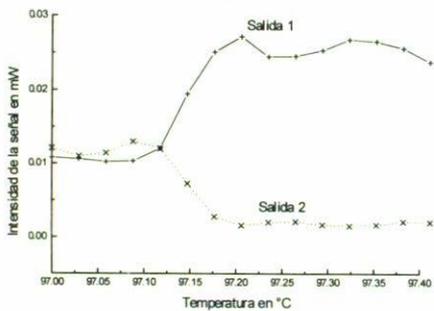


FIGURA 6. Potencias de salida a través de las terminales S1 y S2 contra la temperatura de las rejillas 1 y 2. La temperatura de la rejilla 2 se mantiene estable a 72°C, mientras que la rejilla 2 es calentada desde 45°C hasta 110°C.



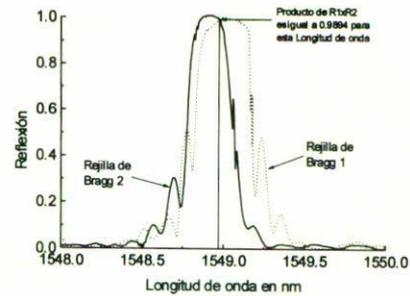
(a)



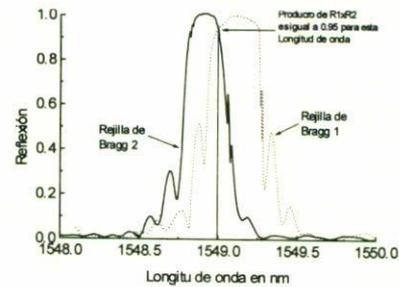
(b)

FIGURA 7. Región del salto en intensidad: a) cuando una rejilla está alcanzando a la otra rejilla; y b) cuando esta rejilla está rebasando a la otra.

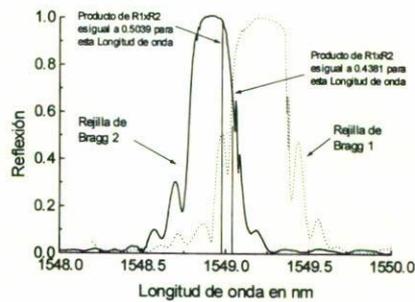
Para estudiar la causa de estos saltos rápidos de la señal es necesario conocer el perfil de reflectancia de las rejillas. La Fig. 8 nos muestra el espectro real de las rejillas y el producto de sus reflectancias para diferentes valores del corrimiento espectral entre ellas. La Fig. 8a, muestra a las dos rejillas cuando se encuentran sobrepuestas a temperatura ambiente. El producto de las reflectancias $R_1 \times R_2$ es de 0.98 y presenta un máximo de reflexión a una longitud de onda de ~ 1548.97 nm. En este caso, la intensidad de la señal transmitida en las salidas S_1 y S_2 es muy baja. Este comportamiento se observa, en la Fig. 5, alrededor de los 60°C. Ahora bien, la Fig. 8b muestra el caso en que la reflectancia espectral de la rejilla 1 se desplaza un poco debido al cambio de



(a)



(b)



(c)

FIGURA 8. Desplazamiento de una rejilla con respecto de la otra y la formación de una nueva longitud de onda de láser. a) Perfiles de las rejillas a temperatura ambiente; b) breve desplazamiento de la rejilla 1; y c) generación de un nuevo máximo por medio del lóbulo de la rejilla 1 y el perfil principal de la rejilla 2.

temperatura que experimenta. Esta variación afecta al producto del coeficiente de reflexión de las reflectancias $R_1 \times R_2 = 0.95$, el cual es ahora menor, por lo que se transmite un poco más de señal. Este es el comportamiento observado en la Fig. 5 alrededor de los 85°C. Esta situación se continúa presentando conforme la temperatura se incrementa hasta que ocurre un salto en la intensidad de la señal. Este salto se debe al pronunciado perfil de reflectancia espectral de la rejilla y a la activación de uno de los lóbulos laterales del espectro de la rejilla, como se puede observar en la Fig. 8c. En dicha figura se muestra que el producto de las reflectancias $R_1 \times R_2 = 0.4381$, que se esperaría que fuera el máximo, pero el máximo de reflectancia de las rejillas es generado por el lóbulo lateral de la rejilla 1 y rejilla 2, teniendo una reflectancia de $R_1 \times R_2 = 0.5039$, lo cual implica un retroceso en su longitud de onda.

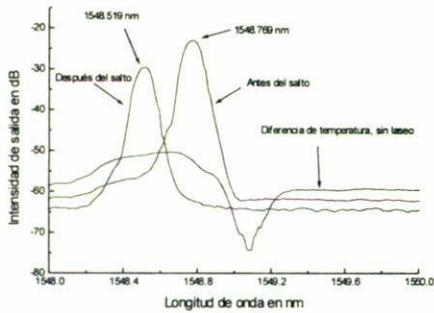


FIGURA 9. En esta gráfica se puede observar el comportamiento de la señal antes y después del salto en intensidad, también se observa el retroceso en longitud de onda que sufre la señal después del salto.

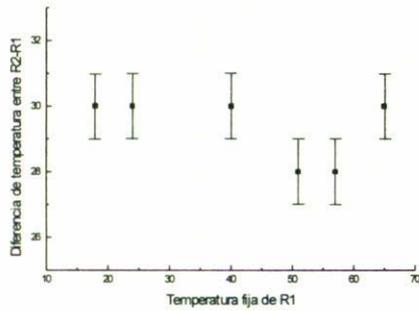


FIGURA 10. Respuesta del sistema a diferentes puntos fijos de prueba para la rejilla 1 contra la diferencia de temperaturas entre la rejilla 2 y 1.

La Fig. 9 muestra el perfil espectral de la señal antes y después del salto de intensidad. En esta gráfica se puede observar un corrimiento en longitud de onda de aproximadamente 0.3 nm, que se presenta después del salto de intensidad. Este comportamiento coincide con lo que pasaba en la Fig. 8c. En esa gráfica se aprecia cómo en vez de trabajar con un coeficiente de reflexión de 0.4381, se trabajó con el de 0.5039, que es donde mayor reflectancia tendrá el sistema láser.

Es bastante atractivo usar este salto para determinar la temperatura de una rejilla (rejilla de medición), si se conoce la temperatura de la rejilla de referencia. Para este fin tenemos que sumar a la temperatura de la rejilla de referencia, la diferencia de las temperaturas entre las rejillas a la cual corresponde al salto. Una cuestión más importante en este caso es si la diferencia de las temperaturas entre dos rejillas es un parámetro constante. La Fig. 10 muestra las pruebas realizadas a diferentes temperaturas fijas de la rejilla 1, calentando la otra rejilla y buscando la diferencia de las temperaturas al

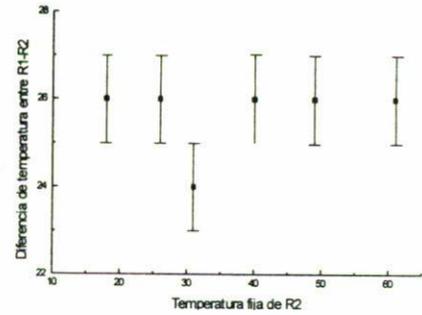


FIGURA 11. Respuesta del sistema a diferentes puntos fijos de prueba para la rejilla 2 contra la diferencia de temperaturas entre la rejilla 1 y 2.

encontrar el salto. En esta gráfica se tiene la dependencia de temperatura fija de la rejilla 1 contra la diferencia de temperaturas entre las rejillas 2-1. Se puede observar que los puntos resultantes se encuentran aproximadamente entre los 28 y 30°C.

El mismo análisis se realizó a la rejilla 2, manteniéndola a varias temperaturas fijas y calentando la rejilla 1 hasta encontrar el salto. Los resultados se pueden observar en la Fig. 11. Para la rejilla 2, se puede observar que la repetición del salto en la señal se genera entre los 24 y 26°C, con la variante de que sólo uno queda fuera del rango de los 26°C.

La utilidad de conocer la respuesta del salto con respecto de la diferencia de temperatura para cada una de las rejillas, radica en que se puede utilizar alguna de las rejillas como punta del sensor, ya que conociendo la diferencia de temperatura a la que presentan el salto rápido de la señal más la suma de la temperatura de la otra rejilla con la cual se está realizando el barrido, se podrá determinar la temperatura ambiente real del otro punto.

5. Conclusiones

Es posible la utilización de este arreglo como un sistema de censado remoto, simplificando la utilización de equipo sofisticado como un monocromador para la detección de la señal, cambiando esto por sólo un detector de intensidad. Para la utilización de este sistema se pondrá la rejilla de censado en el lugar deseado y se calentará la rejilla restante mientras se monitorea el comportamiento de la señal, por medio del detector de intensidad o un simple multímetro. En el momento que se realiza el salto en intensidad se toma la lectura de la temperatura de la rejilla que se está barriendo y se le suma 26 ó 30°C, dependiendo de cual rejilla se tomó como punta de sensor.

1. A.D. Kersey, *Optic Fiber Technology* **2** (1996) 291.
2. K. Hotate, *Optical Fiber Technology* **3** (1997) 356.
3. A.D. Kersey, *I.E.E.E. Journal of Lightwave Technology* **15** (1997) 1442.
4. P.M. Cavaleiro, A.B. Lobo, and J.L. Santos, *Electronics Letters* **31** (1995) 392.
5. Y.J. Rao *et al.*, *Electronics Letters* **32** (1996) 924.
6. S.V Chernikov, R. Kashyap, P.F. McKee, and J.R. Taylor, *Electronics Letters* **29** (1993) 1089.
7. M.J. Guy *et al.*, *Electronics Letters* **31** (1995) 671.