Transductor para la medida simultánea de deformación y temperatura mediante una única red de difracción en fibra óptica

J. Echevarria, C. Jáuregui, A. Quintela, R. García, M.A. Rodríguez, O.Conde, J.M. López-Higuera
Grupo de Ingeniería Fotónica – Universidad de Cantabria
Dpto. TEISA – ETSIIT – Avda. Los Castros s/n, 39005 Santander
Tfno: +34-942-201495, Fax: +34-942-201873, e-mail:jeche@teisa.unican.es

Áreas interés: Sensores, Fibras ópticas.
Palabras clave: Sensor de fibra óptica, Bragg, discriminación deformación y temperatura.

1.- Introducción.

Las redes de difracción en fibra óptica o Fiber Bragg Gratings (FBG) constituyen uno de los dispositivos más interesantes para la construcción de transductores debido a su pequeño tamaño y las demás características propias inherentes a la fibra óptica tales como inmunidad a la interferencia electromagnética, poco peso, etc.

La capacidad de los FBG para la medida de varias e importantes magnitudes físicas como son la temperatura y la deformación abre un nuevo rango de aplicaciones previamente reservadas exclusivamente a los sistemas de medida clásicos. Sin embargo, es necesario resolver algunos problemas prácticos para su aplicación en sistemas de medida fuera del laboratorio debido a la similar sensibilidad que tienen estos transductores a ambas magnitudes físicas. Se deben desarrollar estrategias de diseño especiales para realizar la medida simultánea de deformación y temperatura[1].

En algunas aplicaciones específicas, aprovechando la geometría de la estructura a medir, se puede hacer una medida de la deformación independiente de la temperatura colocando dos transductores, uno a cada lado del elemento a medir [2]. pero en general, la resolución de este problema es más complejo. Para la discriminación entre deformación y temperatura se han propuesto con éxito diversos sistemas sensores. El más simple e intuitivo de estos métodos consiste en disponer de una cabeza transductora formada por dos FBG, uno de los cuales se usa para la medida de deformación y de temperatura, mientras que el otro, aislado adecuadamente frente a la deformación, se ve afectado únicamente por la temperatura [3]. La generalización de esta idea incluso ha dado lugar al diseño y construcción de rosetas muy similares a las realizadas con galgas extensiométricas[4]. Sin embargo, este sistema tiene por una parte el defecto de aumentar el tamaño de la cabeza transductora, y por otro, el que se produce un derroche del ancho de banda óptico del sistema de medida.

Este problema ha sido resuelto con éxito grabando dos FBG uno sobre el otro, produciéndose un ahorro de tamaño y un aprovechamiento juicioso del ancho de banda óptico[5]. En este caso, aunque los dos FBGs se ven afectados por ambas magnitudes a medir, las longitudes de onda de los mismos se graban lo suficientemente separadas como para que la matriz de transferencia del sistema no esté mal condicionada. La principal desventaja de este diseño es que se necesita realizar un doble proceso de grabado sobre la fibra óptica.

Es posible superar este aspecto negativo mediante un diseño en el cual se grabe un FBG sobre la fibra en un único proceso. Este proceso, debe ser diseñado y optimizado para que el FBG resultante proporcione un pico de reflexión no solo a la longitud de onda principal, sino también a una longitud de onda mitad de la principal gracias al segundo orden de difracción de la estructura grabada. Este dispositivo ofrece por tanto, dos medidas independientes que permiten la obtención simultánea de la deformación y la temperatura.

Como regla general, para la obtención simultánea de deformación y de temperatura el diseño debe basarse en la obtención de dos parámetros de medida de forma que la matriz de transferencia que describe el mecanismo de transducción viene dado por :

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1T} & K_{1\varepsilon} \\ K_{2T} & K_{2\varepsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} \qquad (1)$$

donde T es la temperatura y ε es la deformación unitaria, ϕ_1 y ϕ_2 son los dos parámetros de medida. K_{1T} y $K_{2\varepsilon}$ son las sensibilidades a la temperatura y a la deformación mientras que K_{2T} y $K_{1\varepsilon}$ son las sensibilidades cruzadas que se desean evitar[6]. Para conseguir realizar la medida, lo primero que debe ocurrir que es que esta matriz sea invertible,

y además, la precisión de los resultados obtenidos dependen de la condición de la misma.

Como resultado de la técnica propuesta, las longitudes de onda de Bragg correspondientes al primer y al segundo orden de difracción del FBG son los parámetros a medir por en el sistema interrogador de transductor. La medida de la longitud de onda primaria no constituye un grave problema, ya que se puede conseguir fácilmente que tenga una buena reflectividad para obtener una medida óptima. La reflectividad correspondiente a longitud de onda secundaria no ha sido estudiada en suficiente profundidad. La eficiencia del segundo orden de difracción de un FBG en con diferentes dopados de GeO_2 fue estudiado por primera vez por Xie et al.[7]. Sin embargo, el uso de fibras estándar de telecomunicación hidrogenadas para la grabación de FBGs ofrece la posibilidad de un método muy rentable para la producción en masa de este tipo de transductores. Esta aplicación fue propuesta inicialmente por Brady et al.[8]. En este trabajo, en primer lugar se ha realizado una caracterización del proceso de incremento de índice de una fibra óptica estándar de telecomunicación hidrogenada mediante la iluminación con luz UV. En segundo lugar, con estos datos experimentales y una completa simulación del proceso de grabado de un FBG se ha diseñado y realizado un proceso de grabado que optimiza la reflectividad de los picos de reflexión de primer y segundo orden. En tercer lugar, utilizando este sistema, se realizaron los grabados de varios FBGs que después de un proceso de envejecimiento acelerado se caracterizaron adecuadamente. Finalmente, con todo ello, se ha determinado la capacidad de estos dispositivos para la medida simultánea de deformación y temperatura obteniéndose además, conclusiones prácticas de interés.

2.- Diseño y fabricación del transductor

Las fibras estándar de telecomunicación tienen, en principio, una fotosensitividad a la luz UV demasiado baja para grabar FBGs sobre ellas de forma eficiente. Sin embargo, este comportamiento se puede mejorar si se las somete a un proceso de hidrogenación. En este caso, se puede incrementar el índice de refracción de la fibra por iluminación UV adecuadamente. Para energías de exposición pequeñas, se suele considerar que este proceso es lineal, lo cual, no sucede en la práctica, porque es lineal sólo hasta que se alcanza el punto de saturación del índice. Cuando sucede esto, las zonas del núcleo de la fibra que no han alcanzado este valor de saturación siguen incrementando su índice de refracción con la exposición, mientras que las zonas que ya han alcanzado este valor máximo de incremento mantienen este valor. Como resultado, para energías de exposición bajas (E_1 y E_2 de la figura 1) el perfil resultante de la grabación de un FBG resulta sinusoidal mientras que para una energía de exposición mayor (E_3) el perfil de índice resultante es claramente no sinusoidal obteniéndose un alto contenido en armónicos. Esto permite que el pico de reflexión del segundo armónico del FBG se significativamente mayor.

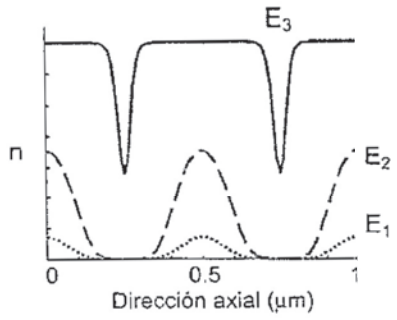

Fig 1. Perfiles de índice resultantes como resultado de la fabricación de FBGs con el método de la máscara de fase para tres energías de exposición E_1 , $E_2 > E_1$ y $E_3 > E_2$..

En primer lugar, se realizó una caracterización del incremento de índice en función de la exposición UV para fibras estándar de telecomunicación hidrogenadas. Mientras se realizaba la exposición con luz UV, se monitorizó el cambio de índice haciendo el uso de un interferómetro Mach-Zehnder en el que uno de sus brazos estaba formado por la fibra expuesta. Los datos obtenidos se utilizaron para el desarrollo de un modelo para simular FBGs con diferentes perfiles de índice. Los diseños realizados se comprobaron experimentalmente.

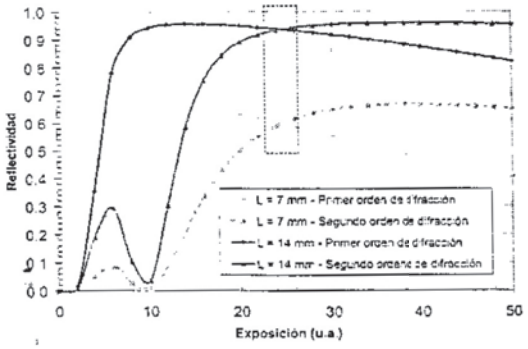

Fig. 2. Evolución de la reflectividad del primer y segundo orden de difracción de un FBG en función de la energía de exposición para longitudes de L = 7 mm y L = 14 mm .

En la figura 2 se muestra un ejemplo de estos cálculos mostrando la evolución de las reflectividades del primer y segundo armónico del FBG en función de la energía de exposición y para longitudes de FBG diferentes. La energía de exposición óptima es aquella que equilibra ambas reflectividades y tal como se puede comprobar en la figura es independiente de la longitud para FBGs uniformes. Para la realización de los FBGs se ha utilizado el método de la máscara de fase y también se simuló y evaluó la influencia del orden de difracción "0" de la misma [9]. Los resultados obtenidos mostraron que no se produce una degradación significativa de los cálculos por el aumento de la potencia de este orden de difracción.

3.- Caracterización del transductor

Manteniendo los FBG a un temperatura constante de 25°C se realizó una caracterización espectral previa de alta resolución (1pm) de los mismos haciendo uso de una configuración en lazo cerrado de fuente sintonizable, medidor de longitud de onda y medidor de potencia óptica. Los espectros obtenidos se utilizaron posteriormente como referencia para calcular el comportamiento de los dispositivos. Los FBGs caracterizados mostraron un longitud de onda de Bragg primaria de 1536.85 nm y secundaria de 767.94 nm con buenas reflectividades de pico tal como se habían diseñado. Para la medida de la sensibilidad a la deformación y a la temperatura se montó un banco de medida tal como el que se muestra en la figura 3. El sistema utiliza dos fuentes de luz blanca, cada una de ellas con su máximo de emisión situado alrededor de cada una de las longitudes de onda de Bragg de los FBG. Se añadieron dos conmutadores ópticos para dotar al sistema de la suficiente flexibilidad, automatización y rapidez para realizar las medidas y por último, se utilizó un analizador de espectro óptico para la obtención de los espectro de reflexión y de transmisión de los dispositivos.

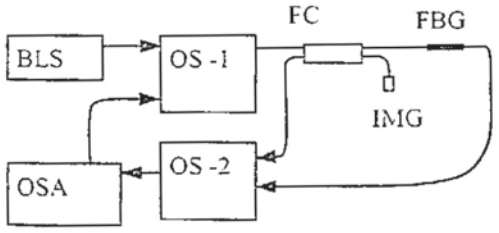

Fig. 3 Sistema automatizado de medida de los dispositivos. BLS : Fuente de luz blanca, OSA : Analizador de espectro óptico, OS : Conmutador óptico y IMG : Gel adaptador de índice de refracción.

3.a.- Resultados experimentales de la caracterización en temperatura.

Cada uno de los dispositivos se introdujo en una cámara climática en la que se realizó un barrido controlado de temperatura entre los 0°C y los 100°C con un paso de 5°C. Después de colocada la temperatura deseada se esperó a que se alcanzara una temperatura estable antes de realizar una serie de medidas en transmisión y en reflexión para la longitud de onda primaria y secundaria de los dispositivos. En la figura 8 se muestra una fotografía con una visión del experimento de laboratorio. En la figura 4 se muestran varios estos espectros en transmisión tanto para el primer como para el segundo armónico. Los espectros de reflexión tenían las mismas características que los anteriores. Con la conjunción de ambas informaciones se obtuvieron unas funciones de calibración que se muestran en la figura 5. Se puede observar un alto grado de linealidad para ambos ordenes de difracción en los rangos de temperatura aplicados.

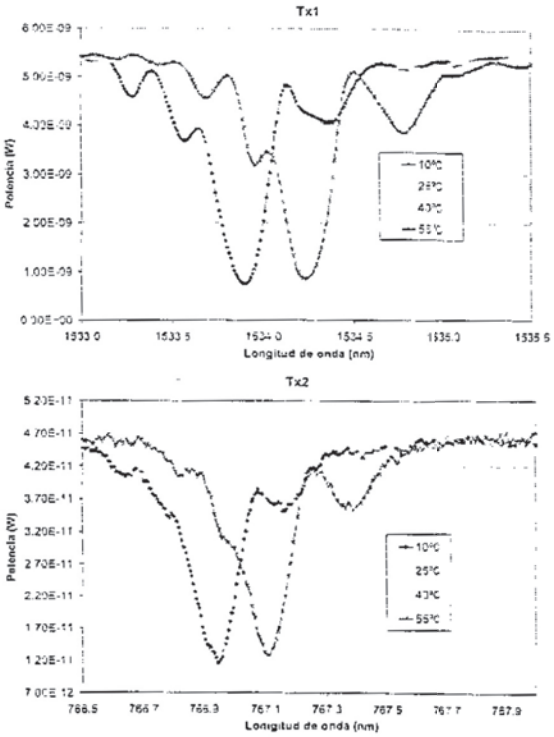

Fig. 4 Espectros de transmisión obtenidos para la longitud de onda primaria (Tx1) y secundaria (Tx2) y para diferentes temperaturas.

El hecho de que a las longitudes de onda correspondientes a la longitud de onda secundaria la fibra estándar de telecomunicación no es monomodo, existía la posibilidad de que las medidas se vieran entorpecidas por la

aparición de modos superiores. Sin embargo, realizadas las medidas, no se observaron dificultades para obtener el desplazamiento la longitud de onda de Bragg para cada caso. Para realizar una evaluación numérica de este efecto se realizó un cálculo de correlación entre los espectros obtenidos para el primer y segundo armónico ratificándose la afirmación anterior.

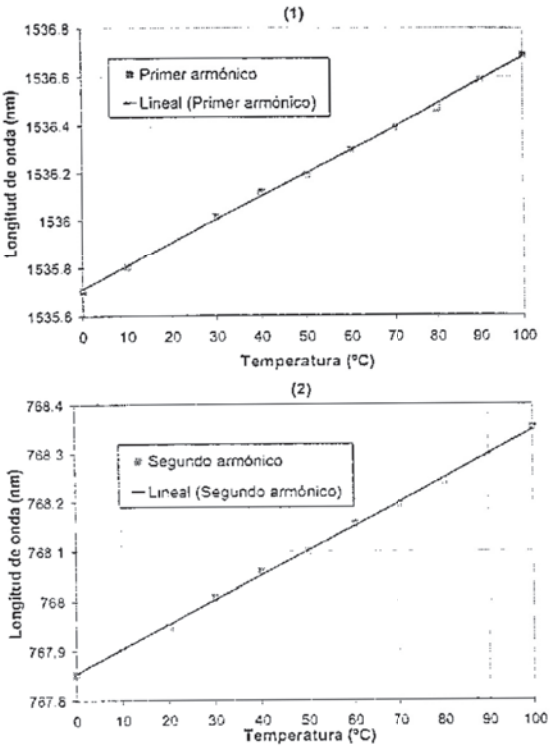

Fig. 5 Funciones de calibración de temperatura obtenidas a partir de los espectros de reflexión y de transmisión para el primer (1) y segundo (2) armónicos.

3.b.- Resultados experimentales de la caracterización en elongación.

Para la realización de la caracterización en elongación de los dispositivos construidos se utilizó un posicionador controlado por ordenador. Una determinada longitud de la fibra que contenía el FBG se fijó al posicionador por un extremo mientras que por el otro se fijó a un punto inmóvil. Posteriormente, mediante un dispositivo de medida de precisión se realizó la medida de la distancia entre los dos puntos pegados para así obtener una relación de elongación unitaria entre esta distancia y el movimiento del posicionador. Después de realizado este proceso, se realizaron desplazamientos calibrados a una temperatura fija de 25°C que proporcionaron elongaciones unitarias desde 0 με hasta 1800 με en pasos de 100 με.

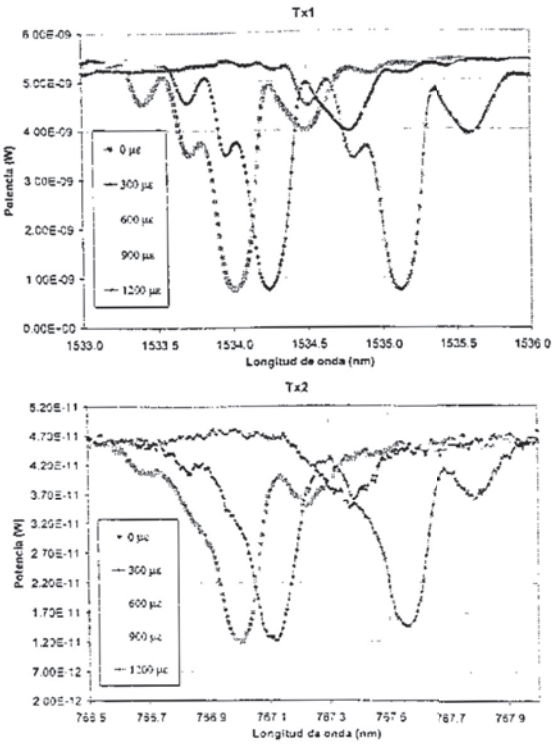

Fig. 6 Espectros de transmisión obtenidos para la longitud de onda primaria (Tx1) y secundaria (Tx2) y para diferentes elongaciones unitarias.

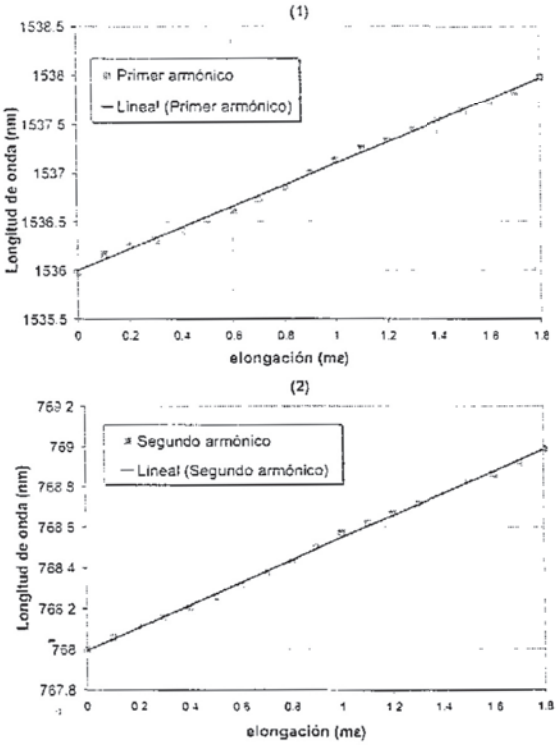

Fig. 7 Funciones de calibración deelongación obtenidas a partir de los espectros de reflexión y de transmisión para el primer (1) y segundo (2) armónicos.

Para cada uno de los pasos se obtuvieron los espectros de reflexión y de transmisión para el primer y segundo armónico cada FBG. En la figura 6 se muestran varios espectros de transmisión de ejemplo

Al igual que se hizo anteriormente para la caracterización en temperatura, se realizó un análisis comparativo entre los espectros de reflexión y de transmisión para ambas longitudes de onda con el objeto de detectar posibles problemas producidos por los modos de orden superior en longitudes de onda bajas. Se obtuvieron los mismos resultados positivos que en el caso anterior. Con toda la información obtenida se obtuvieron las funciones de calibración que se muestran en la figura 7 para el primer y segundo armónico.

3.c- Caracterización simultánea de elongación y temperatura.

Con el objeto de comprobar la independencia de la respuesta de los dispositivos frente al efecto de las dos magnitudes físicas a medir, se realizó una caracterización simultanea de elongación y temperatura. Cada uno de las fibras con el FBG se fijo a un dispositivo posicionador que fue tal como se indicó anteriormente calibrado para determinar las elongaciones unitarias en la fibra. La parte de la fibra que contenía el FBG se introdujo dentro de una de una estructura térmicamente aislada del ambiente y se controló su temperatura mediante una célula de efecto Peltier junto con un sensor de temperatura de precisión y conectados ambos a un sistema de control de temperatura. Se realizaron barridos en temperatura desde –5°C a 55°C en pasos de 15°C y de elongaciones unitarias desde 0 με hasta 1200 με en pasos de 100 με formando mapeando todos estos valores. El banco de medida óptico que fue utilizado es el mismo que se ha descrito anteriormente y se puede observar en la figura 3. Se obtuvieron múltiples muestras de los espectros de reflexión y de transmisión hallándose las sensibilidades a ambas magnitudes físicas y comprobándose que hay suficiente independencia en la medida para ambas magnitudes físicas dentro del rango ensayado. De acuerdo con los resultados experimentales, las sensibilidades que se obtuvieron a los dos parámetros de interés son los siguientes :

$$k_{1T} = 9.70 \pm 0.03 \text{ pm/°C}$$
$$k_{1\varepsilon} = 1.092 \pm 0.013 \text{ pm/με}$$
$$k_{2T} = 4.89 \pm 0.02 \text{ pm/°C}$$
$$k_{2\varepsilon} = 0.472 \pm 0.006 \text{ pm/με}$$

Suponiendo que los coeficientes de la matriz de transferencia se han medido con la suficiente precisión, los errores asociados a las medidas de las magnitudes físicas vendrán limitados por la precisión de la medida de las longitudes de onda primaria y secundaria del FBG transductor. Estos errores también dependen de los valores concretos de los coeficientes de la matriz.

4.- Conclusiones.

Se ha realizado una caracterización en elongación y temperatura de una serie de FBG uniformes grabados en un único proceso de exposición a luz UV por el método de la máscara de fase. Se han obtenido los espectros de transmisión y reflexión para las longitudes de onda del primer y segundo orden de difracción del FBG. Las medidas obtenidas muestran una buena linealidad del dispositivo dentro de los rangos utilizados. Aunque el comportamiento multimodo de las fibras estándar de telecomunicación en las longitudes de onda correspondientes al segundo armónico del FBG puedes producir interferencias en la medida, no se ha observado ninguna complicación adicional para obtener las medidas de esta longitud de onda secundaria. Como conclusión final, los resultados obtenidos muestran la capacidad de realizar la medida simultanea de elongación y temperatura de este tipo de dispositivos.

5.- Agradecimientos

Este trabajo ha sido cofinanciado por la CICYT a través de su proyecto TIC'98-0397-C03-02 y por la UE a través de su proyecto FEDER "SISFOCDETIC" 1FD97-0775.

6.- Bibliografía.

[1] Wei Jin, W. Craig Michie, Graham Thursby, Maria Konstantaki and Brian Culshaw, "Simultaneous measurement of strain and temperature: error analysis", Optical Engineering, 36, No. 2, pp. 598-609, 1997.

[2] M.G. Xu, J.L. Archambault, L. Reekie and J.P. Dakin, "Thermally-compensated bending gauge using surface-mounted fibre gratings", International Journal of Optoelectronics, 9, No. 3, pp. 281-283, 1994.

[3] M. Song et al, "Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using Two Fiber Bragg Gratings Embedded in a Glass Tube", Optical Fiber Technology, 3, pp. 194-196, 1997

[4] S. Magne, S. Rougeault, M. Vilela and P. Ferdinand. "State-of-strain evaluation with fiber Bragg grating rosettes: application to discrimination between strain and temperature effects in fiber sensors", Applied Optics, 36, No. 36, pp 9437-9447, 1997.

[5] M.G.Xu, J.L. Archambault, L. Reekie and J.P. Dakin, "Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors", Electronic Letters, 30, o. 13, pp.1085-1087, 1994.

[6] W.X. Xie et al. "Second order diffraction efficiency of Bragg gratings written within germanosilicate fibers", Opt. Communications, 101, No, !, 2, pp. 85-91. 1993.

[7] G.P. Brady, K. Kalli, D.J. Webb, D.A. Jackson, L. Reekie & J.L. Archambault, "Simultaneous measurement of strain and temperature using the first-and second-order diffraction wavelength of Bragg gratings", IEE. Proc.-Optoelectronics, 44, No. 3, pp. 156-161,1997.

[8] F. Farahi et al, "Simultaneous measurement of temperature and strain : cross-sensitivity considerations", Journal of Ligthwave Technology, 8, No. 2, pp. 138-148, 1990

[9] J. Echevarría et al., "Efficient Temperature and Strain Discrimination with a Single Type I Fiber Bragg Grating Transducer", LEOS 2000 proceedings, Vol. 2, pp. 458-459 , IEEE, Rio Grande, 2000

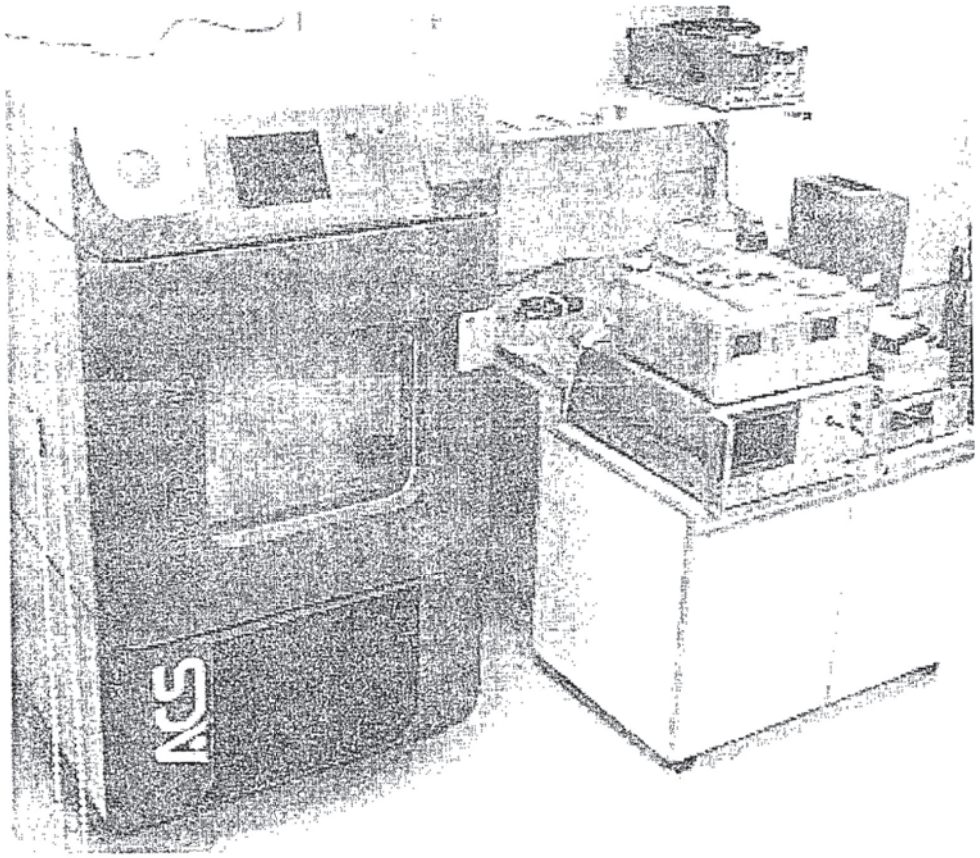

Fig. 8 Fotografía del sistema de caracterización en temperatura.