

DESARROLLO DE UNA RED DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA PARA LA DETECCIÓN DE HUMEDAD MEDIANTE REFLECTOMETRÍA ÓPTICA

R. López Ruisánchez, A. Cobo, M. Morante, J.L. Arce, J.M. López Higuera
Grupo de Ingeniería Fotónica
Departamento de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática
E.T.S.I. Industriales y de Telecomunicación
Universidad de Cantabria
Avda. Los Castros s/n 39005 Santander
Tfno. 942-201498 Fax 942-201873 E-mail higuera@teisa.unican.es

ABSTRACT

A method to detect humidity is presented. It is based on a reflective fibre optic sensor. Volume changes due to water presence in a hydrogel compound are transformed into variations of the light coupled into a monomode optical fibre by a reflective device. This kind of sensors is easily arranged in the form of a linear array so they can be monitored with an OTDR. An experimental example of such a network is presented.

1. INTRODUCCION

Los sistemas de sensores de fibra óptica presentan ventajas respecto a los sensores convencionales, como son su naturaleza dieléctrica, inmunidad frente a perturbaciones electromagnéticas, seguridad intrínseca y excelentes prestaciones. El campo de acción de este tipo de sensores es muy amplio, y cubre parámetros tales como presión, temperatura, esfuerzo, vibración, desplazamiento y otro gran número de ellos. Sin embargo, los esfuerzos dedicados a la medida de un parámetro tan común como es la humedad no han sido tan amplios como en otros casos. La mayor parte de ellos buscan el sensado de la humedad haciendo que esta actúe con la fibra o con la cubierta de la fibra, habiendo sido estas modificadas para que esa interacción produzca cambios perceptibles en la luz guiada.

En este trabajo se presenta un sistema fotónico para la detección de humedad mediante sensores ópticos reflectivos espacialmente distribuidos, realizados utilizando como elemento fundamental un hidrogel.

El sensor que se propone se ha realizado utilizando un compuesto químico hidrogel, cuyos cambios en volumen son función de la humedad. Varios autores han utilizado materiales de este tipo para detectar la presencia de agua a lo largo de una estructura [1] o en puntos de una fibra, como empalmes [2], haciendo que los cambios de volumen del hidrogel produjeran curvaturas en la fibra y, por lo tanto, pérdidas en la luz guiada. En este trabajo, esos cambios se traducen en el desplazamiento de un espejo estratégicamente situado, de forma que se produce una variación en la reflexión del haz de luz proveniente de una fibra monomodo, con la consiguiente modulación del acoplo del haz en la misma fibra emisora. Para interrogar la red de sensores ópticos se ha utilizado el método OTDR, que es el más accesible desde un punto de vista práctico, sin por ello perder eficiencia como método de medición.

Se han comprobado en el laboratorio los resultados teóricos esperados y el funcionamiento general del sistema. En este trabajo se presentarán y discutirán los resultados obtenidos.

2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La forma de detección de humedad está basada en medir los cambios de volumen experimentados por un polímero hidrogel en contacto con un aire de humedad variable. Los hidrogeles son materiales que pueden ser descritos como redes poliméricas que aumentan de volumen en contacto con el agua u otro disolvente. Los polímeros, al entrar en contacto con un disolvente experimentan primero un fenómeno de hinchado, debido a que el disolvente penetra en la red y separa las macromoléculas. Este hinchamiento suele terminar con una disolución del polímero. La característica que diferencia al hidrogel es que aumenta de volumen sin llegar a disolverse, y el proceso es reversible.

Un aumento de volumen conlleva una variación en tres dimensiones. Para simplificar el mecanismo de detección, se fijan dos de esas dimensiones mediante un recipiente que contenga el gel, detectando únicamente la variación de la tercera dimensión. De esa forma el problema se reduce a medir un desplazamiento del gel. Si se coloca un espejo junto al gel de tal forma que un aumento en el volumen de

este último conlleve un movimiento del mismo, esto nos proporciona una manera de modular la luz de una fibra, mediante un mecanismo de acoplo de haces. El esquema propuesto es el de la figura 1:

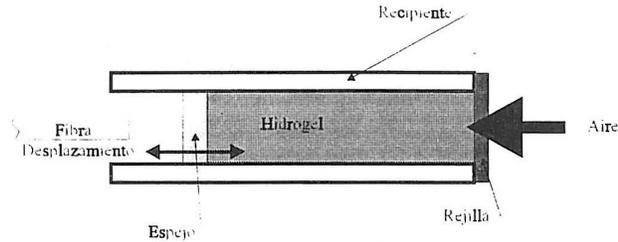


Figura 1. Propuesta de sensor.

Para el cálculo de la luz acoplada se ha recurrido al estudio de haces gaussianos descrito en [3], que aproxima el campo de una fibra monomodo por un campo con forma gaussiana que se propaga a la salida de esta fibra, acoplándose a la entrada de otra fibra igual pero separada una distancia D . Esta disposición es la equivalente a la de tener un espejo ideal colocado a una distancia $D/2$. El valor de este acoplo viene dado por:

$$T = \frac{4 \left(4Z^2 + \frac{w^2}{w^2} \right)}{\left(4Z^2 + \frac{w^2 + w^2}{w^2} \right)^2 + 4Z^2 \frac{w^2}{w^2}} \quad (1)$$

$$Z = \frac{D}{n_2 k w^2} \quad (2)$$

Donde el parámetro w es la anchura del modo gaussiano. Este valor se obtiene a partir de ecuaciones experimentales que aproximan la distribución de modos en una fibra a un modo gaussiano en función de la anchura efectiva de la fibra V y de su perfil de índice.

Un solo sensor pudiera tener sentido en determinadas aplicaciones. Sin embargo, es mucho más útil integrar sensores formando redes de forma que se tenga la posibilidad de medir en varios puntos a la vez. De esta forma se puede monitorizar la humedad en una estructura como puede ser un edificio o un avión, donde más que un único punto, es conveniente tener controladas varias zonas.

Una posibilidad de medida de una red de sensores la ofrece la reflectometría óptica. De todos los tipos de reflectometría, la más práctica actualmente es la reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR), ya que es la más desarrollada y accesible en ambientes que no sean únicamente de investigación. Para poder emplear un OTDR es necesario disponer los sensores de forma que su respuesta esté separada en el tiempo, ya que aquel actúa como un radar óptico a lo largo de una fibra, y un intervalo temporal puede ser fácilmente convertible a distancia a lo largo de esa fibra. Para conseguirlo se empleará el siguiente montaje:

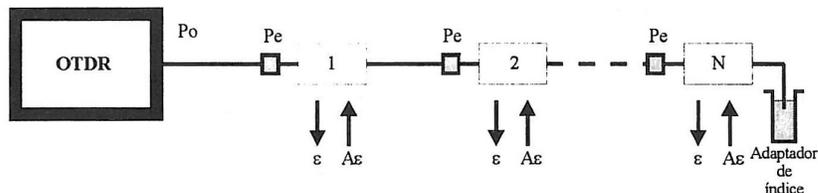


Figura 2. Esquema de red de sensores.

Red en la que se han empleado como distribuidores ópticos (1,2,...,N), acopladores direccionales. En la figura, P_o es la potencia de salida del OTDR, P_e son las pérdidas en cada sensor, ϵ es la potencia óptica que viaja hacia el reflector y A es el porcentaje de luz acoplada de nuevo en la fibra. La luz acoplada se va a añadir a la luz proveniente de la reflexión de Fresnel producida en la interfase fibra-aire de cada

dispositivo. Por lo tanto, la reflexión obtenida será un pico de amplitud variable en función del acoplo, que se producirá a la distancia dada por la posición del sensor dentro del array [4]:

$$\mathcal{S}_2 = 10 \log \left[\frac{\varepsilon(A + 0.04)}{KT} \right] (dB) \quad (5)$$

Donde \mathcal{S}_2 es la altura del pico, T es la anchura del pulso. K es un término que depende de las características de la fibra.

A partir de estos valores y del rango dinámico del OTDR (D) se puede tener el número máximo de sensores que se pueden colocar en la red:

$$N - 1 = \frac{D - \left(\frac{S}{N} \right) + 10 \log(A\varepsilon) - 2P_e}{2[P_e - 10 \log(1 - \varepsilon)]} \quad (4)$$

3. FABRICACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

La cabeza que simula al sensor se compone de dos microposicionadores: uno de paso fino ($2 \mu\text{m}$) sobre el que va colocado la fibra y otro de paso más grande ($10 \mu\text{m}$) para acercar el espejo a la fibra sin perder el punto de referencia del microposicionador anterior. El espejo está montado sobre un holder que permite girarlo en dos ejes de forma que se sitúe perpendicularmente al eje de la fibra. La luz acoplada mediante la reflexión debe poder ser introducida de nuevo en la fibra para que pueda ser detectada mediante el fotodiodo del OTDR. Para ello se emplea un acoplador direccional cuyas pérdidas en la salida directa son de 3.12 dB y en la acoplada de 3.26 dB.

El gel que se ha empleado como elemento sensible a la humedad es un copolímero cuyo principal componente es un acrilato de sodio entrecruzado, que permite un aumento máximo de volumen para hidratación completa del 3200% (en función de la cantidad de sales disueltas en el agua).

Una vez que se ajustó la inclinación del espejo para obtener un máximo de potencia acoplada (espejo transversal al eje de la fibra), se fue desplazando el microposicionador fino hasta que la potencia acoplada fue nula. Los resultados de la medida de la potencia acoplada en función de la separación del espejo se muestran en la figura 3. La curva procede de obtener la media para varias series de medidas, normalizando al valor máximo de potencia acoplada.

A partir de la figura anterior se puede deducir que para desplazamientos mayores que $300 \mu\text{m}$ la resolución de la medida disminuye considerablemente, aunque es a partir de un desplazamiento máximo de $500 \mu\text{m}$ cuando la potencia acoplada es indistinguible de la reflexión de Fresnel.

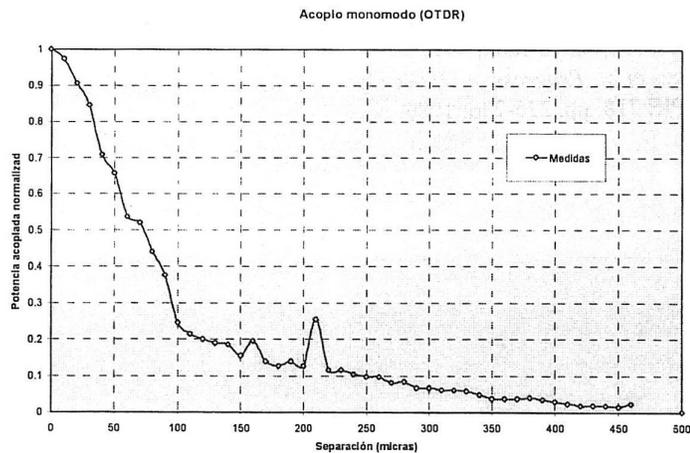


Figura 3. Medidas de la luz acoplada.

Para comprobar su funcionamiento en una red, sobre una fibra de unos 4 Km. de longitud total se colocaron dos dispositivos como el anterior: uno a la mitad de la longitud total, con un acoplador de 3 dB, y otro al final de la fibra. Este último, por tanto, no necesitaba acoplador, ya que no es necesario sacar luz de la fibra para más dispositivos. Los resultados se muestran en la tabla 1:

Dispositivo	Distancia (m)	N máximo	Acoplo máximo (%)	Rango (μm)	Resolución (μm)
1	2200	6	1.31	500	< 2
2	4100	6	1.40	500	< 2

Tabla 1. Resultados de la red.

Si se necesitaran sensores del tipo todo/nada, la tabla muestra que para ese acoplo máximo conseguido se podrían controlar 6 dispositivos con ese OTDR. La vía para aumentar este número pasa por reducir las pérdidas P_e , aumentar el rango dinámico del OTDR y mejorar el método de acoplo de luz. Gracias al gran incremento de volumen producido en el gel para una humedad relativa del 100%, conseguir el desplazamiento de 500 μm es fácilmente producible, con lo que se demuestra la viabilidad de la propuesta para la detección de humedad.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado sensor de fibra óptica para la detección de humedad. El sensor se basa en detectar ópticamente el desplazamiento que produce en un espejo el efecto de la humedad sobre un hidrogel.

El sensor ha sido caracterizado en el laboratorio con resultados satisfactorios.

Utilizando el sensor desarrollado, una red de sensores de fibra óptica ha sido propuesta utilizando como técnica de interrogación la Reflectometría Óptica en el Dominio del Tiempo. Su viabilidad técnica y experimental ha sido demostrada.

5. RECONOCIMIENTO

Este trabajo ha sido soportado gracias a la aportación del proyecto CICYT TIC'95-0631-C04-01.

6. REFERENCIAS

- [1] W.Craig Michie *et al.* *A Fibre Optic/Hydrogel Probe for Distributed Chemical Measurements*, in Tenth International Conference on Optical Fibre Sensors, Brian Culshaw, Julian D.C.Jones, Editors, Proc. SPIE 2360, pp. 130-133, 1994.
- [2] S.Tomita, H.Tachino y N.Kasahara, *Water Sensor with Optical Fiber*, Journal of Lightwave Technology, Vol.8, Nº.12, pp. 1829-1832, Dic. 1990.
- [3] D.Marcuse, *Loss Analysis of Single-mode Fiber Splices*, Bell System Technical Journal, Vol. 56, Nº. 5, pp. 703-718, Mayo-Junio 1977.
- [4] F.X.Desforges *et al.* *Progress in OTDR Optical Fiber Sensor Networks*, Fiber Optic Laser Sensors IV, Proc. SPIE 718, pp. 225-236, 1986.