

MODELO DE LA ATENUACION DE LUZ EN UNA FIBRA OPTICA COMO CONSECUENCIA DE LA ABSORCION DE HIDROGENO

M. Aleixandre, P. Corredera, M.L. Hernanz, J.P. Blanco, J. Lozano, J. Gutierrez-Monreal.
manuel@ifa.cetef.csic.es

Resumen

La fibra óptica absorbe hidrógeno del medio ambiente. Esta absorción conlleva un cambio en la atenuación óptica a determinadas frecuencias. Esta atenuación se puede usar como mecanismo sensor. El proceso de absorción de hidrógeno por la fibra es muy lento y un modelo sobre el que trabajar resulta muy conveniente. En este trabajo se desarrolla dicho modelo.

Palabras Clave: Sensor de Hidrógeno. Modelado. Fibra óptica.

1 INTRODUCCIÓN.

Una fibra inmersa en una atmósfera con H_2 sufre un cambio en su espectro de absorción [5]. Este cambio es debido a que el hidrogeno se difunde en la fibra, originando absorciones a diversas frecuencias. Este fenómeno bien conocido origina problemas en la transmisión de datos a la industria de las telecomunicaciones. Los estudios realizados hasta ahora se centran en el estudio de este fenómeno como un problema [9][4]. Sin embargo debido a que algunas de estas absorciones son reversibles y dependen de la concentración exterior de hidrógeno pueden ser utilizadas como mecanismos sensores. En este trabajo se realiza un modelo de la fibra óptica inmersa en hidrógeno para su uso como sensor.

Un sensor de fibra óptica sin ningún tratamiento especial ni mecanizado de ningún tipo presenta importantes ventajas frente a otros sensores de hidrógeno disponibles [1][2][6][7][8]. Entre ellas un muy reducido coste, una alta resistencia a ambientes agresivos, la posibilidad de hacer medidas localizadas de hidrógeno mediante técnicas como la OTDR (Reflecometría óptica en el dominio del tiempo). Por otro lado como veremos más adelante este sensor presenta una desventaja clara, su lenta velocidad de respuesta. Sin embargo este sensor se adapta perfectamente a la medida de hidrógeno en cementerios de residuos nucleares en los cuales no se espera bruscos cambios de concentración de hidrogeno sino constantes aumentos y en donde el ambiente puede ser altamente agresivo. Este trabajo

se desarrolla con fondos del proyecto europeo Safety and Operational Monitoring of Nuclear Waste Repositories with Fiber Optic Sensing Systems (SOMOS) y en este contexto el sensor de fibra óptica de hidrógeno es una excelente propuesta.

Debido a los largos tiempos de respuesta de este sensor los experimentos son poco prácticos y un modelo que sea capaz de simular su respuesta es extremadamente útil en su estudio.

2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

En la figura 1 se puede ver el dispositivo experimental usado para medir la evolución del espectro de absorción durante la exposición de la fibra a la atmósfera de hidrógeno.

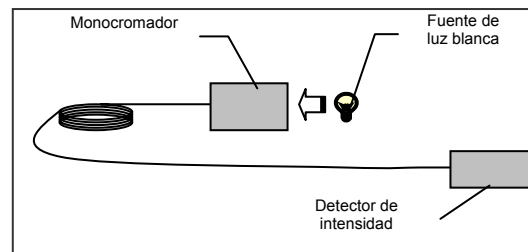


Figura 1: Esquema del sistema experimental.

La fuente de luz es una lámpara de incandescente que proporciona luz blanca. Después un monocromador se encarga de reducir la anchura espectral de esta luz. Esta luz es colimada hasta la fibra y transmitida por la fibra a través de 6.6 Km. de fibra enrollada y metida en una cámara con hidrógeno. Por último un detector se encarga de medir la intensidad lumínica.

Con este dispositivo se realizan barridos para medir la intensidad lumínica desde 1150 nm hasta 1650 nm en los cuales estará comprendidas las frecuencias de 1245 nm y de 1385 nm que son las de la absorción del hidrógeno molecular absorbido en la fibra y la de los defectos de OH nos interesan.

La cámara se llena de una mezcla de nitrógeno e hidrógeno a concentraciones del 2% y el 4%. Tras un llenado inicial de 5 horas de 200 ml/min la olla se cierra. Cada día se abre la olla y el paso de gas para

rellenar posibles pérdidas de hidrógeno por difusión. El control del caudal se hace mediante un caudalímetro y una caja de control.

La fibra que usamos es IYU-T G.652 Fibra mono-modo Standard y tiene las siguientes características:

- Longitud onda de corte, de 1.18 a 1.27
- Diámetro del campo modal: 9.3µm (8-10µm, tolerancia 10%)
- Diámetro del núcleo: 9µm.
- Diámetro del revestimiento: 125 µm (tolerancia 3µm.)
- Atenuación: 0.4 a 1dB/Km en 1300 nm.
- Atenuación: 0.25 a 0.5dB/Km en 1550 nm.

3 MEDIDAS

Para determinar la absorción primero se debe realizar un barrido inicial que usará como línea base. Después todas las lecturas se dividen por esta intensidad, se saca el logaritmo y se multiplica por -10. De esta forma obtenemos los decibelios de pérdidas. Para eliminar los posibles cambios globales de intensidad se restan los decibelios de un punto fijo. En este caso la absorción a 1310 nm debido a que no sufre ningún cambio debido a las absorciones del hidrógeno como se observa en la figura 2.

En la figura 2 se puede observar el cambio del espectro de absorción de una fibra óptica tras 45 y 142 horas de exposición a una atmósfera del 2% de hidrógeno.

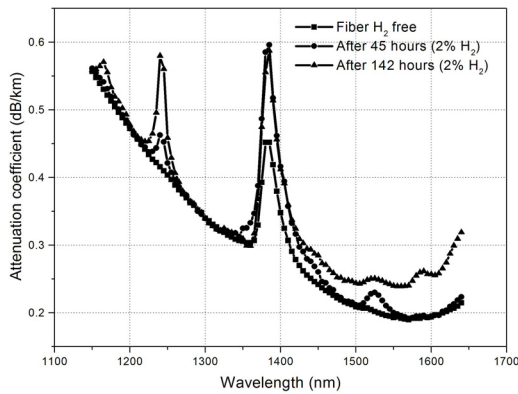


Figura 2: Espectro de absorción de la fibra.

Esta gráfica se corresponde con el primer llenado y en ella se observan 3 picos de absorción que aumentan con el tiempo. El pico cerca de los 1525 nm. no corresponde a ningún pico debido a hidrógeno. Por su longitud de onda se corresponde con CH₃Cl posiblemente generado en la exposición del hidrógeno con las colas usadas en el sellado de la cámara. Al cabo de 142 horas este compuesto desaparece y también lo hace su pico de absorción.

Los otros dos picos, mucho más elevados son debidos al hidrógeno.

En las longitudes de onda alta se puede observar la cola de las absorciones del hidrógeno que se producen en el infrarrojo.

El pico a 1245 es debido al hidrógeno molecular y el otro a los grupos OH que se forman en los defectos de la red del Si₂O. La absorción del hidrogeno molecular es reversible mientras que la formación de OH no [5]. En la figura 3 se puede constatar este hecho. Además se puede ver que la generación de OH se satura en la primera en una muy breve fracción de tiempo de la absorción del hidrógeno molecular exposición.. En esta misma figura se puede observar que la absorción del hidrógeno si es totalmente reversible.

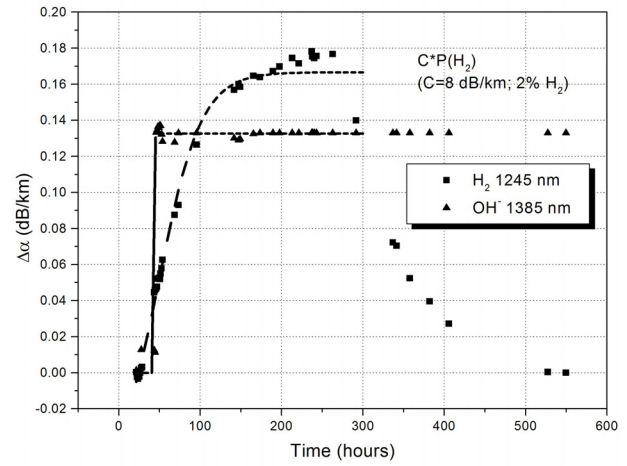


Figura 3: Evolución de la absorción de las frecuencias 1245 nm y 1385 nm.

4 MODELO

El hidrogeno penetra en la fibra mediante un proceso de absorción [9]. Este proceso esta regido por la ley fe Fick:

$$j = -D \cdot \nabla C(\rho, t) \quad (1)$$

$$j = -D \cdot \frac{\partial C(\rho, t)}{\partial \rho} \quad (2)$$

Además tenemos la ley de conservación de la masa que dice:

$$-\int_s j = \frac{d}{dt} \int_v C \quad (3)$$

Integrando en cilíndricas en una capa concéntrica llegamos a:

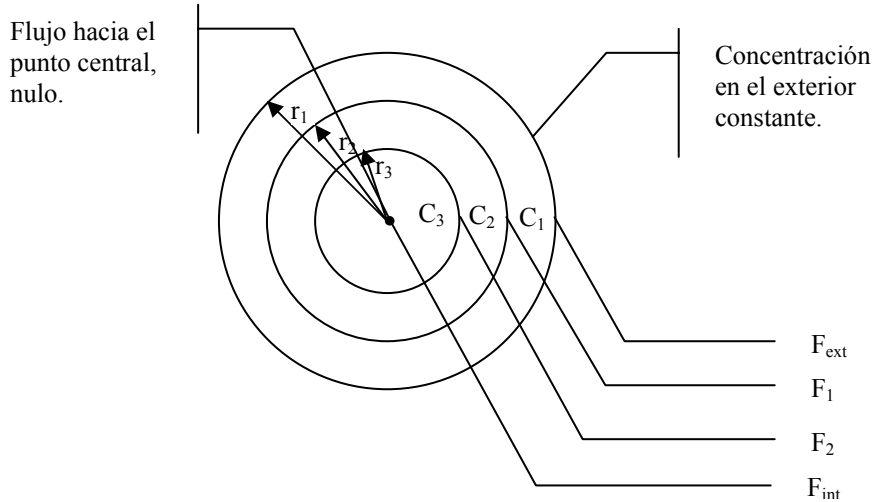
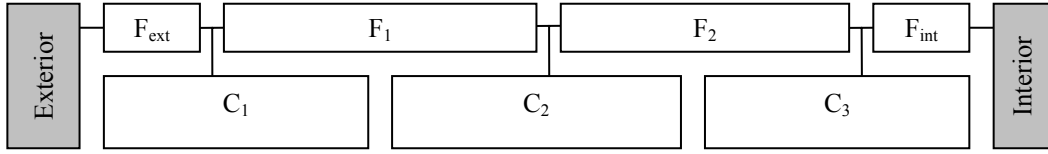


Figura 4. Esquema de discretización usado para la implementación del modelo.

$$2 \cdot \pi \cdot L \cdot \left[\rho \cdot j(\rho, t) \right]_{\rho_1}^{\rho_2} = \pi \cdot L \cdot \left[\rho^2 \cdot \frac{\partial C(\rho, t)}{\partial t} \right]_{\rho_1}^{\rho_2} \quad (4)$$

Donde hemos supuesto que la concentración C se mantiene constante en todo el volumen para poder simplificar la integración.

Usando la ecuación de Fick (2) llegamos a la ecuación (5).

El primer término corresponde a la difusión por cada cara de la capa concéntrica. El segundo es el cambio de masa total en el recinto encerrado por ρ_1 y ρ_2

$$2 \cdot \pi \cdot L \cdot D \left[\rho \frac{\partial C(\rho, t)}{\partial \rho} \right]_{\rho_1}^{\rho_2} = \pi \cdot L \cdot \left[\rho^2 \right]_{\rho_1}^{\rho_2} \cdot \frac{\partial C(\rho, t)}{\partial t} \quad (5)$$

Suponiendo un cambio lineal de concentración entre las capas:

$$2 \cdot \pi \cdot L \cdot D \cdot \left[\rho \frac{C_{i-1} - C_i}{d} \right]_{\rho_1}^{\rho_2} = \pi \cdot L \cdot \left[\rho^2 \right]_{\rho_1}^{\rho_2} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial t} \quad (6)$$

Podemos usar esta ecuación para realizar el modelo en Modelica. Para ello usamos el esquema de discretización mostrado en la figura 4:

Los bloques C representan la concentración en cada segmento. La concentración en cada uno de estos bloques solo varía con el flujo neto que entra y sale. Este cambio lo expresamos con la ecuación (7).

$$Flujo = \pi \cdot L \cdot \left[\rho^2 \right]_{\rho_1}^{\rho_2} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial t} \quad (7)$$

Los bloques F representan el flujo en cada una de las caras. El flujo solo depende de la diferencia de concentración entre dos bloques C contiguos. La ecuación (8) expresa el flujo.

$$Flujo = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot D \cdot \left[\rho \cdot \frac{C_{i-1} - C_i}{d} \right]_{\rho_1}^{\rho_2} \quad (8)$$

Como condiciones adicionales en el exterior la concentración es constante y en el interior el flujo se hace 0 ya que el hidrógeno no puede escapar a ningún lado. En la figura 4 se pueden ver la figura de cómo se representan los diferentes valores para la disposición cilíndrica que tenemos.

El campo eléctrico de la luz en una fibra mono-modo viene dada por:

$$E = E_0 \cdot e^{-\rho^2/w^2} \cdot e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (9)$$

La absorción entonces vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta\alpha = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \int_0^a C(r,t) \cdot e^{-2\rho^2/w^2} \cdot \rho \cdot d\rho \quad (10)$$

Para obtener el cambio en la atenuación debida a la concentración de gas hidrógeno suponemos que el incremento en la atenuación solo depende de la concentración y además de forma lineal [9].

$$\Delta\alpha = A \cdot C(H) \quad (11)$$

Donde A es el coeficiente de sensibilidad de la fibra a la atenuación por hidrógeno.

En el desarrollo anterior tenemos la fibra dividida en capas con diferentes concentraciones dependientes del tiempo. La influencia relativa de esa capa viene dada por la fracción de flujo de intensidad lumínica en cada capa que contiene. Por tanto, para averiguar el incremento total de la intensidad lumínica debemos sumar la contribución de todas las capas.

Al ser una fibra mono-modo usamos la aproximación usual de campo gaussiano.

$$E = E_0 \cdot e^{-\rho^2/w^2} \cdot e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (12)$$

Donde w es la anchura de campo modal que en nuestro caso es de 9.3 μm . La potencia entonces viene dada por:

$$P(\rho) = P_0 \cdot e^{-2\rho^2/w^2} \quad (13)$$

La atenuación entonces será:

$$\Delta\alpha = A \cdot \sum_i C_i \cdot P(\rho_i) / P_i \cdot S_i \quad (14)$$

$$\Delta\alpha = A \cdot \frac{\sqrt{2}}{w\sqrt{\pi}} \cdot \sum_i C_i \cdot e^{-2\rho^2/w^2} \cdot S_i \quad (15)$$

El modelo se ha implementado en modelica y se ha ejecutado en Dymola 5.

5 SIMULACIÓN

Una vez realizado el modelo lo simulamos y comparamos los resultados con el experimento real. Los resultados de un experimento realizado con el 4% de hidrógeno y la simulación se puede ver en la figura 5.

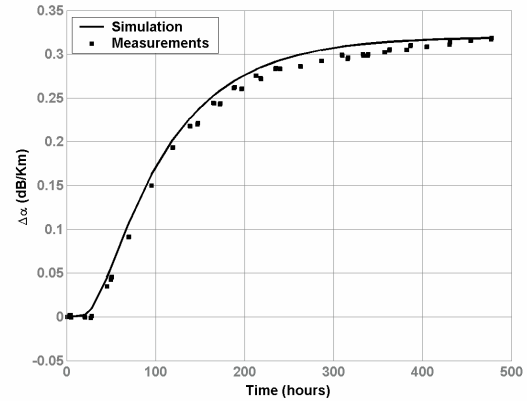


Figura 5: Valores experimentales para el 6% de hidrógeno y simulación.

6 CONCLUSIONES

Hemos desarrollado un modelo del sensor cuyos resultados concuerdan con los de las medidas experimentales. Sobre este modelo se puede realizar cambios en diversos factores como temperatura, concentración de hidrógeno exterior y predecir el comportamiento de la fibra bajo esas variaciones sin tener que llevar a cabo costosos y largos experimentos.

Además sobre este modelo se pueden construir modelos adicionales de absorción de diferentes especies como metano u otros gases que cuyo estudio puede ser interesante.

Agradecimientos

Este trabajo no se habría podido realizar sin los fondos del proyecto europeo SOMOS (FIKW-CT2001-00190).

Referencias

- [1] Andreas Mandelis and Jose A. Garcia, Pd/PVDF thin film hydrogen sensor based on laser-amplitude-modulated optical-transmittance: dependence on H₂ concentration and device physics, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 49, 258-267, (1998).
- [2] Boonsong Sutapun, Massood Tabib-Azar and Alex Kazemi, Pd-coated elasto-optic fiber optic Bragg grating sensors for multiplexed hydrogen sensing, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 60, 27-34, (1999).
- [3] F. J. Franco, J. Lozano, J. P. Santos, A. Agapito. "Degradation of Instrumentation Amplifiers Due to the Nonionizing Energy Loss Damage". *IEEE Transactions On Nuclear Science*, Vol 56, (2003).
- [4] J. Canning, M. Åslund, and P-F. Hu, Ultraviolet-induced absorption losses in hydrogen-loaded optical fibers and in presensitized optical fibers, *Optics Letters*, Vol. 25 Issue 22 Page 1621 (2000).
- [5] J. Stone, "Interactions of Hydrogen and Deuterium with Silica Optical Fibers: A Review", *Journal of Lightwave Thecnology*, Vol LT 5 No 5. May 1987.
- [6] M. A. Butler, Fiber Optic Sensor for Hydrogen Concentrations Near the Explosive Limit, *J. Electrochem. Soc.*, vol 138, n°9, (1991).
- [7] Michael A. Butler, Micromirror optical-fiber hydrogen sensor, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 22, 155-163, (1993).
- [8] X. Bevenot, A. Trouillet, C. Veillas, H. Gagnaire and M. Clement, Surface plasmon resonance hydrogen sensor using an optical fibre, *Measurement Science Technology* 13 118-124, (2002).
- [9] Y. Namihira, K. Mochizuki and M. Kuwazuru. "Temperature dependence of the hydrogen-diffusion constant in optica fibers", *Optical letters* Vol 9, No 9. September 1984.