

# Aplicación de la técnica $\phi$ OTDR de pulsos chirpados a la detección distribuida de hidrógeno y deuterio

## Application of the Chirped-pulse $\Phi$ OTDR technique to the distributed detection of hydrogen and deuterium

Andres GARCIA-RUIZ <sup>(1)</sup>, Adriana MORANA <sup>(2)</sup>, Hugo F. MARTINS <sup>(3)</sup>,  
Sonia MARTIN-LOPEZ <sup>(1)</sup>, Miguel GONZALEZ-HERRAEZ <sup>(1)</sup>,  
Sylvie DELEPINE-LESOILLE <sup>(4)</sup>, Aziz BOUKENTER <sup>(2)</sup>, Youcef OUERDANE <sup>(2)</sup>,  
Sylvain GIRARD <sup>(2)</sup>

1. Dpto. de Electrónica, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, 28805, España.
2. Laboratorio Hubert Curie, Universidad Jean Monnet, Saint-Étienne, 42000, Francia.
3. Inst. de Óptica "Daza de Valdés", IO-CSIC, C/Serrano 121, 28006 Madrid.
4. Agence nat. pour la gestion des déchets radioact. (Andra), Châtenay-Malabry, 92298, Francia.

Persona de contacto: Andres Garcia-Ruiz ([andres.garcia Ruiz@uah.es](mailto:andres.garcia Ruiz@uah.es)).

### RESUMEN:

La detección y cuantificación de la presencia de ciertas especies químicas tiene una importancia central en lo referente a la vigilancia permanente de grandes estructuras en sectores industriales clave y ciertas infraestructuras civiles como los pozos de extracción de combustibles fósiles o los almacenes de residuos radioactivos, donde se libera H<sub>2</sub>. En este trabajo se propone y prueba una técnica competitiva capaz de medir la concentración de hidrógeno y deuterio gracias a su difusión en el vidrio de sílice de una fibra óptica convencional, empleadas de hecho para la monitorización distribuida de grandes infraestructuras. La técnica propuesta, basada en CP- $\phi$ OTDR, podría representar una novedosa solución para este problema, gracias a su demostrada eficacia para la realización de medidas dinámicas de variaciones de índice de refracción, con gran linealidad y sensibilidades del orden de 10<sup>-8</sup> unidades de índice de refracción, proporcionando resoluciones espaciales de unos pocos metros y extendiéndose sobre rangos de medida de decenas de kilómetros.

**Palabras clave:** Sensores distribuidos de fibra óptica, dispersión de Rayleigh, sensado químico, difusión de gas, almacenamiento de residuos radioactivos.

### ABSTRACT:

The detection and quantification of the presence of certain chemical species is of central importance regarding permanent structural health monitoring of key industrial fields and civil infrastructures like oil extraction boreholes or radioactive waste repositories, where H<sub>2</sub> is released. With this work we propose and test a competitive technique able to measure the concentration of hydrogen and deuterium thanks to their diffusion into the silica glass of a standard optical fiber, already employed for the distributed monitoring of large infrastructures. The proposed technique, based on CP- $\phi$ OTDR, could represent a novel solution for this problem, thanks to its ability to provide dynamical measurements of refractive index change, with great linearity and sensitivities of 10<sup>-8</sup> refractive index units, featuring spatial resolutions of a few meters and kilometeric sensing ranges.

**Key words:** Distributed optical fiber sensors, Rayleigh scattering, chemical sensing, gas diffusion, radioactive waste storage.

## 1.- Introducción

En las últimas décadas, la presencia de los sensores distribuidos de fibra óptica se ha incrementado, particularmente en aquellas aplicaciones relacionadas con la supervisión de la estabilidad de grandes estructuras. La poca intrusión de la fibra sensora, su inmunidad a interferencias electromagnéticas, la estabilidad química y mecánica del vidrio de sílice o el bajo coste de mantenimiento de los sistemas interrogadores son solo algunas de sus ventajas, y estos sensores son capaces de ofrecer medidas en cientos o miles de puntos a lo largo de fibras kilométricas, para una amplia variedad de magnitudes físicas.

El sensado químico es solo parte de algunas de las magnitudes en las que estos sensores se centran, y existen múltiples esquemas dedicados a la detección y cuantificación de especies químicas como el hidrógeno molecular. Para algunas instalaciones o áreas industriales, como los pozos de extracción petrolífera, o los almacenes de residuos radiactivos, una presencia excesiva de  $H_2$  puede ser un indicador o un problema en sí mismo.

Por estos motivos, hay un creciente interés por parte de instituciones como Andra en la comprobación de nuevos sensores distribuidos de gas capaces de operar en condiciones adversas, como las propias de un almacén de residuos radiactivos, mediante el proyecto Cigéo [1]. Grandes cantidades de hidrógeno son liberadas en este tipo de almacenes. Algunos de los sensores actualmente disponibles se basan en transductores reactivos al hidrógeno, como el paladio [2]. Sin embargo, se continúa buscando métodos más simples y que sólo requieran fibras convencionales.

Estas fibras, al ser el vidrio permeable a la difusión de pequeñas moléculas como las de hidrógeno o deuterio, pueden ser explotadas para el desarrollo de sensores distribuidos de gas. En este trabajo se propone un método efectivo basado en la técnica de reflectometría óptica en dominio temporal, sensible a las fases y que emplea pulsos con *chirp* (CP- $\phi$ OTDR, por sus siglas en inglés).

## 2.- Fundamentos de la difusión

Cuando se somete a una fibra óptica a la presencia de moléculas como  $H_2$  o  $D_2$ , estas empiezan a difundir a través del vidrio de la fibra. La forma en que esto sucede viene determinada por las características de las sustancias implicadas. Puede encontrarse un modelo detallado del proceso en [3]. Las soluciones de la ecuación que lo gobiernan, al restringirse al problema cilíndrico que nos ocupa donde la difusión es radial, permite obtener la evolución de la concentración del gas en el núcleo de la fibra (donde será interrogada) en términos de, básicamente, una sencilla ley exponencial.

El tiempo característico de la exponencial ( $\tau$ ) depende del radio de la fibra, y decrece con la temperatura ( $T$ ), pero no se ve afectada por la presión del gas ( $P$ ). El valor de saturación de la carga del gas en la fibra, por otro lado, crece con  $P$  pero decrece con  $T$ . El proceso de descarga de la fibra sigue un comportamiento similar.

La presencia de estos nuevos componentes dentro del vidrio afecta a su susceptibilidad dieléctrica, dándose una relación lineal entre su concentración o  $P$  y la variación de índice de refracción inducida. Esta es la base del método de sensado propuesto.

## 3.- Procedimiento experimental

La fibra interrogada (FUT) está compuesta por tres segmentos ( $\sim 30$  m) monomodo (SMF) distintos concatenados, incluyendo un tramo de fibra Corning® SMF-28e®, un tramo de fibra con núcleo no dopado (Fibertronix®), y una tercera parte de tipo *Hole-Assisted Carbon-Coated* (HACC). La primera es empleada como sensor de gas, mientras que las otras dos, provistas de un recubrimiento de carbono, son impermeables a los analitos testados. El propósito de estas es servir de termómetro distribuido, sin verse afectadas por la difusión, de forma que su señal se pueda abstraer de la de la fibra permeable. Al extremo de la fibra, se ha fusionado un segmento de algunos centímetros de fibra sin núcleo, que no guía la luz y evita reflexiones indeseadas al final del sistema.

Las fibras fueron selladas dentro de un reactor de alta presión, donde primero se bombeó hidrógeno hasta los 150 bar. Para la desorción, el hidrógeno se sustituyó por nitrógeno (que no difunde en el vidrio) evitando los efectos mecánicos que tendría un cambio en la presión exterior sobre la medida. Se siguió un proceso similar para el deuterio, que fue mantenido a unos 100 bar. La temperatura osciló entorno a los 25°C durante todo el experimento (temperatura ambiental).

Para la interrogación de la fibra se empleó un sistema experimental basado en CP- $\phi$ OTDR. En comparación con un  $\phi$ OTDR convencional, el uso de pulsos con chirp proporciona una mayor sensibilidad, linealidad y capacidad de realizar medidas dinámicas de cambios de índice de refracción  $\Delta n$ . La información se extrae de los retardos locales  $\Delta t$  que sufren sus trazas en las regiones  $z$  correspondientes a puntos de fibra perturbados. Estos retardos son proporcionales a la perturbación aplicada, a través de la relación [4]:

$$\Delta t|_z = \frac{v_0}{\delta v} \tau_p \frac{\Delta n(z)}{n}, \quad (1)$$

donde  $v_0$  y  $\delta v$  son el centro y anchura espectral del chirp de los pulsos, y  $\tau_p$  es la duración de estos. De esta forma, la medida del cambio de índice de refracción en todos los puntos de la fibra se realiza mediante el cálculo de  $\Delta t$  por correlación cruzada de cada región de traza con la correspondiente en una traza previa. Esto permite acumular las variaciones que se dan a lo largo de un determinado periodo de tiempo y seguir la deriva del índice a más largo plazo.

El esquema óptico que implementa esta técnica se ha representado en la figura 1. Se divide en una primera rama emisora de los pulsos, que son inyectados en la FUT, y una rama receptora. En la emisión, se emplea un diodo láser de cavidad externa (LD) operando en onda continua (CW) a 1550 nm, que se controlan en temperatura y corriente. Su señal es modulada por un amplificador óptico de semiconductor (SOA), que produce los pulsos, mientras se genera el chirp con una señal sincrónica a ellos y que alimenta la corriente del LD. Tras amplificar (EDFA) y filtrar la señal, esta ya puede ser emitida.

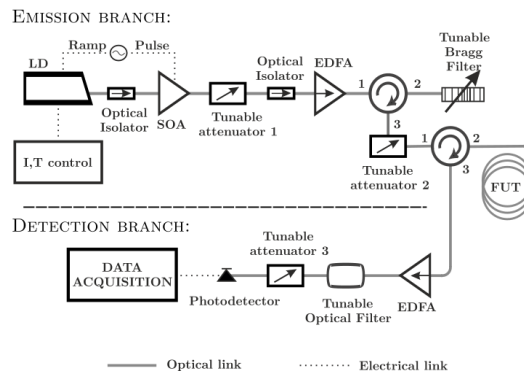


Fig. 1: Setup óptico del sistema interrogador.

Para su detección, las trazas requieren de una nueva amplificación y filtrado consiguientes, tras lo cual se pasan a un fotodetector p-i-n de ancho de banda compatible con el rango del chirp empleado (600 MHz para  $\tau_p = 60$  ns). Finalmente, la señal eléctrica es digitalizada y procesada mediante un ordenador.

En este experimento (de días de duración) se ha aplicado una técnica que mitiga el efecto del ruido de fase del láser [5], para lo cual se ha prolongado la FUT con 300 m adicionales a su inicio (Fig. 2).

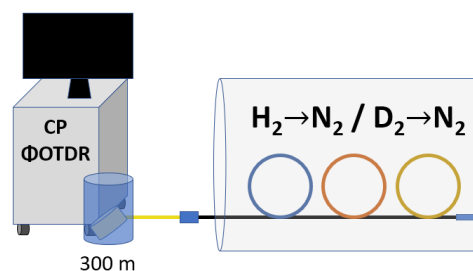


Fig. 2: Disposición experimental de las muestras de fibra en el reactor a presión.

#### 4.- Resultados y discusión

Se monitorizaron varios puntos de cada tipo de fibra simultáneamente. Se ha representado el proceso de carga y descarga de hidrógeno para un punto de cada tipo de fibra en la Fig. 3. Se incluye además el resultado de restar las medidas de temperatura, que eliminan los ciclos día-noche presentes en la lectura del índice de refracción de la fibra permeable. Se añaden también (cruces rojas y azules) los resultados del ajuste exponencial de cada transitorio, de los que se ha extraído el tiempo característico del proceso:  $\tau(\text{H}_2) = 3.37$  días. Del estudio análogo hecho para el gas deuterio, que se representa en la

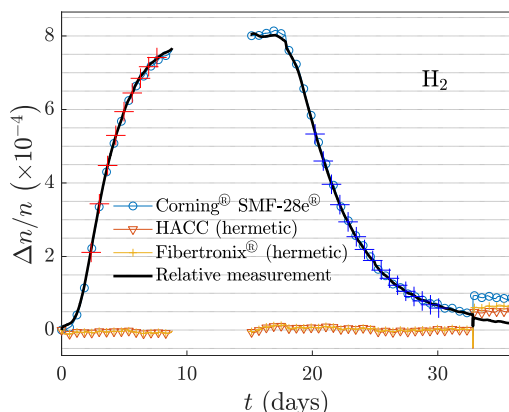


Fig. 3: Cambio de índice relativo registrado debido a la difusión de  $H_2$ .

figura 4, resulta una constante de tiempo de carga (y descarga)  $\tau(D_2) = 3.37$  días, lo que es consistente con que se trate de una molécula más masiva que el  $H_2$  (menor difusividad del gas).

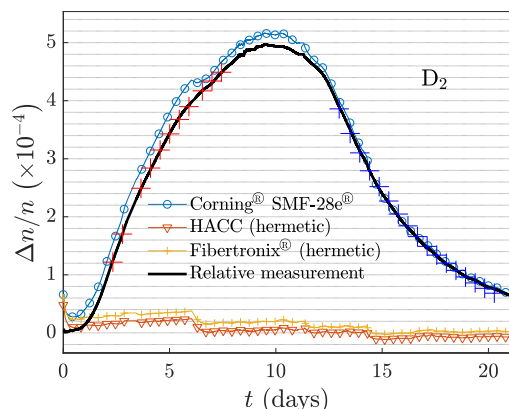


Fig. 4: Medidas de cambio de índice relativo referentes al experimento con  $D_2$ .

## 5.- Conclusión

En esta comunicación, el método propuesto se ha demostrado capaz de seguir los ciclos de absorción y desorción de dos especies químicas en una fibra monomodo convencional, en unas medidas experimentales realizadas *in situ*, a la vez que el sistema evaluaba la temperatura de la fibra y bajo una presión del gas controlada. Considerando las prestaciones del sensor distribuido en que se basa, esta solución podría resultar ventajosa frente a otras alternativas, alcanzando sensibilidades a concentraciones de gas de hasta dos órdenes de magnitud menores. Por ello, se continúa trabajando para contrastar los resultados con un modelo fiable y capaz de convertir las variaciones índice de refracción en fracción molar del gas difundido.

## 6.- Agradecimientos

Investigación financiada por el European Research Council (ERC) (U-FINE, 307441); la Comisión Europea (EC) (H2020) y el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) a través del proyecto DOMINO, ERANET Cofund Water Works 2014 call; la EC (proyecto FINESSE, MSCA-ITN-ETN-722509); el MINECO (TEC2015-71127-C2-2-R); la Comunidad de Madrid (CM) (SINFOTON2-CM: P2018/NMT-4326); y la Universidad de Alcalá (beca FPI).

## Referencias

- [1] Sylvie DELEPINE-LESOILLE, Sylvain GIRARD, M. LANDOLT, J. BERTRAND, Isabelle PLANES, Aziz BOUKENTER, Emanuelle MARIN, G. HUMBERT, S. LEPARMENTIER, J.L. AUGUSTE y Youcef OUERDANE, "France's state of the art distributed optical fibre sensors qualified for the monitoring of the French underground repository for high level and intermediate level long lived radioactive wastes", *Sensors*, 17, 6, 1377, 2017.
- [2] M. ALEIXANDRE, P. CORREDERA, M.L. HERNANZ y J. GUTIERREZ-MONREAL, "Development of fiber optic hydrogen sensors for testing nuclear waste repositories", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 107, 1, 113-120, 2005.
- [3] P.L. SWART, A.A. CHTCHERBAKOV, W.L. JOUBERT y M.G. SHLYAGIN, "Study of the pressure dependence of hydrogen diffusion in optical fiber by an interferometric technique", *Optics communications*, 217, 1-6, 189-196, 2003
- [4] Juan PASTOR-GRAELLS, Hugo F. MARTINS, Andres GARCIA-RUIZ, Sonia MARTIN-LOPEZ y Miguel GONZALEZ-HERRAEZ, "Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses", *Optics Express*, 24, 12, 13121-13133, 2016.
- [5] M. Rosario FERNÁNDEZ-RUIZ, Juan PASTOR-GRAELLS, Hugo F. MARTINS, Andres GARCIA-RUIZ, Sonia MARTIN-LOPEZ y Miguel GONZALEZ-HERRAEZ, "Laser phase-noise cancellation in chirped-pulse distributed acoustic sensors", *J. Lightw. Technol.*, 36, 4, 979-985, 2018.

**Otros:**

(Marque la casilla haciendo doble click y seleccionando activar)

Deseo presentar esta comunicación como candidata a alguno de los premios (sólo si el primer autor es un estudiante; debe acreditar dicha condición con un documento oficial que debe ser enviado a [optoel2019@unizar.es](mailto:optoel2019@unizar.es)).

En este caso recuerde marcar la casilla **SI** en la pregunta correspondiente del formulario.