

Sensor de fibra óptica distribuido para la localización de fugas de hidrocarburo basado en mediciones de transmisión / reflexión

R.M. López, V.V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin

División de Física Aplicada

Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada

Apdo. Post. No.2732, CP22860, Ensenada, B.C., México.

G. Beltrán, E.A. Kuzin

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Apdo. Post. 51 y 216, 7200, Puebla, Puebla, México.

Recibido el 5 de marzo de 2002; aceptado el 12 de julio de 2002

Se presenta un nuevo sensor de fibra óptica distribuido para la detección y localización de fugas de hidrocarburo, basado en la medición de las potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh. La estructura del sensor incluye un polímero sensible, el cual se expande reversiblemente en presencia de hidrocarburo e induce pérdidas por curvatura en la fibra. La localización de la región de pérdidas se determina desde una relación única entre las potencias de transmisión y retrodispersión de Rayleigh normalizadas para diferentes posiciones de la perturbación a lo largo de la fibra de prueba. Se demuestra la localización de una fuerte perturbación con una precisión de ± 1 m a lo largo de una fibra multimodal de 2.844 Km.

Descriptor: Sensor de fibra óptica distribuido; detección de hidrocarburo; retrodispersión de Rayleigh.

A novel type of distributed fiber optic sensor for petroleum hydrocarbon leak detection and localization based on the measurement of transmitted and Rayleigh backscattered power is presented. The sensor structure includes a sensitive polymer, which reversibly expands in hydrocarbon presence and induces the bending losses in the fiber. The location of the loss region is determined from unique relationships between normalized transmitted and Rayleigh backscattered powers for different positions of the disturbance along the test fiber. The localization of a strong disturbance with an estimated accuracy of ± 1 m along a 2.844 km-length single-mode fiber was demonstrated.

Keywords: Distributed fiber optic sensor; hydrocarbon detection; Rayleigh backscattering.

PACS: 07.07.Df; 42.81.-I, 42.81.Dp.

1. Introducción

El estado del arte más alto en sensores ópticos es alcanzado con los de fibra óptica distribuidos [1-2] que permiten medir el parámetro deseado a lo largo de la fibra de prueba. El sensor de fibra óptica distribuido basado en curvaturas es muy atractivo para la medición de presión, temperatura, desplazamiento, etc., donde la influencia de la medición se puede transformar en una deformación lateral [3-5]. Las regiones donde las pérdidas de luz ocurren debido a curvaturas son localizadas principalmente con reflectometría óptica en el dominio del tiempo (*Optical Time Domain Reflectometer, OTDR*) [1-3] o reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia. Esta última utiliza técnicas en óptica coherente (*Coherent Optical Frequency Domain Reflectometer, COFDR*) [6] como en no-coherente (*Incoherent Optical Frequency Domain Reflectometer, IOFDR*) [7-8]. Todos estos métodos utilizan fuentes moduladas en tiempo o frecuencia que permiten localizar un número de perturbaciones a lo largo de la fibra de prueba simultáneamente. Mientras tanto, para algunas aplicaciones, es importante detectar y localizar una condición de alarma peligrosa, la cual típicamente ocurre como un simple evento no frecuente, tales como fuga en una pipa, fuego o explosión.

Para estas aplicaciones se propone un nuevo sensor de fi-

bra óptica simple y económico el cual utiliza una fuente de luz no modulada, detectores de potencia y una fibra de sensor [9, 10]. La técnica propuesta utiliza un novedoso principio de localización de perturbación inducida por pérdidas, basada en la medición de potencias transmitida y reflejada o de retrodispersión de Rayleigh.

Este artículo presenta este tipo de sensor de fibra óptica distribuido para detección y localización de fugas de hidrocarburos basado en el análisis de transmisión/reflexión. Para inducir pérdidas por curvatura se emplea un polímero sensible, el cual se hincha bajo la influencia del hidrocarburo.

2. Principio de localización de la perturbación

El diagrama esquemático del sensor de fibra óptica se muestra en la Fig. 1, donde se utiliza una fuente continua de luz, la cual se conecta al brazo 1 de un acoplador 50/50 mediante un aislador por donde es introducido el haz a una fibra óptica estándar monomodal para comunicaciones que es conectada al brazo 3 del acoplador, al final de la fibra bajo prueba se conecta un medidor de potencia para medir la transmisión y en el brazo 2 del acoplador se conecta otro medidor para la potencia de retrodispersión de Rayleigh y finalmente se conecta un medidor de potencia en el brazo 4 para monitorear la potencia de la fuente.

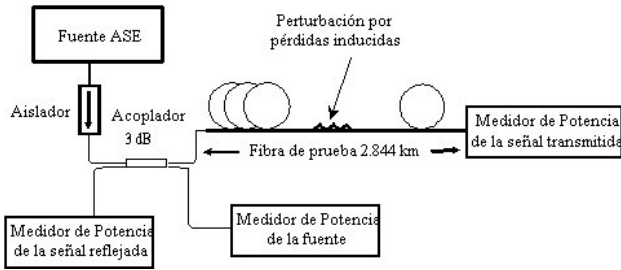


FIGURA 1. Diagrama esquemático del sensor de fibra óptica.

El método propuesto para la localización de pérdidas se basa en una relación única entre las potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh normalizadas. Estas relaciones son distintas para diferente localización de la perturbación debido a pérdidas inducidas a lo largo de la fibra sensora. Si, por ejemplo, las pérdidas por curvatura ocurren en el extremo lejano de la fibra sensada (ver Fig. 1), existe un decremento proporcional de la potencia transmitida. Sin embargo, la potencia de retrodispersión de Rayleigh no cambia debido a que toda la longitud de la fibra participa en la retrodispersión y la distribución de la potencia introducida es la misma que para una fibra sin perturbación. Sin embargo, si las pérdidas por curvatura en la fibra de prueba están cerca al extremo inicial, la potencia transmitida decrece la cual es acompañada con un decremento de la potencia de retrodispersión de Rayleigh. Esto sucede porque la pérdida inducida cerca del extremo inicial decrece la potencia propagándose hacia adelante y de ahí decrece la potencia de retrodispersión de Rayleigh. Además, la potencia retrodispersada decrece cuando ésta pasa de regreso a través de la región de pérdidas. Detalladamente, si las pérdidas por curvatura en la fibra de prueba ocurren a la mitad (la primera mitad de la fibra) la cual es cercana al extremo inicial aun dispersa la luz de la misma manera como una fibra sin perturbación, pero la potencia dispersada en la segunda mitad es menor debido a las pérdidas inducidas. Así, en general, para perturbaciones por pérdidas inducidas idénticas, el decremento de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizada depende de la localización de la región con exceso de pérdidas.

Para la simulación numérica de la relación entre las potencias de transmisión y de retrodispersión de Rayleigh normalizadas cuando las pérdidas ocurren en diferentes distancias a lo largo de la fibra de prueba, se calculó la transmisión y la reflexión por dispersión de Rayleigh para dos segmentos de fibra con longitudes de l_1 y l_2 , separadas por un segmento corto con pérdidas inducidas. La potencia del coeficiente de reflexión de cada segmento de dispersión de Rayleigh en

fibra es [11,12]

$$R_{\delta L} = S (\alpha_s/\alpha) [1 - \exp(-2\alpha\delta L)]/2, \tag{1}$$

donde α_s es el coeficiente de atenuación debido a la dispersión de Rayleigh, α es el coeficiente de atenuación total de la fibra de prueba, δL es la longitud del segmento de fibra y el factor de recaptura S para la fibra de índice escalonado se define como [13]

$$S = b (n_1^2 - n_2^2) / n_1^2. \tag{2}$$

Aquí b es un parámetro que depende de la propiedad de guía de onda de la fibra y es usualmente en el intervalo de 0.21 a 0.24 para fibras monomodo de índice escalonado [13], n_1 y n_2 son los índices de refracción del núcleo y recubrimiento de la fibra, respectivamente.

Introduciendo un parámetro $S\alpha = S(\alpha_s/2\alpha)$, los coeficientes de transmisión y de retrodispersión de secciones de fibra completa se pueden escribir como $T_{1,2} = \exp(-\alpha l_{1,2})$ y $R = S\alpha[1 - \exp(-2\alpha l_{1,2})]$, respectivamente. Un tramo corto de fibra se afecta por una condición de monitoreo, se introduce pérdida de luz y tiene una transmisión $T_S \leq 1$.

Considerando que la dispersión es relativamente débil y la porción de la luz dispersada es muy pequeña. Esto permite simplificar el análisis, despreciando dispersión múltiple en ambas direcciones. Se tomaron en cuenta la reflexión del inicio y final de la fibra con coeficientes r_1 y r_2 , respectivamente, ya que una reflexión débil se puede comparar con la retrodispersión. Sin embargo, se puede asumir que $r_{1,2} \ll 1$ y despreciar reflexiones múltiples también. En este caso, los coeficientes de transmisión T y la retrodispersión R de este sistema óptico se pueden escribir como

$$T = T_1 T_S T_2 = T_S e^{-\alpha L}, \tag{3}$$

$$R = r_1 + S\alpha (1 - e^{-2\alpha l_1}) + T_1^2 T_S^2 S\alpha (1 - e^{-2\alpha l_2}) + T_1^2 T_S^2 T_2^2 r_2, \tag{4}$$

donde $L = l_1 + l_2$ es la longitud total del sensor.

Los coeficientes normalizados son definidos como $T_{norm} = T/T_{max}$ y $R_{norm} = R/R_{max}$, donde T_{max} y R_{max} se pueden evaluar a partir de las ecuaciones anteriores cuando $T_S = 1$. Esto deja

$$T_{norm} = T_S, \tag{5}$$

$$R_{norm} = \frac{S\alpha + r_1 - (S\alpha + r_2) T_S^2 e^{-2\alpha L} - S\alpha (1 - T_S^2) e^{-2\alpha l_1}}{S\alpha + r_1 - (S\alpha - r_2) e^{-2\alpha L}}. \tag{6}$$

La relación entre las potencias transmitida T_{norm} y de retrodispersión de Rayleigh R_{norm} normalizadas se pueden encontrar en las Ecs. (5) y (6):

$$T_{norm}^2 = \frac{(S\alpha + r_1) (R_{norm} - 1) - R_{norm} (S\alpha - r_2) e^{-2\alpha L} + S\alpha e^{-2\alpha l_1}}{S\alpha (e^{-2\alpha l_1} - e^{-2\alpha L}) + r_2 e^{-2\alpha L}} \tag{7}$$

La Fig. 2 muestra el resultado de los cálculos numéricos cuando las pérdidas adicionales ocurren en distancias $l_{1,n} = n\Delta L$ desde el inicio hasta el final de la fibra de prueba, donde $n = 0, 1, \dots, 10$ y el intervalo entre la localización de curvaturas $\Delta L = 284,4 m$. Las potencias transmitida y de retrodispersión fueron normalizadas con respecto a sus valores iniciales sin perturbación. En los cálculos fue utilizado un valor típico para $b = 1/4,55$ para fibra monomodal [14]. Se obtiene una buena aproximación entre los datos experimentales y la teoría obtenida utilizando $(\alpha_s/\alpha) = 0,68$, que es bastante razonable para la fibra utilizada en los experimentos con coeficiente de atenuación total $\alpha = 0,19 dB/km$ [14]. Las reflexiones al inicio y al final de la fibra de prueba son iguales a $4,7 \times 10^{-6}$ y $1,5 \times 10^{-5}$, respectivamente, en nuestro experimento, donde también se toman en cuenta los cálculos.

La pendiente de la dependencia de la potencia transmi-

tida normalizada al cuadrado (T_{norm}^2) respecto a la potencia retrodispersión de Rayleigh normalizada (R_{norm}) es

$$\frac{\partial (T_{norm}^2)}{\partial R_{norm}} = \frac{S_\alpha + r_1 - (S_\alpha - r_2) e^{-2\alpha L}}{S_\alpha (e^{-2\alpha l_1} - e^{-2\alpha L}) + r_2 e^{-2\alpha L}}, \quad (8)$$

donde $\partial (T_{norm}^2) / \partial R_{norm}$ se obtiene a partir de datos experimentales, se toma la lectura (T_{norm}, R_{norm}) en dos puntos, el primero sin perturbación y el segundo con pérdidas inducidas, entonces se grafica (T_{norm}^2, R_{norm}) para cada punto, se traza una recta entre estos puntos y la pendiente de esta recta es el término que corresponde a la derivada del cuadrado de la potencia transmitida con respecto a la potencia de retrodispersión de Rayleigh. Una vez que se conoce $\partial (T_{norm}^2) / \partial R_{norm}$, la localización de la región de pérdida l_1 se encuentra directamente desde la Ec. (8) obteniendo la siguiente expresión:

$$l_1 = -\frac{1}{2\alpha} \ln \left[\frac{S_\alpha + r_1 - (S_\alpha - r_2) \left(1 - \frac{\partial (T_{norm}^2)}{\partial R_{norm}} \right) e^{-2\alpha L}}{S_\alpha \frac{\partial (T_{norm}^2)}{\partial R_{norm}}} \right]. \quad (9)$$

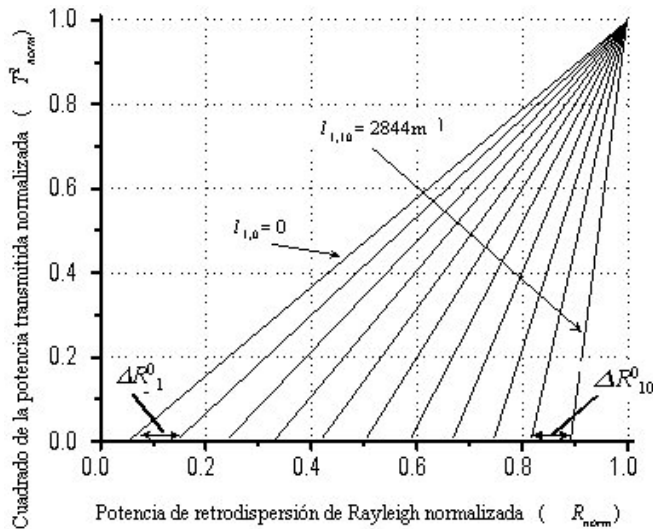


FIGURA 2. Relaciones teóricas entre las potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh normalizadas para pérdidas inducidas por curvatura en diferentes localizaciones espaciadas igualmente a lo largo de la fibra de prueba.

Como se puede ver, entre las curvas paramétricas de los extremos $l_{1,0}$ y $l_{1,10}$ cada punto localizado con coordenadas (T_{norm}^2, R_{norm}) corresponde únicamente a una curva paramétrica que atraviesa este punto (Fig. 2). Por lo tanto, para localizar la perturbación con el método propuesto, se necesitan las coordenadas dadas por las potencias normalizadas de retrodispersión de Rayleigh y de transmisión.

Por otro lado, como es bien sabido, el exceso de pérdidas por curvaturas depende de la amplitud de la perturba-

ción [3-5]. De ahí, el decremento en la potencia transmitida se puede utilizar para medir el valor integral de la perturbación sobre algún dominio espacial [15]. Por lo tanto, el método propuesto proporciona la detección y la localización de una sola perturbación con pérdidas inducidas en la fibra de prueba.

3. Resultados experimentales y discusión

El diagrama esquemático del sensor de fibra óptica se muestra en la Fig. 1. Una onda continua de luz emitida por una fuente ASE, operando cerca de la longitud de onda de 1550 nm con un ancho de línea de pocos nanómetros, se introdujo en una fibra estándar monomodal para comunicaciones de índice escalonado con una longitud de 2.884 Km a través de un acoplador de 3 dB. La potencia óptica introducida fue alrededor de 1.1 mW y el coeficiente de atenuación a de la fibra de prueba fue de 0.19 dB/km, el cual se midió con un OTDR. Para anular las retrorreflexiones de la fuente ASE se utilizó un aislador óptico. También todos los extremos finales de las fibras fueron colocados en líquidos de inmersión para reducir las retrorreflexiones. Se utilizó un HP 8153A *Lightwave Multimeter* de alta precisión para medir la potencia de retrodispersión de Rayleigh con un tiempo de promediación de 5 ms y para la potencia transmitida un medidor de potencia estándar.

Para inducir las pérdidas de curvatura bajo la influencia de gasolina como transductor sensible, se utilizó un polímero hinchable. El diseño de los elementos sensibles se muestra

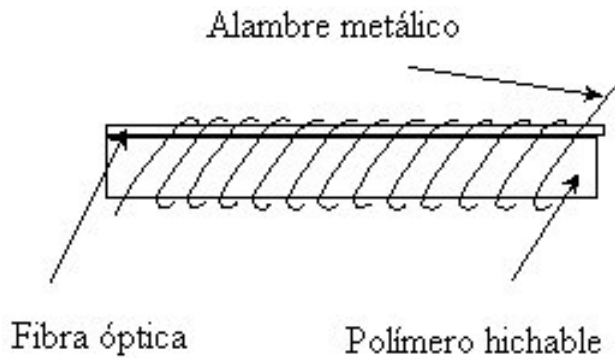


FIGURA 3. Construcción del elemento sensible de fibra óptica.

esquemáticamente en la Fig. 3. La fibra óptica y el polímero hinchable fueron alineados juntos y acoplados mecánicamente por un alambre suave alrededor de ellos. La fibra se colocó dentro de pequeñas ranuras en el polímero que permite eliminar las pérdidas iniciales, pero no incrementa significativamente el tiempo de respuesta del sensor. En la zona donde ocurre la perturbación no existen reflexiones adicionales, es decir, cuando se inducen las pérdidas en esta región no se llega a dañar ni la fibra ni el recubrimiento de plástico, esto se comprobó con el estudio experimental utilizando un OTDR, este resultado concuerda con otras publicaciones [14] y [16-17]. Una goma blanca de *butyl* se utilizó como polímero sensible en el sensor de hidrocarburo propuesto. Este material tiene buenas propiedades de envejecimiento a elevadas temperaturas y buena estabilidad química. Es también resistente al clima, a la luz del sol, ozono, ácidos minerales, solventes oxigenados (ketones y alcohol) y absorción al agua [18-19]. La goma absorbe y se hincha en presencia del hidrocarburo sin disolución y cambio significativo en sus propiedades mecánicas. El comportamiento del hinchamiento del polímero produce un incremento en las dimensiones físicas del material, el cual se puede fácilmente transformar en una respuesta mecánica. Este estudio muestra que la goma de *butyl* puede incrementar su volumen por más de dos veces bajo la influencia de la gasolina [20,21]. Por otra parte, su comportamiento es reversible, es decir que se puede utilizar en múltiples ciclos de húmedo - seco. En el experimento se probó el sensor bajo la influencia de la gasolina, pero cualitativamente el mismo comportamiento del hinchamiento de goma de *butyl* se muestra en una gama de combustibles de hidrocarburo en la Ref. 22.

Para estudiar la respuesta del sensor, se colocó dentro de un recipiente lleno de gasolina 20 cm de longitud del elemento sensible localizado a 2780 m desde el inicio de la fibra. Bajo la influencia de la gasolina la goma de *butyl* se hincha produciendo curvaturas en la fibra, las cuales inducen las pérdidas en la fibra de prueba. La Fig. 4 muestra el cambio de transmisión de la fibra de prueba durante el ciclo húmedo - seco. El decremento de transmisión indica presencia del hidrocarburo y permite estimar un valor integral de la perturbación. Para localizar la perturbación con el método propuesto se necesita encontrar la relación entre las potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh normalizadas.

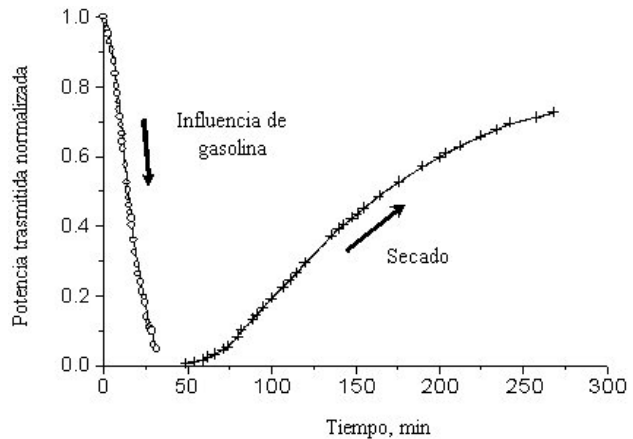


FIGURA 4. Potencia transmitida normalizada durante el ciclo húmedo-seco. (o influencia de gasolina, + secado)

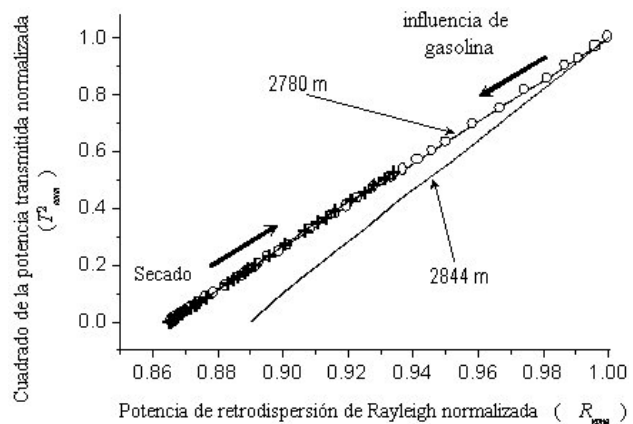


FIGURA 5. Relaciones entre potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh normalizadas durante ciclos de húmedo-seco (o bajo influencia de gasolina, + secado, - dependencias teóricas).

Estas dependencias durante el ciclo de húmedo-seco se presentan en la Fig. 5. Dependencias teóricas calculadas para pérdidas inducidas a 2780 m y al final de la fibra (2844 m) se muestran en la Fig. 5. Como se puede ver, las dependencias para periodos de humedad y secado prácticamente coinciden con predicciones teóricas. De ahí, con el método propuesto, la localización de la perturbación puede encontrarse midiendo las potencias transmitidas y de retrodispersión de Rayleigh. Nótese que, en general, utilizando este algoritmo, se puede localizar solamente una perturbación, la cual puede aparecer a lo largo de la fibra de prueba.

Para estimar la precisión de la localización de la perturbación con este método, se indujeron fuertes pérdidas por curvatura que decrecen la transmisión de la fibra por más de 30 dB en el extremo final de la fibra. La Fig. 6 muestra las variaciones medidas de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizada. Estas variaciones aleatorias caen dentro del intervalo $(R_0 \pm \delta R_0)$, donde $R_0 = 0,8936$ es el valor principal y $2\delta R_0 = 6 \times 10^{-4}$ es el ancho del intervalo. La derivación estándar de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizada fue estimada como $1,5 \times 10^{-4}$. La diferencia entre las potencias de retrodispersión de Rayleigh normalizadas para las curvas paramétricas $l_{1,10}$ y $l_{1,9}$ para la transmisión igual

a 0 (perturbación fuerte) es $\Delta R_{10}^0 = 0,08$ (ver Fig.2). Ya que las curvas paramétricas $l_{1,10}$ y $l_{1,9}$ corresponden a posiciones separadas por $\Delta L = 284,4$ m, el máximo error de localización de una fuerte perturbación cerca del extremo final de la fibra δl_{10}^0 se encontró ser igual a ± 1 m utilizando la siguiente ecuación:

$$\delta l_{10}^0 = \frac{\Delta L \delta R_0}{\Delta R_{10}^0} \tag{10}$$

En la Ec. (10) el error máximo de localización δl_{10}^0 se determina utilizando la derivación máxima de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizada δR_0 . Nótese que el error de localización, el cual se define desde la derivación estándar de la potencia de retrodispersión normalizada, fue aproximadamente dos veces menos. Para la perturbación fuerte cerca del extremo inicial de la fibra de prueba se obtuvo alrededor del mismo valor del error de localización. Se debe notar, sin embargo, que el análisis del error de localización presentado aquí toma solamente en cuenta errores aleatorios de la potencia normalizada medida de la dispersión de Rayleigh. En la práctica, el ruido con otro origen e imperfecciones del sistema puede también contribuir al decremento de precisión. Éstos pueden ser cambios temporales de la fibra y parámetros del detector, pérdidas adicionales incontrolables, etc. Sin embargo, el análisis completo de error del sensor de fibra óptica propuesto está fuera del campo de este artículo y será llevado a cabo más tarde.

A partir de los datos presentados en la Fig. 2, con el método propuesto es más fácil localizar perturbaciones fuertes, sin embargo la localización de perturbaciones débiles requiere

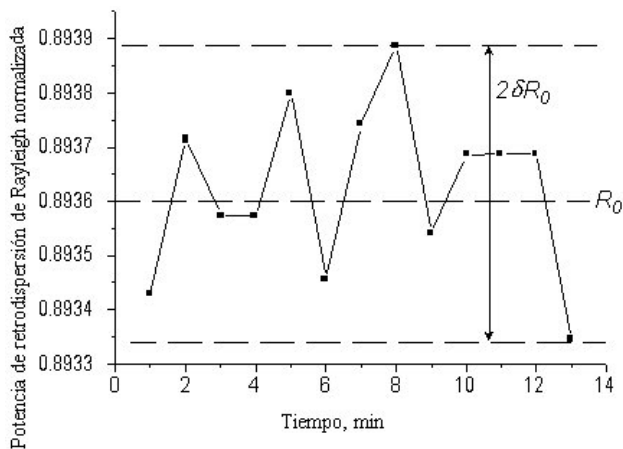


FIGURA 6. Variaciones de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizada en el tiempo para fuertes pérdidas inducidas en el extremo final de la fibra de prueba.

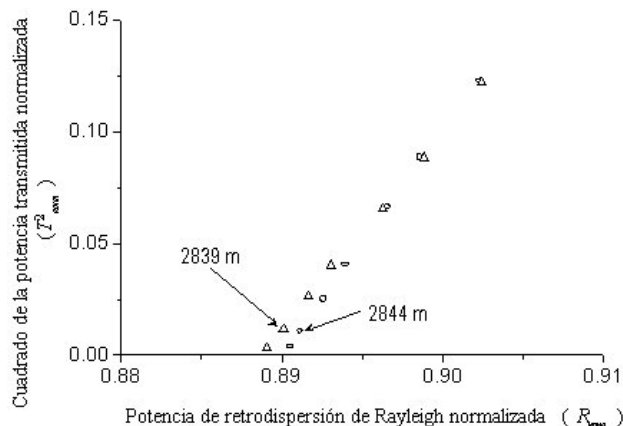


FIGURA 7. Relación entre las potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh normalizadas para pérdidas inducidas por curvatura en 2844 m (O) y en 2839 m (Δ).

una más alta precisión de la medición de las potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh. La Fig. 7 muestra la relación de mediciones experimentales entre las potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh normalizadas para las pérdidas inducidas por curvatura en 2844 y 2839 metros. Como se puede apreciar, dos diferentes localizaciones de la perturbación cerca del extremo final de la fibra de prueba separada por 5 metros se pueden claramente reconocer para las pérdidas que decrecen la transmisión inicial por más de 5 veces.

4. Conclusión

Se ha desarrollado un sensor simple de fibra óptica distribuido para detección de fugas de hidrocarburo, el cual utiliza un polímero hinchable y una fuente de luz no modulada de onda continua. Se ha demostrado que el sensor de hidrocarburo propuesto permite la localización de una perturbación por pérdidas inducidas a lo largo de la fibra midiendo solamente las potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh de una fuente de onda continua no modulada. Se demostró que con una fuerte perturbación el error máximo de localización es de ± 1 m en una fibra monomodal de 2.844 km de largo. Se considera que la técnica propuesta debe ser muy atractiva para la eventual realización de un sensor de alarma de fibra óptica distribuido compacto y de bajo costo.

Agradecimientos

R.M. López agradece por su apoyo al proyecto IMP FIES97-04-IV.

1. J.P. Dakin, "Distributed optical fiber sensors", en *Fiber Optic Smart Structures*, edited by E. Udd (John Wiley & Sons, New York 1995).
2. A. Hartog, "Distributed fiber-optic Sensors: Principles and applications", en *Optical Fiber Sensor Technology. Advanced*

- Applications-Bragg Gratings and Distributed Sensors*, edited by K.T.V. Grattan and B.T. Meggitt (Kluwer Academic Publishers, Boston 2000).
3. D.A. Nolan, P.E. Blaszyk, and E. Udd., "Optical fibers" *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*

- (John Wiley & Sons, New York 1991).
4. G.L. Mitchell, "Intensity-based and Fabry-Perot interferometer sensors" en *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists* (John Wiley & Sons, New York 1991).
 5. T. Clark and H. Smith, "Microbend fiber optic sensors" en *Fiber Optic Smart Structures*, edited by E. Udd (John Wiley & Sons, New York 1995).
 6. K. Tsuji, K. Shimizu, T. Horiguchi, and Y. Koyamada, *IEEE Phot. Technol. Lett.* **7** (1995) 804.
 7. S.G. Pierce, A. MacLean, and B. Culshaw, *Appl. Opt.* **39** (2000) 4569.
 8. S. Venkatesh and D.W. Dolfi., *Appl. Opt.* **29** (1990) 1323.
 9. V.V. Spirin, M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov, and P. L. Swart, *Electronics Letters*, **38** (2002) 117.
 10. V.V. Spirin, M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov, and P. L. Swart, *Optics Communications* (aceptado para su publicación).
 11. P.Gysel, R.H. Staubli, J. *Lightwave Technol.* **8** (1990) 561.
 12. S.K. Liaw, S.L. Tzeng, and Y.J. Hung, *Opt. Comm.* **188** (2000) 63.
 13. E. Brinkmeyer, *Electron. Lett.* **16** (1980) 329.
 14. J. Beller. "OTDRs and Backscatter Measurements", in *Fiber Optic Test and Measurement*, edited by D. Derickson. (Prentice Hall PTR, New Jersey 1998).
 15. W.B. Spillman, Jr, "Fiber optics and smart structures", en *Optical fiber Sensors. Applications, analysis, and future trends*, v.4, edited by J. Dakin and B. Culshaw. (Artech House, Boston, London 1997).
 16. A. MacLean, C. Moran, G. Thursby, S. G. Pierce, B. Culshaw, and N.B. Graham, *Proc. SPIE* **3986** (2000) 342.
 17. MacLean, C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw, D. Marsh, V. Watson, and Geoff Andrews, *Proc. SPIE* **4185** (2000) 382.
 18. P. W. Allen, *Natural Rubber and the Synthetics* (Wiley, New York 1972).
 19. M. Morton, *Rubber Technology* (Von Nostrand Reinhold Co., 3d. ed. New York, 1987).
 20. V.V. Spirin, M.G. Shlyagin, S. V. Miridonov, F. J. Mendieta, R., and M. López, *Optics and Lasers in Engineering* **32** (2000) 497.
 21. R.M. López, V. V. Spirin, M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov, I. Márquez, and A. Márquez, *Proc. SPIE* **4328** (2001) 114.
 22. A. MacLean, C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw, D. Marsh, and G. Andrews, *Proc. SPIE* **4328** (2001) 47.