

Sensor de Fibra Óptica Integrado Fabry-Perot para Medir Contaminantes en Agua

Fernández, Germán R; Laureano A. Bulus Rossini, Pablo A. Costanzo Caso

german.fernandez@ib.edu.ar

Instituto Balseiro

Universidad Nacional de Cuyo

1. Resumen

En este trabajo se propone el desarrollo de un sensor integrado de fibra óptica (FO) tipo Fabry-Perot (F-P) para determinar la presencia de contaminantes en agua. Inicialmente se propone un sensor basado en dos cavidades F-P acopladas, grabadas en el extremo de la FO. La cavidad interna está formada por aire y la segunda por la propia FO. Se modela y se simula numéricamente el sensor a partir de analizar el espectro de reflectividad cuando se varían tanto las longitudes de las dos cavidades, como el índice de refracción del medio externo (o líquido). Posteriormente, se procesa numéricamente el espectro simulado (el cual correspondería la señal medida en un sistema real) mediante la transformada de Fourier de manera de caracterizar la respuesta del sensor. A partir de las señales medidas, se analizaron la separación de las franjas de interferencia y el contraste de las mismas, o visibilidad, mientras que a partir de las señales transformadas se caracterizaron las componentes de baja y alta frecuencia presentes. Finalmente, cada uno de estos parámetros fueron analizados cuando se propone el sensor para medir las características del agua y la presencia de contaminantes que modifican su índice de refracción.

2. Introducción

Los sensores interferométricos de fibra óptica (FO) son altamente sensibles a las variaciones de los parámetros y por ello es un sensor muy utilizado en la actualidad. La técnica de interferometría se basa en detectar el cambio de fase óptico inducido a medida que la luz se propaga a lo largo de la fibra. Normalmente, un haz de luz incidente en un interferómetro se divide en dos caminos, uno sirve como referencia, mientras el otro es afectado por el parámetro físico que se desea medir (temperatura, presión, tensión, etc.). Los caminos de fibra se combinan en la salida del sensor formando un patrón de interferencia, el cual está relacionado con la diferencia de fase óptica entre los dos caminos originada con la magnitud que se desea medir [1]. Típicamente, el cambio de fase por cambio de temperatura es de $100 \text{ rad/m/}^\circ\text{C}$, por deformación longitudinal $10 \text{ urad/m}/\mu\text{e}$ y por cambio de presión es de $10 \text{ urad/m}/\text{bar}$ [2].

Existen cuatro tipos de interferómetros de FO: Fabry-Perot (F-P), Mach-Zehnder, Michelson y Sagnac [1]. Estos presentan excelentes características como resistencia a la corrosión, inmunidad a la interferencia electromagnética, alta precisión, entre otras [3]. Un Interferómetro F-P esta generalmente formado por dos reflectores paralelos separado por cierta distancia L (tamaño de la cavidad). Los espejos o interface entre los dieléctricos pueden ser usados como reflectores. La Interferencia ocurre debido a las superposiciones múltiples de los rayos reflejados y transmitidos por reflectores paralelos. El espectro transmitido y reflejado obtenido depende del tamaño de la cavidad, del índice de refracción del medio y de la reflectividad de los espejos. Una perturbación externa induce un cambio en la diferencia de fase óptica del interferómetro modificando el espectro característico dado por franjas de interferencia. Tanto la separación de franjas, o rango espectral libre FSR (de las siglas en inglés *free spectral range* dado por $c/2Ln$, siendo C la velocidad de la luz en el vacío y n el índice de refracción del medio), como el máximo contraste entre éstas, o visibilidad, pueden ser utilizadas para determinar la magnitud que se desea sensar. El interferómetro F-P puede ser extrínseco o intrínseco, dependiendo de si los dos reflectores están separados por un espacio de aire (o por algún material externo a la fibra) en el primer caso, o por la misma fibra, en el otro [1].

Ran et al [3] proponen la fabricación de un sensor F-P con una cavidad de aire, usando un láser para micromecanizado con una longitud de onda de 157 nm. Los autores determinan el índice de refracción externo a partir del máximo contraste de las franjas en el espectro de reflexión del sensor. Por otra parte, Pengcheng et al [4], demostraron este tipo de sensor con una muy alta resolución y sensibilidad. Comprobaron que pueden monitorear temperatura con alta sensibilidad, midiendo simultáneamente la temperatura y el índice de refracción RI (del inglés *refractive index*). Por último, Hanglin et al [8] muestran experimentalmente un sensor de FO basado en un interferómetro *Sagnac*, siendo éste un sensor de fácil fabricación, y alta sensibilidad.

En este trabajo, se analizan los parámetros espectrales de un sensor F-P de FO con una cavidad intrínseca de aire, para medir el RI de los líquidos en contacto con la punta del sensor. Se evalúa además la performance del sensor para la evaluación de la concentración de solutos en los líquidos, teniendo como finalidad la medición de la contaminación de agua.

3. Materiales y Métodos

Principios Básicos de Operación

La estructura básica de la cabeza del sensor ubicado en extremo de la FO se muestra en la Figura 1, donde se aprecia que el sensor está formado por tres superficies reflectoras denominadas 1, 2 y 3, respectivamente.

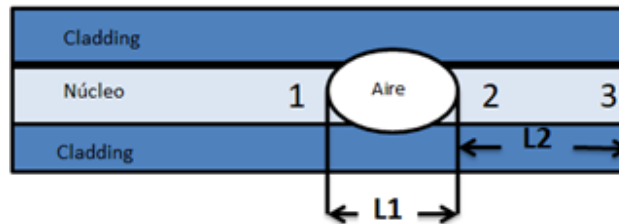


Fig.1 Estructura básica de la cabeza del sensor

Las superficies reflectoras 1 y 2 forman una cavidad F-P de aire de tamaño L_1 , a la que se denomina cavidad 1, que será más corta que la cavidad F-P formada por la superficie reflectora 2 y 3, cuyo tamaño es L_2 , a la cual se denomina cavidad 2. Por último, se tiene cavidad que se forma por la superficie de reflexión 1 y 3, cavidad 3, cuyo tamaño es L_3 y coincide con la suma de los tamaños de las cavidades 1 y 2. Los RIs del líquido en contacto con la punta del sensor, de la cavidad 1 y de la cavidad 2, son denominados como n_m , n_H y n_o , respectivamente. La Figura 2 muestra la estructura del sensor con los campos eléctricos incidente y reflejado, para las tres superficies 1, 2 y 3, respectivamente.

E_i es el campo incidente a la entrada y E_r es el campo total reflejado (en la entrada) compuesto de las múltiples reflexiones originadas en las cavidades. R_1 , R_2 , R_3 son las reflectividades de las superficies 1, 2 y 3, respectivamente, y A_1 , A_2 , A_3 son los correspondientes factores de pérdidas de transmisión (o pérdidas por exceso). β es la constante de propagación para el modo guiado y α es el factor de pérdida, ambos de la cavidad 1. En la demostración se desprecian las pérdidas en la cavidad 2 debido a que son muy bajas en la FO (~ 0.2 dB/km) y la distancia es extremadamente corta.

El cuadrado del coeficiente de reflexión (reflectancia) de las superficies reflectoras puede determinarse a partir de la ecuación de Fresnel [5] como:

$$R_i = \left(\frac{n_0 - n_x}{n_0 + n_x} \right)^2 \quad (1)$$

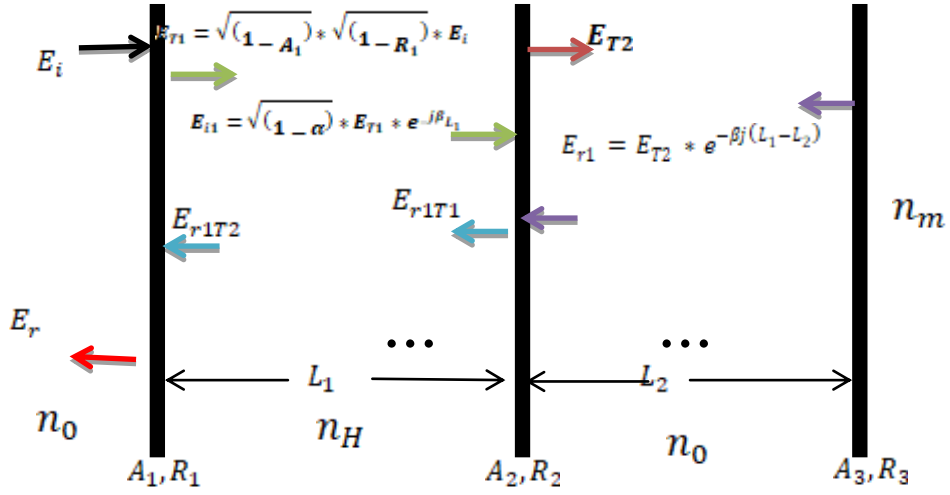


Figura 2 Se observa el campo transmitido y reflejado por las tres superficies reflectoras.

A partir de la Figura 2 y siguiendo el procedimiento presentado por Ran et al [3], puede demostrarse que el espectro de potencia de la reflexión total en la superficie reflectora 1 resulta

$$\begin{aligned}
 R_{FP}(\lambda) &= \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2 = R_1 + (1 - \alpha)^2 * (1 - A_1)^2 * R_2 * (1 - R_1)^2 \\
 &+ (1 - \alpha)^2 * (1 - A_1)^2 * (1 - A_2)^2 * (1 - R_1)^2 * (1 - R_2)^2 * R_3 \\
 &+ 2\sqrt{R_1 R_3} * (1 - \alpha) * (1 - A_1) * (1 - A_2) * (1 - R_1) * (1 - R_2) * \cos\left(\frac{4\pi(L_1 + n_0 L_2)}{\lambda}\right) \\
 &- 2\sqrt{R_2 R_3} * (1 - \alpha)^2 * (1 - A_1)^2 * (1 - A_2) * (1 - R_1)^2 * (1 - R_2) * \cos\left(\frac{4\pi(2L_1 + n_0 L_2)}{\lambda}\right) \\
 &- 2\sqrt{R_1 R_2} * (1 - \alpha) * (1 - A_1) * (1 - R_1) * \cos\left(\frac{4\pi L_1}{\lambda}\right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

para $n_m \leq n_0$, y

$$\begin{aligned}
 R'_{FP}(\lambda) &= \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2 = R_1 + (1 - \alpha)^2 * (1 - A_1)^2 * R_2 * (1 - R_1)^2 \\
 &+ (1 - \alpha)^2 * (1 - A_1)^2 * (1 - A_2)^2 * (1 - R_1)^2 * (1 - R_2)^2 * R_3 \\
 &- 2\sqrt{R_1 R_3} * (1 - \alpha) * (1 - A_1) * (1 - A_2) * (1 - R_1) * (1 - R_2) * \cos\left(\frac{4\pi(L_1 + n_0 L_2)}{\lambda}\right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$+2\sqrt{R_2 R_3} * (1 - \alpha)^2 * (1 - A_1)^2 * (1 - A_2) * (1 - R_1)^2 * (1 - R_2) * \cos\left(\frac{4\pi(n_0 L_2)}{\lambda}\right) - 2\sqrt{R_1 R_2} \\ * (1 - \alpha) * (1 - A_1) * (1 - R_1) * \cos\left(\frac{4\pi L_1}{\lambda}\right)$$

para $n_m > n_0$.

Donde para R_{FP} se considera que el índice de refracción del medio externo (liquido) n_m , es menor o igual que el de la FO n_0 , y para R'_{FP} el caso contrario. Para la demostración, se desprecian las reflexiones de orden superior (< 0.1% de la potencia total) porque se consideran reflectancias bajas.

El contraste de las franjas en el espectro de reflexión no es uniforme y para conseguir la mayor resolución para determinar el RI, se deben buscar las franjas que poseen el máximo contraste. Ran propone primero localizar el valle de la envolvente del espectro de reflexión, identificar las franjas que tiene el máximo y el mínimo valor de reflexión, y con estas calcular la visibilidad. Este valor está dado por:

$$V = 10 * \text{Log}_{10} \left(\frac{A * \left(\frac{n_0 - n_m}{n_0 + n_m}\right)^2 + E * \left(\frac{|n_0 - n_m|}{n_0 + n_m}\right) + F}{A * \left(\frac{n_0 - n_m}{n_0 + n_m}\right)^2 - E * \left(\frac{|n_0 - n_m|}{n_0 + n_m}\right) + F} \right) \quad (4)$$

para todo n_m , siendo

$$A = (1 - \alpha)^2 * (1 - A_1)^2 * (1 - A_2)^2 * (1 - R_1)^2 * (1 - R_2)^2$$

$$E = +2\sqrt{R_1} * (1 - \alpha) * (1 - A_1) * (1 - A_2) * (1 - R_1) * (1 - R_2)$$

$$F = R_1 + (1 - \alpha)^2 * (1 - A_1)^2 * R_2 * (1 - R_1)^2 - 2\sqrt{R_1 R_2} * (1 - \alpha) * (1 - A_1) * (1 - R_1)$$

4. Discusiones y Resultados

La Figura 3 muestra la configuración experimental utilizada para medir el espectro de reflexión, el cual consiste en una fuente de banda ancha que alimenta el sensor, previo paso por un circulador óptico. La señal de entrada es perturbada y reflejada en el sensor, y luego medida en un analizador de espectro óptico (OSA). Esta señal, además, es adquirida y procesada en un ordenador (PC).

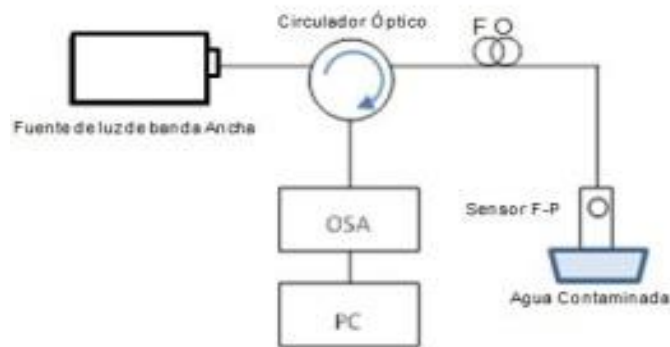


Figura 3 Configuración experimental para medir el espectro de reflexión.

Comportamiento del espectro en función de las longitudes de la cavidad

Para poder comprender las variaciones que sufre el espectro de reflexión frente a las variaciones de las longitudes de las cavidades 1 y 2 (L_1 y L_2) mostradas en la Figura 1, se analizan tanto el FSR y la visibilidad del espectro medido, como la transformada de Fourier del mismo el cual entrega información de cómo es la tasa de variación del espectro y su dependencia con la longitud de las cavidades.

Inicialmente se considera que la longitud de la cavidad 1 de aire se mantiene fija e igual a $L_1 = 20 \mu\text{m}$, y se varía el tamaño de la cavidad 2 de la siguiente manera: $L_2 = 100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$, $1000 \mu\text{m}$ y $2000 \mu\text{m}$. Además, se considera que el valor de las pérdidas en la cavidad 1 es igual a $\alpha = 0,02$ y los factores de pérdidas de transmisión para las superficies de reflexión 1 y 2 son ambos iguales a 0,40. Las figuras 4(a)-(e) muestran los espectros de potencia de la reflectividad, característicos de las cavidades F-P. Se observan franjas de interferencia finas correspondientes a la cavidad más larga (cavidad 2) y franjas anchas o una envolvente, correspondiente a la cavidad 1 más corta. Puede observarse claramente como el FSR de la cavidad 1 se mantiene fijo dado que la longitud se mantuvo, mientras que el FSR de la cavidad 2 fue disminuyendo, inversamente proporcional al crecimiento de L_2 . En las Figuras 4(f)-(j) se realizó la transformada de Fourier de los espectros medidos anteriormente, donde se observa que existe una componente de baja frecuencia centrada en el origen y bandas laterales. A medida que se aumenta el valor de la longitud de la cavidad 2 las componentes de alta frecuencia o bandas laterales comienzan a desplazarse, y su ancho de banda se incrementa. En cambio, las componentes de baja frecuencia no sufren ningún tipo de desplazamiento ni aumento en su ancho de banda.

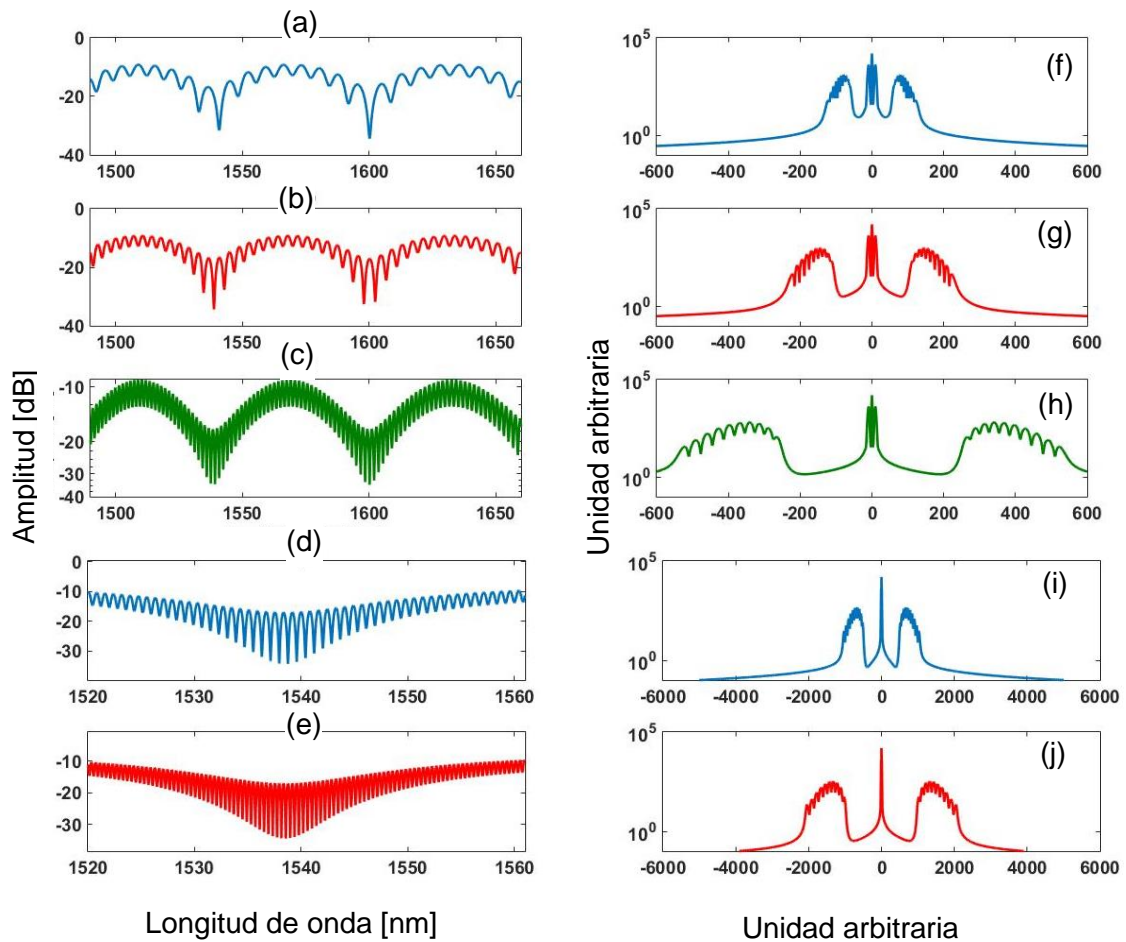


Figura 4 (a)-(e) Espectros de reflexión para longitudes de la cavidad 2 iguales a $L_2 = 100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$, $1000 \mu\text{m}$ y $2000 \mu\text{m}$, respectivamente. (f)-(j) Transformadas de Fourier correspondientes a los espectros. La longitud L_1 es $20 \mu\text{m}$.

A continuación, se mide gráficamente las posiciones de las bandas laterales y el resultado obtenido se presenta en la Figura 5. En la misma se observa el corrimiento de la posición en función de la variación del tamaño de la cavidad 2. Además, junto a la variación de la cavidad 2, se tomaron tres tamaños distintos para la cavidad 1 iguales a $L_1 = 10 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ para verificar si afecta, o no, el desplazamiento de las componentes de alta frecuencia.

Como se puede observar en la figura el corrimiento de las componentes de alta frecuencia tiene un comportamiento exponencial y no se percibe un cambio frente a las variaciones del tamaño de la cavidad 1. Para finalizar, en la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de medir el FSR de la cavidad 2, obtenido como la separación de las franjas finas a partir de las Figuras 4 (a)-(e). Puede observarse que a medida que aumenta

el tamaño de la cavidad 2 el FRS de las franjas finas disminuye, como se predice con la teoría.

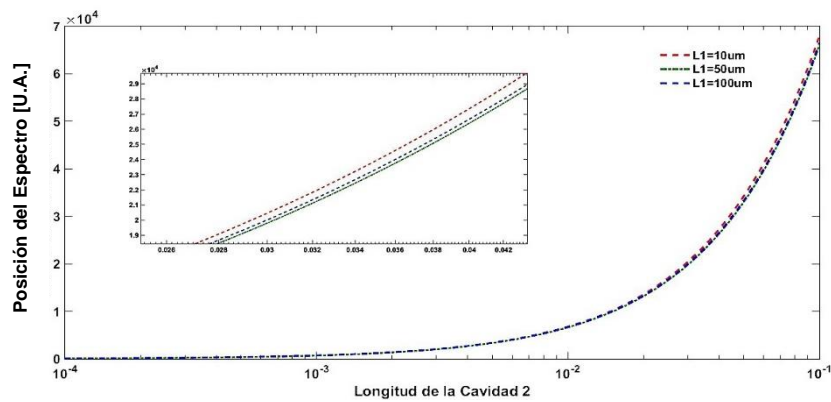


Figura 5. Posiciones de las bandas de alta frecuencia en el dominio transformado para distintos valores de tamaño de cavidad 1 iguales a $L1 = 10 \text{ um}$, 50 um , 100 um

Tabla 1 se observa FSR para distintos tamaños de la cavidad 2

Tamaño cavidad 2	FRS franjas finas
[nm]	[nm]
100	7
200	4
1000	1

A continuación, se analiza la respuesta del sensor cuando se realiza una variación de la longitud de la cavidad 1 y se mantiene fija la longitud de la cavidad 2. Los valores considerados están dados por: $L1 = 10 \text{ um}$, 20 um y 50 um , y $L2 = 1000 \text{ um}$. Nuevamente, en las Figuras 6(a)-(c) se muestran los espectros de potencia de la reflectividad, mientras que en las Figuras 6(d)-(f) se presentan los resultados correspondientes luego de hacer la transformada de Fourier de los mismos. Como era de esperarse, ahora el FSR de la cavidad más corta decrece con el aumento de $L1$, lo que se observa a partir del período de la envolvente de las figuras (a)-(c). Por otro lado, a partir de las figuras (d)-(f) se observa que a medida que se incrementa el tamaño de la cavidad 1 las componentes de bajas frecuencias comienzan a desplazarse sobre el dominio transformado y su ancho se incrementa. En cambio, las componentes de alta frecuencia no sufren desplazamiento alguno, ni aumento en su ancho de banda como se observa en las Figuras 7(a)-(d). No obstante, se aprecia un incremento en las oscilaciones de las bandas laterales.

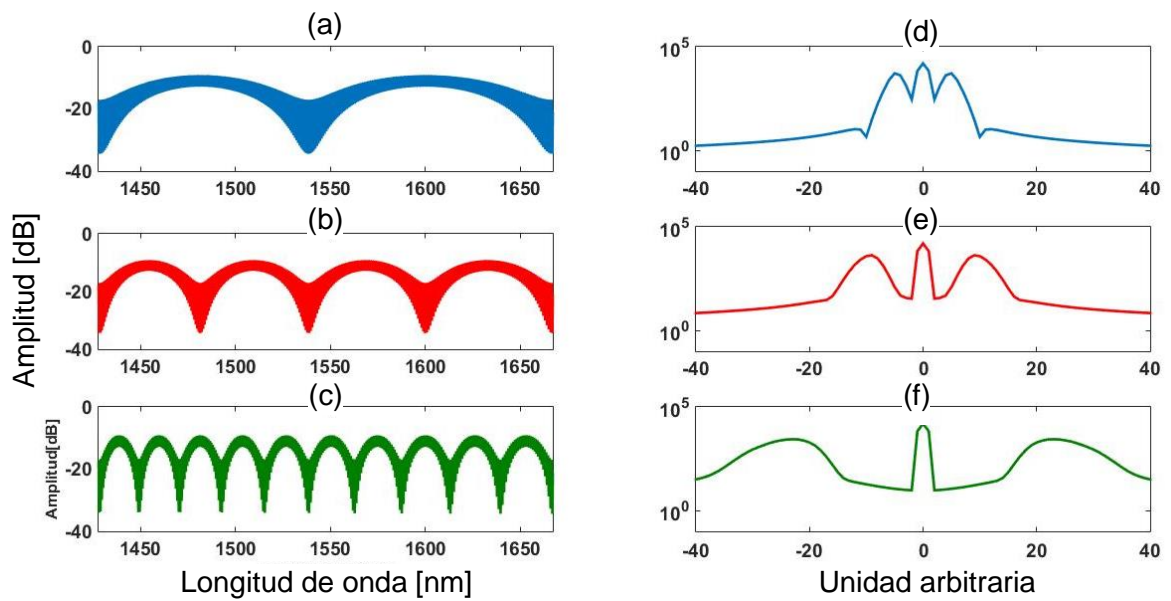


Figura 6 (a)-(c) Espectros de reflexión para longitudes de la cavidad 1 iguales a $L_1 = 10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$ respectivamente. (d)-(f) Transformadas de Fourier correspondientes a los espectros. La longitud L_2 es $1000\mu\text{m}$.

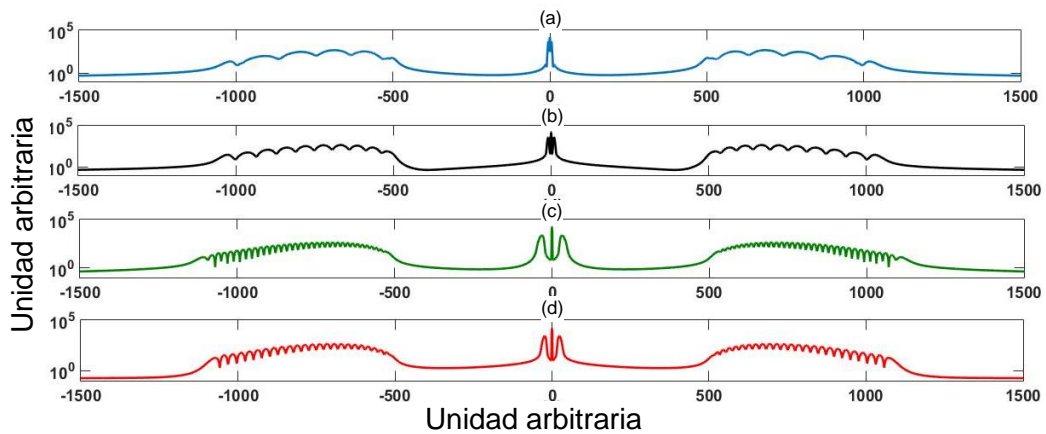


Figura 7 (a)-(d) Transformadas de Fourier correspondientes a los espectros de reflexión, para longitudes de la cavidad 1 iguales a $L_1 = 10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$ y $100\mu\text{m}$, respectivamente. La longitud L_2 es $1000\mu\text{m}$.

A continuación, se midió la posición de las componentes de bajas frecuencias en el dominio transformado y se observó que sigue un comportamiento exponencial en función de la variación del tamaño de la cavidad 1, como se puede observar en la Figura 8.

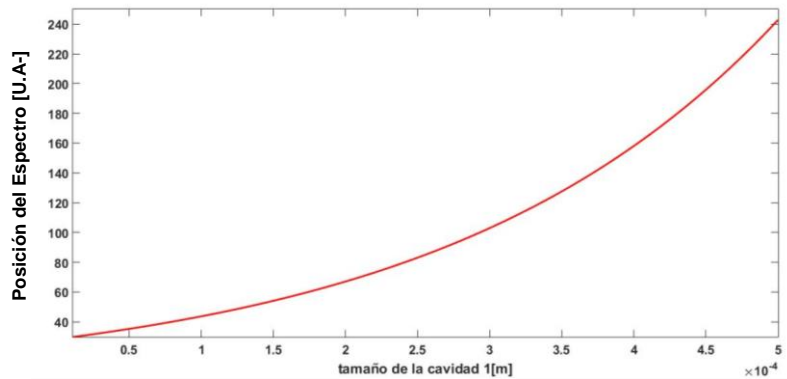


Figura 8 Corrimiento de la posición de la banda de baja frecuencia en función a la variación del tamaño de la cavidad 1

La Tabla 2 presenta los valores del FSR medidos a partir de los espectros de potencia de la reflectividad para diferentes longitudes de la cavidad 1.

Tabla 2 se observa FSR para distintos tamaño de la cavidad 1

Tamaño cavidad 1 [nm]	FRS franjas anchas [nm]
10	95
20	45
50	18
70	15
100	14

A partir del análisis previo se puede concluir que la longitud de la cavidad 2 modifica las franjas de interferencia finas o de mayor frecuencia, lo que se demostró a partir de la posición y el ancho de las bandas laterales en el dominio transformado. Por otro lado, el aumento en el tamaño de la cavidad 1 modifica la separación de las franjas gruesas o el FSR de la envolvente del espectro de la reflectividad. Este hecho en el dominio transformado produce un corrimiento y un aumento en el ancho de banda en las componentes de baja frecuencia. De esta manera, si se considera que la cavidad 1 posee una longitud mucho menor que la cavidad 2, la respuesta de cada una de estas es independiente

Comportamiento del espectro en función de los índices de refracción

Se analiza la variación que sufre el espectro de reflexión cuando se varía el RI n_m del medio externo en contacto con el sensor F-P. Para el análisis que sigue a continuación, las

longitudes de las cavidades 1 y 2 se fijan en 50 μm y 1000 μm , respectivamente. En la Figura 9(a) se observa el espectro de potencia de la reflectividad para $n_m = 1; 1,15$ y $1,33$. Puede observarse que la visibilidad de las franjas aumenta conforme disminuye el valor del RI. Las Figuras 9(b)-(g) muestran la transformada de Fourier de los espectros de potencia dados anteriormente, donde no se observan cambios en las componentes de frecuencia, posición de las bandas laterales, y ancho de banda de las mismas para los tres RI considerados, tanto para las componentes de alta frecuencia, figuras (b)-(d), como de baja frecuencia, figuras (e)-(g).

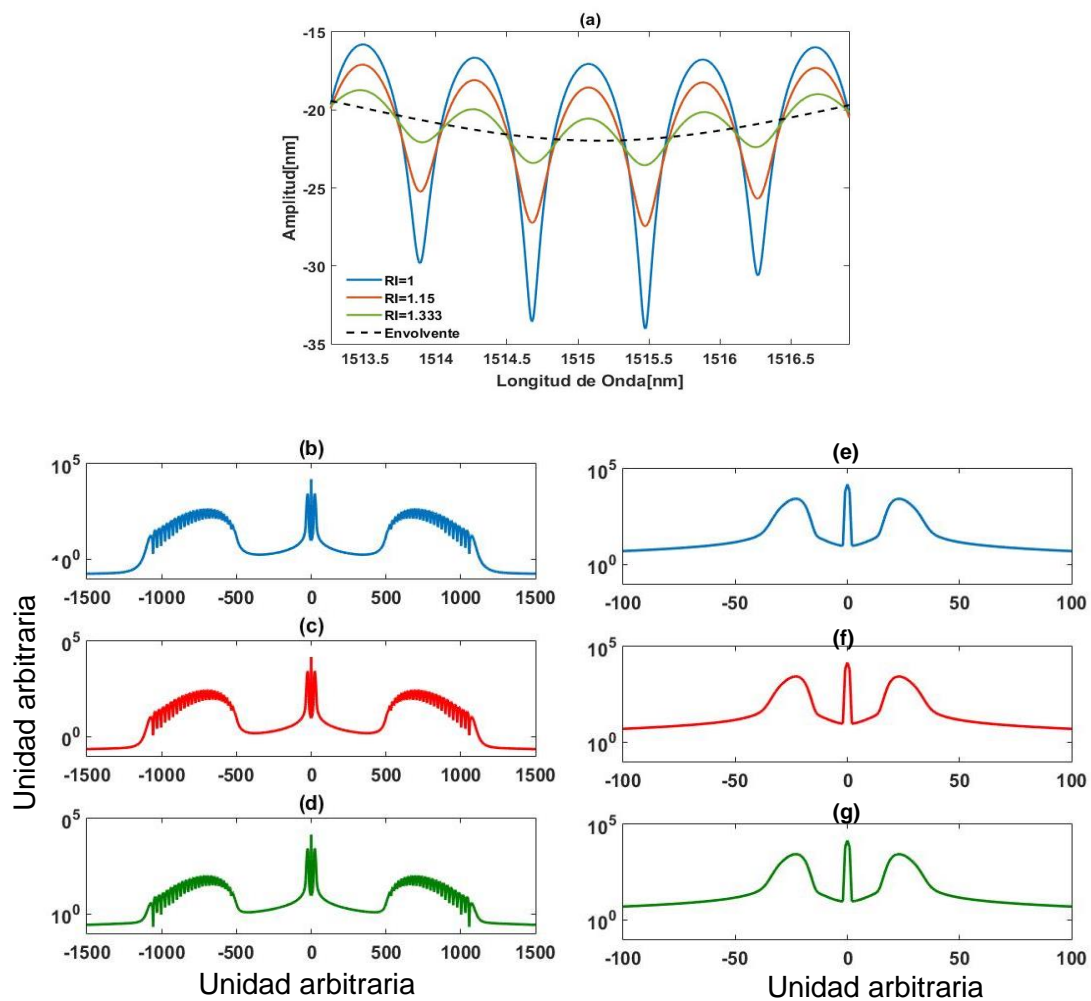


Figura 9(a) Espectro de reflexión para una variación del RI = 1; 1,15; 1,33. (b)-(d) banda lateral de alta frecuencia en el dominio transformado. (e)-(g) banda lateral de baja frecuencia en el dominio transformado.

En la Figura 10 (a) se observan las transformadas de Fourier de los espectros medidos para los tres valores de RI. Puede corroborarse que, si bien no hay variación de las componentes de frecuencia, si existe una variación en la amplitud de las mismas. Para

cuantificar este efecto, en la Figura 10(b) se observa la función de visibilidad que es calculada a partir de la ecuación 4, en función del RI del líquido externo o del medio n_m . Es posible determinar que la máxima visibilidad se logra cuando el RI es igual a 1 (aire) y el mínimo se obtiene cuando el RI coincide con el índice de la FO n_0 .

Finalmente se puede concluir que la variación del RI del medio externo no afecta el FSR de las franjas finas o gruesas del espectro de potencia de la reflectividad, o similarmente, los valores de los espectros de baja y alta frecuencia observados en el dominio transformado. El único efecto que genera tanto sobre el espectro de reflectividad como el de su transformada de Fourier, es modificar la amplitud de los mismos o visibilidad.

A partir del análisis del comportamiento del sensor F-P se puede concluir que los tres factores analizados que modifican el espectro de reflexión L1, L2 y n_m , considerando $L1 \ll L2$, producen efectos independientes que pueden identificarse directamente a partir del espectro de potencia de la reflectividad o de la transformada de Fourier del mismo..

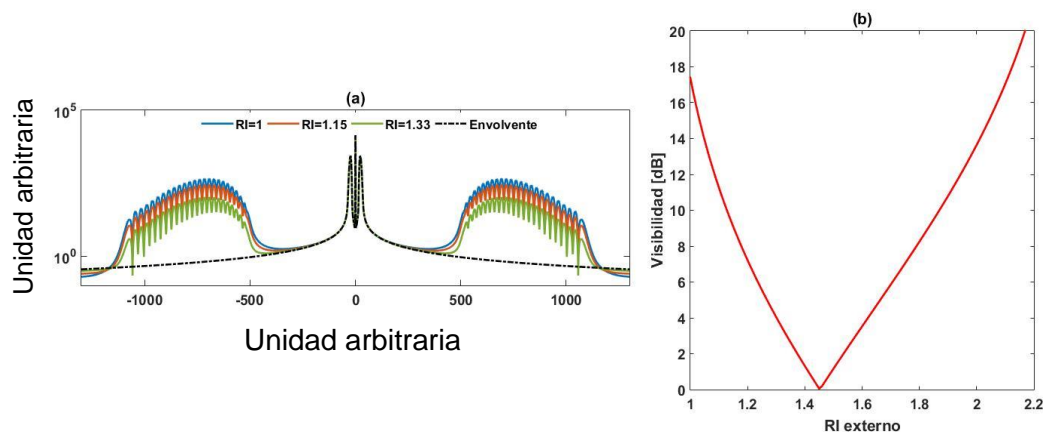


Figura 10 (a) Transformada de Fourier del espectro de reflexión para distintos RI. (b) Función de Visibilidad

5. Desempeño del sensor

En las secciones previas se introdujeron los fundamentos del sensor de FO tipo F-P y se analizó numéricamente la respuesta del mismo en función de tres parámetros: las longitudes de las cavidades 1 y 2 dadas por L1 y L2, y el índice de refracción del medio exterior del sensor n_m . En esta sección se analizará el desempeño del sensor cuando se quiere determinar el grado de contaminación del agua.

El índice de refracción es una propiedad fundamental de una solución, la cual puede variar con la temperatura, composición, concentración [9], y la longitud de onda incidente

[10]. Para observar el desempeño del sensor se utilizan distintos valores de RI que se obtuvieron variando la concentración de NaCl en agua. Los valores de RI utilizados fueron medidos y presentados por Zhu Xingyu et al [11]. En la Figura 11 se observa como varia la amplitud del espectro de la reflectividad normalizado, dependiendo del RI cuyos valores se tomaron entre 1,333 y 1,3391, correspondientes a una concentración de NaCl [mol/L] que varía entre 0 y 0,5 mol/L, respectivamente. Con estos valores, la variación de la amplitud del espectro de la reflectividad fue del orden del 1%. Por otro lado, la Figura 12 muestra la variación de la visibilidad en función de RI o de la concentración de NaCl, donde se puede apreciar un comportamiento lineal en la cual la visibilidad disminuye con la concentración de NaCl o RI.

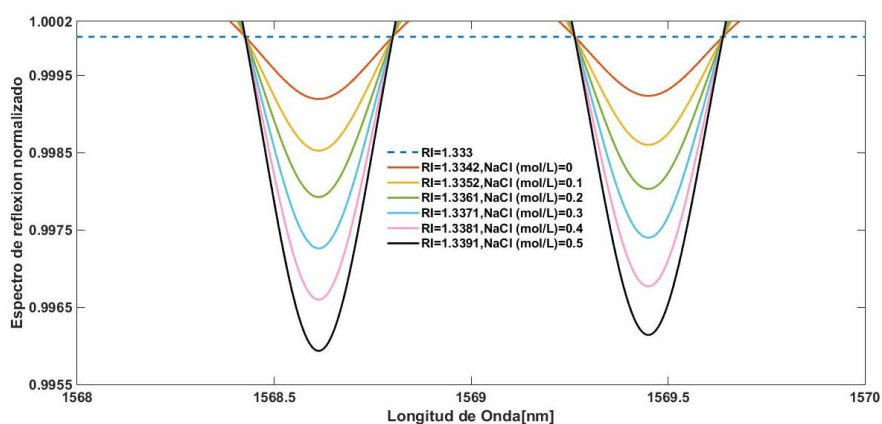


Figura 11. Variaciones de amplitud del espectro de la reflectividad debido a la variación del RI de los líquidos que están en contacto con la punta.

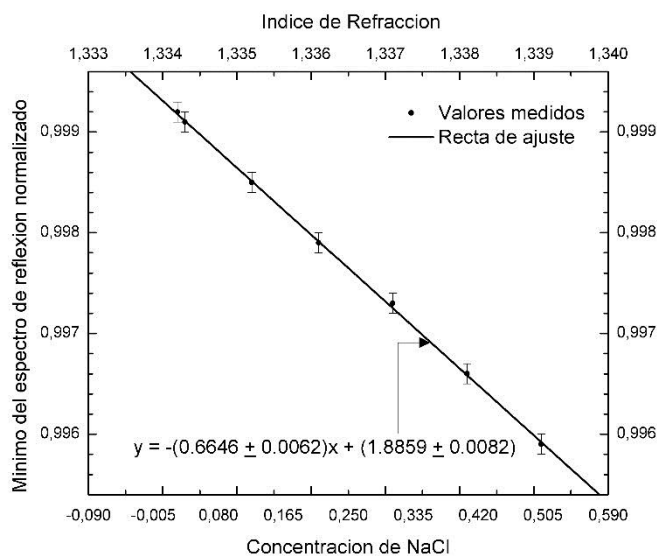


Figura 12 se observa las variaciones de la amplitud del espectro a medida que cambia la concentración de NaCl

Es importante destacar que tanto el índice de refracción como las longitudes L1 y L2 de las cavidades en la FO poseen una dependencia con la temperatura. El primero se ve afectado mediante el coeficiente termo óptico, el cual está dado por $6.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, mientras que las longitudes dependen del coeficiente de expansión térmico dado por $0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [3]. Normalmente, si el sistema se encuentra en equilibrio térmico estos efectos pueden ser despreciados o los mismos pueden ser desafectados utilizando un sensor estabilizado como referencia.

6. Conclusiones

En este trabajo se propuso el diseño de un sensor de FO tipo F-P para mediciones de contaminantes en agua. En la primera parte se desarrollaron los fundamentos matemáticos de la estructura propuesta, la cual consiste de dos cavidades F-P dentro de la FO. La cavidad 1 está formada por un agujero de aire dentro del núcleo de la FO y la segunda, a continuación de la primera, por dos superficies reflectivas en el interior de la FO. Finalmente, la cara externa de la segunda cavidad es la que se encuentra en contacto directo con los líquidos que se desean ensayar.

A continuación, se hizo una caracterización numérica de la respuesta del sensor, donde se consideraron como parámetros variables para ensayar las longitudes L1 y L2 de ambas cavidades y el índice de refracción del medio exterior o líquido. Se demostró que el espectro de la reflectividad presenta franjas de interferencia finas, o con FSR chico, que dependen de la longitud de la cavidad mayor L2, y franjas gruesas o envolvente, con FSR grande, el cual depende de la longitud L1 de la cavidad más chica (agujero). Por otro lado, se pudo observar que la variación del índice de refracción del material exterior o líquido afecta la visibilidad de las franjas del espectro, es decir, la relación de amplitudes o contraste de las franjas.

Finalmente se analizó la respuesta del sensor considerando una aplicación real en la cual se desea monitorear el grado de contaminación del agua con NaCl. Se verificó la dependencia del índice de refracción del líquido en función de la concentración del contaminante y se determinó la variación de la amplitud del espectro o visibilidad en función de dichas concentraciones. Se demostró que la visibilidad decrece linealmente con la concentración del contaminante NaCl, probando que es factible el empleo del sensor en la aplicación.

7. Referencias

- [1]. G. Rajan, "Optical Fiber Sensors Advanced Techniques and Applications", 2015.
- [2] A. J. Rogers, "Polarization-optical time domain reflectometry: A technique for the measurement of field distributions," 1981.
- [3] Z. L. Ran, Y. J. Rao, W. J. Liu, X. Liao, and K. S. Chiang, "Laser-micromachined Fabry-Perot optical fiber tip sensor for High-resolution temperature-independent measurement of refractive index" 2008.
- [4] Pengcheng Chen, Xuwen Shu, Hanyuan Cao and Kate Sugden "Ultra –sensitive refractive index sensor based on an extremely simple femtosecond-laser- induced structure", 2017.
- [5] Chen, J.H.; Huang, X.G.;Huang, Z.J."Simple thin-film fiber optic temperature sensor based on Fabry-Perot interference" 2010.
- [6] Saleh B. E and Teich M. C" Fundamentals of Photonics", Second Edition.
- [7] J.L.Cruz, J.Marzal, M.V.Andres, IEEE "Transaction son Microwave Theory and Techniques" 1995.
- [8] Hanglin Lu, Yaoli Yue, Jing Du, Laipeng Shao, Tianyin Wu, Jiao Pan, and Junhui Hu "Temperature and liquid refractive index sensor using P-D fiber structure-based Sagnac loop", 2018.
- [9] Jimenez Riobo , Philipp M, Ramos M A et al. "Concentration and Temperature Dependence of the Refractive Index of Ethanol-Water Mixtures: Influence of Intermolecular Interactions", 2009.
- [10] Yahya M, Saghir M Z." Prediction and Experimental Measurement of Refractive Index in Ternary Hydrocarbon Mixtures ", 2015.
- [11]. Zhu Xingyu, Mai Tiancheng and Zhao Zilong. "Relationship between Refractive Index and Molar Concentration of Multi-Component Solutions", 2011.