

# **PROPUESTA PARA IMPLEMENTAR UN SENSOR OPTOELECTRÓNICO BASADO EN UN FILTRO ÓPTICO SENSIBLE A LA TEMPERATURA E ÍNDICE DE REFRACCIÓN**

*PROPOSAL TO IMPLEMENT AN OPTOELECTRONIC SENSOR BASED ON AN OPTICAL FILTER SENSITIVE TO TEMPERATURE AND REFRACTIVE INDEX*

***Miguel Ángel López Durán***

Universidad de Guanajuato, México  
*ma.lopezduran@ugto.mx*

***Ana Dinora Guzmán Chávez***

Universidad de Guanajuato, México  
*ad.guzman@ugto.mx*

***Everardo Vargas Rodríguez***

Universidad de Guanajuato, México  
*evr@ugto.mx*

***Martín Cano Contreras***

Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato, México  
*mcano\_cco@utsoe.edu.mx*

***Leonardo Martínez Jiménez***

Universidad de Guanajuato, México  
*leonardomj@ugto.mx*

**Recepción:** 28/octubre/2020

**Aceptación:** 8/diciembre/2020

## **Resumen**

En este trabajo se presenta una propuesta para implementar un sensor optoelectrónico basado en un filtro óptico sensible a la temperatura e índice de refracción. Aquí, la respuesta del filtro espectral (un patrón de franjas) es analíticamente modelada y se muestra que la posición de las franjas y su amplitud pico a pico se ven afectados por la temperatura y el índice de refracción externo. Además, se muestra que evaluando la intensidad acumulada relativa de ciertos segmentos del espectro, es posible establecer relaciones casi lineales con ambas variables físicas. Basándonos en estos principios, se presenta la propuesta de un

sensor optoelectrónico para medir el índice de refracción de 1–2.5 UIR y la temperatura de 25–56 °C usando un láser sintonizable, un detector de infrarrojo, el filtro espectral fabricado y una etapa electrónica de acondicionamiento y procesamiento de señales. Finalmente, se presenta el modelo matemático del sensor optoelectrónico propuesto.

**Palabras Clave:** Índice de refracción, interferómetro, sensor no dispersivo, sensor optoelectrónico, temperatura.

## **Abstract**

In this work a proposal to implement an optoelectronic sensor based on an optical filter which is sensitive to temperature and refractive index is presented. Here, the spectral filter response (a fringe pattern) is analytically modeled and it is shown that the position of the fringes and their peak-to-peak amplitude are affected by temperature and the external refractive index. Besides, it is shown that by evaluating the relative accumulated intensity of certain portions of the spectrum, it is possible to establish quasi linear relationships with both physical variables. Based on these principles, an optoelectronic sensor to measure refractive index from 1–2.5 UIR and temperature from 25–56 °C by using a tunable laser, an infrared photodetector, the fabricated spectral filter and a stage of electronic conditioning and signals processing is proposed. Finally the mathematical model of the proposed optoelectronic sensor is provided.

**Keywords:** *Interferometer, non-dispersive sensor, optoelectronic sensor, refractive index, temperature.*

## **1. Introducción**

En años recientes, los sensores de fibra óptica para medir temperatura e índice de refracción han ganado mucha atención en la comunidad científica pues estos tienen características (inmunes a interferencia electromagnética, tamaño compacto, configuración óptica simple, altas sensibilidades, etc.) que les permiten ser usados en un amplio rango de aplicaciones, por ejemplo, en la industria química y biotecnológica, en aplicaciones médicas y ambientales, etc. [Jorge, 2012], [Mehrvar,

2000], [Roriz, 2020], [Yadav, 2014]. Existe una gran variedad de técnicas que se han desarrollado para medir temperatura [Patrick, 1997], [Zhan, 2004] e índice de refracción con este tipo de sensores. Por ejemplo, para medir índice de refracción se han reportado sensores basados en: rejillas de Bragg grabadas en fibra [Liang, 2005], [Zhang, 2011], rejillas de periodo largo grabadas en fibra óptica [Jorge, 2012], [Lim, 2012], fibras adelgazadas [Cano, 2015], [Xu, 2012], [Yang, 2011] y sistemas interferométricos [Jauregui, 2013], [Vargas, 2015]. Una de las desventajas de la mayoría de estos sensores es que su implementación es costosa, ya que los autores proponen el uso de un analizador de espectros ópticos (OSA) para analizar la señal óptica del sensor que es modificada a causa de la variable física a medir. En algunos de estos trabajos se ha propuesto el uso de fotodetectores de bajo costo en lugar de un OSA [Cano, 2015], [Vargas, 2015].

Por otra parte, una de las ventajas de algunos de estos sistemas de sensado reportados es que el elemento sensor puede ser fabricado con equipo de bajo costo. Un ejemplo de esto, es el reportado en [Vargas, 2015], el cual es un interferómetro Fabry-Perot formado por una burbuja de aire en la punta de una fibra óptica fabricada con una empalmadora de fusión. Aquí, el sílice y el aire, que son los materiales que forman el filtro espectral (interferómetro), tienen propiedades térmicas prácticamente despreciables lo que implica que la burbuja no pueda ser usada para medir temperatura, solo puede ser usada para medir el índice de refracción que la rodea. Sin embargo, se han reportado sensores duales de fácil fabricación basados en interferómetros de materiales sensibles a la temperatura. Por ejemplo, en [Vargas, 2020] se propone un filtro de tres capas en la punta de una fibra de materiales sensibles a la temperatura para la medición simultánea de índice de refracción y temperatura para los rangos dinámicos 1–2 unidades de índice de refracción (UIR) y 0–100 °C, respectivamente. La fabricación del filtro es con un sistema de posición de tres ejes. Otro ejemplo de sensor dual hecho con materiales sensibles a la temperatura es el reportado en [Zhang, 2014], el cual se fabricó depositando una capa de polidimetilsiloxano. Las mediciones de índice de refracción y temperatura fueron obtenidas por medio de la respuesta del pico y la posición de la franja espectral. De esa manera, los autores alcanzaron rangos dinámicos de

operación de 1.3625–1.4150 UIR y 25–60 °C. Similarmente, en [Tan, 2014], los autores presentaron un sensor el cual fue fabricado depositando una capa de un polímero curable con ultravioleta en la punta de una fibra óptica y para obtener las mediciones de índice de refracción se trazó el desplazamiento de un mínimo del espectro. Siguiendo este procedimiento, los autores alcanzaron rangos dinámicos de índice de refracción de 1.38–1.42 UIR y de temperatura de 24–55 °C. Otro ejemplo de sensor dual es el propuesto en [Liu, 2018] el cual fue implementado por medio del empalme de una fibra de núcleo hueco rellena con isopropanol entre dos fibras mono-modo. En ese trabajo, los autores monitorearon un valle del espectro para obtener las mediciones de temperatura e índice de refracción para los rangos dinámicos de 25–80 °C y 1.333–1.376 UIR, respectivamente. Aquí, para aplicaciones de medición simultánea de ambas variables físicas es importante modelar el comportamiento del patrón espectral para validar los rangos dinámicos de temperatura e índice de refracción que pueden ser medidos usando relaciones de preferencia lineales.

En este trabajo se presenta la propuesta de un sensor optoelectrónico para medir índice de refracción y temperatura basado en el principio de un sensor de infrarrojo no dispersivo. En la segunda sección (Métodos) se muestra el modelo teórico del elemento sensor fabricado (filtro espectral), el cual está basado en un apilamiento de tres capas en la punta de una fibra óptica. Se muestra que el espectro simulado del filtro ajusta muy bien al espectro teórico. Además, se muestra que gracias a las propiedades térmicas de los materiales del filtro, su espectro de interferencia puede ser desplazado y puede cambiar la amplitud pico a pico de sus franjas si se cambia el coeficiente de reflexión de la última interface del filtro por medio del índice de refracción del medio externo. En la tercera sección (Resultados) se analizan los efectos en la señal del espectro inducidos por cambios de temperatura e índice de refracción. Se observó que midiendo la intensidad acumulada relativa para una cierta porción del espectro se obtienen relaciones lineales para los valores de índice de refracción externo de 1 a 2.5 UIR y para diferentes rangos de temperatura. También se analiza la respuesta del sensor optoelectrónico propuesto para medir las variables físicas por medio de un láser sintonizable y una etapa electrónica

basada en un detector de infrarrojo. En la siguiente sección (Discusión), se discute acerca de las características que debe tener el láser sintonizable y finalmente se muestra que por medio de un plano se puede relacionar la potencia acumulada relativa con el índice de refracción externo en el rango de 1 a 2.5 UIR y la temperatura en el rango de 25 a 56 °C.

## 2. Métodos

Uno de los componentes principales de un arreglo de sensado es el elemento sensor. Aquí, el elemento sensor que se fabricó, es un interferómetro óptico el cual se comporta como un filtro espectral que consistió en la deposición de tres capas en la punta de una fibra óptica mono-modo (SMF-28e+) (figura 1a). Para el diseño óptico se tomó en cuenta que dos de las capas eran sensibles a la temperatura (C2 y C3). Debido a las múltiples reflexiones en las interfaces de las capas (figura 1), cada capa contribuye a la formación de un espectro de interferencia, lo cual provoca que la distribución del patrón de interferencia reflejado resultante esté formado por la superposición de los diferentes espectros de cada una de las capas.

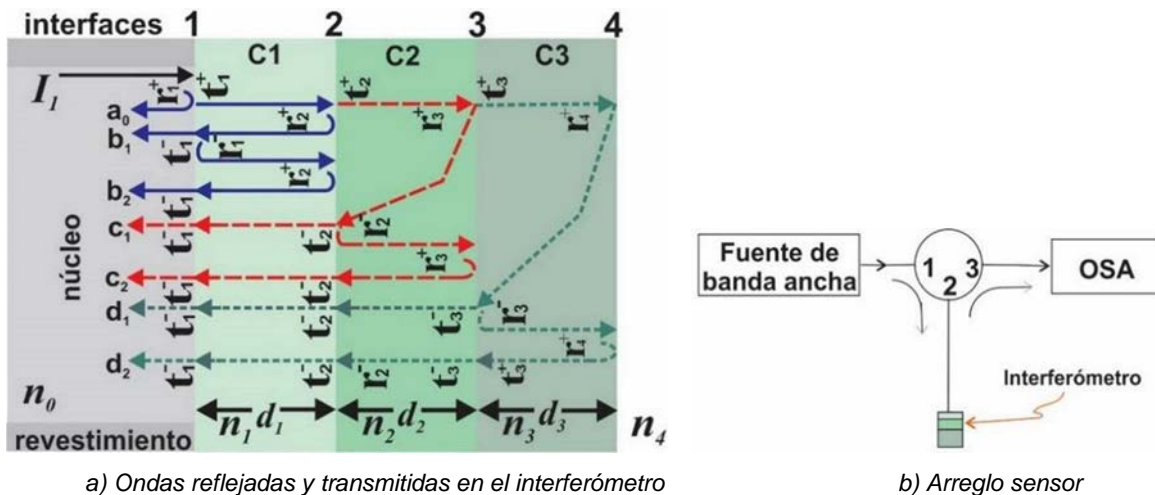


Figura 1 Ondas reflejadas y transmitidas en el interferómetro y arreglo sensor.

El patrón de interferencia reflejado resultante puede ser matemáticamente modelado usando el método de superposición de las ondas  $a_0$ ,  $b_k$ ,  $c_k$  y  $d_k$ , las cuales son todas las  $k$ -ésimas reflexiones ocurriendo en las interfaces 1, 2, 3 y 4 de

las capas del interferómetro, respectivamente (figura 1a). Por lo tanto, la amplitud del campo eléctrico de la luz reflejada puede ser expresada por la ecuación 1 y la distribución de la intensidad relativa reflejada resultante del espectro del filtro puede ser calculada como  $R = I_r/I_i = |E_r/E_i|^2$ .

$$E_r = E_i \left[ r_1^+ + t_1^+ t_1^- \sum_{k=1}^2 [L_1 r_2^+]^k (r_1^-)^{k-1} e^{ik\delta_1} + t_1^+ t_1^- t_2^+ t_2^- L_1 \sum_{k=1}^2 [L_2 r_3^+]^k (r_2^-)^{k-1} e^{i(\delta_1+k\delta_2)} + t_1^+ t_1^- t_2^+ t_2^- t_3^+ t_3^- L_1 L_2 \sum_{k=1}^2 [L_3 r_4^+]^k (r_3^-)^{k-1} e^{i(\delta_1+\delta_2+k\delta_3)} \right] \quad (1)$$

Donde:

- $I_i$ : Onda incidente en la interfaz 1; mientras que los parámetros de la  $m$ -ésima capa son:
- $n_m$ : Índice de refracción
- $d_m$ : Grosor de la capa
- $\alpha_m$ : Coeficiente termo-óptico
- $\gamma_m$ : Coeficiente de expansión térmica
- $\delta_m = 4\pi(n_m + \Delta n_m)(d_m + \Delta d_m)$ : Diferencia de fase
- $L_m$ : Pérdidas ópticas
- $\Delta n_m = \alpha_m(T - T_0)$ : Cambio en el índice de refracción
- $\Delta d_m = d_m \gamma_m(T - T_0)$ : Variación en el grosor de la capa
- $t_m^+ = 2n_{m-1}/(n_m + n_{m-1})$ ,  $t_m^- = 2n_m/(n_m + n_{m-1})$ : Coeficientes de transmisión
- $r_m^+ = -r_m^- = (n_m - n_{m-1})/(n_m + n_{m-1})$ : Coeficientes de reflexión

El filtro se fabricó usando una fibra óptica mono-modo (SMF-28e+) con una película antirreflejante ( $m = 1$ ) en la punta de la misma. La segunda capa ( $m = 2$ ) fue de un polímero de cianoacrilato y finalmente la tercera capa ( $m = 3$ ) estuvo formada por una oblea de silicio (figura 1a).

El proceso de fabricación se encuentra descrito a detalle en [Vargas, 2018]. Las propiedades de los materiales de cada una de las capas y grosores experimentales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Propiedades de los materiales de las capas del interferómetro fabricado.

Parámetro	m=1	m=2	m=3
$n_m$ $n_0 = 1.44$	1.2	1.45	$3.41696 + 0.138497(\lambda^2 - 0.028)^{-1} + 0.13924(\lambda^2 - 0.028)^{-2} - 2.09 \times 10^{-5} \lambda^2 + 1.48 \times 10^{-7} \lambda^4 + 1.8 \times 10^{-4}(T - T_o)$
$d_m(\mu m)$	0.31	32.10	497.53
$\alpha_m [\mu m / (m \cdot K)]$	0	198	2.6
$\gamma_m (K^{-1})$	0	$-0.4 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-4}$
$A_m$	0.047	0.0	0.8

Cabe mencionar que se eligió la fibra mono-modo con una película antirreflejante en su punta (C1) para cerciorarnos de que la mayor cantidad de luz fuera acoplada a las siguientes dos capas cuando la luz viajara de la fibra hacia las capas. Las capas 2 (C2) y 3 (C3) se eligieron porque son transparentes al infrarrojo y por tanto permiten que la luz viaje hasta la última capa y ocurran múltiples reflexiones entre las interfaces de las capas. Además, como el patrón de intensidad resultante reflejado de un interferómetro (filtro espectral) es un espectro con franjas, se eligió el material de la C2 con altas propiedades térmicas para que cuando se modifique la temperatura del interferómetro, el espectro de interferencia se desplace. Finalmente, el material de la C3 se eligió también con propiedades térmicas para que contribuyera al desplazamiento del espectro pero principalmente se eligió con un alto índice de refracción, con la finalidad de que cuando se cambiara el índice de refracción externo, el coeficiente de reflexión fuera grande y provocara cambios visibles en la intensidad de los picos máximos de las franjas de interferencia.

El filtro fabricado fue caracterizado con el arreglo que se muestra en la figura 1b. Aquí la luz de una fuente de banda ancha es enviada al puerto 1 de un circulador óptico y viaja al puerto 2 en donde se encuentra el filtro espectral (elemento sensor). La luz reflejada por el filtro espectral pasa por el puerto 3 del circulador donde es grabada con un OSA. Las pérdidas ópticas experimentales fueron estimadas

minimizando el error entre el espectro simulado y el espectro experimental. Por ejemplo, las distribuciones de intensidad relativa reflejada experimental y simulada se muestran en la figura 2. Aquí, el índice de refracción de salida fue  $n_4 = 1.0$  y la temperatura  $T = 26.8$  °C. En la figura se puede apreciar que el espectro simulado ajusta muy bien con el experimental. Además, se puede observar que el patrón de interferencia está por formado principalmente por la superposición de dos espectros uno con una separación entre franjas grande y el otro con separación pequeña, atribuida a los grosores de las capas C2 y C3, respectivamente.

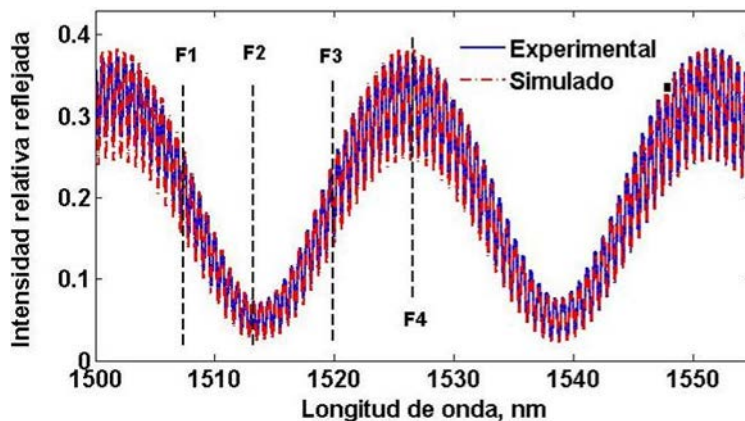


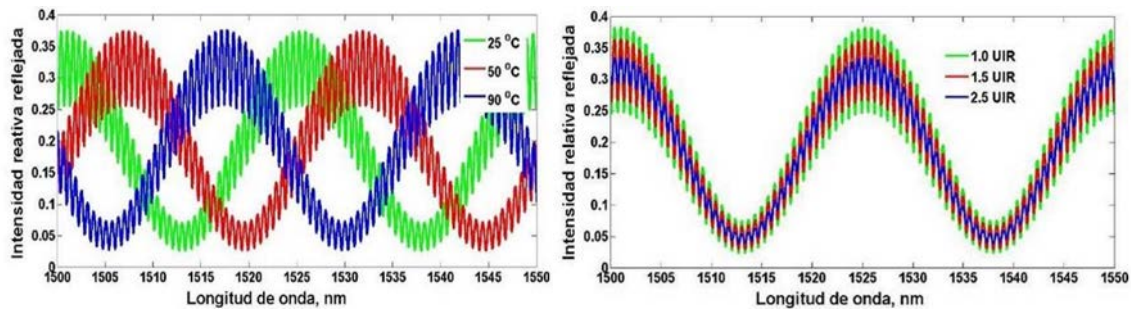
Figura 2 Patrón de interferencia experimental y simulado a  $T = 26.8$  C.

### 3. Resultados

Para caracterizar los efectos de la temperatura sobre el patrón de interferencia de reflexión, la temperatura se varió en un amplio rango de valores  $25 \leq T \leq 125$  C. mientras el índice de refracción externo que rodea el elemento sensor se mantuvo fijo. Para este caso, se observó que el espectro de interferencia se desplaza hacia la derecha conforme la temperatura aumenta (figura 3a). Este desplazamiento se debe a los coeficientes de expansión térmica y termo óptico de los materiales de las capas. También se observó que el interferómetro ocupa un cambio de temperatura de  $\sim 100$  C. para llegar al mismo estado. En la figura se puede apreciar que el desplazamiento está gobernado por la capa de polímero de cianoacrilato (C2) debido a que la tasa de desplazamiento de su espectro es mucho mayor que la del espectro atribuido a la capa de silicio (C3). Este comportamiento



es debido a los coeficientes de expansión térmica y termo óptico como también a los grosores de las capas. Por otra parte, para caracterizar los efectos del índice de refracción sobre el patrón de interferencia de reflexión, se varió el índice de refracción que rodea al interferómetro en un amplio rango de valores  $1.0 \leq n_4 \leq 2.5$  UIR mientras se mantuvo fija la temperatura. Para este caso se observó que la amplitud pico a pico de las franjas disminuye conforme el índice de refracción aumenta (figura 3b). Este comportamiento se debe a que el coeficiente de reflexión de la última interface depende del índice de refracción externo  $n_4$ .



a) Espectros con diferente  $T$  y  $n_4 = 1.2$

b) Espectros con diferente  $n_4$  y  $T = 25$  °C

Figura 3 Espectros con diferente  $T$  y  $n_4 = 1.2$ , y diferente  $n_4$  y  $T = 25$  °C.

Ahora, para obtener el valor de cualquier variable física medida por un sensor, es necesario encontrar una relación entre la señal de salida del sensor y la variable física a medir. Para nuestro elemento sensor analizamos la señal óptica de su respuesta a la temperatura y al índice de refracción externo en diferentes rangos de longitudes de onda, F1:  $1500 \leq \lambda \leq 1508$  nm, F2:  $1500 \leq \lambda \leq 1513$  nm, F3:  $1500 \leq \lambda \leq 1520$  nm y F4:  $1500 \leq \lambda \leq 1527$  nm. En la figura 2 se observan estos rangos y tomando en cuenta que el patrón de interferencia del filtro espectral es una señal periódica, el rango de longitudes de onda máximo (F4) cubre aproximadamente un ciclo completo de una franja. Además, para cada uno de estos rangos se midió la intensidad acumulada relativa  $A$  la cual está descrita tal y como se muestra en la ecuación 2.

$$A = \frac{\sum_{\lambda_i}^{\lambda_f} R(\lambda)}{R_{max}(\lambda)} \quad (2)$$

Donde:

$\lambda_i$  y  $\lambda_f$ : Longitudes de onda inicial y final del rango de medición

$R_{max}(\lambda)$ : Es la máxima intensidad relativa reflejada

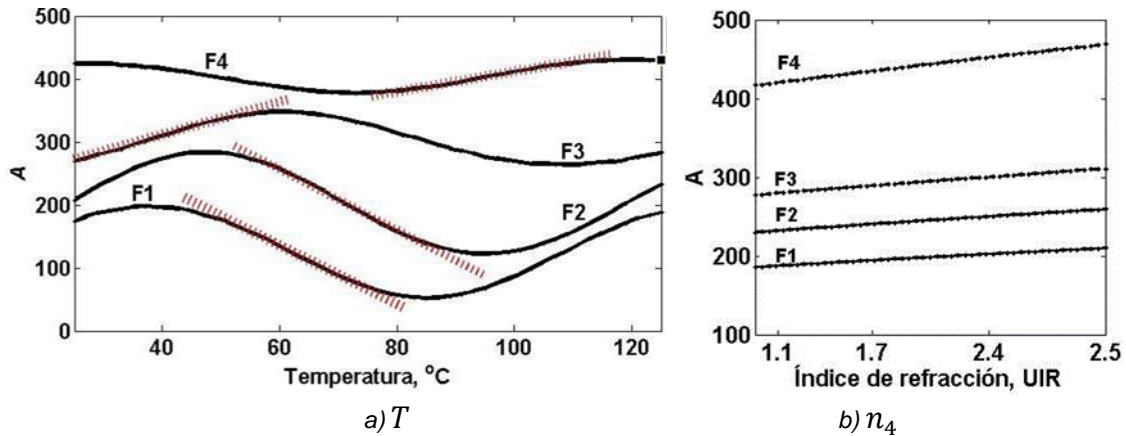


Figura 4 A en función de  $T$  y  $n_4$  para diferentes rangos de longitudes de onda.

La medición de  $A$  se hizo tomando en cuenta dos casos; para el primer caso se varió la temperatura  $25 \leq T \leq 125$  C y se fijó el índice de refracción externo  $n_4 = 1.2$ . Se observó que para cada uno de los rangos de longitudes de onda, la relación entre  $A$  y  $T$  está descrita por distintas curvas y solo en una porción del espectro se comporta de manera cuasi lineal (figura 4a). Por ejemplo, en el primer rango de longitudes de onda (F1) se exhibe un comportamiento cuasi lineal para el rango de temperaturas  $51 \leq T \leq 75$  C, en el segundo rango F2 se describe un comportamiento cuasi lineal en  $57 \leq T \leq 87$  C. Así mismo para el tercer rango de longitudes de onda F3 se presenta un comportamiento casi lineal en el rango de temperaturas  $25 \leq T \leq 56$  °C y finalmente para F4 en  $78 \leq T \leq 113$  °C.

Como el patrón de interferencia es una señal periódica, si se toma la misma porción espectral para calcular la intensidad acumulada relativa para diferentes rangos de longitudes de onda se debe tener prácticamente la misma respuesta. En la figura 5 se muestra que tomando la misma porción espectral de F3, para otros rangos de longitudes de onda diferentes a F3, se tiene prácticamente la misma relación con respecto a la temperatura. Para el segundo caso, se varió el índice de refracción  $1.0 \leq n_4 \leq 2.5$  UIR y se fijó la temperatura  $T = 25$  °C. Se observó que, para cada

uno de los rangos de longitud de onda, el comportamiento es altamente lineal en todo el rango de índices de refracción. Esto es debido a que cuando se varía el índice de refracción externo la posición de las franjas se mantiene fija, cambiando únicamente las amplitudes de las intensidades reflejadas en la misma proporción. Ahora, como ya se demostró que el elemento sensor es sensible tanto a la temperatura como al índice de refracción externo, se simuló el comportamiento de  $A$  en función de la temperatura para ocho diferentes índices de refracción externos y  $A$  en función del índice de refracción externo considerando ocho diferentes temperaturas. Para ambos casos se tomó el rango de longitudes de onda F3 y el rango de temperaturas  $25 \leq T \leq 56$  C para el cual  $A$  se comportó de manera cuasi lineal. Se observó que para ambos casos las relaciones tienen el mismo comportamiento cuando se consideran diferentes índices de refracción externo o temperaturas, según sea el caso (figura 6).

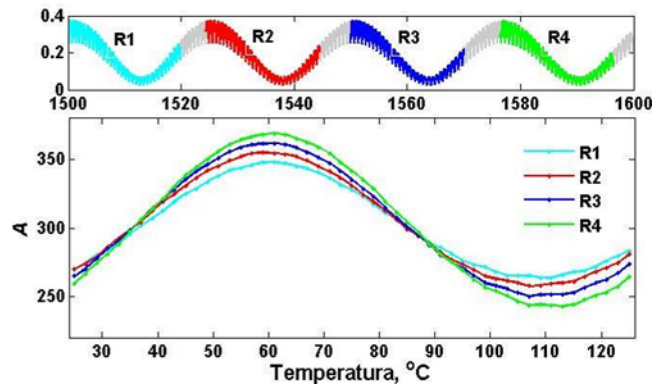


Figura 5 A en función de  $T$  del mismo espectro en diferentes longitudes de onda.

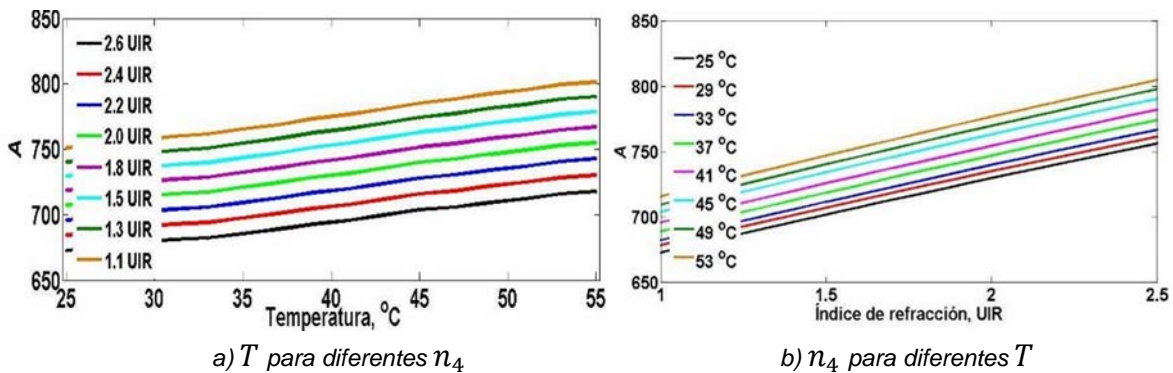


Figura 6 A en función de la  $T$  para diferentes  $n_4$  y de  $n_4$  para diferentes  $T$ .

Como los comportamientos de la intensidad acumulada relativa  $A$  con respecto a la temperatura  $T$  y con respecto al índice de refracción externo  $n_4$  son casi lineales, estas tres variables pueden ser relacionadas por medio de un plano. En la figura 7 se muestra esta relación para el rango de temperaturas de 25 a 56 °C y el rango de índices de refracción de 1 a 2.5 UIR.

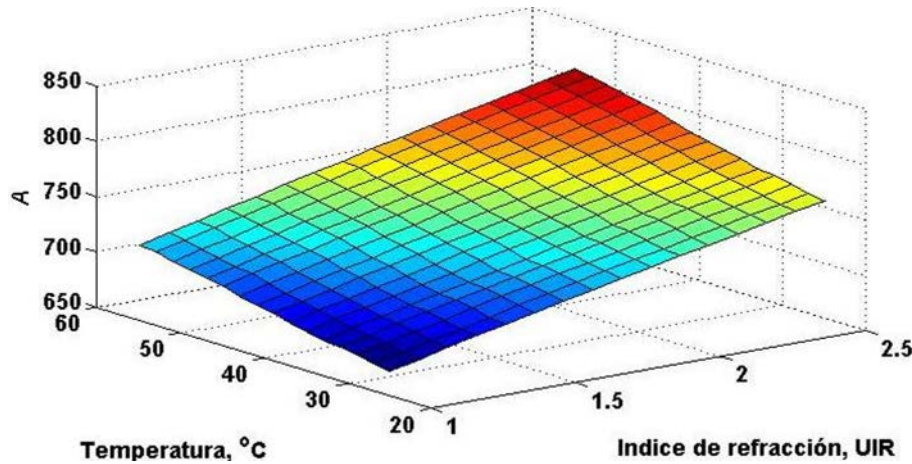


Figura 7 Plano que muestra la relación de  $A$  en función de  $T$  y  $n_4$ .

De la manera propuesta queda demostrado que al seleccionar regiones espectrales delimitadas podemos construir un sistema lineal para relacionar la intensidad acumulada relativa, la temperatura y el índice de refracción del medio que rodea el filtro. Estas relaciones se han validado experimentalmente, debido a que hemos medido los espectros y los hemos comparado con los simulados. Esto confirma en sí mismo el principio de operación de un sensor dual de índice de refracción y de temperatura. A pesar de que este sensor en principio es altamente sensible tiene la desventaja que se requiere medir el espectro de reflexión el cual se obtiene con un OSA, el cual es un instrumento muy costoso, poco práctico y viable de implementarse como instrumento de medición para incorporarse en un sistema de sensado. Por lo que existe un área de oportunidad para implementar un sensor que tenga un funcionamiento práctico. Existen diferentes formas de implementar el sensor sin que se use un OSA. Nosotros aquí analizamos teóricamente una propuesta de diseño en la cual remplazamos la fuente de luz blanca de ancho

espectro por un láser sintonizable y el OSA por una etapa electrónica de adquisición de señales ópticas basado en un detector de infrarrojo (figura 8). En este arreglo, la potencia medida por un fotodetector  $P_{\lambda_c}$  relacionada con la señal de laser reflejada por el filtro puede ser descrita por la ecuación 3.

$$P_{\lambda_c} = \int_{\lambda_c - \Delta\lambda}^{\lambda_c + \Delta\lambda} F(\lambda)R(\lambda)d\lambda \approx R(\lambda_c) \quad (3)$$

Donde:

- $F(\lambda)$ : Perfil de emisión del laser
- $\lambda_c$ : Longitud de onda central de emisión del laser
- $\Delta\lambda$ : Ancho espectral de la línea de emisión del laser

De acuerdo con la ecuación 2, para obtener la intensidad acumulada relativa es necesario sumar cada una de las intensidades relativas en un cierto rango espectral. Entonces, si se sintoniza la longitud de onda de emisión del laser dentro del rango de longitudes de onda que conforman la porción del espectro utilizado ( $\lambda_c \pm 10 \text{ nm}$  para el rango F3) para medir la intensidad acumulada relativa y la señal reflejada por el elemento sensor de cada una de las longitudes de onda se miden con un fotodetector, se puede obtener la potencia acumulada relativa  $P_T$  la cual se expresa como la ecuación 4.

$$P_T = \frac{\sum_{\lambda_i=\lambda_i}^{\lambda_f} \int_{1-\Delta\lambda}^{1+\Delta\lambda} F(\lambda)R(\lambda)d\lambda}{\int_{1-\Delta\lambda}^{1+\Delta\lambda} F(\lambda)R_{\max}(\lambda)d\lambda} \approx A \quad (4)$$

Donde:

- $\lambda_i$  y  $\lambda_f$ : Longitud de onda inicial y final del rango espectral, respectivamente.

Tomando en cuenta que la relación  $P_T (T, n_4) \approx A(T, n_4)$  se puede obtener con un láser sintonizable y una etapa electrónica para la adquisición de señales ópticas basada en un fotodetector, en la figura 8 se presenta la propuesta del arreglo experimental del sensor optoelectrónico para la medición de temperatura e índice de refracción externo que rodea al filtro espectral (elemento sensor).

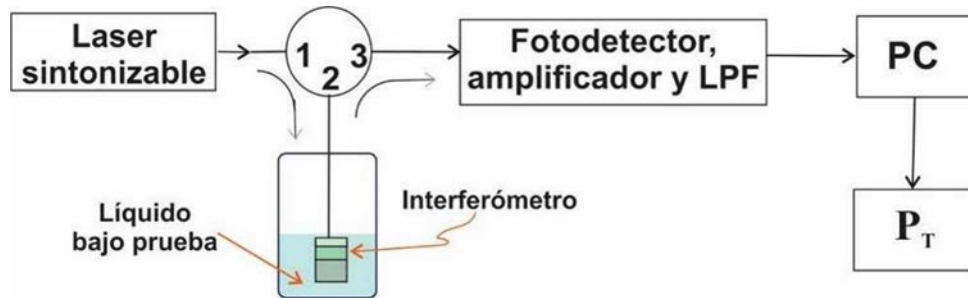


Figura 8 Propuesta del arreglo experimental del sensor optoelectrónico basado en un filtro espectral para medir temperatura e índice de refracción.

#### 4. Discusión

Consideramos que el filtro espectral que fabricamos y del cual presentamos su modelo matemático y su caracterización espectral tiene potencial para ser empleado como elemento sensor para medir temperatura e índice de refracción. Parte fundamental de implementar un sensor optoelectrónico consiste en conocer los efectos que las variables físicas inducen en los espectros de reflexión o transmisión de los componentes ópticos. Por otra parte, se pueden implementar diferentes relaciones para extraer información de los espectros ópticos para establecer relaciones entre algunas características de los espectros y las variables físicas. En nuestro caso demostramos teóricamente que seleccionando un rango espectral específico es posible establecer una relación lineal entre la intensidad acumulada relativa, la temperatura y el índice de refracción. Con esto validamos teórica y prácticamente por lo que se tiene la certeza de que está correctamente modelada la respuesta espectral del filtro y los efectos de la temperatura y el índice de refracción. Una vez que se tiene resuelta la parte central del elemento sensor y la parte del espectro que debemos de emplear para establecer la relación de intensidad acumulada relativa, temperatura e índice de refracción se puede proseguir a la siguiente etapa, que consiste en la implementación de un sensor práctico, en el cual se elimine el uso del OSA. Al eliminar el OSA ya no se adquirirían espectros en sí, por lo que debemos de integrar dispositivos que matemáticamente realicen lo que establecen las ecuaciones 3 y 4.

En este trabajo hacemos la propuesta de un diseño de sensado, que consideramos con base en el modelado matemático correspondiente que es altamente viable. En

nuestra propuesta, con el láser sintonizable iríamos generando diferentes longitudes de onda y por su parte el detector fotónico haría la tarea de integrar la señal espectral que pase por el sistema e incida sobre su superficie. Con estos dos dispositivos evaluaríamos físicamente la ecuación 3, que es la parte central del diseño. Adicionalmente, la etapa electrónica de procesamiento de señales nos serviría para ir almacenando los valores que se vayan generando para cada longitud de onda emitida por el láser sintonizable y al finalizar el barrido cubriendo la región espectral F3, en la siguiente etapa se ejecutarían las operaciones numéricas necesarias para evaluar la ecuación 4. Finalmente, la etapa de procesamiento puede determinar el valor de una variable física, por ejemplo el índice de refracción, después de que se evalúa el valor de A [ecuación 4] y se tiene el valor de la otra variable física (temperatura), esto de una manera relativamente simple en base a que se ha determinado que existe una relación lineal (figura 9) entre estas variables, definida por la ecuación 5, con un coeficiente de determinación de 0.9979.

$$n_4(A, T) = -0.0292 T + 0.0174 (A) - 9.9069 \quad (5)$$

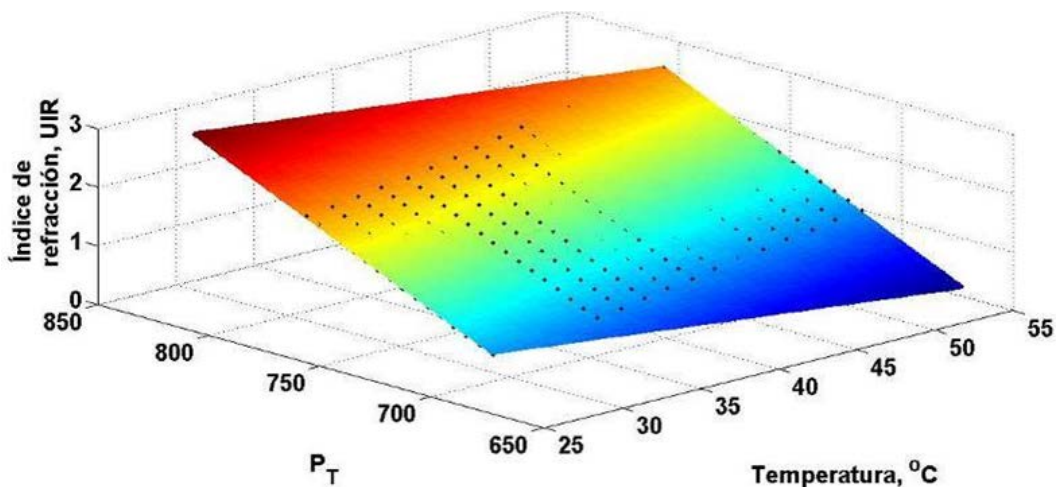


Figura 9 Índice de refracción en función de temperatura e intensidad acumulada relativa.

Esta última parte se implementará en un trabajo futuro pero consideramos que es factible debido a que existen en el mercado varios láseres de una sola longitud de onda de emisión que pueden ser sintonizados ~20 nm (ancho del rango espectral F3) con longitudes de onda de emisión de alrededor de ~ 1.5 μm.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se demuestra que un filtro espectral de tres capas puede utilizarse como cabeza sensora para medir temperatura e índice de refracción. Además, se muestra que si se escoge una adecuada porción del espectro de interferencia existe una relación casi lineal entre la intensidad acumulada relativa y ambas variables físicas. La relación lineal para el rango de índices de refracción de 1–2.5 UIR y para el rango de temperaturas de 25–56 °C fue tomando en cuenta la porción del espectro de 1500–1520 nm. Además, la intensidad acumulada relativa puede ser relacionada con la potencia acumulada relativa utilizando el principio básico de un sensor de infrarrojo no dispersivo mediante un láser sintonizable y una etapa electrónica. Por lo que se plantea que es posible implementar un sensor optoelectrónico para medir temperatura e índice de refracción. Finalmente, se presenta la expresión matemática del sensor para medir índice de refracción en función de la temperatura y la potencia acumulada relativa.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Cano Contreras, M., Guzman Chavez, A. D., Vargas Rodríguez, E., Gallegos Arellano, E., Jauregui Vazquez, D., Mata Chavez, R. I., Torres Cisneros, M., Rojas Laguna, R. Refractive index sensing setup based on a taper intrinsic micro Fabry-Perot interferometer. *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, vol. 10, 15039-5, 2015.
- [2] Jauregui Vazquez, D., Estudillo Ayala, J. M., Rojas Laguna, R., Vargas Rodriguez, E., Sierra Hernandez, J. M., Hernandez Garcia, J. C., & Mata Chavez, R. I. An all fiber intrinsic Fabry-Perot interferometer based on an air-microcavity. *Sensors*, No. 5, 6355–6364, 2013.
- [3] Jorge, P. A. S., Silva, S. O., Gouveia, C., Tafulo, P., Coelho, L., Caldas, P., Viegas, D., Rego, G., Baptista, J. M., Santos, J.L., et al. Fiber optic-based refractive index sensing at inesc porto. *Sensors*, No. 6, 837189-, 2012.
- [4] Liang, W., Huang, Y., Xu, Y., Lee, R. K., & Yariv, A. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors. *Applied Physics Letters*, No. 15, 151122, 2005.



- [5] Lim, A., Ji, W. B., & Tjin, S. C. Improved refractive index sensitivity utilizing long-period gratings with periodic corrugations on cladding. *Journal of Sensor*. 48347-5, 2012.
- [6] Liu, S., Zhang, H., Li, L., Xiong, L., & Shum, P.P. Liquid core fiber interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature. *IEEE Photonics Technology Letters*. No. 2, 189–192, 2018.
- [7] Mehrvar, M., Bis, C., Scharer, J. M., Young, M. M., & Luong, J. H. Fiber-optic biosensors-trends and advances. *Analytical Sciences*, Co.7, 677-692, 2000.
- [8] Patrick, H. J., Williams, G. M., Kersey, A. D., Predazzani, J. R., & Vengsarkar, A. M. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensors for strain/temperature discrimination. *Sensors*, no. 9, 1223-1225, 1997.
- [9] Roriz, P., Silva, S., Frazao, O., & Novais, S. Optical Fiber Temperature Sensors and Their Biomedical Applications. *Sensors*, no. 7, 2020.
- [10] Tan, X.L., Geng, Y.F., Li, X.J., Deng, Y.L., Yin, Z., & Gao, R. UV-Curable Polymer Microhemisphere-Based Fiber-Optic Fabry–Perot Interferometer for Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature. *IEEE Photonics Journal*, no. 4, 1–8, 2014.
- [11] Vargas Rodríguez, E., Guzman Chávez, A. D., Baeza Serrato, R., & Garcia Ramirez, A. Optical Fiber FP Sensor for Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature based on the Empirical Mode Decomposition Algorithm. *Sensors*, no. 664, 1-14, 2020.
- [12] Vargas Rodriguez, E., Guzman Chavez, A. D., Cano Contreras, M., Gallegos Arellano, E., Jauregui Vazquez, D., Hernández García, J. C., Estudillo Ayala, J. M., & Rojas Laguna, R. Analytical Modelling of a Refractive Index Sensor Based on an Intrinsic Micro Fabry-Perot Interferometer. *Sensors*, no. 15, 26128-26142, 2015.
- [13] Vargas Rodriguez, E., Guzman Chavez, A. D., & Garcia Ramirez, M. A. Tunable Optical Filter Based on Two Thermal Sensitive Layers. *IEEE Photonics Technol. Lett.* No. 20, 1776–1779, 2018.
- [14] Yadav, T. K., Narayanaswamy, R., Abu Bakar, M. H., Kamil, Y. M., & Mahdi, M. A. Single mode tapered fiber-optic interferometer based refractive index

- sensor and its application to protein sensing. *Optics Express*. No. 19, 22802–22807, 2014.
- [15] Xu, L., Li, Y., & Li, B. Nonadiabatic fiber taper-based Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing. *Applied Physics Letters*, 153510, 2012.
- [16] Yang, R., Yu, Y.-S., Xue, Y., Chen, C., Chen, Q.-D., & Sun, H.-B. Single S-tapered fiber Mach-Zehnder interferometers. *Optics Letters*, no. 23, 4482–4484, 2011.
- [17] Zhan, Y., Cai, H., Qu, R., Xiang, Sh., Fang, Z., & Wang, X. Fiber Bragg grating temperature sensor for multiplexed measurement with high resolution. *Optical Engineering*, no. 10, 2004.
- [18] Zhang, A. P., Yan, G., Gao, S., He, S., Kim, B., Im., J., & Chung, Y. Microfluidic refractive-index sensors based on small-hole microstructured optical fiber Bragg gratings. *Applied Physics Letters*, no. 22, 221109, 2011.
- [19] Zhang, X., Yu, Y., Zhu, C., Chen, C., Yang, R., Xue, Y., Chen, Q., & Sun, H. Miniature End-Capped Fiber Sensor for Refractive Index and Temperature Measurement. *IEEE Photonics Technology Letters*, no.1, 7–10, 2014.