

*Influencia de la temperatura en la dispersión de luz en
fibra óptica.*

Tesis para obtener el grado de:

Maestría en Ciencia de Materiales

Q. Daniela Yenthile Rodríguez Hernández

Director de Tesis: Dr. Alfredo Márquez Lucero

Noviembre 2012., Chihuahua, Chih. México

Dedicatoria

El presente trabajo se lo dedico:

A mis padres por ser el pilar fundamental de lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por sus consejos, sus valores, su motivación constante, por creer en mí, por su incondicional apoyo perfectamente sostenido a través del tiempo, pero más que nada por su gran amor.

A mis Hermanos Gaby, Hugo y Max porque en cada paso que doy, me motivan a esforzarme mas, buscando ser un buen ejemplo de hermana mayor.

A mi Abuelito por la perseverancia y constancia que lo caracteriza, por el valor mostrado para salir adelante, y principalmente por el cariño y amor que siempre me brinda.

*Influencia de la temperatura en la dispersión de luz en
fibra óptica*

Resumen

Gracias al creciente desarrollo de tecnología utilizando fibra óptica, se ha presentado una notable tendencia por el estudio de la transmisión de luz y los efectos ópticos no lineales, como las dispersiones elásticas e inelásticas.

La temperatura repercute directamente en la generación de los diferentes tipos de dispersiones. Por lo que es de suma importancia poder evaluar dicha influencia, de manera exacta.

En esta tesis se propone un circuito óptico (TRCP) utilizando fibra óptica monomodal, un láser de bombeo continuo Fabry- Perot y uno pulsado. Se muestra que con tal configuración experimental, es posible detectar cambios de temperatura en retrodispersión con un analizador de espectros ópticos. Partiendo de la consideración de los efectos no lineales que tienen lugar en la fibra.

Se aporta una explicación teórica de los procesos que conducen a la generación del circuito óptico TRCP como sensor térmico, así como un modelo matemático que describe los resultados obtenidos durante la experimentación.

El desarrollo del circuito óptico TRCP resulta de gran interés para su aplicación como sensor distribuido, y se ha propuesto como trabajo a futuro.

Introducción

El estudio de las no linealidades en las fibras ópticas son un campo de investigación inagotable en la ciencia y tecnología, sobre todo, porque se han encontrado múltiples aplicaciones.

Dentro de los efectos no lineales en la transmisión de luz, se encuentran las dispersiones elásticas e inelásticas, dichas dispersiones, se ven afectadas por perturbaciones del medio.

El hecho de que las dispersiones presenten una respuesta sensible a estímulos externos, como cambios de presión, tensión, temperatura, ha permitido en los últimos años, un creciente desarrollo de en el diseño de sensores distribuidos (Y.D. Gong., 2007).

El presente trabajo se enfocará en los sensores térmicos, ya que ofrecen una gran ventaja al permitir localizar en tiempo real, cambios de temperatura.

En la actualidad existe una amplia gama de sensores puntuales, sin embargo, los sensores distribuidos es tecnología en pleno desarrollo.

Países como, Canadá, Australia, Alemania, Suiza, Inglaterra, se han enfocado en el avance tecnológico de sensores distribuidos de fibra óptica, y a pesar de que ya comercializan su tecnología, sigue siendo a un costo elevado.

Es por ello, que esta tesis se basa en el estudio de la influencia de la temperatura en la dispersión de luz a través de una fibra óptica.

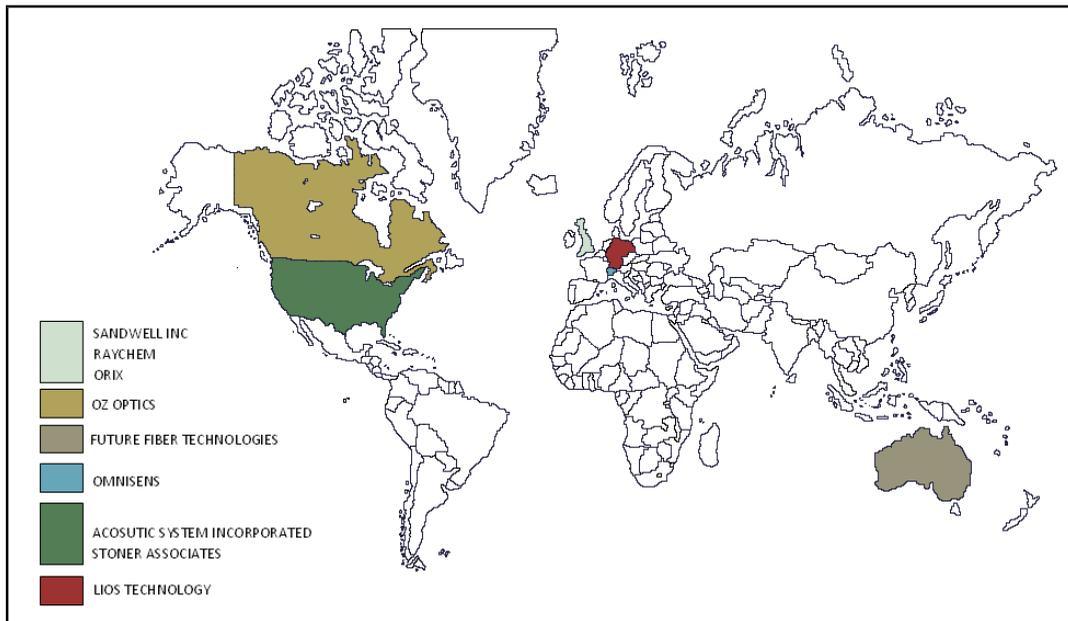


Figura I. 1. Tecnología comercial por país

Justificación

En la actualidad, es de vital importancia, monitorear la integridad de instalaciones encargadas de transportar fluidos, reactores, cables submarinos o subterráneos de alta tensión, por mencionar algunos ejemplos, esto con el fin de identificar problemas de manera oportuna, y sobre todo prevenir fugas, rupturas, fallas por corrosiones, hurtos, las cuales pueden provocar secuelas desastrosas en la economía de la institución afectada, o peor aun con pérdidas humanas.

En el caso particular de las instalaciones encargadas de transportar fluidos, es posible discriminar un evento extraordinario, si se presenta un cambio de temperatura significativo, ya que cuando un gas, o un líquido, sometidos a alta presión se escapa por una grieta u orificio del lugar que los contiene, su temperatura y presión descienden debido al efecto Joule-Thomson.

(D.M. Heyes et al., 1992).

Los cambios de temperatura, antes indicados, repercuten en toda la zona aledaña donde se presenta la fuga, de tal manera que se puede detectar y localizar con ayuda de un sensor térmico distribuido (STD).

El utilizar fibra óptica como sensor, aporta una gran ventaja, porque permite aprovechar las emisiones ópticas no lineales, que se generan cuando se le inyecta luz laser a la fibra, principalmente la dispersión inelástica, que responde variaciones de temperatura (K.T.V. Grattan et al., 2000).

I.1 Fibra óptica.

La fibra óptica es una guía de ondas dieléctricas cilíndrica que opera a frecuencias ópticas por cuyo interior viaja la información como ondas electromagnéticas. El método de transmisión consiste en modular los parámetros de la luz, conforme a la señal de información y guiarla a su destino a través de un medio óptico, que es en este caso una fibra muy delgada de óxido de silicio u otro material adecuado, constituido de un núcleo con un índice de refracción n_a , un manto o envoltura de índice de refracción n_b y un recubrimiento (Barry Elliott., 2002).

El haz de luz que se transmite a través de la fibra óptica queda completamente confinado y se propaga por el interior con un ángulo de reflexión por encima del límite de la reflexión total interna, según lo describe la función de la ley de Snell (Robert J. Schechter ., 1977).

Los elementos fundamentales en una fibra óptica son:

- Núcleo: Es la porción conductora de luz; es el centro dieléctrico en una fibra óptica, cuyo índice de refracción es mayor que el índice de refracción del medio que la envuelve.
- Manto o Envoltura: Forro exterior o envoltura fundido al núcleo de la fibra.
- Recubrimiento: Envoltura de protección mecánica, evita la penetración de rayos de luz y de la humedad.

Existen diversas clasificaciones de fibra óptica, una de ellas es por el modo de propagación (multimodal y monomodal): debido a que una fibra óptica es un guía que impone restricciones a la propagación de una onda electromagnética, existirán formas únicas de propagación, denominadas “modos” (Todd R. Downey et al., 1999).

De acuerdo al número de modos que se propaga por el núcleo existen las llamadas Multimodos y la Monomodos.

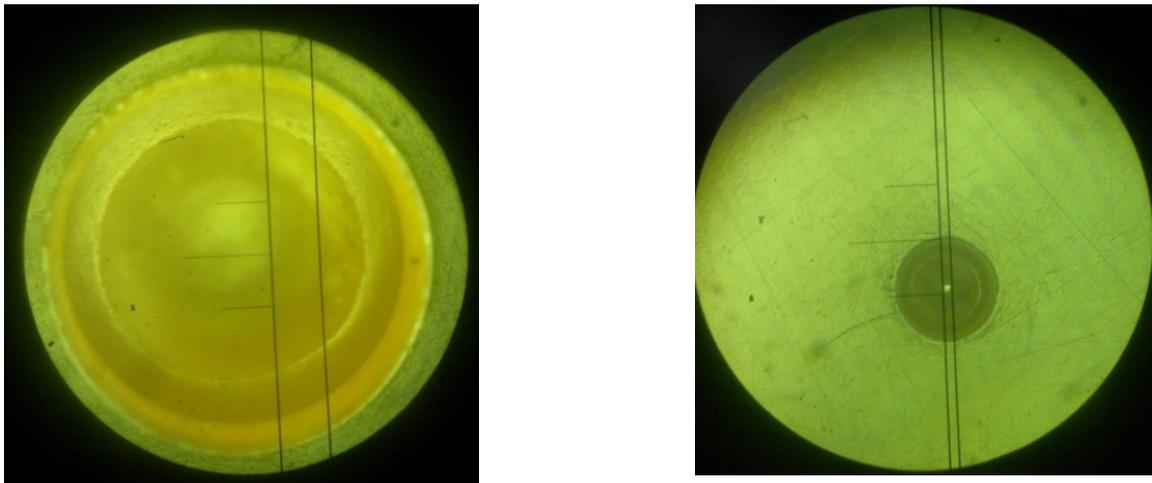


Fig I. 2 Micrografía M.O de la fibra monomodal establecida en la Tabla IV 1.

I.2 Dispersión de luz en fibra óptica.

La dualidad onda-partícula de la radiación electromagnética permite afirmar que cuando un fotón incide con una molécula, éste puede interactuar de manera elástica e inelástica. En el primer caso el fotón es dispersado sin pérdida de energía, lo contrario ocurre en la dispersión inelástica donde existe un cambio de frecuencia entre el fotón incidente y el emitido (H. Nakanishi., et al., 1996).

Al efecto que se genera cuando el fotón emitido es de menor energía que la radiación incidente se le conoce como dispersión stokes, lo contrario es denominado dispersión anti-stokes.

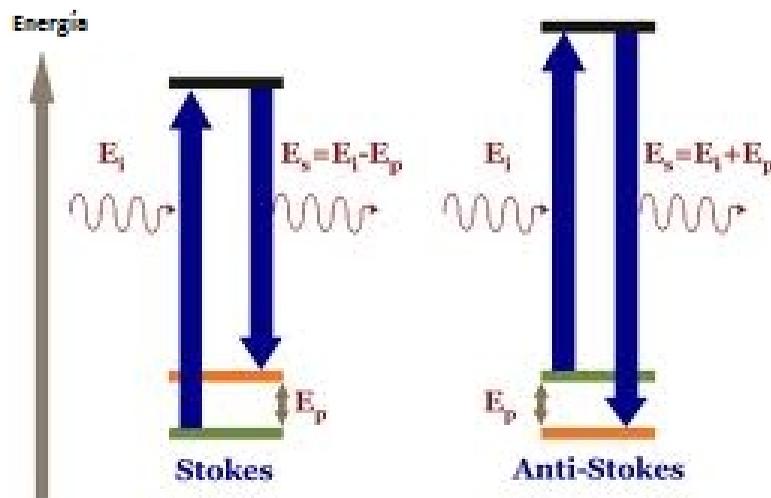


Fig I. 3 Dispersión inelástica stokes y antistokes.

I.3 Láser Fabry-Perot.

Un láser Fabry-Perot consta de una cavidad de dos espejos planos paralelos altamente reflectantes y sus centros están sobre el eje óptico del láser.

Una cavidad estable, es aquella en la cual se captura la radiación dentro de sí misma, produciendo ondas estacionarias por interferencias constructivas y destructivas, generadas por el recorrido del haz entre los espejos. (Xiaofei Cheng et al., 2009).

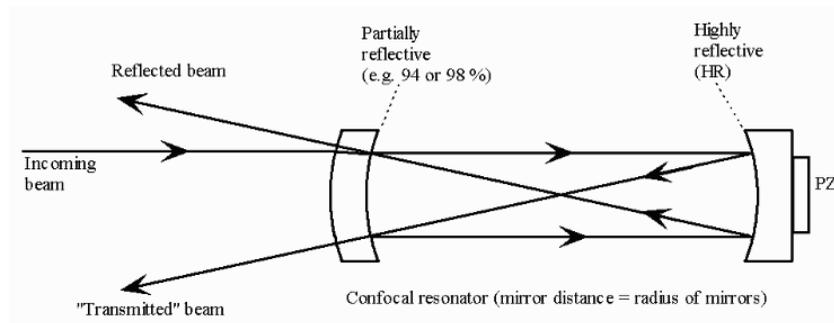


Fig I.4 Cavidad Fabry-Perot

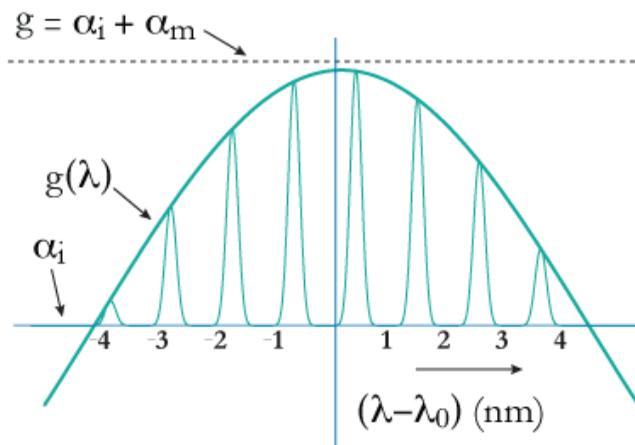


Fig I. 5. Espectro óptico de un laser Fabry-Perot

II. Hipótesis

Es posible optimizar la respuesta térmica en la transmisión de luz, mediante el empleo de fibra óptica acoplada en circuitos particulares, y utilizando un laser de bombeo continuo Fabry-Perot.

III. Objetivos

El objetivo general de esta investigación es el estudio de la influencia de la temperatura en la dispersión de luz, que se genera en circuitos ópticos de fibra óptica utilizando un láser de bombeo continuo Fabry- Perot y uno pulsado.

Objetivos Particulares:

- Analizar experimentalmente el comportamiento de la transmisión de luz en la fibra óptica, utilizando un laser de bombeo continuo Fabry-Perot a diferentes temperaturas.
- Estudiar las diferentes técnicas que utilicen fibra óptica para el sensado de temperatura con la finalidad de proponer un nuevo circuito.
- Determinar cuál tipo de conexión tiene una respuesta más sensible y exacta a la dispersión de luz, mejorando su calidad de sensado.

*Influencia de la temperatura en la dispersión de luz en
fibra óptica.*

Q. Daniela Yenthile Rodríguez Hernández

Índice

Resumen	iv
Introducción	v
Justificación	vii
I. Antecedentes	
I. 1 Fibra Óptica	viii
I. 2 Dispersión de luz en Fibra Óptica.	x
I. 3 Láser Faby-Perot	xi
II. Hipótesis	xii
III. Objetivos	xiii
IV. Técnica experimental	
a) Materiales	3
b) Equipo	4
c) Circuitos ópticos experimentales	5
V. Resultados	
V.1 - Monitoreo de los espectros del Láser de longitud de onda nominal de 1310nm en Trasmisión Directa (TD).	9

V.2 Resultados espectrales de la interacción de un laser pulsado y un laser de bombeo continuo Fabry-Perot (TCP) 10

V.3 Resultados espectrales de la interacción de un laser pulsado y un laser de bombeo continuo en retrodispersion (TRCP). 11

VI. Discusion de Resultados

VI.1. Analisis de la respuesta termica en transmision de luz directa (Circuito TD) ..12

VI.2 Analisis de los espectros del circuito optico TCP. 13

VI.3 Analisis de los espectros del circuito optico TRCP. 14

VI.3 Planteamiento y Discusion del modelo matematico que se ajusta a los resultados experimentales. 18

VII. Conclusiones. 22

VIII. Trabajos a futuro 23

Referencias 24

Agradecimientos 25

IV. Técnica Experimental

- *Materiales*

25 metros de Fibra óptica monomodal sus características vienen descritas en la Tabla 1.

Díámetro del Fibra	Díámetro del Núcleo	Cut off	Modelo y Proveedor
125 μm	9 μm	1310 & 1550 nm	1310BHP Thorlabs

Tabla IV 1. Características de la Fibra Óptica Monomodal

Conector monomodal tipo FC/PC de 125 μm de diámetro, modelo 30126D1 Thorlabs.

Controlador de Polarización, modelo FPC560 Thorlabs.

Divisor de haz monodal 2x2 50:50 bidireccional 1310/1550nm, modelo 10202A-50.

Divisor de haz multimodal 1x2 50:50 bidireccional 1310/1550nm, modelo FCMM625 Thorlabs.

- **Equipo**

- Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR Tektronix TFP2A), sus parámetros se indican en la Tabla IV 2.

Ancho de pulso	Rango Máximo	Promedios Máximos	Coefficiente de Difusión	Umbral del evento	Longitud nominal
10ns (1m)	4.00Km	163,840 (20.2min)	-69.7	0.05dB	1300nm

Tabla IV 2. Parámetros establecidos para el OTDR Tektronix TFP2A.

- Laser de bombeo continuo Fabry Perot THORLABS MCLS a una longitud de onda nominal 1310nm, y una potencia de 2.97mW.
- Analizador de Espectros ANRITSU MS9740A bajo las condiciones señaladas en la Tabla IV 3.

Longitud de onda central	Espacio entre longitud de onda	Inicio de longitud de onda	Fin de longitud de onda	Resolución	Frecuencia	Número de repeticiones
1305nm	10nm	1295nm	1315nm	0.1nm	1KHz	1

Tabla IV 3. Parámetros de monitoreo para el ANRITSU MS9740A

- Analizador Dinámico Mecánico DMA TARSA3 con una programación temperatura escalonada de 10°C, por cada salto de temperatura se tomaron 3 espectros, una exactamente cuando el horno alcanza la temperatura programada, el segundo a los 5 minutos de mantener esa temperatura y el último a los 10 minutos.

A continuación describe los circuitos ópticos utilizados en la experimentación, cada prueba se realizó 3 veces bajo las mismas condiciones por circuito. Sin embargo, en el capítulo de Resultados se reportará solo uno de ellos.

- ***Circuitos ópticos experimentales.***

- a) **Trasmisión directa (TD).**

A las fibras ópticas descritas en la Tabla IV 1, se les inyectó luz láser continua de una longitud de onda nominal de 1310nm y de una potencia de 2.97mW. A la entrada y la salida se le conecto al polarizador.

Se obtuvieron los espectros bajo los parámetros indicados en la Tabla IV 3, los primeros sin ningún tipo de estímulo, ni térmico, ni físico, durante 180min.

Posteriormente a la misma conexión se le sometió a cambios de temperatura que iban desde 35°C a 117°C, controladas de manera escalonada por el DMA TA RSA3. De los 25 metros de Fibra óptica 5 fueron colocados al horno del DMA, dejando libre 10m de cada lado.

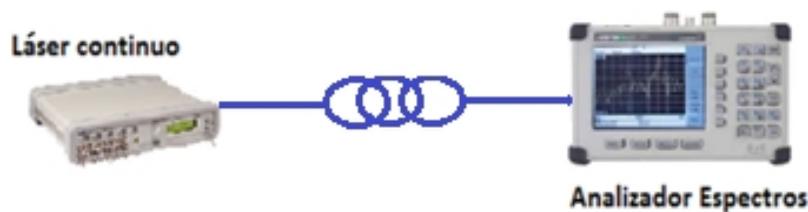


Fig IV 6. Gráfico de la conexión experimental del circuito de trasmisión directa (TD).

b) Interacción entre un láser pulsado y un laser de bombeo continuo (TCP).

La Figura IV 7 describe como se realizaron las conexiones ópticas para interactuar un láser de bombeo continuo Fabry-Perot con uno pulsado descrito en la Tabla IV 2. En este circuito se utilizó un divisor de haz de potencia 50:50. Las condiciones de temperatura, tiempo, y obtención de espectros son las iguales a las que se mencionaron en el inciso a) TD.

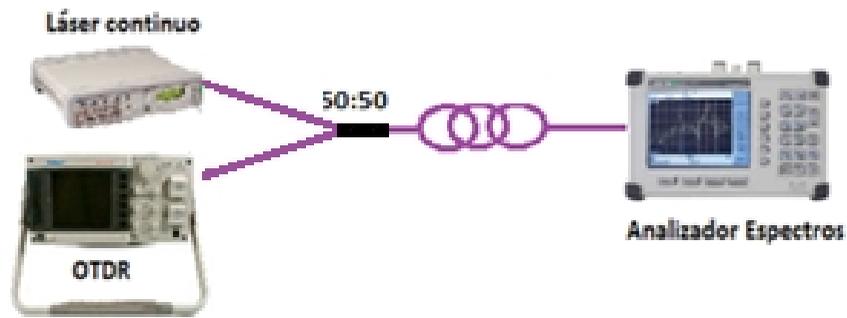


Fig IV 7. Gráfico de la conexión de la interacción del láser pulsado y continuo (TCP).



Fig IV 8. Fotografía del montaje de la experimentación, CIMAV 2012

c) Interacción entre un láser pulsado y un laser bombeo continuo Fabry - Perot (TRCP) en retrodispersión.

Para el análisis de la influencia de la temperatura en la trasmisión de luz retrodispersada, se consideraron las mismas condiciones descritas en el inciso b)TPC, pero utilizando el esquema óptico de la Figura IV 9



Fig IV 9. Gráfico de la conexión de la interacción del láser pulsado y continuo (TRCP).



Fig IV 10. Fotografía del circuito óptico TRCP, CIMAV 2012.

V. Resultados.

En los espectros que se mostraran a continuación se tiene gráficamente en el eje “x” la longitud de onda (nm) y en el eje “y” la potencia en (mW).

Como se mencionó en el capítulo IV Técnica Experimental, se controló la temperatura de manera escalonada con saltos de 10°C.

En el incremento de la temperatura se registraron los espectros desde ~27°C (Temperatura ambiente), hasta 117°C. Por cada temperatura se tomaron 3 espectros, al instante que alcanzó esa temperatura, a los 5 y 10 minutos.

En la experimentación previa, se observó que al incrementar la temperatura en los diferentes circuitos, se presentaban cambios en los espectros ópticos, pero estos se estabilizaban al mantener la temperatura constante durante 10 minutos.

Por lo antes señalado, en los resultados se mostrarán los espectros obtenidos a los 10 minutos de que se alcanzará la temperatura indicada, y con el afán de enfatizar los cambios se mostraran principalmente los correspondientes a 35, 75 y 117°C.

V.1 - Monitoreo de los espectros del Láser de longitud de onda nominal de 1310nm en Trasmisión Directa (TD).

a) Sin estímulos físicos

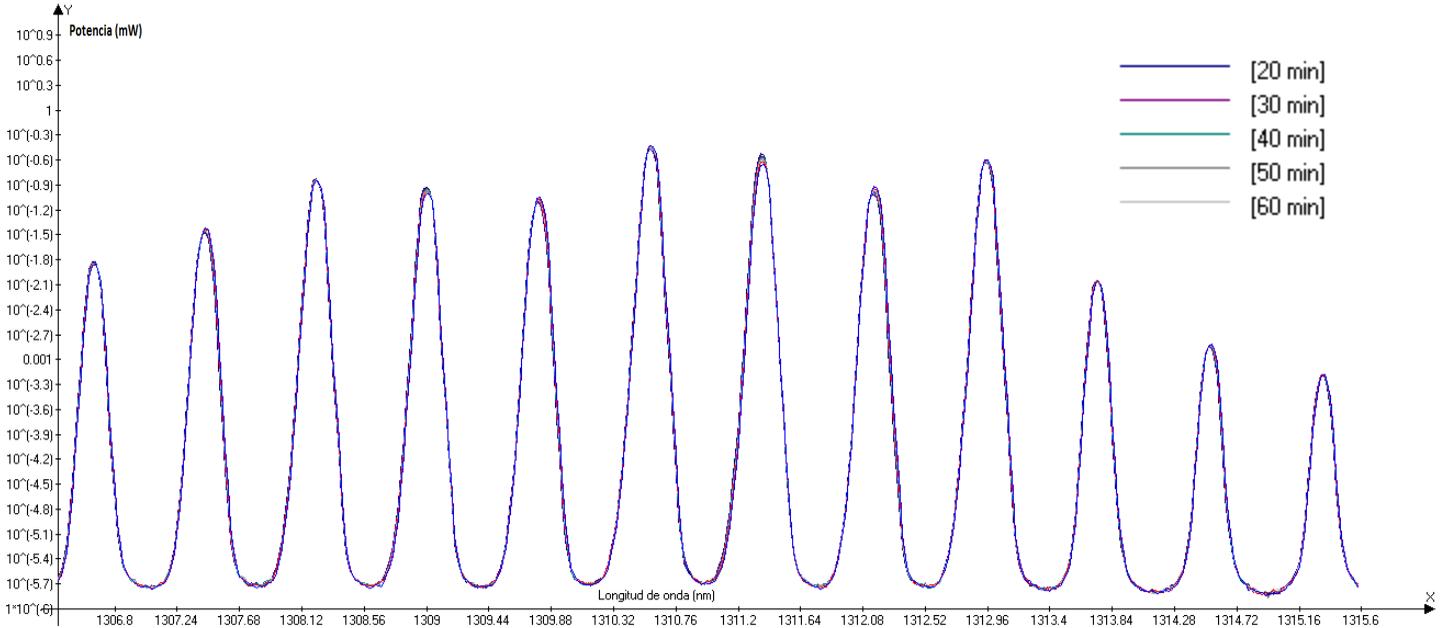


Fig V 11. Espectro de TD de luz a través de la fibra monomodal descrita en la Tabla IV 1, sin estímulos externos.

b) Cambios de temperatura

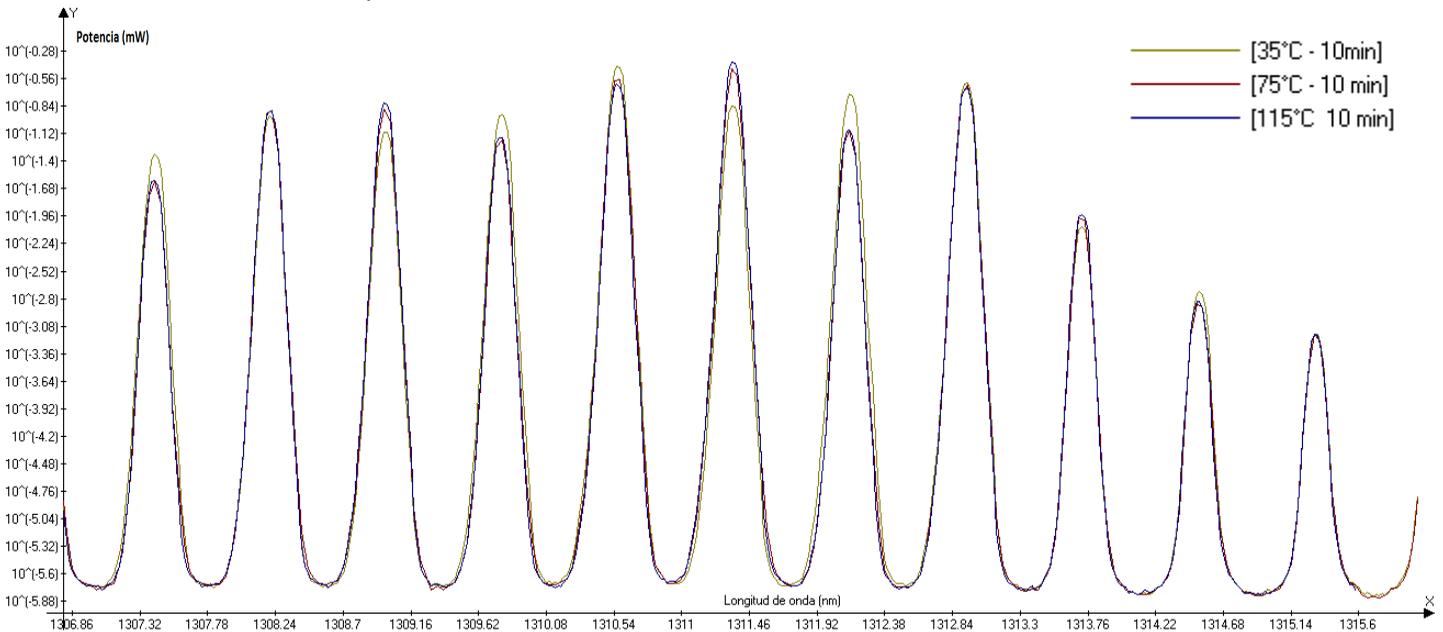


Fig V 12. Espectro de la trasmisión de luz a través de la fibra monomodal descrita en la Tabla IV 2, con cambios de temperatura 35°C, 75°C y 115°C.

V.2 Resultados espectrales de la interacción de un laser pulsado y un laser de bombeo continuo Fabry-Perot (TCP).

a) Temperatura y condiciones constantes

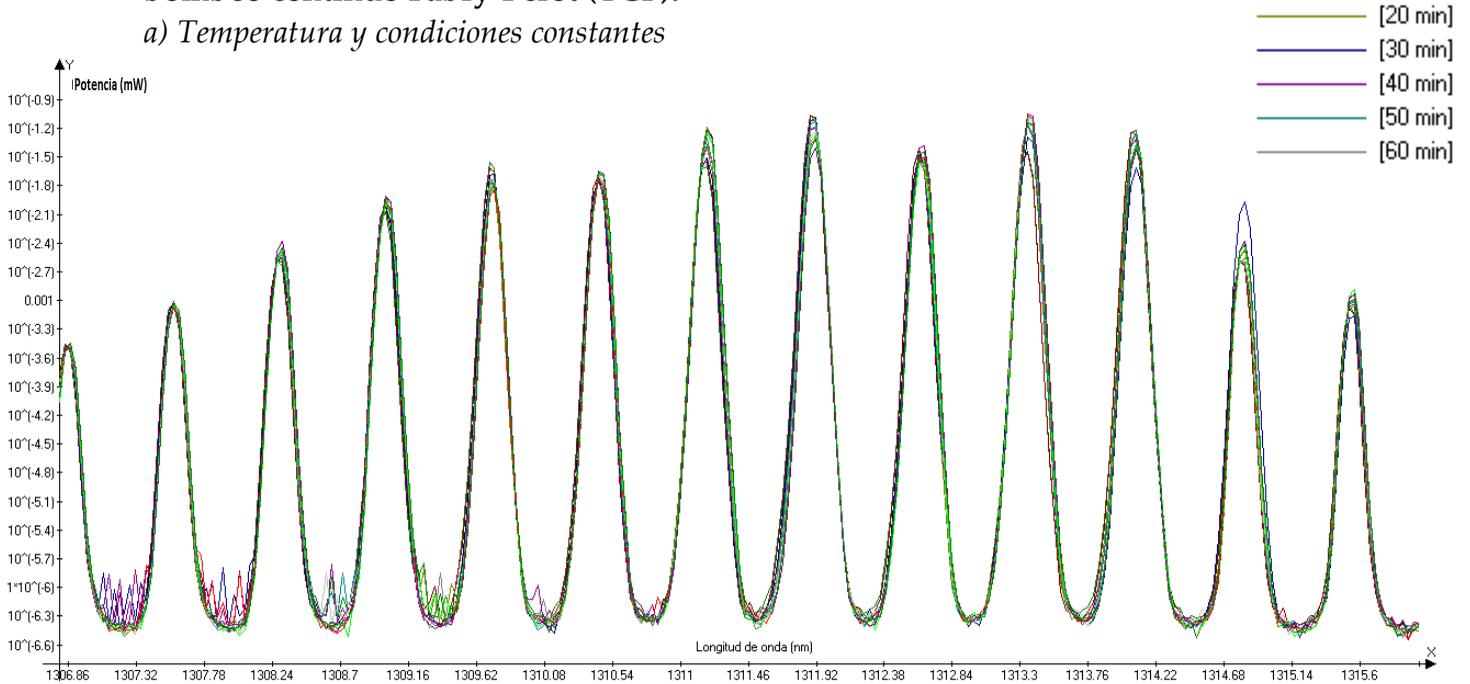


Fig V 13. Espectro del comportamiento del esquema TCP a través del tiempo, a temperatura constante, graficando desde 1306.8 hasta 1316nm, utilizando fibra óptica monomodal.

b) Temperatura variable.

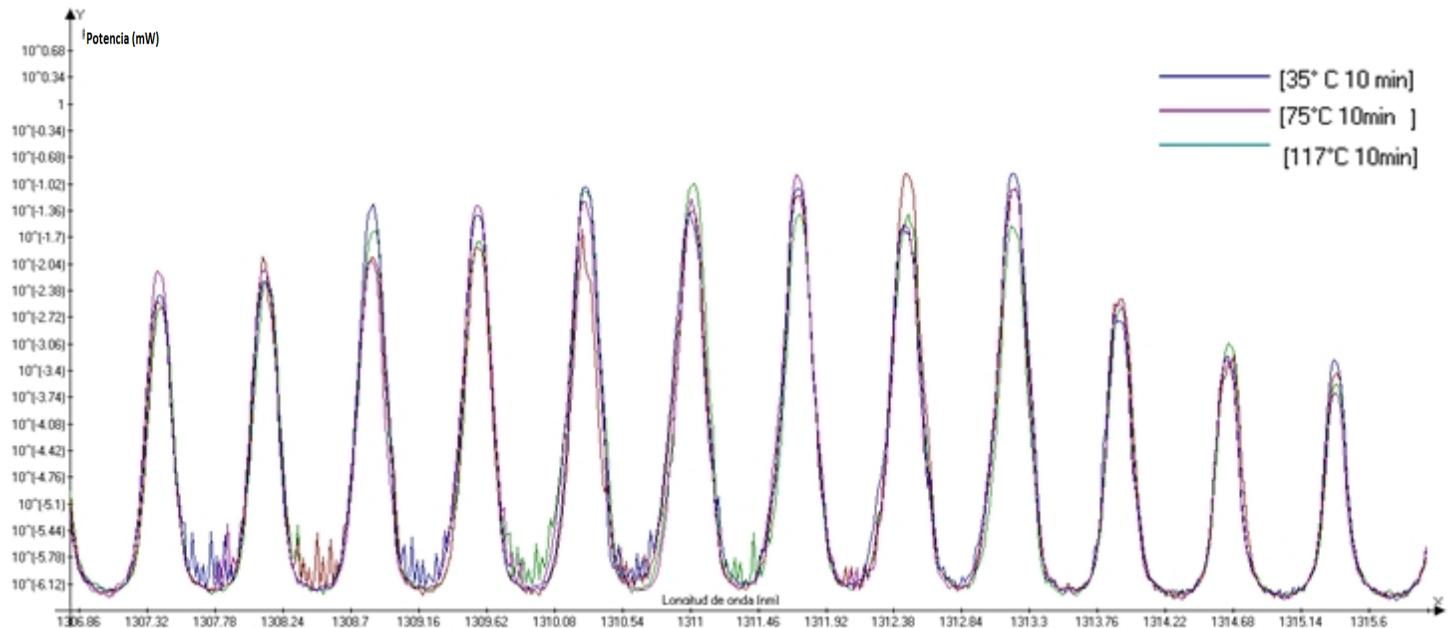


Fig V14. Espectro de las temperaturas 35, 75 y 117°C del circuito óptico TCP utilizando fibra óptica monomodal.

V.3 Resultados espectrales de la interacción de un laser pulsado y un laser de bombeo continuo en retrodispersión (TRCP).

a) Temperatura y condiciones constantes.

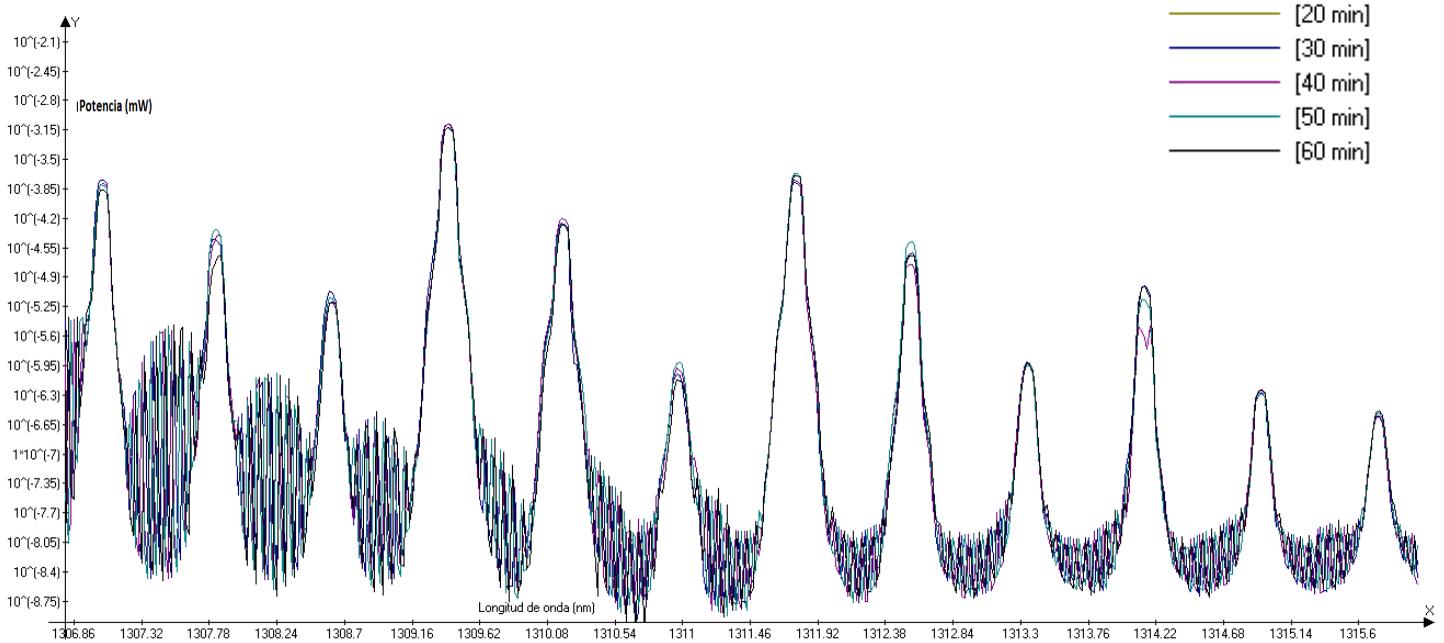


Fig V 15. Espectro del comportamiento del esquema TRCP a través del tiempo, a temperatura constante, graficando desde 1305 hasta 1315nm, utilizando fibra óptica monomodal.

b) Respuesta a variaciones térmicas.

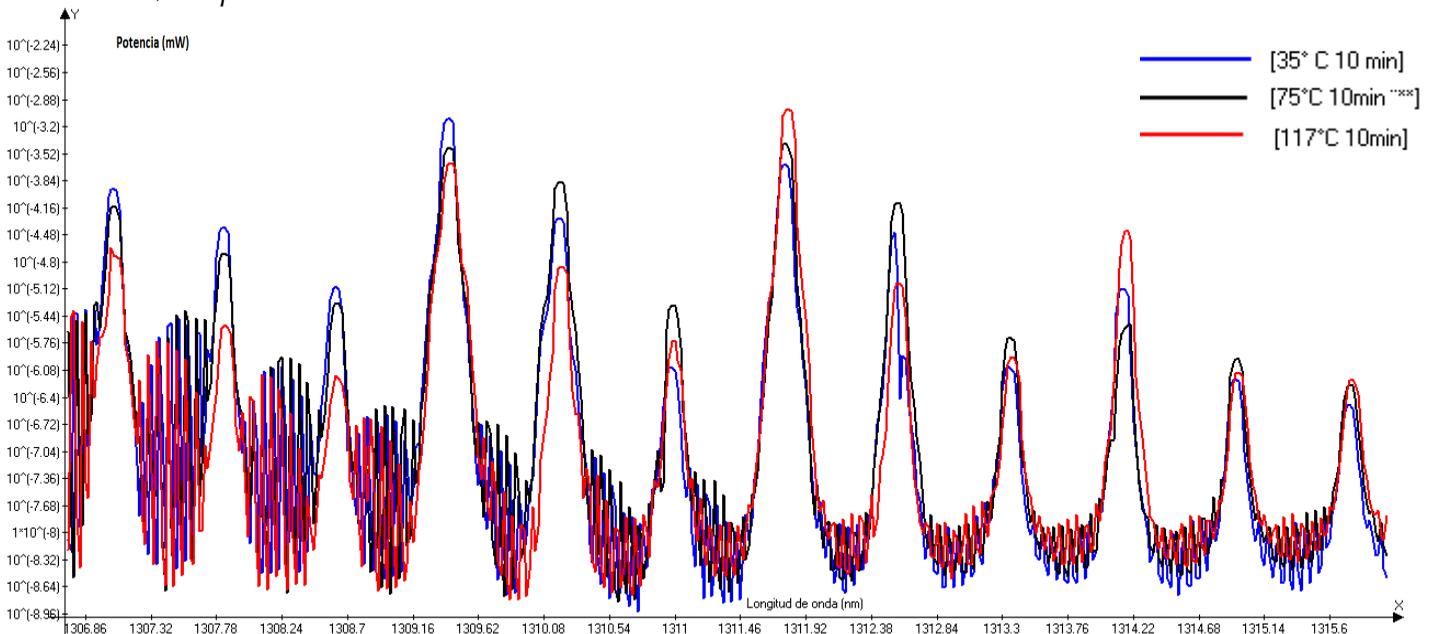


Fig V 16. Espectro del comportamiento del esquema TRCP a través del tiempo, a aumentos de temperatura (35, 75 y 117°C), utilizando fibra óptica monomodal.

VI. Discusión de Resultados

Con la finalidad de validar los resultados de los circuitos ópticos planteados, cada 10 minutos se registraron los espectros de los diferentes arreglos de fibra óptica (TD, TCP y TRCP) cuidando las condiciones iniciales, es decir, sin cambios de temperatura, vibración y ningún factor externo que pudiera afectar la transmisión de luz.

Los espectros de las Figuras V 11, 13 y 15 demuestran que durante un periodo de 60 minutos se mantienen constantes, por lo cual se garantiza que cualquier respuesta detectada, es propiamente del fenómeno y no por inestabilidad del equipo o la conexión misma.

VI.1. Análisis de la respuesta térmica en transmisión de luz directa (Circuito TD).

Al analizar el espectro mostrado en la Figura V 12, se observa que cuando la temperatura cambia también lo hace la potencia lumínica, esto es debido a variaciones en el índice de refracción de la fibra óptica que se utiliza como medio de la transmisión de luz. La estructura molecular del óxido de silicio, que es el principal componente de la fibra óptica, tienen una respuesta sensible a diferentes temperaturas, que se ve reflejado en el índice de refracción (Y.D. Gong., 2007).

Estos cambios de potencia no presentan un patrón de conducta específico, que permita discriminar entre una temperatura y otra.

Aparte de los cambios en el eje “y”, los espectros correspondientes al esquema óptico TD no presentan ninguna otra modificación, es decir, en el eje x no se detecta ningún desplazamiento en la longitud de onda, aun si se compara el espectro de 35°C con respecto al de 117°C.

VI.2 Análisis de los espectros del circuito óptico TCP.

En los espectros del circuito TCP de las Figuras V 13 y V 14 se observa la presencia de señales de menor potencia entre los picos característicos del laser Fabry Perot (Gabriele Bolognini, et al., 2009), estas señales intermedias son debido a la interferencia provocada entre el laser continuo con el pulsado, dicha afirmación se puede comprobar con los espectros de la transmisión de luz directa (véase Figura V 11) donde solo se observan los picos emitidos por el laser de bombeo continuo.

Al analizar la Figura V 14. Cuando el circuito TCP fue sometido a variaciones de temperatura, se ve una respuesta inmediata en la potencia, sin embargo, estos cambios no son característicos o dependientes específicamente de la temperatura, porque incluso al comparar los espectros en el tiempo (veasé figura V 13), se ve modificaciones en la potencia, lo cual

no es posible discernir entre los cambios propiamente del arreglo óptico, a los que surgen por someter la fibra óptica a diferentes temperaturas.

Al igual que el circuito TD, los espectros del circuito TCP solo presenta cambios de potencia, y en el eje de las abscisas se mantiene estable.

VI.3 Análisis de los espectros del circuito óptico TRCP.

Los espectros ópticos mostrados en la Figura V 15, señala la estabilidad en el tiempo del arreglo óptico TRCP.

Al presentar únicamente ligeras variaciones en la potencia, permite señalar que cualquier otro cambio que se muestre es una respuesta directa a modificaciones de la temperatura del medio en donde se encuentra la fibra óptica

Las Figuras VI 17 a la VI 20, corresponden al espectro de la Figura V 16, solo que en estas, se hace un aumento dimensional de la imagen en la zona de interés, con el objetivo de observar de manera más detallada la respuesta térmica en la transmisión de luz.

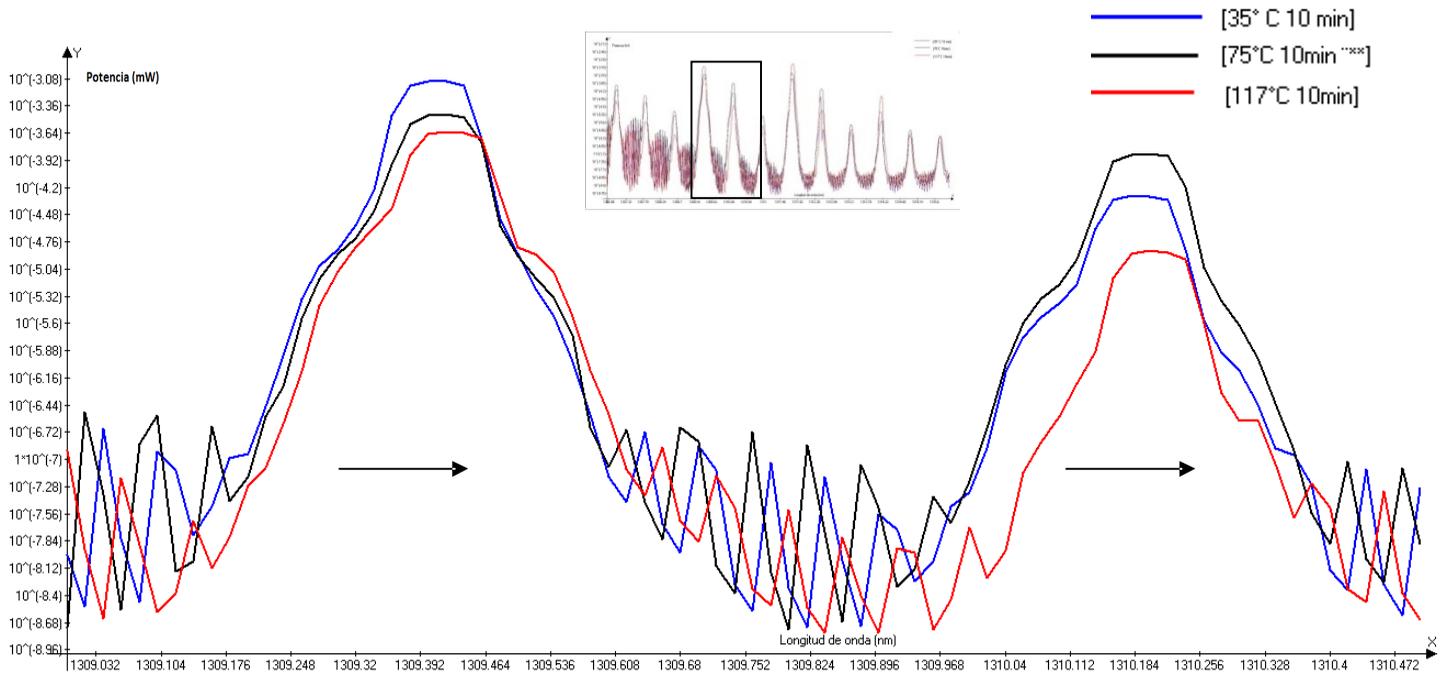


Fig VI 17. Aumento de la imagen del espectro mostrado en la Figura V 16, centrada en eje x a 1309.8nm.

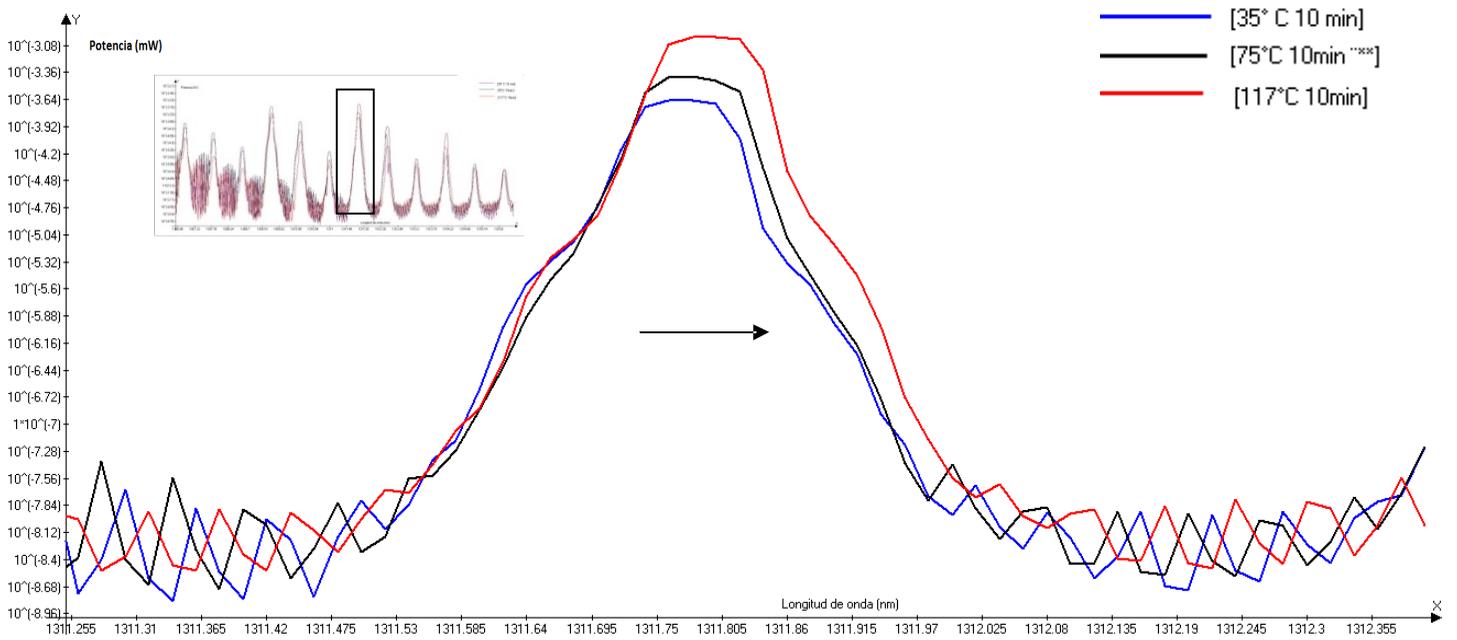


Fig VI 18. Aumento de la imagen del espectro mostrado en la Figura V 16, centrada en eje x a 1311.6nm

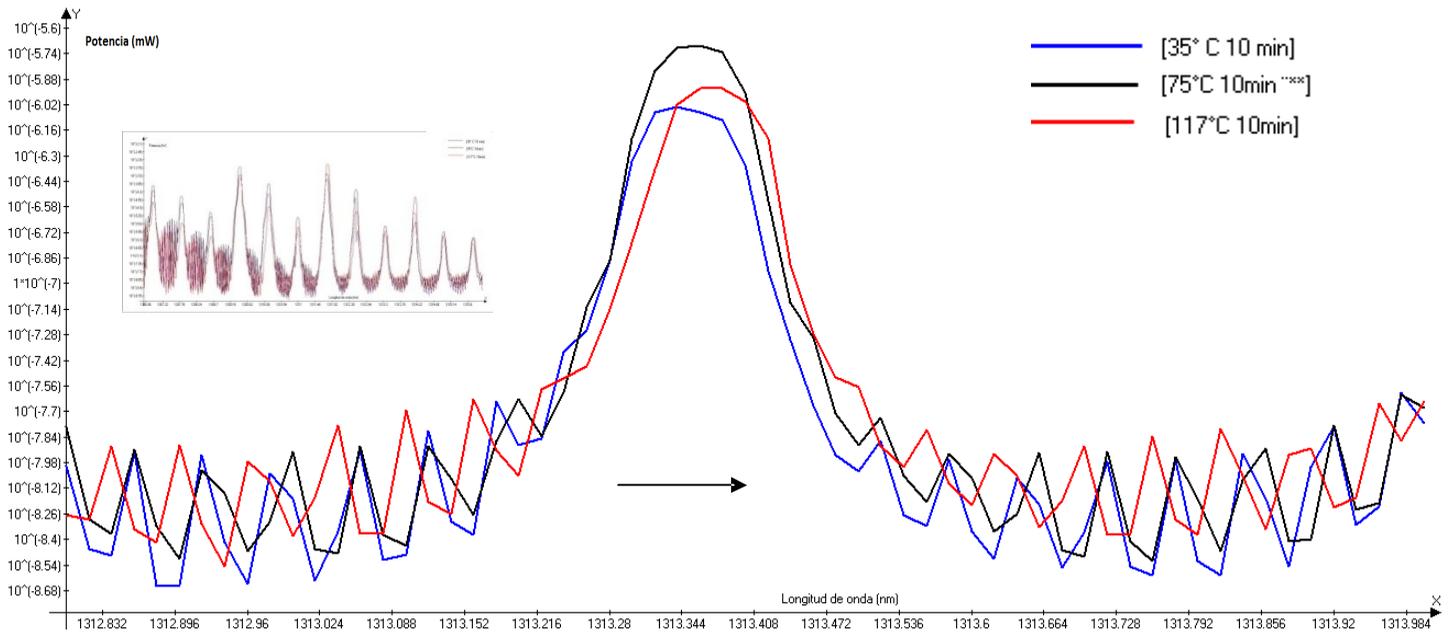


Fig VI 19. Aumento de la imagen del espectro mostrado en la Figura V 16, centrada en eje x a 1313.4nm.

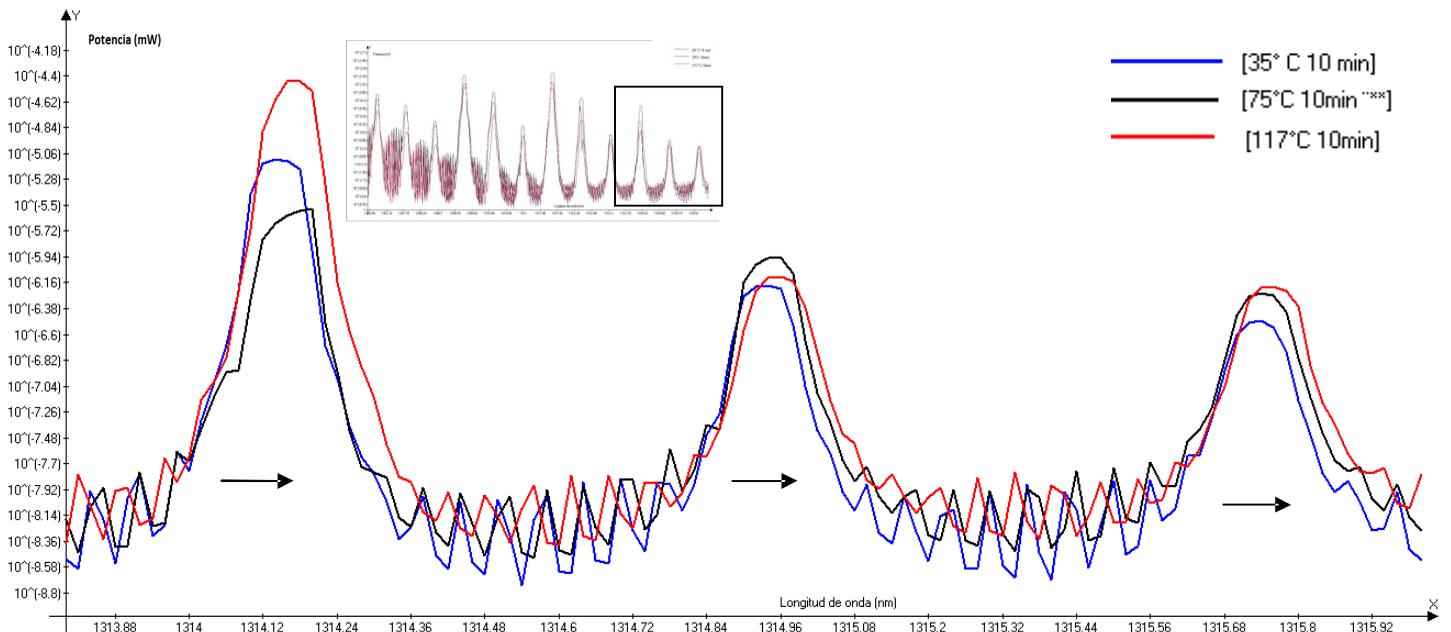


Fig VI 20. Aumento de la imagen del espectro mostrado en la Figura V 16, centrada en eje x a 1315.6nm

Al someter el circuito óptico TRCP a saltos de temperatura ascendente se observó que conforme la temperatura iba en aumento, se presentaba un ligero desplazamiento hacia la derecha de la longitud de onda en cada uno de los picos.

Cuando se incrementó la temperatura en la fase experimental, se le suministró energía al sistema, por lo tanto las moléculas de óxido de silicio de la fibra óptica, al emitir un fotón no regresan a su estado fundamental, sino absorbe parte de la energía del fotón incidente para activar un nivel mayor de energía; esto provoca, que el fotón emitido sea de menor energía que el incidente, tales condiciones generan una dispersión inelástica stokes, que se ve reflejado en un desplazamiento de los espectros ópticos a una mayor longitud de onda (H. Nakanishi, et al., 1996.) .

Este fenómeno explica los resultados obtenidos, tal como se indica en las Figuras V16 a la VI 20.

VI.3 Planteamiento y Discusión del modelo matemático que se ajusta a los resultados experimentales.

La Tabla VI 4, se concentra la longitud de onda (nm) central de algunos de los picos de los espectros obtenidos durante la experimentación en función de la temperatura.

Temp.	Pico 1	Pico 2	Pico 3	Pico 4	Pico 5	Pico 6	Pico 7	Pico 8
35°C	1307.8195	1308.5895	1309.3805	1310.18	1310.941	1311.73	1312.5385	1313.3485
45°C	1307.8315	1308.6105	1309.3855	1310.185	1310.96	1311.74	1312.569	1313.3575
55°C	1307.86	1308.6005	1309.411	1310.161	1310.961	1311.7205	1312.539	1313.3595
65°C	1307.86	1308.6005	1309.3905	1310.1895	1310.9795	1311.7415	1312.63	1313.36
75°C	1307.8605	1308.6305	1309.3915	1310.1905	1310.9795	1311.7405	1312.57	1313.3605
85°C	1307.87	1308.651	1309.4105	1310.193	1310.982	1311.7515	1312.57	1313.3605
95°C	1307.86	1308.6305	1309.4005	1310.181	1311.0105	1311.7705	1312.599	1313.3705
105°C	1307.881	1308.6155	1309.411	1310.1805	1311.011	1311.7615	1312.5895	1313.359
117°C	1307.8755	1308.6005	1309.4255	1310.192	1310.991	1311.7505	1312.57	1313.3445

Tabla VI 4. Longitud de onda (nm) de los diversos picos del espectro, a diferentes temperaturas.

Se tomo como referencia los datos obtenidos en el espectro a los 35°C, y se comparó con los espectros de mayor temperatura, con la finalidad de determinar el desplazamiento de la longitud de onda central por cada pico.

Estos desplazamientos fueron promediados, dando a lugar el gráfico representado en la Figura VI 21.

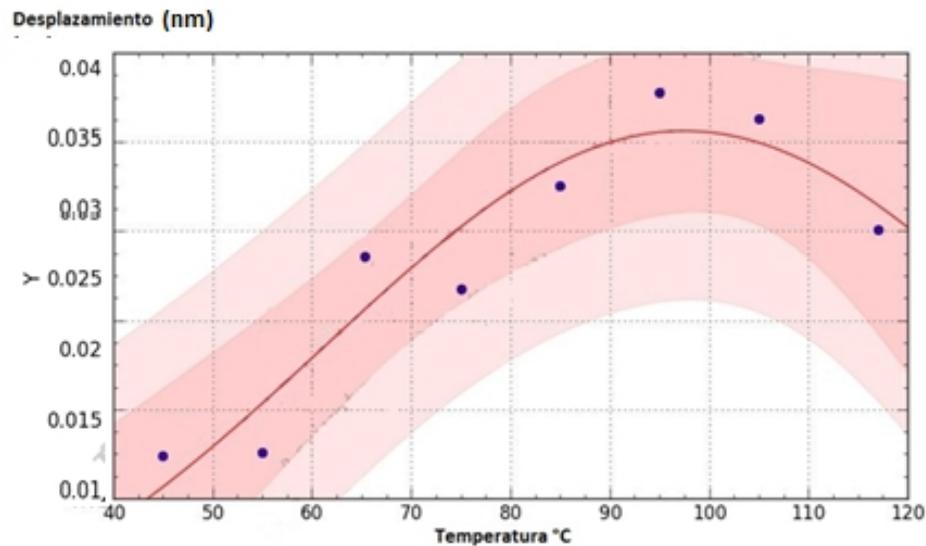


Fig VI 21. Corrimiento de la longitud de onda (nm) en función de la temperatura por cada pico.

Al hacer un ajuste de curvas y análisis de la regresión al gráfico de la Figura VI 21, se encontró que el modelo matemático (TRCP) que describe el desplazamiento en la longitud de onda, según los datos experimentales es:

$$f(T) = a e^{-\frac{(T-b)^2}{2(c)^2}} \quad (\text{Ecuación VI.1})$$

Donde:

$f(T)$ representa el desplazamiento de la longitud de onda en nm.

a : $6,13734 \times 10^{-2}$

b : 0,973601

c : 0,361571

T: temperatura en °C.

Coefficiente de determinación R^2 : 0,873320

Desviación estándar: 0,006466

Es necesario mencionar la similitud del modelo matemático anterior (Ecuación VI-A) con el modelo de la Distribución de Maxwell- Boltzmann.

$$f(E) = A e^{-\frac{E_i - E_j}{kT}}$$

(Ecuación VI-B)

Donde:

$f(E)$ representa la probabilidad de que una partícula se encuentre en el estado de energía E

k es la constante de Boltzmann: relación la temperatura absoluta y la energía ($1,3806504 \times 10^{-23}$ J/K)

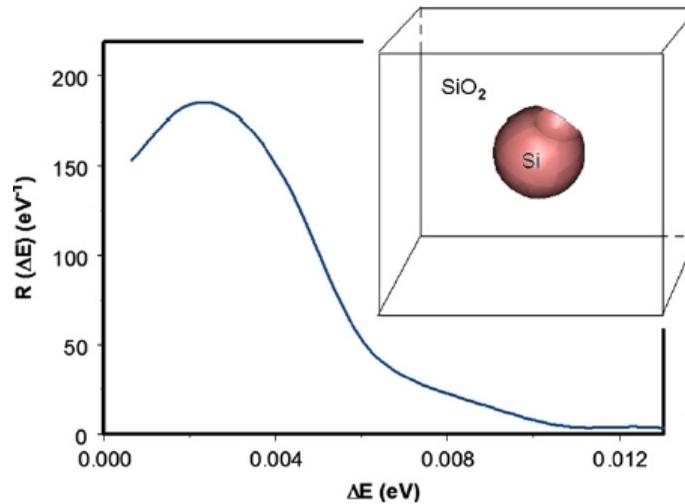
T es la temperatura (K)

$E_i - E_j$ Estados de energía (J)

(M. Groppi et., al., 2002).

Anteriormente se discutió que el desplazamiento de la longitud de onda conforme la temperatura aumenta, es consecuencia de la dispersión inelástica Stokes.

Se tiene como hipótesis para el desarrollo de un trabajo a futuro que es posible explicar el modelo matemático planteado en la Ecuación VI-A, como relación de la ecuación de Maxwell-Boltzmann, y la distribución de los niveles de energía en las moléculas de SiO₂ que se muestran en la Figura VI 22.



VI 22. $R(\Delta E)$ Función de la distribución de los niveles de energía para la molécula de SiO₂.

(Filikhin et al., 2010)

VII. Conclusiones.

Al concluir la investigación se cumplieron los objetivos planteados desde el inicio, ya que se realizó un estudio teórico de la influencia de la temperatura y su relación con los efectos no lineales de la transmisión de luz, a través de fibras ópticas. Dichos efectos se analizaron experimentalmente en base a diferentes técnicas existentes de sensado.

Se estableció cuál tipo de conexión tiene una respuesta más sensible y exacta a la dispersión de luz.

Se aportó un nuevo y original circuito óptico nombrado como TRCP, este circuito comprueba de manera experimental, la hipótesis planteada, ya que fue posible optimizar la sensibilidad térmica en la transmisión de luz, a través de fibra óptica, utilizando un láser de bombeo continuo Fabry-Perot

El láser Fabry- Perot dio un valor agregado al circuito, ya que al tener emisiones de banda estrecha, permite una mayor precisión en la medición, por su estabilidad térmica, pero sobre todo porque se tiene una serie de emisiones que responden a cambios de temperatura utilizando el circuito propuesto.

Se propone un modelo matemático que se ajusta a los resultados experimentales del circuito TRCP, determinando el desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura.

VIII. Trabajos a futuro

Estudio y caracterización del modelo fundamental que describe el desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura.

Desarrollo del sensor térmico distribuido utilizando el circuito óptico TRCP.

Suplementar las actuales tecnologías de alto costo como el OTDR coherente por el circuito TRCP utilizado un laser Fabry-Perot.

Referencias

A. Yeniay, J-M. Delavaux, and J. Toulouse., 2002. Spontaneous and Stimulated Brillouin Scattering Gain Spectra in Optical Fibers. *Journal of Light wave Techonology* Vol. 20, No. 8.

Barry Elliott, Mike Gilmore., 2002. *Optical fiber theory. Fiber Optic Cabling (Second Edition)*, 2002, Pages 11-55.

David M. Heyes, Claro T. Llaguno., 1992. Computer simulation and equation of state study of the Boyle and inversion temperature of simple fluids Original. *Chemical Physics*, Volume 168, Issue 1, 1, Pages 61-68.

Gabriele Bolognini, Marcelo A. Soto, and Fabrizio Di Pasquale., 2009. Fiber-Optic Distributed Sensor Based on Hybrid Raman and Brillouin Scattering Employing Multiwavelength Fabry-Pérot Lasers. *IEEE Photonics Techonlogy Letters*, Vol 21. No. 20, October 15, 2009, Pages 1523-1526.

H. Nakanishi, H. Ohnishi, A. Okiji., 1996. Inelastic scattering from the translational vibration mode of molecules adsorbed on solid surfaces. *Surface Science*, Volume 363, Issues 1-3, 1 August 1996, Pages 391-396

K.T.V. Grattan, T. Sun., 2000 Fiber optic sensor technology. *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 82, Issues 1–3, 15 May 2000, Pages 40-61.

M. Groppi and G. Spiga., 2002. The Linear Boltzmann Equation with Inelastic Scattering. *Applied Mathematics Letters* 15 (2002), Pages 29-34

Robert J. Schechter ., 1977. Snell's law: Optimum pathway analysis. *Survey of Ophthalmology*, Volume 21, Issue 6, May–June 1977, Pages 464-466

Todd R. Downey, Fabrice Meriaudeau, Ali Passian, Andrew Wig, Thomas L. Ferrel., 1999. Guided propagation in a step-index, multi-mode fiber: effect of index difference variation on allowable TM propagation constants. *Optics & Laser Technology*, Volume 31, Issue 4, June 1999, Pages 273-277

Xiaofei Cheng, Yang Jing Wen, Zhaowen Xu, Yixin Wang., 2009. Characterization of Fabry–Perot laser diodes injection locked by spectrum sliced ASE noise in WDM-PON. *Optical Fiber Technology* 15 (2009) Pages 161–164

Y.D. Gong., 2007. Guideline for the design of a fiber optic distributed temperature and strain sensor. *Optics Communications*, Volume 272, Issue 1, 1 April 2007, Pages 227-237.

Agradecimientos

A mi director de tesis el Dr. Alfredo Márquez Lucero por la oportunidad brindada, pero sobre todo por la confianza que ha depositado en mí, y su soporte constante en todos los órdenes (científico, moral y económico).

A mis maestros, por su tiempo y conocimiento compartido, que ha sido clave en la culminación de mis estudios de posgrado.

A mis compañeros, por su amistad, apoyo y compañía principalmente a José Luis Bueno Escobedo.

Al equipo de laboratorio de Integridad y Diseño de Materiales, con especial mención a los técnicos Ing. Monica E. Mendoza Duarte y al al Ing. Miguel Orozco Alvarado por facilitarme material y equipo.

Y finalmente a CIMAV y CONACyT por ser Instituciones que apoyan y fortalecen el desarrollo de la ciencia en México.

¡Gracias a todos y a cada uno de ustedes!