



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES
AVANZADOS, S.C.**

POSGRADO

**Optimización del Sistema ϕ -OTDR, mediante el desarrollo
de una fuente de luz coherente especial y la selección de
fibras ópticas sensibles.**

Tesis que como requisito para obtener el grado de
Doctor en Ciencia de Materiales presenta:

M.C. José Luis Bueno Escobedo

Director de tesis: **Dr. Alfredo Márquez Lucero**

Co-Director de tesis: **Dr. Vasili Spirine Sudarkina**

Chihuahua, Chih., agosto de 2017

Dedicatoria:

Para mi familia.

Agradecimientos:

A mi **Mamá**, por apoyarme siempre y guiarme por un buen camino, gracias por tenerme paciencia.

A mi **hermana y sobrinos**, que sin ellos esta tesis se hubiera escrito más rápido, aun así, son lo mejor que me ha pasado.

Al **Dr. Alfredo Márquez**, por confiar en mí y apoyarme en las decisiones.

Al **Dr. Vasili Spirine** por guiarme y entregarme su conocimiento.

A mis sinodales, **el Dr. Antonino Pérez, Dr. José Duarte, Dr. Luis Fuentes**, por enfocarme y apoyar la realización de esta tesis, y en especial al **Dr. Joel Santos** por sus recomendaciones.

Al equipo **Beach-Olas**: Cesar, Ramon, Soto, Miguel, entre otros, por hacer mi estancia en **CICESE** más amena y compartir esas grandes experiencias.

Al **personal de CIMAV**, por su paciencia y apoyo en la administración.

A mis **amigos en general** por compartir esos buenos momentos.

Al **CIMAV y CONACyT** por el apoyo económico en la realización de esta tesis.

Índice

Resumen.....	6
Lista de Figuras	7
Lista de Tablas.....	8
Capítulo I, Introducción.....	9
1.1 Motivación	9
1.2 Antecedentes	11
1.2.1 Sensores distribuidos de fibra óptica.....	11
1.2.2 Sistema de reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR).....	12
1.2.3 Sistema de reflectometría óptica en el dominio del tiempo sensible a la fase (ϕ -OTDR).....	13
1.2.4 Fuente de luz coherente.....	15
1.2.5 Fibra óptica como medio sensible en el sistema ϕ -OTDR.....	17
1.2.6 Fibras ópticas.....	18
1.3 Hipótesis	19
1.4 Objetivos	19
1.4.1 Objetivo general.....	19
1.4.2 Objetivos particulares	19
Capítulo II, Refractómetro óptico coherente del dominio del tiempo, ϕ -OTDR.....	20
2.1 Esquema experimental de fibra óptica del sistema ϕ -OTDR.....	20
2.2 Efectos de la potencia del láser y ancho de pulso en el sistema.....	22
2.3 Longitud de sensado, resolución espacial y rango de frecuencias para un sistema ϕ -OTDR.....	24
2.3.1 Longitud de sensado.....	24
2.3.2 Resolución espacial.....	24
2.3.3 Rango de frecuencias de perturbación que puede detectar el sistema ϕ -OTDR.....	25
2.3 Algoritmo de procesamiento para la detección y localización de la perturbación.....	27
2.4 Resultados.....	29
Capítulo III, Caracterización de fibras.....	31
3.1 Análisis EDS.....	31
3.2 Análisis de traza retrodispersada mediante el sistema ϕ -OTDR.....	36
3.2.1 Promedio de la potencia retrodispersada.....	37

3.2.2 Relación entre potencia retrodispersada y porcentaje de germanio por unidad de área.	38
3.2.3 Detección de perturbación con diferentes fibras de sensado.	39
3.2.4 Relación señal-ruido, SNR	41
3.3 Resultados.	42
Capítulo IV, Fuente de luz coherente especial para el sistema ϕ -OTDR.	43
4.1 Regímenes de acoplamiento de la cavidad resonante de fibra óptica para el encadenamiento del láser DFB mediante la técnica de auto-inyección.....	43
4.2 Medición del ancho de línea en los diferentes regímenes de acoplamiento.....	51
4.3 Comportamiento de la polarización en el encadenamiento por auto-inyección de un láser DFB a través de un FORR.....	54
4.4 Resultados.	59
Capítulo V, Láser IL-DFB y fibra seleccionada como elemento sensitivo en el sistema ϕ -OTDR.	60
5.1 Láser IL-DFB en un sistema ϕ -OTDR.....	60
5.2 Resultados.	67
Capítulo VI. Conclusiones generales.....	68
Referencias.....	70

Resumen.

Tras el desarrollo del láser de semiconductor y las fibras ópticas de baja pérdida, se crea lo que hoy se le puede llamar la era de la comunicación y la información. Sin embargo, como toda tecnología puede tener varias aplicaciones, estos dos grandes desarrollos no son la excepción.

Los sistemas de reflectometría óptica en el dominio del tiempo sensible a la fase (ϕ -OTDR), son un tipo de sensor distribuido de fibra óptica, capaces de sensar temperatura, presión, tensión y vibraciones. El estudio y desarrollo de estos sistemas es de gran importancia debido a su amplia gama de aplicaciones tales como, el monitoreo de la integridad de estructuras, hasta la detección de fugas o daños en ductos, y la detección de intrusos en sistemas de seguridad perimetral.

El presente trabajo se enfoca en la caracterización de la fibra óptica como elemento sensible y al desarrollo de una fuente de luz coherente especial para el sistema ϕ -OTDR.

La primera parte habla de generalidades del sistema ϕ -OTDR, esquema de fibra óptica experimental y parámetros como potencia del láser, ancho de pulso, frecuencia de muestreo, ancho de línea y sus consecuencias.

En la segunda parte, se observan las características de las fibras ópticas que las hacen mejor elemento sensible, se establece una dependencia experimental entre la potencia retrodispersada y el contenido de germanio en el núcleo de las fibras, para su óptima selección.

En la tercera parte, se propone un esquema de fibra óptica, para el encadenamiento de un láser DFB por auto-inyección a través de un anillo resonador de fibra óptica, para la reducción de su ancho de línea, se observó una reducción de 1000 veces. Se estudian los regímenes de acoplamiento y su comportamiento de polarización.

Por último, se emplea la fibra óptica con mejor comportamiento como elemento sensible y la fuente de luz coherente especial en un esquema de fibra óptica del sistema ϕ -OTDR, con una longitud de sensado de 10 kilómetros.

Palabras clave: ϕ -OTDR, porcentaje de germanio en núcleo, FORR, encadenamiento por auto-inyección, ancho de línea y longitud de sensado.

Lista de Figuras

Figura 1 Traza de OTDR.....	13
Figura 2 Diagrama de bloques del sistema ϕ -OTDR, se representa con una flecha truncada a la mitad la señal óptica, mientras que la señal eléctrica mantiene la flecha completa.	14
Figura 3 Interferómetro Fabry-Perot formado por dos espejos semi-reflejantes.	16
Figura 4 Representación gráfica de la transmisión de un rayo de luz en una fibra óptica ideal.	18
Figura 5 Esquema experimental de fibra óptica para el sistema ϕ -OTDR.....	20
Figura 6 Ventana de 1ms de registro por el osciloscopio. ventana superior: pulsos inyectados a la fibra óptica de sensado. Ventana inferior: traza de retrodispersión.	21
Figura 7 Ventana superior: pulso inyectado a la fibra. Ventana inferior: Traza de retrodispersión correspondiente a un pulso inyectado.....	21
Figura 8 Ventanas de retrodispersión de los láseres OEwaves (ventana superior) y TERAXION (ventana inferior).	22
Figura 9 Ventanas de 10 ms de trazas de retrodispersión con diferentes anchos de pulso. Ventana superior, retrodispersión con ancho de pulso de 150ns. Ventana intermedia, retrodispersión con ancho de pulso de 250ns. Ventana Inferior, retrodispersión con ancho de pulso de 350ns.	23
Figura 10 Aplicación de la transformada rápida de Fourier a las trazas de retrodispersión con perturbaciones de 80 Hz, 300 Hz, 500 Hz y 700 Hz respectivamente.	26
Figura 11 Trazas consecutivas, mostrando diferencias entre si.....	27
Figura 12 Traza promedio derivada de 30 trazas, N=30.	28
Figura 13 Porcentaje de germanio por unidad de área (%Ge/UA) presente en el núcleo para cada fibra óptica.	35
Figura 14 Energía retrodispersada en cada fibra óptica de sensado.	38
Figura 15 Potencia retrodispersada normalizada contra porcentaje de germanio por unidad de área presente en el núcleo de cada fibra.....	39
Figura 16 Relación señal-ruido para cada fibra.....	41
Figura 17 esquema óptico experimental. CO: Circulador óptico, CP: Controlador de polarización, C: acoplador, SO: interruptor óptico, VRC: Acoplador óptico variable y FORR: Anillo resonador de fibra óptica.	44
Figura 18 Potencia reflejada (Puerto B) y transmitida (Puerto C).	45
Figura 19 Potencia reflejada (figura izquierda) y transmitida reflejada (figura derecha) contra coeficiente de acoplamiento k_1 , los puntos en las gráficas representan los valores experimentales mientras que la línea continua son los valores teóricos de acuerdo a las ecuaciones 22 y 23.	49
Figura 20 Mínimo experimental para potencia reflejada (Puerto B) en régimen de acoplamiento crítico.	50
Figura 21 Esquema óptico para la técnica de medición de ancho de línea, Delayed self-heterodyne.	51

Figura 22 Espectro delayed self-heterodyne para el láser en emisión normal, o no encadenado.....	52
Figura 23 Espectro delayed self-heterodyne para el láser en acoplamiento crítico.	52
Figura 24 Anchos de línea del láser DFB encadenado contra el factor de acoplamiento k.....	53
Figura 25 Configuración experimental del láser DFB acoplado a una cavidad de fibra óptica externo.....	54
Figura 26 trazas de osciloscopio de los puertos B y C.	55
Figura 27 Eventos de salto de modo (figura derecha), las trazas muestran los dos diferentes regímenes de salto de modo; y comportamiento flip-flop de los estados de polarización (figura izquierda) de potencia transmitida (Puerto C) en el segundo.	57
Figura 28 a) puerto A, salida del láser, b) puerto B, potencia reflejada, c) puerto C, potencia transmitida. Las flechas muestran los estados de polarización medidos.	58
Figura 29 Circuito óptico del láser IL-DFB (DFB encadenado a través del FORR); CO, circulador óptico, C, acoplador, CP, controlador de polarización, SO, interruptor óptico.	61
Figura 30 Espectro de emisión bajo la técnica delayed self-heterodyne del láser IL-DFB.....	61
Figura 31 Traza típica de osciloscopio de las potencias reflejado (Puerto B) y transmitido (Puerto C) en el régimen de acoplamiento crítico.	62
Figura 32 Circuito óptico para la detección de la perturbación en la fibra de sensado.	63
Figura 33 Relación señal-ruido en función del cambio m.	64
Figura 34 Superposición de los valores absolutos de la diferencia entre las trazas promedio del láser IL-DFB.	65
Figura 35 Superposición de los valores absolutos de la diferencia entre las trazas promedio del láser ultra-estrecho ancho de línea OEwaves OE4020-155000-PA-00. .	66

Lista de Tablas.

Tabla 1 Velocidad de muestreo (MSPS-Mega Samples Per Second).....	25
Tabla 2 Parámetros de fibras ópticas.	31
Tabla 3 Perfil ortogonal del núcleo de las fibras de sensado y mapeo elemental de silicio y germanio respectivamente.....	32
Tabla 4 Espectro EDS realizado en el núcleo de las fibras de sensado.	33
Tabla 5 Porcentaje de Germanio presente en el núcleo de la fibra por unidad de área.	34
Tabla 6 Promedio de trazas retrodispersadas en cada fibra óptica.	37
Tabla 7 Superposición de trazas resta.	40

Capítulo I, Introducción.

1.1 Motivación

En 1915 Albert Einstein estableció los principios de emisión estimulada para el desarrollo del láser, sin embargo, no fue hasta 1953 cuando Charles Townes apoyándose en este principio desarrollo el *maser* el cual producía un rayo coherente de microondas. Siendo hasta 1958 cuando Townes y Schawlow proponen extender el concepto del *maser* a frecuencias ópticas. En 1960, el primer láser por Theodore Maiman y en 1962 el primer láser semiconductor demostrado por R. Hall (Silfvast, 2004).

Por otro lado, en 1870 John Tyndall demostró que una corriente de agua podía guiar la luz. Y hasta 1970 los doctores Robert Maurer, Peter Schultz y Donald Keck trabajaron para reducir las pérdidas en una fibra óptica de 1000dB/km a solo 20 dB/km cuyas pérdidas son comparables a un cable de cobre (Yeh, 1989 y Hecht 2010).

Fueron estos dos acontecimientos, el desarrollo del láser de semiconductor y las fibras ópticas de baja pérdida, los que crearon lo que hoy podemos llamar la era de la comunicación y la información.

Pero, como toda tecnología puede tener varios usos, estos desarrollos abrieron el campo para el estudio de los sensores distribuidos de fibra óptica, donde su principal característica es usar la fibra óptica, en toda su longitud como sensor, haciendo de esta un sensor distribuido de fibra óptica.

Este tipo de sensores presentan ventajas tales como: su bajo peso, inmunidad a interferencias electromagnéticas y al no existir pulsos eléctricos en la fibra óptica, no hay problema al ser instalados en ambientes explosivos.

Sus aplicaciones son la detección de temperatura, presión, tensión y vibraciones mecánicas, las cuales se presentan en el monitoreo de la integridad de estructuras civiles como puentes y edificios, hasta la detección de fugas o daños en ductos, así como la detección de intrusos en sistemas de seguridad perimetral (Shi et al 2016; Peng et al 2014; Wang et al 2015).

El estudio de esta tesis se centra en el sistema de reflectometría óptica en el dominio del tiempo sensible a la fase, o por sus siglas en inglés ϕ -OTDR (Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometer), el cual se optimiza mediante la caracterización del sensor de fibra óptica y el auto-encadenamiento por inyección óptica de un láser DFB.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Sensores distribuidos de fibra óptica.

Los sensores distribuidos de fibra óptica son llamados sensores intrínsecos y se caracterizan por utilizar la fibra óptica como transductor del parámetro físico de interés al alterar sus propiedades ópticas. (Grattan y Sun, 2000).

En general un campo óptico monocromático $\vec{E}(\vec{r}, t)$ puede ser representado como:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}, t)e^{i(\omega t + \phi(\vec{r}, t))} \quad (1)$$

Donde $\vec{A}(\vec{r}, t)$ es la amplitud compleja del campo de luz, ω la frecuencia angular del campo de luz monocromático y $\phi(\vec{r}, t)$ es la fase del campo complejo.

Los siguientes parámetros del campo óptico monocromático, puede estar sujetos a cambios debido a una perturbación externa en la fibra óptica:

- La polarización (dirección del campo eléctrico), perturbaciones como estrés o tensión provocan cambios en la birrefringencia de la fibra y esto a su vez genera cambios en la polarización de la luz.
- La amplitud (o intensidad $I(\vec{r}, t) = |\vec{A}(\vec{r}, t)|^2$), al ser doblada la fibra óptica se genera una pérdida que se traduce en cambios de amplitud.
- La frecuencia ($f = \omega/2\pi$ o longitud de onda del campo eléctrico λ), este parámetro puede verse afectado por fenómenos como la electrostricción (que genera ondas acústicas en la fibra) o cambios de energía en los fotones que se ven reflejados por cambios de frecuencia o longitud de onda.
- La fase $\phi(\vec{r}, t)$, cambios pequeños en el camino óptico pueden resultar en cambios grandes en el cambio de fase.

Detectando estos parámetros y sus cambios la perturbación externa puede ser sensada (Yu y Yin, 2002).

1.2.2 Sistema de reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR).

Basado en la dispersión Rayleigh, la cual consta de la reemisión de fotones de la misma frecuencia (y longitud de onda) por las moléculas que está compuesta la fibra, es decir, la luz se dispersa elásticamente, esta técnica detecta la señal retrodispersada como función de la distancia.

Cuando un pulso de luz es inyectado a la fibra óptica, una fracción de la luz inyectada es dispersada (debido a la dispersión Rayleigh) en contra-propagación (180° de la dirección incidente) y capturada por la apertura numérica (NA) de la fibra para ser guiada hacia la fuente de luz, esta fracción de luz, se le llama luz retrodispersada o señal retrodispersada.

Matemáticamente la intensidad de la potencia (flujo de energía por unidad de tiempo a través de un área unidad) de la luz retrodispersada, P_s , es dada por:

$$P_s(t) = P_0 r(z) e^{-\int_0^z 2\alpha(z) dz} \quad (2)$$

Donde P_0 es una constante determinada por la energía del pulso inyectado, $z = tc/2n$, refleja la localización del pulso inyectado en el tiempo t (donde c es la velocidad de la luz en el vacío y n es el índice de refracción de la fibra), $r(t)$ es el coeficiente de reflexión de retrodispersión efectivo por unidad de longitud (toma en cuenta el coeficiente de retrodispersión de rayleigh y la apertura numérica), y $\alpha(z)$ es el coeficiente de atenuación (Yu y Yin, 2002).

La señal retrodispersada es detectada por un fotodetector en función de la distancia que recorre el pulso inyectado, al aplicar $\log(P_s)$ al eje vertical se observa la gráfica generada en la figura 1, la cual es llamada traza.

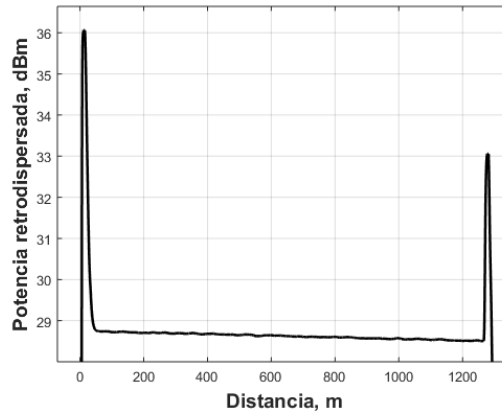


Figura 1 Traza de OTDR.

Como lo muestra la figura 1 la intensidad de la potencia retrodispersada decae uniformemente en una fibra homogénea, donde la pendiente de esta es el coeficiente de atenuación de la fibra ($\alpha(z)$), que indica la pérdida de potencia que tendría una señal inyectada en la fibra por unidad de longitud (las fibras estándar de comunicaciones tienen un coeficiente de atenuación de 0.2dB/km). El perfil de la pendiente puede ser modificado si existiera alguna fusión de fibra (caída de potencia) o algún defecto de fabricación en ella, por ejemplo, los dos crecientes de potencia que se observan al inicio y final del perfil de la gráfica, son debido a los conectores, donde los cambios de índice de refracción son grandes, existe una mayor reflexión de potencia.

Entonces, la intensidad de la potencia retrodispersada de una localización específica refleja el estado de la fibra en esa localización por lo tanto un sentido distribuido se puede realizar.

1.2.3 Sistema de reflectometría óptica en el dominio del tiempo sensible a la fase (ϕ -OTDR).

Los sistemas ϕ -OTDR trabajan como un OTDR convencional, sin embargo, a diferencia el sistema ϕ -OTDR usa una fuente de luz coherente.

En esta sección y en todo el trabajo, se refiere a luz coherente, aquella bajo el concepto de coherencia temporal, el cual se define como el intervalo temporal

en el que podemos predecir razonablemente la fase de la onda en un punto dado en el espacio. También se puede expresar en términos de longitud, la longitud de coherencia, es la extensión en el espacio en el que la onda conserva su perfil y su fase puede predecirse con seguridad (la duración temporal correspondiente es el tiempo de coherencia) (Hecht 2010).

Una de las condiciones para que el sistema ϕ -OTDR funcione, es que el tiempo de coherencia exceda el tiempo que dura el pulso inyectado en la fibra más el tiempo en el que la luz retrodispersada llega al fotodetector.

En estos sistemas, un pulso de luz coherente (como se muestra en el siguiente diagrama de la figura 2) es inyectado a la fibra óptica de sensado mediante un circulador, y es por este mismo que la señal retrodispersada es adquirida para su posterior procesamiento.

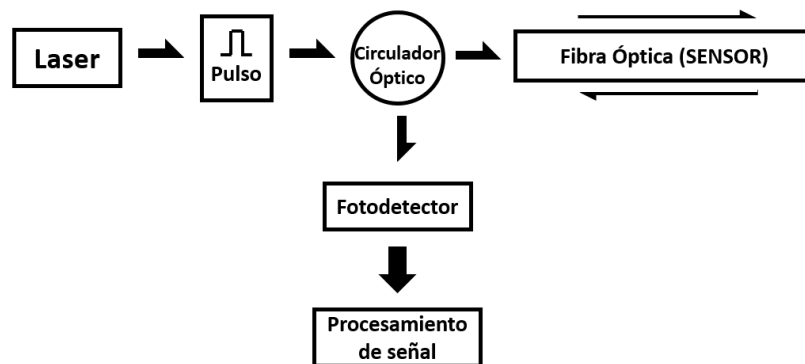


Figura 2 Diagrama de bloques del sistema ϕ -OTDR, se representa con una flecha truncada a la mitad la señal óptica, mientras que la señal eléctrica mantiene la flecha completa.

La estabilidad de la fuente de luz debe mantener cambios pequeños de frecuencia para no afectar notablemente la potencia de la luz retrodispersada de los múltiples interferómetros de espejo con la longitud igual al espacio ocupado por el pulso de prueba en la fibra. Bajo esta condición dos trazas consecutivas para la fibra no perturbada deberían ser casi idénticas. Mientras tanto cualquier cambio en las imperfecciones estáticas del índice de refracción de la fibra debido a la variación del esfuerzo, tensión o temperatura en alguna parte a lo largo de la fibra de prueba, inmediatamente conduce a la diferencia entre trazas

consecutivas y por lo tanto puede ser detectado y localizado (Lu et al 2010; Li et al 2014; Li et al 2014; Zhan et al 2015).

1.2.4 Fuente de luz coherente.

Los láseres de semiconductor son fuentes de luz con alta coherencia, donde su tiempo de coherencia t_c esta definido por (Hecht 2010):

$$t_c = \frac{l_c}{c} \quad (3)$$

Donde l_c es la longitud de coherencia y c es la velocidad de la luz en el vacío. El recíproco de este valor, es un parámetro importante en los láseres de semiconductor llamado ancho de línea $\Delta\nu$, el cuál es el ancho de banda o amplitud de frecuencias presentes que emite el láser, estableciéndolo de la siguiente manera por fines prácticos:

$$l_c = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (4)$$

Donde podemos observar que un reducido ancho de línea es fundamental para tener mayor longitud de coherencia, por lo tanto, mayor longitud de sensado en el sistema φ -OTDR.

La técnica de retroalimentación óptica de un láser, es utilizada para la reducción del ancho de línea (entre otras mejoras), esta técnica implica hacer incidir un haz de luz en la cavidad del láser, de esta manera, la cavidad se encadena a una de las frecuencias de la luz incidente para provocar cierta inestabilidad. Dependiendo de la intensidad de la retroalimentación existen 5 regímenes, en el que el régimen no. 5 (arriba del 10% de retroalimentación) se observa una gran reducción del ancho de línea; sin embargo, desde los regímenes 1, 2 y 3 (0.01 a 0.1 % de retroalimentación) se observa cierta reducción (Ohtsubo, J. 2008).

Para la retroalimentación a la cavidad del láser de semiconductor, se proponen técnicas como: inyección óptica de otro láser, retroalimentación por espejo plano,

retroalimentación por conjugación de fase, retroalimentación por rejilla óptica, retroalimentación por opto-electrónica y retroalimentación por resonador Fabry-Perot.

Los anillos resonantes de fibra óptica o FORR por sus siglas en inglés (fiber optic ring resonator), pueden ser usados como filtros (Stokes et al 1982; Seraji, 2009), mejorando las características que retroalimentan a la cavidad del láser.

La configuración del FORR formada por dos acopladores ópticos se comporta como un interferómetro Fabry-Perot (Rao, et al, 2011; Urquharz, 1988), formado por dos espejos semi-reflejantes con un campo de entrada, una parte reflejada, el campo que es inducido a la cavidad, y el campo de salida de la cavidad, como se muestra en la figura 3.

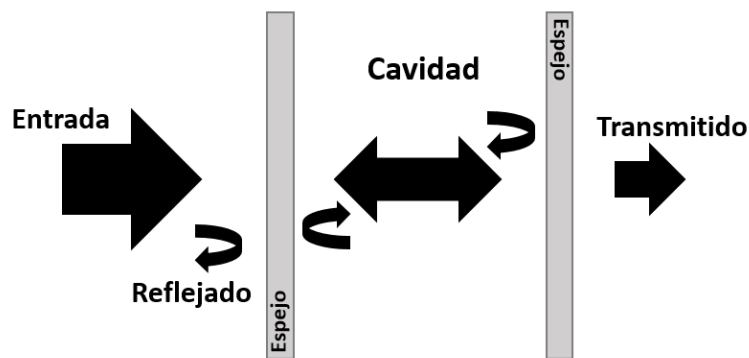


Figura 3 Interferómetro Fabry-Perot formado por dos espejos semi-reflejantes.

La cavidad formada por los dos espejos, soporta solo la luz transmitida dentro de la cavidad de aquellas ondas que al sufrir un cambio de fase de 180 grados en el espejo derecho (figura 3) continúe su propagación y después de sufrir el mismo cambio de fase en el espejo izquierdo mantenga el mismo perfil. Existen varias longitudes de onda que soporta el resonador llamados modos longitudinales.

En este trabajo se propone el encadenamiento por auto-inyección de un láser DFB a través de un FORR, para la reducción de su ancho de línea.

1.2.5 Fibra óptica como medio sensible en el sistema φ -OTDR.

En los sistemas φ -OTDR el elemento sensible a la perturbación externa es la fibra óptica, dependiendo de ella que la señal sea visible. Una forma de medir la calidad de la señal retrodispersada es medir su relación señal-ruido, SNR (signal noise rate), la cual es una relación del valor de la señal entre el valor promedio del ruido.

Para el aumento de SNR, la técnica más utilizada es la detección coherente, donde el principio básico consiste en combinar la señal óptica coherente con un oscilador local antes de llegar al detector (Lu, et al, 2010; Ren, et al, 2016), mientras que otros intentan compensar la variación de frecuencia del láser mediante modelos matemáticos en la etapa de procesamiento de señal y así elevar el SNR (Zhu, et al, 2015).

Para aumentar las características como elemento sensible en el sistema φ -OTDR, se ha propuesto la exposición de fibra óptica de telecomunicaciones a luz ultravioleta, incrementando drásticamente los centros de dispersión (Loranger, et al 2015).

1.2.6 Fibras ópticas.

La transmisión de luz en una fibra óptica es posible a la refracción total interna, figura 4, en la que la luz al incidir con un ángulo de aceptación θ (relacionado con la apertura numérica), es totalmente reflejada (Senior 2009) al tratar de pasar de un medio con índice de refracción mayor (núcleo de la fibra óptica) a un medio con menor índice de refracción.

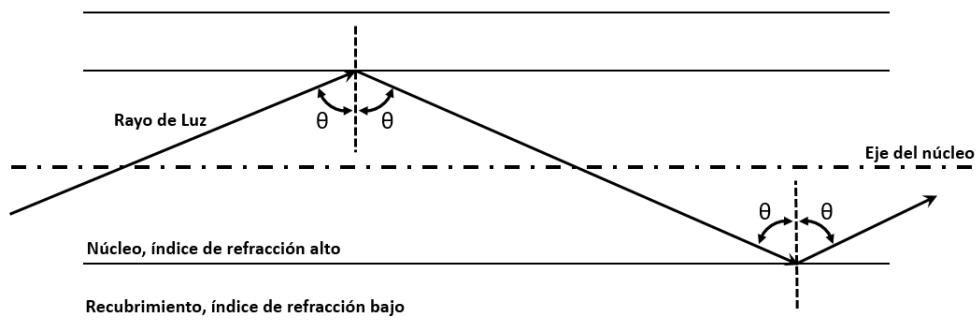


Figura 4 Representación gráfica de la transmisión de un rayo de luz en una fibra óptica ideal.

Para que exista una diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el recubrimiento de la fibra óptica, se agregan diferentes dopantes a la matriz base (óxido de silicio SiO_2) como Germanio, Aluminio y Fosforo utilizados para aumentar el índice de refracción, mientras el Boro y Flúor son utilizados para disminuir el índice de refracción (Keiser, 1991).

En este trabajo se caracterizan diferentes fibras ópticas comerciales para determinar cuál es la característica que aumenta el SNR en el esquema de retrodispersión.

1.3 Hipótesis

Se puede optimizar el sistema ϕ -OTDR mediante la caracterización y selección de la fibra óptica como medio sensible, y desarrollando una fuente de luz coherente especial mediante el método de encadenamiento por auto-inyección para la reducción de su ancho de línea.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar una fuente de luz coherente especial y caracterizar fibras ópticas para su selección como medio sensible de un sistema de reflectometría óptica en el dominio del tiempo sensible a la fase (ϕ -OTDR).

1.4.2 Objetivos particulares

Estudiar el sistema ϕ -OTDR, esquemas y parámetros.

Caracterizar fibras ópticas para la evaluación de su desempeño como medio sensible del sistema ϕ -OTDR.

Desarrollar una fuente de luz coherente especial basado en encadenamiento por inyección óptica de un láser DFB con anillo de fibra óptica para reducir su ancho de línea.

Estudio teórico y experimental de los regímenes de acoplamiento de la cavidad resonante de fibra óptica para el encadenamiento de láser DFB mediante la técnica de auto-inyección.

Estudio experimental del comportamiento de la polarización en el encadenamiento por auto/inyección de un láser DFB a través de un FORR.

Estudio experimental del sistema ϕ -OTDR.

Capítulo II, Refractómetro óptico coherente del dominio del tiempo, ϕ -OTDR.

En este capítulo se presenta el esquema experimental de fibra óptica utilizado en el sistema ϕ -OTDR, así como parámetros necesarios en la adquisición de la señal retrodispersada y su procesamiento.

2.1 Esquema experimental de fibra óptica del sistema ϕ -OTDR

La figura 5 presenta el esquema experimental de fibra óptica del sistema ϕ -OTDR, en el cual, la radiación proveniente del láser pasa a través del modulador de intensidad, para ser modulada la intensidad óptica de la radiación. Adyacentemente pasa por un acoplador óptico C donde una porción (el 1%) de la luz es detectada por un fotodetector de 125 MHz de ancho de banda (Detector 1), la otra parte de la luz (el 99%) pasa a través de un circulador óptico CO y es inyectada a la fibra óptica utilizada como sensor (F.O.) en el puerto 2 del circulador óptico. La perturbación es generada 100 metros antes del final de la fibra óptica, por medio de una membrana de oscilación conectada a un generador de funciones.

La luz retrodispersada es adquirida en el puerto 3 del circulador óptico por un fotodetector de 125 MHz de ancho de banda (Detector 2) y un osciloscopio, la señal eléctrica proveniente del detector 2 es amplificada por el amplificador eléctrico.

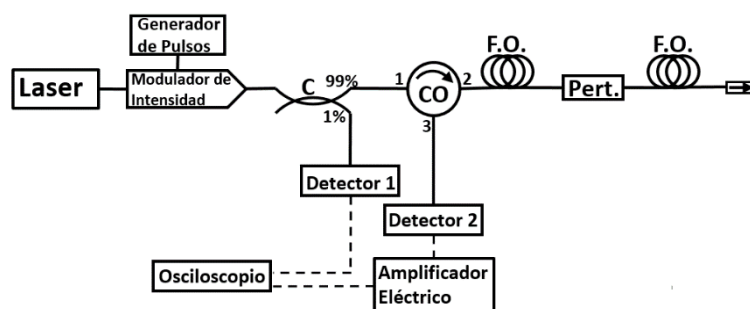


Figura 5 Esquema experimental de fibra óptica para el sistema ϕ -OTDR.

La figura 6 se muestra dos ventanas de 1ms registradas con el osciloscopio sin perturbación en la fibra de sensado, la ventana superior proviene del Detector 1 donde se observan los pulsos inyectados y en la ventana inferior se muestran las trazas de la luz retrodispersada.

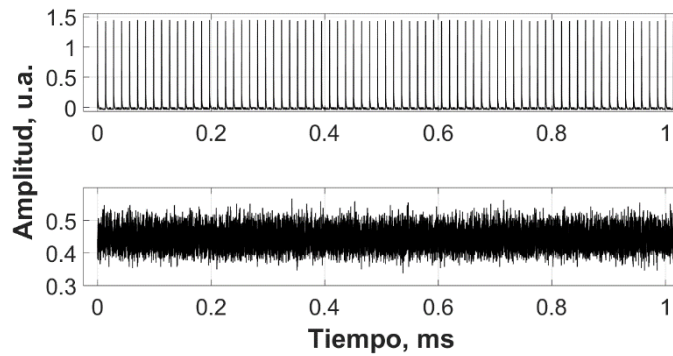


Figura 6 Ventana de 1ms de registro por el osciloscopio. ventana superior: pulsos inyectados a la fibra óptica de sensado. Ventana inferior: traza de retrodispersión.

Posteriormente se corta la traza de retrodispersión correspondiente a cada pulso inyectado a la fibra, como se muestra en la figura 7 para analizar 3550 trazas de retrodispersión.

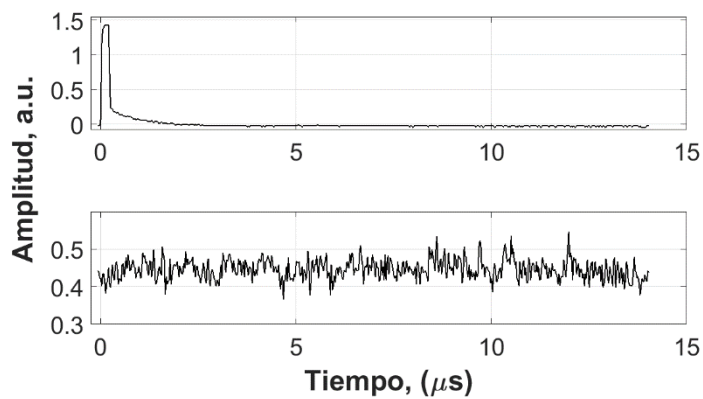


Figura 7 Ventana superior: pulso inyectado a la fibra. Ventana inferior: Traza de retrodispersión correspondiente a un pulso inyectado.

2.2 Efectos de la potencia del láser y ancho de pulso en el sistema.

Para observar los efectos que generan distintas potencias de láseres se utilizaron dos láseres de diferentes potencias, un láser OEwaves de 11mW con un ancho de línea de 300Hz y el otro láser TERAXION de 80mW con ancho de línea de 5kHz, ambos de 1550 nm de longitud de onda, observándose mayor energía en la retrodispersión con el láser TERAXION, contando con un promedio de 0.3 en amplitud, mientras que el láser OEwaves obtuvo un 0.09 mostrado en la figura 8, sin embargo esta mayor energía que presenta el láser TERAXION y debido a que el modulador de intensidad no es capaz de eliminar completamente el paso de radiación (puesto que su relación de extinción es de 22 dB), esta energía en el sistema hace que exista mayor ruido en las trazas retrodispersadas.

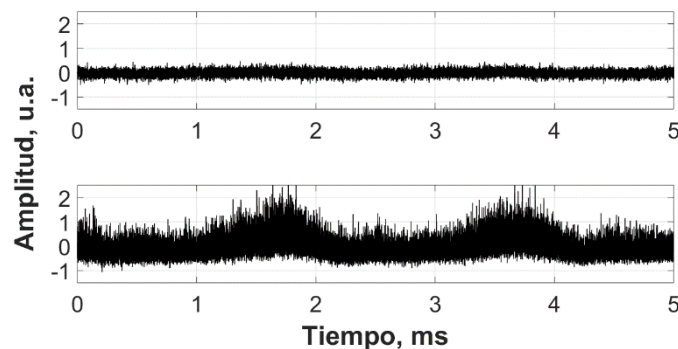


Figura 8 Ventanas de retrodispersión de los láseres OEwaves (ventana superior) y TERAXION (ventana inferior).

La figura 9 muestra las trazas de retrodispersión para los anchos de pulso de 150ns, 250ns y 350ns respectivamente, observándose un incremento del 10% en el promedio de la energía retrodispersada entre el pulso de 150ns y 250ns, mientras que entre el pulso de 250ns a 350ns se observa un 30% de incremento en la energía retrodispersada.

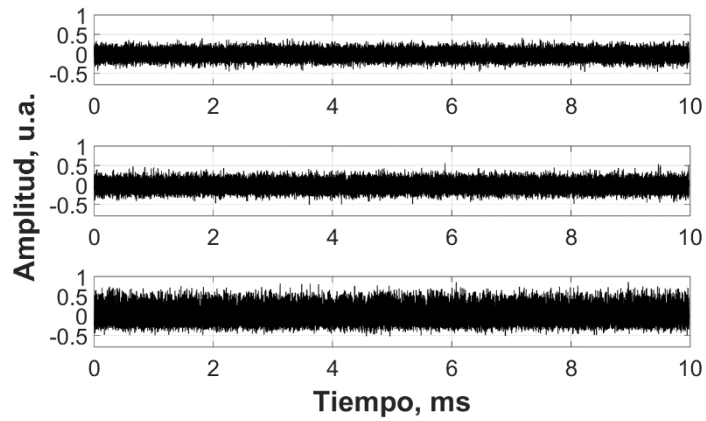


Figura 9 Ventanas de 10 ms de trazas de retrodispersión con diferentes anchos de pulso. Ventana superior, retrodispersión con ancho de pulso de 150ns. Ventana intermedia, retrodispersión con ancho de pulso de 250ns. Ventana Inferior, retrodispersión con ancho de pulso de 350ns.

Se observa que existe un incremento de la energía en el sistema al aumentar el ancho del pulso inyectado a la fibra óptica de sensado sin aumentar significativamente el ruido en este mismo.

2.3 Longitud de sensado, resolución espacial y rango de frecuencias para un sistema ϕ -OTDR.

2.3.1 Longitud de sensado

La longitud de sensado para un sistema ϕ -OTDR está relacionada con la longitud de coherencia L_c del láser utilizado como fuente de luz, y está dada por la siguiente ecuación (Muanenda et al 2016), difiriendo de la ecuación 4 debido a que el medio de propagación es la fibra óptica:

$$L_c = \frac{c}{\pi N_{eff} \Delta\nu} \quad (5)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el espacio libre, N_{eff} es el índice de refracción de grupo efectivo, utilizado en fibras ópticas porque es el índice de refracción que experimenta un modo de propagación en relación a su velocidad de grupo (Senior 2009), y $\Delta\nu$ es el ancho de línea del láser.

Siendo la longitud de sensado L_s la mitad de la longitud de coherencia del láser, debido a que tanto la luz inyectada (en forma de pulso) a la fibra óptica y la luz retrodispersada tienen que mantenerse coherentes en todo su trayecto, por lo tanto, la longitud de sensado es definida como:

$$L_s = \frac{1}{2} * L_c \quad (6)$$

2.3.2 Resolución espacial.

La resolución espacial Δz del sistema ϕ -OTDR está determinada por el ancho de pulso inyectado (Yu y Yin 2002) mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta z = \frac{c * T}{2 * N_{eff}} \quad (7)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el espacio libre, T es el tiempo del ancho de pulso y N_{eff} es el índice de refracción efectivo de la fibra óptica.

Entonces un pulso de ancho de 150ns nos da una resolución espacial de aproximadamente de 15m. Sin embargo, la velocidad de muestreo con la que se adquieren los datos, juega un papel importante ya que esta determina el tiempo entre cada muestra adquirida y por lo tanto una resolución espacial.

En la tabla 1 se muestran algunas de las velocidades de muestreo, así como su resolución espacial.

Tabla 1 Velocidad de muestreo (MSPS-Mega Samples Per Second).

MSPS	Tiempo entre muestras	Resolución
200	5 ns	0.5 m
100	10 ns	1 m
40	25 ns	2.5 m
20	50 ns	5 m

2.3.3 Rango de frecuencias de perturbación que puede detectar el sistema ϕ -OTDR.

La frecuencia máxima f de perturbación que se puede detectar en el sistema ϕ -OTDR está en función de la distancia de sensado, y es determinada por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{c}{2 * N_{eff} * d} \quad (8)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el espacio libre, N_{eff} es el índice de refracción efectivo y d es la distancia de sensado.

El análisis de la frecuencia de perturbación se lleva a cabo en los datos de la ventana completa de trazas de retrodispersión (figura 6 inferior), donde se

cambia la señal en el dominio de tiempo al dominio de la frecuencia, y se realiza mediante la transformada rápida de Fourier (FFT).

Para la aplicación de la transformada rápida de Fourier es necesaria una ventana grande de adquisición, del orden de los segundos, debido a que el rango de frecuencias que muestra la FFT está sujeto a la cantidad de muestras recogidas y la velocidad de muestreo.

La figura 10 muestra la transformada rápida de Fourier aplicada a la ventana de trazas de retrodispersión de 2 segundos cuando se aplicó una perturbación sinusoidal (mediante la membrana de oscilación) de 80 Hz, 300 Hz, 500 Hz y 700 Hz respectivamente, se observan resonancias al menos en las perturbaciones de 80 Hz y 300 Hz, las cuales se atribuyen a la membrana de oscilación.

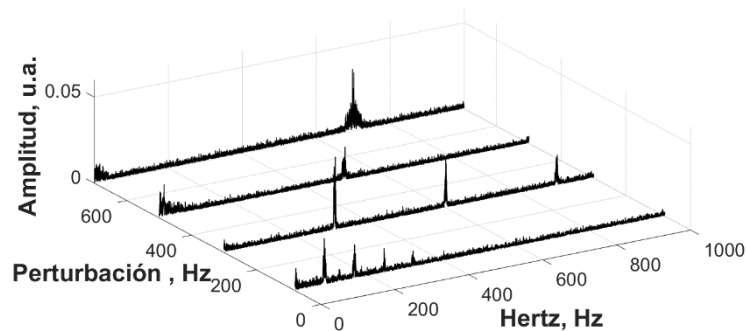


Figura 10 Aplicación de la transformada rápida de Fourier a las trazas de retrodispersión con perturbaciones de 80 Hz, 300 Hz, 500 Hz y 700 Hz respectivamente.

2.3 Algoritmo de procesamiento para la detección y localización de la perturbación.

Idealmente las trazas de retrodispersión del sistema ϕ -OTDR al no existir perturbación deben ser idénticas entre si. Sin embargo, en condiciones normales, cambios en el medio ambiente de presión y temperatura, y también cambios en la frecuencia del láser hacen que existan variaciones entre trazas consecutivas como se muestra en la figura 11, por esta razón, en el procesamiento de la señal se trabaja con promedios de las trazas.

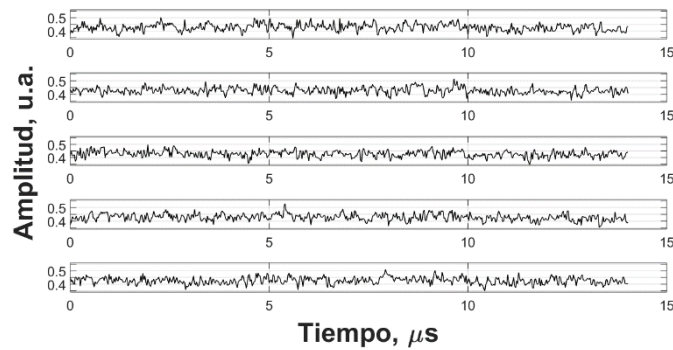


Figura 11 Trazas consecutivas, mostrando diferencias entre si.

Una traza promedio \bar{s}_n para cada tiempo entre las trazas está definido como (Lizárraga 2012):

$$\bar{s}_n(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i(t) \quad (9)$$

Donde N es el número de trazas a promediar y $s_i(t)$ es una traza a promediar. La figura 12 muestra una traza promedio derivada de 30 trazas como las mostradas en la figura 11.

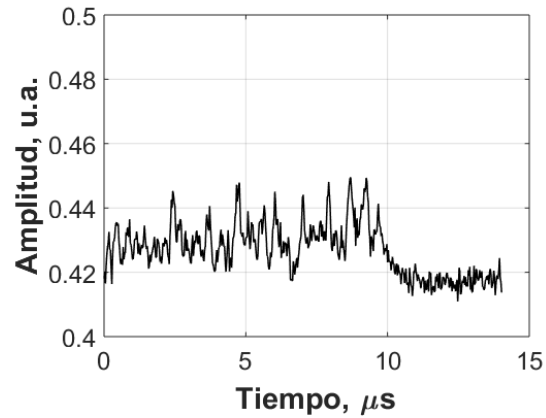


Figura 12 Traza promedio derivada de 30 trazas, $N=30$.

Una vez obtenidos todos los promedios, se procede a restarlos entre si, bajo el siguiente algoritmo:

$$R_n = \bar{s}_{n+1} - \bar{s}_n \quad (10)$$

Donde R_n es una traza resta, y $n = 1, 2, \dots, no. de promedios - 1$. Esta resta nos indica donde existen cambios significativos provocados por la perturbación en la fibra óptica de sensado. Una forma gráfica de ver la localización de estas perturbaciones es superponiendo las trazas resta en un mismo gráfico, como los veremos en la sección 3.2.3.

2.4 Resultados

En el esquema experimental se utilizó un osciloscopio para registrar las señales retrodispersadas (detector 2, ventana inferior figura 6) y los pulsos inyectados a la fibra óptica de sensado (detector 2, ventana superior figura 6), este procedimiento hace más sencillo el procesamiento debido a que se corta la traza completa de retrodispersión correspondiente a cada pulso, evitando la sincronización del sistema de modulación de intensidad y la adquisición de señal retrodispersada.

También se observaron que potencias bajas del láser (11 mW) son necesarias para evitar ruido causado por la radiación que no logra eliminar el modulador de intensidad. Si se requiere mayor energía de retrodispersión para poder observar mayor señal, se puede incrementar el ancho de pulso, donde observamos un incremento de 10% cuando se incrementa el pulso de 150 a 250 ns y un 30% al incrementar a 350ns.

La resolución espacial del sistema ϕ -OTDR, consta de dos parámetros, el primero, el ancho de pulso relacionado con la señal que emite el inicio de pulso y el final de pulso. El segundo parámetro es la velocidad de muestreo, la cual es importante ya que se puede traducir en la distancia que existe entre una muestra y otra, así en una velocidad de muestreo de 20 MSPS registra muestras cada 5m.

Se recalca que la longitud de sensado está en función del parámetro ancho de banda o ancho de línea del láser utilizado como fuente de luz y también que la máxima frecuencia de perturbación que el sistema puede detectar está en función de la longitud de sensado, sin embargo, se requieren grandes ventanas de adquisición como las mostradas en la figura 6, en donde nuestro esquema experimental necesita por lo menos 2 segundos para lograr una transformada rápida de Fourier fiable.

Por último, se mostró el algoritmo de detección, donde se explica que las trazas deben ser promediadas para evitar ruidos en el procesamiento de señal utilizado

en la siguiente sección donde se caracteriza la fibra elementalmente y se analizan sus trazas de retrodispersión.

Capítulo III, Caracterización de fibras.

En este capítulo se caracterizan diferentes fibras ópticas usadas como sensor del sistema ϕ -OTDR, para evaluar su desempeño como tales.

La tabla 2 muestra las fibras utilizadas como sensor, las fibras: SMF-28e+, SMF28, LEAF y la fibra Single Model (SM), son fibras estándar utilizadas en telecomunicaciones, mientras que la fibra raman es una fibra con alto contenido en germanio, el cual genera mayor retrodispersión.

Tabla 2 Parámetros de fibras ópticas.

Fibra	Nomenclatura	Fabricante	Atenuación máxima, dB/Km	Diámetro de núcleo, μm .	Índice de Reflexión Efectivo	Longitud de fibra óptica, m.
SMF28-E+	E+	Corning	0.18	8.2	1.4682	1050
SMF28	28		0.22	8.2	1.4682	1300
LEAF	LF		0.20	9.6	1.468	1300
SM	SM	OFS	0.19	No esp.	No esp.	1300
RAMAN	R		0.33	No esp.	No esp.	950

La transmisión de luz en la fibra óptica se efectúa mayormente en el núcleo, por lo que el siguiente análisis elemental se realiza en el núcleo de la fibra.

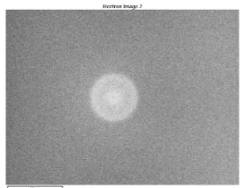
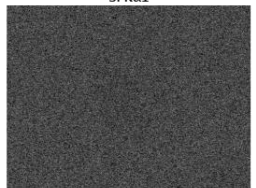
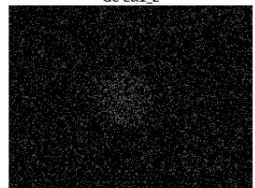
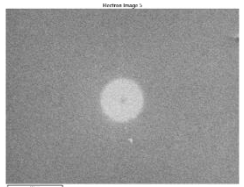

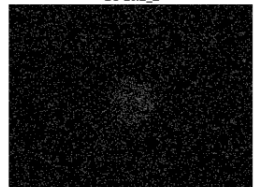
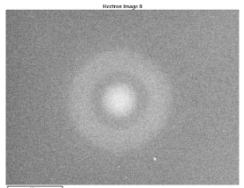
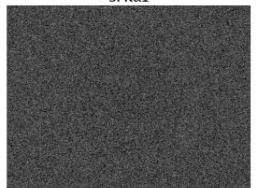
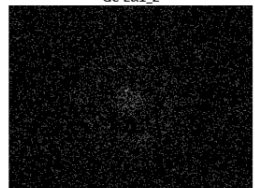
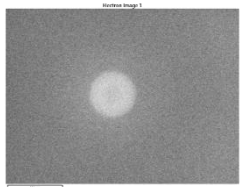
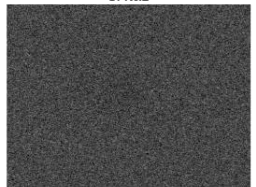
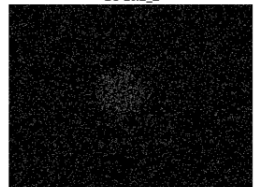

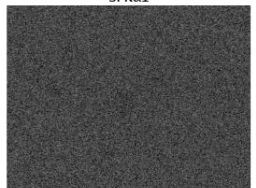
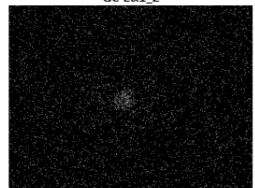
3.1 Análisis EDS.

La técnica de EDS (Energy dispersive X-ray spectrometry) es utilizada para obtener un análisis químico localizado en un área definida, y consiste en bombardear la muestra (el área definida) con un haz de electrones, haciendo que los electrones de los átomos de la muestra ganen energía y al regresar a su estado base emitan un rayo X particular del elemento presente en la muestra, determinando así la concentración del elemento presente. También se puede hacer un mapeo elemental sobre la muestra, este análisis determina la localización de dichos elementos.

Esta técnica es capaz de determinar las concentraciones de los elementos presentes en las fibras, ya sea el recubrimiento o el núcleo, cada una con una precisión de 0.01 wt%, (Noons et al 2008).

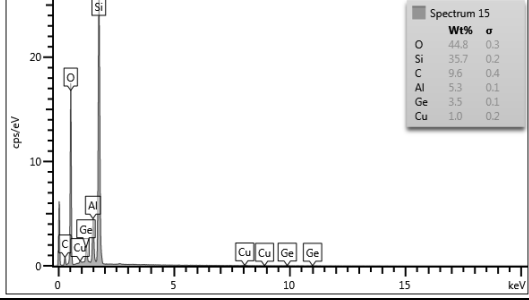
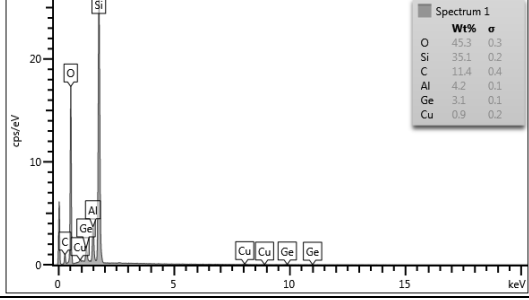
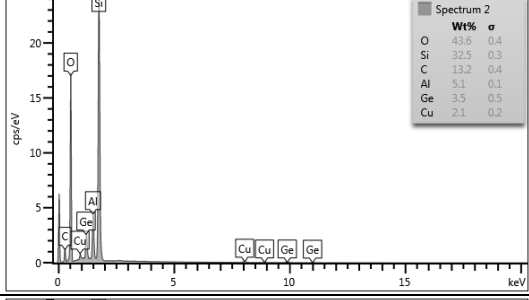
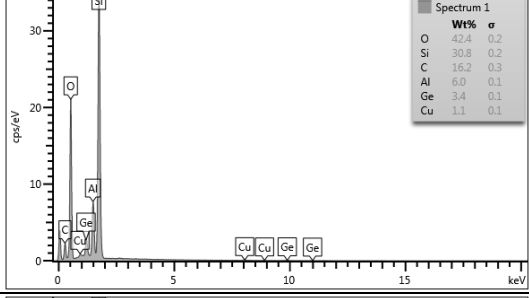
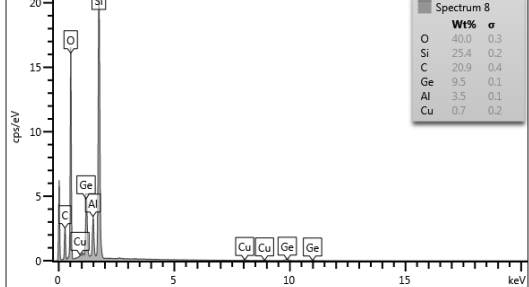
A continuación (Tabla 3), se muestra el mapeo elemental solo de los elementos silicio y germanio, debido a que estos fueron los únicos elementos que mostraron variaciones de concentración entre el núcleo y el recubrimiento, descartando el interés de los demás elementos.

Tabla 3 Perfil ortogonal del núcleo de las fibras de sensado y mapeo elemental de silicio y germanio respectivamente.

Fibra	Núcleo y recubrimiento respectivamente	Silicio.	Germanio
E+			
28			
LF			
SM			
R			

En la tabla 4 se muestran los espectros realizados en el núcleo de la fibra óptica mediante la técnica de EDS.

Tabla 4 Espectro EDS realizado en el núcleo de las fibras de sensado.

Fibra	Espectro EDS.
E+	
28	
LF	
SM	
R	

Bajo la suposición de que las fibras ópticas son de índice escalonado y homogéneas se procede a calcular el promedio del porcentaje en peso (Wt%)

por unidad de área, este cálculo es debido a que las fibras difieren en su tamaño de núcleo y es necesario para compáralas entre sí. Primero se calcula el porcentaje de germanio (Wt%) por unidad de área de cada espectro, y se hace un promedio entre las tres muestras de cada fibra, el cálculo se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 Porcentaje de Germanio presente en el núcleo de la fibra por unidad de área.

Fibra	Área	Wt% Ge	Wt%/UA	P Wt/UA
E+	19.848	3.5	0.176	0.2229
	13.185	3.5	0.265	
	14.532	3.3	0.227	
28	3.78	3.1	0.819	0.6656
	4.725	3.2	0.677	
	6.202	3.1	0.499	
LF	2.611	3.5	1.34	0.6953
	4.962	3.7	0.745	
	2.611	3.5	1.34	
SM	5.103	3.5	0.685	1.2202
	2.551	2.4	0.94	
	1.228	2.5	2.034	
R	0.189	9.5	50.255	27.0696
	0.496	9.9	19.95	
	1.063	11.7	11.003	

La figura 13 muestra los resultados de la tabla 5, en la cual se observa el porcentaje de germanio por unidad de área (%Ge/UA) presente en el núcleo con respecto a cada fibra.

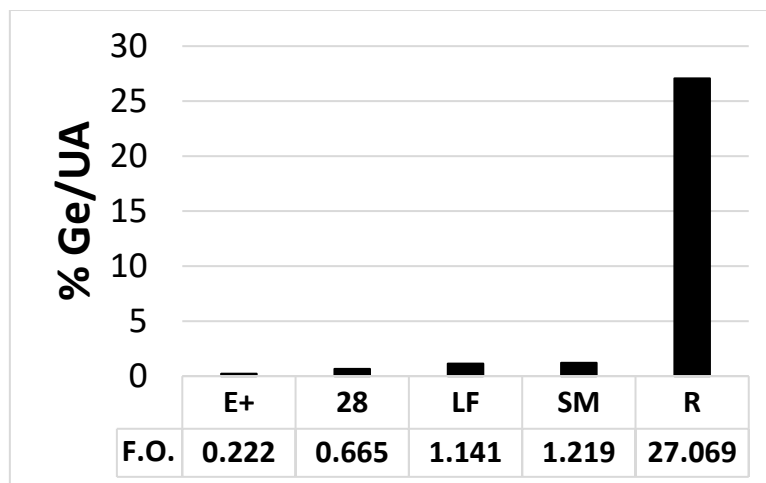


Figura 13 Porcentaje de germanio por unidad de área (%Ge/UA) presente en el núcleo para cada fibra óptica.

La figura 13 muestra un incremento de porcentaje de germanio gradual entre las 4 primeras fibras analizadas y una gran concentración de germanio en el núcleo de la fibra raman. Este tipo de fibras, las que utilizan el germanio como principal elemento para cambiar su índice de refracción se les llama fibras de germanosilicato.

En la siguiente sección se realiza un análisis de la traza retrodispersada mediante el sistema ϕ -OTDR para observar su comportamiento de retrodispersión.

3.2 Análisis de traza retrodispersada mediante el sistema ϕ -OTDR.

El siguiente análisis se realiza en las trazas promedio derivadas del procesamiento de trazas que captura el sistema ϕ -OTDR. Las fibras ópticas fueron conectadas como fibras de sensado en el esquema óptico experimental del sistema (figura 5), aplicándose una perturbación sinusoidal, 80 metros antes del final de cada fibra, esta perturbación fue generada por una membrana de oscilación, conectada a un generador de funciones.

Como fuente de luz, se utilizó un láser DFB de longitud de onda de 1550nm, potencia de 11mW y un ancho de línea de 300Hz, del fabricante OEwaves. Para generar los pulsos se utilizó un modulador de intensidad de la compañía Photline. Se utilizaron dos fotodetectores New Focus como detectores 1 y 2 del esquema óptico (figura 5) y un amplificador eléctrico FEMTO DHPVA-100 para amplificar la traza de retrodispersión.

Debido a que utilizamos un osciloscopio de la compañía Agilent Technologies el tiempo de adquisición y la velocidad de muestreo estaban preestablecidas, por lo que se optó por capturar 50 ms de trazas de retrodispersión a una frecuencia de muestreo de 40 MSPS.

A cada fibra se le inyectó un pulso de luz de 250ns de ancho, el cual se repite a una frecuencia de 66KHz (aproximadamente 15 μ s) para asegurar que la luz retrodispersada no se empalmara con otro pulso inyectado.

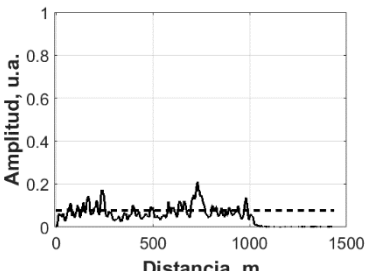
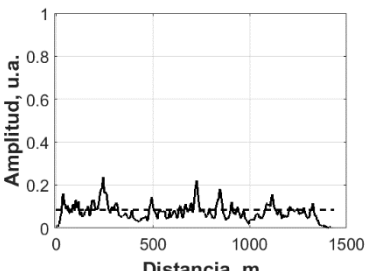
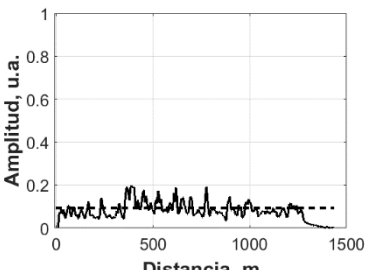
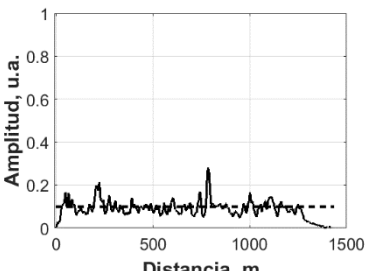
La ventana de adquisición fue de 50ms que equivale a 3550 trazas con 562 puntos cada una, correspondientes a 15 μ s, tiempo en el cual, el pulso viaja hasta el final de la fibra y la retrodispersión hasta el inicio.

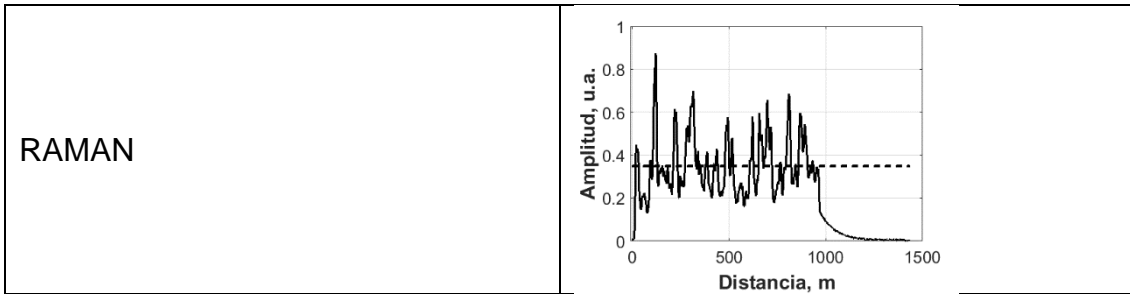
Una vez adquiridos los datos, se procede a realizar un análisis de trazas con respecto al algoritmo de procesamiento propuesto en el capítulo 2.

3.2.1 Promedio de la potencia retrodispersada.

Las siguientes graficas mostradas en la tabla no. 6 son el promedio de todas las trazas que conforman una ventana de adquisición correspondientes a la perturbación de 0Hz para cada fibra óptica, las trazas están normalizadas y la línea central segmentada indica el promedio de la amplitud de cada una de ellas.

Tabla 6 Promedio de trazas retrodispersadas en cada fibra óptica.

Fibra	Promedio de las trazas de retrodispersión.
E+	
28	
LF	
SM	



En la figura 14 se muestra el promedio de potencia retrodispersada de cada fibra. Se observa que existe un incremento de aproximadamente 0.01 en el promedio de la potencia retrodispersada entre las 4 primeras fibras, mostrando mayor promedio y por ende mayor potencia retrodispersada la fibra raman.

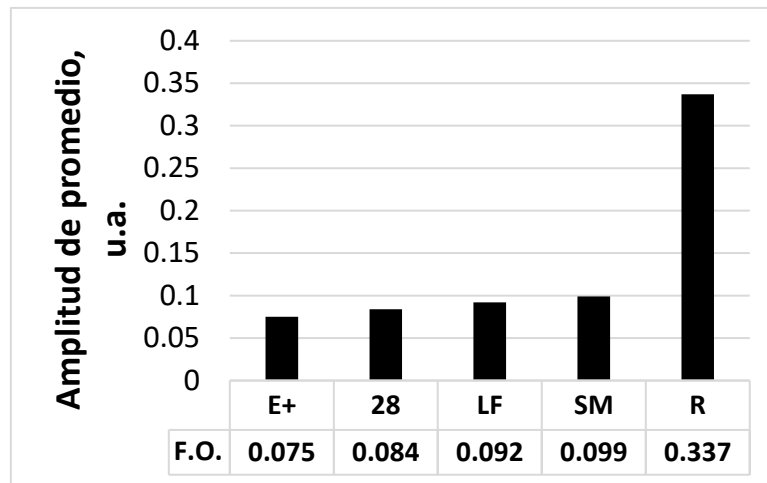


Figura 14 Energía retrodispersada en cada fibra óptica de sensado.

3.2.2 Relación entre potencia retrodispersada y porcentaje de germanio por unidad de área.

En conjunto la figura 13 (porcentaje de germanio) y la figura 14 (potencia retrodispersada) nos permiten observar que existe una relación experimental del incremento de potencia y el porcentaje de germanio, indicado en la figura 15, donde los 4 primeros puntos (a la izquierda del gráfico) correspondientes a las 4 fibras de telecomunicaciones y la fibra raman (punto en el extremo derecho de

la figura), muestra mayor contenido de germanio y mayor potencia retrodispersada.

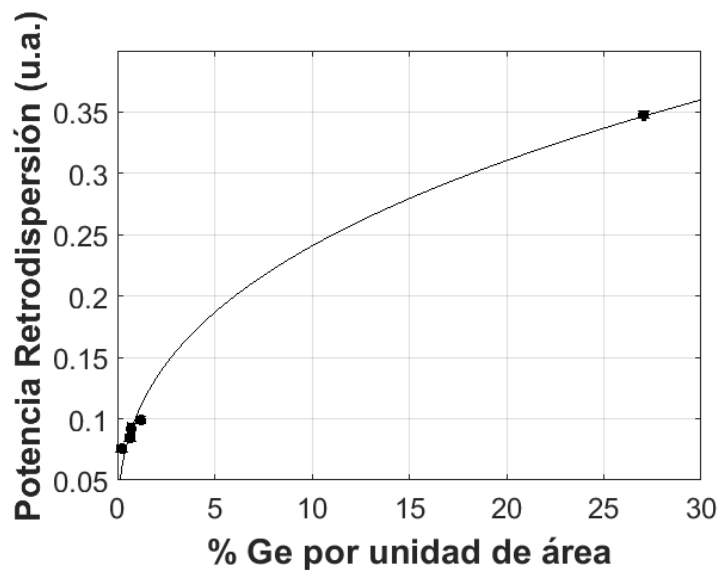


Figura 15 Potencia retrodispersada normalizada contra porcentaje de germanio por unidad de área presente en el núcleo de cada fibra.

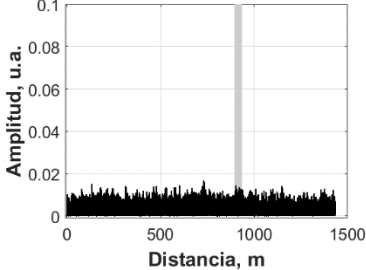
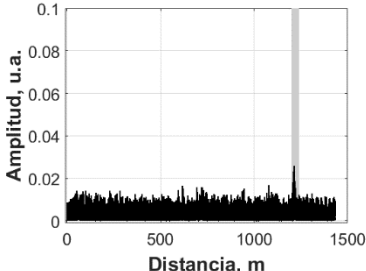
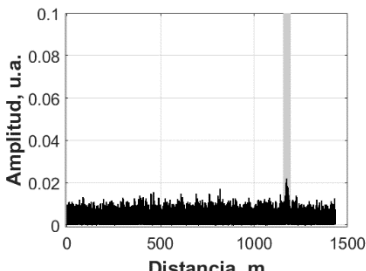
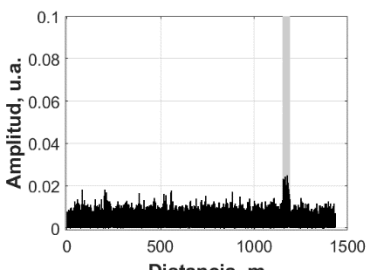
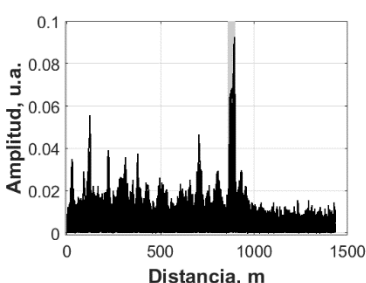
Cabe destacar en la figura 15, la línea continua solo es una tendencia experimental, asociada a un fenómeno de saturación, sin embargo, para desarrollar dicho modelo de saturación se necesitan más datos de porcentaje de germanio y potencia retrodispersada.

3.2.3 Detección de perturbación con diferentes fibras de sensado.

Mediante el algoritmo de la sección 2.3, se procede a realizar el siguiente análisis, para detectar una perturbación de 100 Hz.

En la tabla 7 se presentan gráficamente la localización de la perturbación para las diferentes fibras utilizadas como sensor. Estas graficas se realizan suponiendo todas las trazas resta. En las gráficas de la columna superposición de las trazas resta de promedios, se sombrea la parte donde es realizada la perturbación para su fácil visualización y recordando que la perturbación fue aplicada aproximadamente 80m antes del final de cada fibra.

Tabla 7 Superposición de trazas resta.

Fibra	Superposición de la traza de resta.
e+	 <p>The plot for fiber e+ shows a baseline amplitude of approximately 0.01 u.a. with a very sharp, narrow peak at a distance of 1000 m, reaching an amplitude of about 0.1 u.a. The x-axis is labeled 'Distancia, m' and ranges from 0 to 1500. The y-axis is labeled 'Amplitud, u.a.' and ranges from 0 to 0.1.</p>
28	 <p>The plot for fiber 28 shows a baseline amplitude of approximately 0.01 u.a. with a very sharp, narrow peak at a distance of 1000 m, reaching an amplitude of about 0.1 u.a. The x-axis is labeled 'Distancia, m' and ranges from 0 to 1500. The y-axis is labeled 'Amplitud, u.a.' and ranges from 0 to 0.1.</p>
LF	 <p>The plot for fiber LF shows a baseline amplitude of approximately 0.01 u.a. with a very sharp, narrow peak at a distance of 1000 m, reaching an amplitude of about 0.1 u.a. The x-axis is labeled 'Distancia, m' and ranges from 0 to 1500. The y-axis is labeled 'Amplitud, u.a.' and ranges from 0 to 0.1.</p>
SM	 <p>The plot for fiber SM shows a baseline amplitude of approximately 0.01 u.a. with a very sharp, narrow peak at a distance of 1000 m, reaching an amplitude of about 0.1 u.a. The x-axis is labeled 'Distancia, m' and ranges from 0 to 1500. The y-axis is labeled 'Amplitud, u.a.' and ranges from 0 to 0.1.</p>
RAMAN	 <p>The plot for fiber RAMAN shows a noisy baseline with several distinct peaks. The most prominent peak is at approximately 900 m, reaching an amplitude of about 0.1 u.a. Other smaller peaks are visible at various distances, such as around 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m, 600 m, 700 m, and 800 m. The x-axis is labeled 'Distancia, m' and ranges from 0 to 1500. The y-axis is labeled 'Amplitud, u.a.' and ranges from 0 to 0.1.</p>

Todas las fibras fueron sometidas a los mismos parámetros de pulso y repetición de este, sin embargo, no todas son de igual longitud, por lo que la localización de la perturbación difiere entre ellas.

3.2.4 Relación señal-ruido, SNR

La relación señal ruido *SNR* es definida como (Lu et al 2010):

$$SNR = 10 * \log \left(\frac{V_{señal}}{V_{ruido}} \right) \quad (11)$$

Donde $V_{señal}$ es el valor en amplitud de la señal más alta correspondiente a la perturbación (un ejemplo es la gráfica de la fibra raman en la tabla 7), y V_{ruido} es el promedio de la amplitud en toda la traza resta. En la ecuación 11, se utiliza el voltaje, pues es el valor entregado por los fotodetectores, en respuesta a la intensidad de la potencia óptica de la energía retrodispersada.

La figura 16 muestra el valor de SNR para cada fibra en dB, donde se observa que la fibra raman (R) es la que mejor relación señal ruido presenta 12 dB casi el doble que la fibra SMF28e+ utilizada en telecomunicaciones.

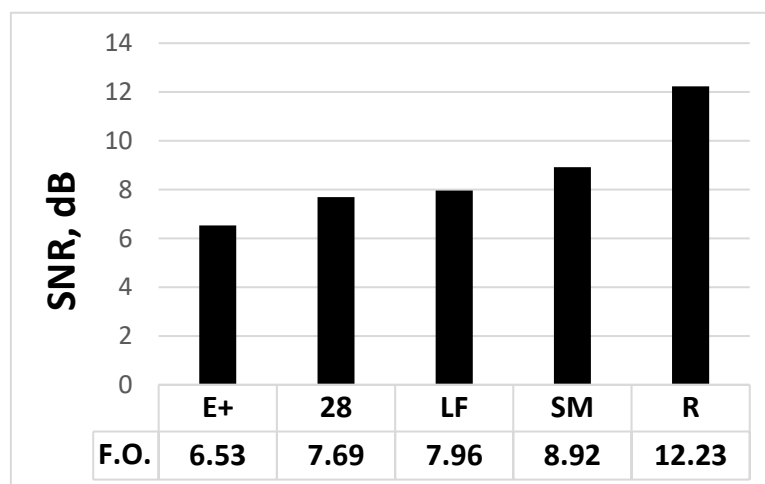


Figura 16 Relación señal-ruido para cada fibra.

3.3 Resultados.

El análisis elemental por espectroscopia de energía dispersiva (EDS), nos muestra que los elementos presentes en el núcleo de las fibras ópticas son: oxígeno (O), silicio (Si), germanio(Ge), cobre (Cu), carbono (C) y aluminio (Al) y por medio del mapeo elemental, determinamos que el elemento que cambia su concentración en el núcleo es el germanio, por lo que concluimos que es el germanio el elemento utilizado principalmente para modificar el índice de refracción en las fibras ópticas. Este tipo de fibras son llamadas fibras de germanosilicato.

La respuesta experimental de la relación de porcentaje de germanio por unidad de área y el promedio de potencia retrodispersada de la figura 15 muestra una tendencia a incrementar la potencia retrodispersada conforme se aumenta la concentración de germanio en las fibras, también cabe destacar que las fibras de telecomunicación no tienen más del 3% de germanio en su núcleo (Agrawal, 2001) como fue mostrado en la gráfica. Esta respuesta experimental nos permite creer que el germanio es el responsable de incrementar los centros de esparcimiento rayleigh.

La relación señal-ruido también mostro un incremento de entre 0.5 y 1 dB para las fibras de telecomunicaciones al incrementar su contenido de germanio. La fibra raman presento una SNR de 12 dB aproximadamente el doble que la fibra SMF28e+, siendo esta la más utilizada en telecomunicaciones.

Este resultado de la fibra raman, es utilizado en el capítulo 5 donde la empleamos como sensor para localizar una perturbación en una longitud de 10 km.

Capítulo IV, Fuente de luz coherente especial para el sistema ϕ -OTDR.

En este capítulo se propone el encadenamiento de un láser DFB a través de un FORR (anillo resonador de fibra óptica) mediante la técnica de auto-inyección, la cual consiste en utilizar al mismo laser para retroalimentar su cavidad y así reducir su ancho de línea (Othsubo 2008; Spirin et al 2006).

Las características ópticas de transferencia de un FORR dependen fuertemente del coeficiente de acoplamiento. Este coeficiente es la cantidad de luz que se divide en cada brazo de un acoplador óptico. Por lo que pueden existir tres regímenes de acoplamiento diferentes: sub-acoplado(under-coupling), sobre-acoplado(over-coupling) y acoplado crítico (critical-coupling) (Heebner, 2004 y Choi 2001).

Se estudia el comportamiento de estos tres regímenes de acoplamiento, la reducción del ancho de línea y el comportamiento de la polarización en el régimen de acoplamiento crítico.

4.1 Regímenes de acoplamiento de la cavidad resonante de fibra óptica para el encadenamiento del láser DFB mediante la técnica de auto-inyección.

Para el estudio de encadenamiento por auto-inyección a través de un FORR en los diferentes regímenes se propone el esquema óptico experimental de la figura 17.

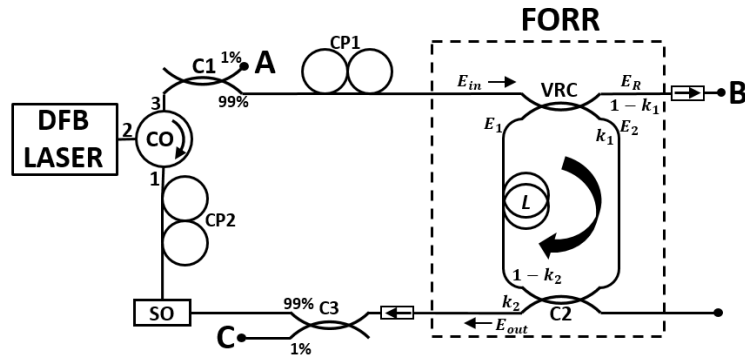


Figura 17 esquema óptico experimental. CO: Circulador óptico, CP: Controlador de polarización, C: acoplador, SO: interruptor óptico, VRC: Acoplador óptico variable y FORR: Anillo resonador de fibra óptica.

El láser DFB MITSUBISHI FU-68PDF-V520M27B opera a 1534.85nm de longitud de onda y es construido con un aislador óptico, la radiación pasa a través de un circulador óptico OC (el cual nos ayudara a retroalimentar el láser con su misma radiación), un acoplador óptico C1 (utilizado para monitorear la salida del láser), controlador de polarización PC1 y es inyectado dentro del FORR. El FORR consiste de un acoplador variable VRC, un acoplador C2 y contiene L metros de fibra estándar SMF-28. Los puertos de salida A, B y C son utilizados para monitorear la potencia del láser DFB, el reflejado y transmitido de la cavidad respectivamente. Aisladores ópticos OI previenen las reflexiones de los componentes y detectores que pueden afectar el comportamiento del láser (OthsubO 2008, Cardona et al 2011). El interruptor óptico OS es usado para activar o desactivar la retroalimentación óptica en la configuración que devuelve la potencia transmitida a través del FORR a la cavidad del láser DFB y consta en la conexión o desconexión de los conectores ópticos provenientes del controlador de polarización CP2 y el acoplador C3.

La potencia en el puerto reflejado B presenta una serie de mínimos cada vez que la frecuencia óptica del láser se encuentra en coincidencia con la condición de resonancia de la FORR.

Cada mínimo en la potencia reflejada (puerto B) es acompañada por un pico máximo correspondiente a la potencia que circula dentro de la cavidad (puerto C) figura 18.

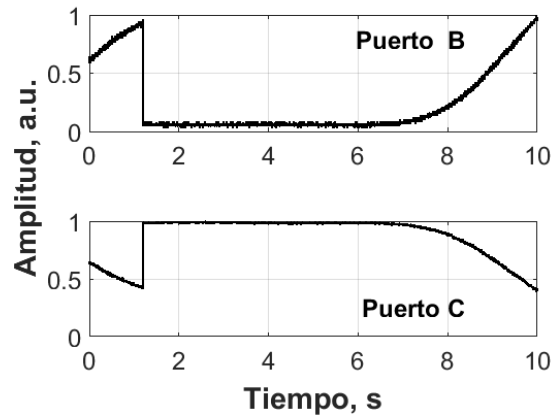


Figura 18 Potencia reflejada (Puerto B) y transmitida (Puerto C).

Como se mencionó en el capítulo 1, la configuración experimental el FORR tiene similitud a un interferómetro Fabry-Perot y es utilizado como un elemento selectivo de frecuencia en la retroalimentación para el auto-encadenamiento por inyección. Puesto que la longitud total de la cavidad de anillo es un múltiplo de la longitud de onda o frecuencia de la luz dentro de ella, se estima que la longitud total es aproximadamente 4 m de fibra estándar de telecomunicaciones SMF-28.

Asumimos que la fibra y los acopladores dentro del FORR son ideales y se encuentran libres de polarización acoplada y birrefringencia, así las amplitudes de los campos E_R y E_2 en base al esquema de la figura 17 y en estado estable son expresadas como (Stokes et al 1982; Seraji 2009):

$$E_R = \sqrt{1 - \gamma_1} \cdot (\sqrt{1 - k_1} \cdot E_{in} - j \cdot \sqrt{k_1} \cdot E_1) \quad (12)$$

$$E_2 = \sqrt{1 - \gamma_1} \cdot (\sqrt{1 - k_1} \cdot E_1 - j \cdot \sqrt{k_1} \cdot E_{in}) \quad (13)$$

Donde k_1 es el coeficiente de acoplamiento de potencia y γ_1 es la intensidad perdida del acoplador variable en una escala lineal.

La conservación de la energía requiere que los campos eléctricos E_1 y E_2 esten relacionados como:

$$E_1 = \sqrt{\alpha} \cdot E_2 \cdot e^{-j \cdot \omega_p \cdot \tau} \quad (14)$$

$$|E_1|^2 = \alpha \cdot |E_2|^2 \quad (15)$$

Donde ω_p es la frecuencia angular óptica, τ es el tiempo de retraso del loop y α es el coeficiente de transmisión de potencia de la fibra del loop.

El coeficiente de transmisión de potencia α incluye todas las pérdidas dentro del loop de fibra:

$$\alpha = (1 - k_2) \cdot 10^{-\frac{(\alpha_0 \cdot L + \zeta + \gamma_2)}{10}} \quad (16)$$

Donde α_0 es el coeficiente de atenuación (dB/m) de la fibra, L es la longitud de la cavidad, ζ (dB) son las pérdidas en conectores dentro del loop, γ_2 (dB) y k_2 son la pérdida de intensidad y el coeficiente de acoplamiento de potencia del acoplador 2 respectivamente.

Y la amplitud compleja del campo de salida E_{out} es definida como

$$E_{out} = -j \cdot \sqrt{k_2} \cdot E_2 \quad (17)$$

Después de algunas manipulaciones algebraicas los campos dentro y fuera de la cavidad FORR, pueden ser expresados en función del campo eléctrico de entrada E_{in} , resultando los campos E_1 , E_2 , E_R y E_{out} como:

$$E_1 = \left[\frac{j \cdot \sqrt{\alpha \cdot k_1 \cdot (1 - \gamma_1)}}{\sqrt{\alpha \cdot (1 - \gamma_1) \cdot (1 - k_1)} - e^{j \cdot \omega_p \cdot \tau}} \right] \cdot E_{in} \quad (18)$$

$$E_2 = \left[\frac{j \cdot \sqrt{k_1 \cdot (1 - \gamma_1)} \cdot e^{j \cdot \omega_p \cdot \tau}}{\sqrt{\alpha \cdot (1 - \gamma_1) \cdot (1 - k_1)} - e^{j \cdot \omega_p \cdot \tau}} \right] \cdot E_{in} \quad (19)$$

$$E_R = \left[\frac{\sqrt{\alpha} \cdot (1 - \gamma_1) - \sqrt{(1 - \gamma_1) \cdot (1 - k_1)} \cdot e^{j \cdot \omega_p \cdot \tau}}{\sqrt{\alpha \cdot (1 - \gamma_1) \cdot (1 - k_1)} - e^{j \cdot \omega_p \cdot \tau}} \right] \cdot E_{in} \quad (20)$$

$$E_{out} = \left[\frac{\sqrt{k_1 \cdot k_2 \cdot (1 - \gamma_1)} \cdot e^{j \cdot \omega_p \cdot \tau}}{\sqrt{\alpha \cdot (1 - \gamma_1) \cdot (1 - k_1)} - e^{j \cdot \omega_p \cdot \tau}} \right] \cdot E_{in} \quad (21)$$

En el experimento se midió la intensidad de la radiación óptica reflejada en el puerto B y la intensidad de la radiación óptica transmitida a través de FORR en el puerto C. Para validar los datos experimentales, se encontraron las expresiones analíticas para las intensidades del reflejado y transmitido. La intensidad de los puertos reflejado I_R y el transmitido I_{out} normalizadas a la intensidad de entrada I_{in} pueden ser mostradas como:

$$I_{out} = \left| \frac{E_{out}}{E_{in}} \right|^2 \quad (22)$$

$$= \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot (1 - \gamma_1)}{1 + \alpha \cdot (1 - \gamma_1)(1 - k_1) - 2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot (1 - \gamma_1) \cdot (1 - k_1)} \cdot \cos(\omega_p \cdot \tau)}$$

$$I_R = \left| \frac{E_R}{E_{in}} \right|^2 \quad (23)$$

$$= (1 - \gamma_1)$$

$$\cdot \left[\frac{\alpha \cdot (1 - \gamma_1) + (1 - k_1) - 2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot (1 - \gamma_1) \cdot (1 - k_1)} \cdot \cos(\omega_p \cdot \tau)}{1 + \alpha \cdot (1 - \gamma_1)(1 - k_1) - 2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot (1 - \gamma_1) \cdot (1 - k_1)} \cdot \cos(\omega_p \cdot \tau)} \right]$$

En resonancia $\omega_p \cdot \tau = 2 \cdot \pi \cdot m$, donde m es un entero, la intensidad de salida I_{out} alcanza un máximo:

$$I_{out_{max}} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot (1 - \gamma_1)}{\left(1 - \sqrt{\alpha \cdot (1 - \gamma_1) \cdot (1 - k_1)}\right)^2} \quad (24)$$

Y la intensidad reflejada I_R toma un valor mínimo:

$$I_{R_{min}} = \frac{\left(\sqrt{\alpha} \cdot (1 - \gamma_1) - \sqrt{(1 - \gamma_1) \cdot (1 - k_1)}\right)^2}{\left(1 - \sqrt{\alpha \cdot (1 - \gamma_1) \cdot (1 - k_1)}\right)^2} \quad (25)$$

El régimen de acoplamiento es definido por la relación entre el coeficiente de acoplamiento y las pérdidas dentro de la cavidad. Cuando el coeficiente $k_1 = 1 - \alpha \cdot (1 - \gamma_1)$, $k_1 < 1 - \alpha \cdot (1 - \gamma_1)$ o $k_1 > 1 - \alpha \cdot (1 - \gamma_1)$, la cavidad opera en régimen de acoplamiento crítico, sub-acoplado y sobre-acoplado respectivamente (Stokes 1982).

Con la condición de acoplamiento crítico:

$$k_1 = 1 - \alpha * (1 - \gamma_1) \quad (26)$$

La potencia reflejada I_{Rmin} se iguala a cero y toda la potencia de entrada es acumulada dentro de la cavidad.

Una vez que la frecuencia del láser DFB entra en resonancia con el FORR, el láser DFB es encadenado al modo longitudinal del FORR. Esto permite la supresión temporal de las fluctuaciones de potencia registradas en los puertos B y C (mostradas en la figura 18). La potencia estable en los puertos B y C es observada durante intervalos relativamente largos de tiempo que son interrumpidos por saltos cortos de tiempo causados por salto de modo (mode hopping) mostrados en la figura 18.

Los intervalos de tiempo estable son de 10-30s con 0.2-0.4 s de inestabilidad para el régimen de acoplamiento crítico sin protección del FORR en un ambiente común de laboratorio. Mientras que en los regímenes sub-acoplado y sobre-acoplado el tiempo de estabilidad fue menos o igual de 5 a 15s en el experimento.

En la figura 19 se muestra la dependencia de la potencia normalizada transmitida y la potencia normalizada reflejada contra el coeficiente de acoplamiento k_1 medida en los puertos C y B respectivamente. Se muestran en comparación con los datos obtenidos de las ecuaciones 22 y 23. Los siguientes parámetros son las pérdidas estándar que se tienen en telecomunicaciones y son usados para la estimación: $k_2 = 0.01$, $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.1 \text{ dB}$, $\zeta = 0.2 \text{ dB}$ y $\alpha_0 = 0.17 \text{ dB/km}$. La potencia reflejada alcanza el valor de cero en $k_1 = 0.08$, que corresponde al acoplamiento crítico. En el experimento se seleccionó el acoplador variable VRC

para que la cavidad de anillo operara a los tres diferentes regímenes: sub-acoplado, sobre-acoplado y acoplamiento crítico.

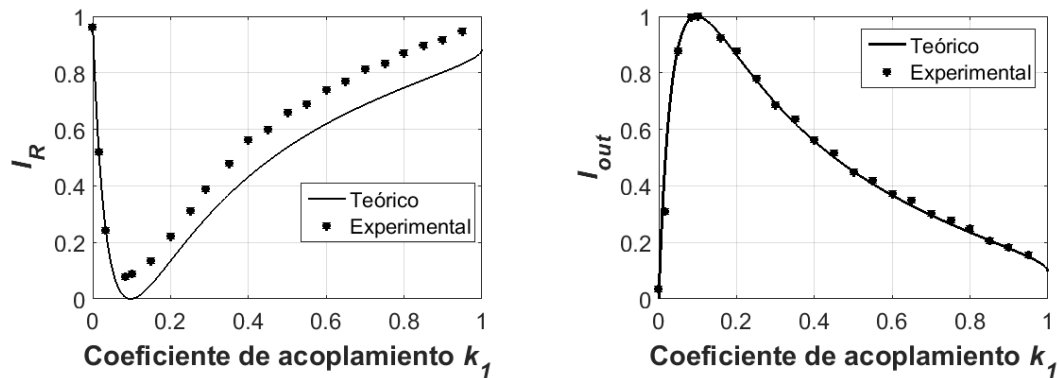


Figura 19 Potencia reflejada (figura izquierda) y transmitida reflejada (figura derecha) contra coeficiente de acoplamiento k_1 , los puntos en las gráficas representan los valores experimentales mientras que la línea continua son los valores teóricos de acuerdo a las ecuaciones 22 y 23.

Ambos valores, el experimental y el teórico para la potencia reflejada (figura derecha de la figura 19) exhiben un mínimo en $k_1 = 0.08$. Sin embargo, experimentalmente no se observa un cero para la potencia transmitida en el régimen de acoplamiento crítico, como lo muestra la figura 20, el mínimo experimental para la potencia reflejada, a pesar de ajustar cuidadosamente la polarización. Suponemos que este efecto es debido a un acoplamiento de polarización indeseable y una pequeña birrefringencia de la fibra constituyente al FORR que hace imposible tener una completa interferencia destructiva por medio del acoplador variable.

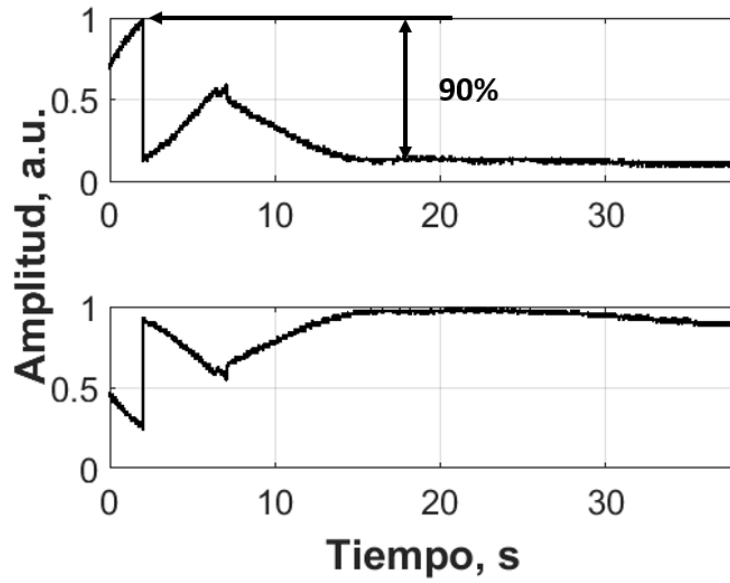


Figura 20 Mínimo experimental para potencia reflejada (Puerto B) en régimen de acoplamiento crítico.

A continuación, se muestran la medición del ancho de línea en los diferentes régimenes de acoplamiento.

4.2 Medición del ancho de línea en los diferentes regímenes de acoplamiento.

Para medir el ancho de línea de la radiación emitida por el láser en el puerto A, bajo los diferentes regímenes de acoplamiento, se utilizó la técnica delayed self-heterodyne, la cual consiste en inyectar la señal en un interferómetro Mach-Zehnder con una fibra de retraso en un brazo y un modulador de fase en el otro. Se utilizaron 15 km de fibra de retraso y una señal sinusoidal moduladora de la fase de 25MHz, mostrado el esquema óptico en la figura 21.

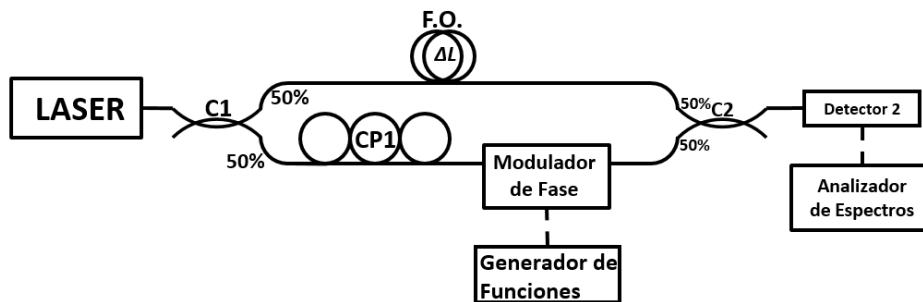


Figura 21 Esquema óptico para la técnica de medición de ancho de línea, Delayed self-heterodyne.

La señal batida proveniente del interferómetro en el conector C2 es detectada por un fotodetector y un analizador de espectros de RF. Asumiendo que el espectro de emisión tiene un perfil lorentziano, el ancho del espectro es dos veces el ancho de línea del láser (Baney y Sorin 1998). Siendo el ancho de línea del láser DFB en emisión normal aproximadamente de 2.55 MHz, mostrado en la figura 22.

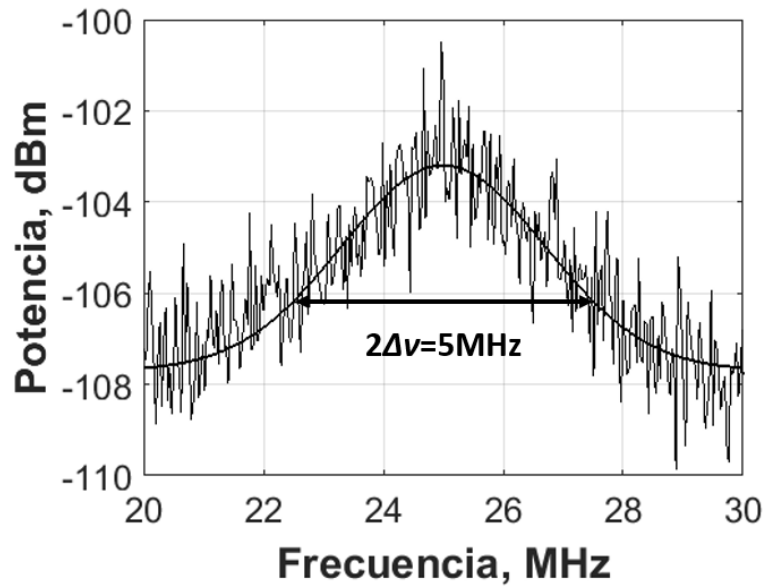


Figura 22 Espectro delayed self-heterodyne para el láser en emisión normal, o no encadenado.

El encadenamiento por auto-inyección produce una drástica reducción del ancho de línea del láser. En el régimen de acoplamiento crítico $k_1 = 0.08$ el ancho de línea medido es de 2.5KHz, mostrado en la figura 23.

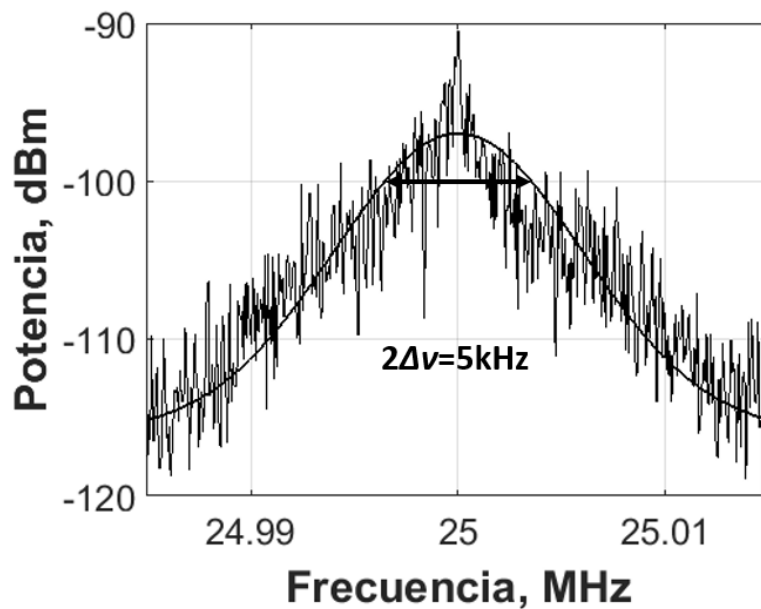


Figura 23 Espectro delayed self-heterodyne para el láser en acoplamiento crítico.

La figura 24 presenta los anchos de línea del láser DFB encadenado contra el coeficiente de acoplamiento k_1 .

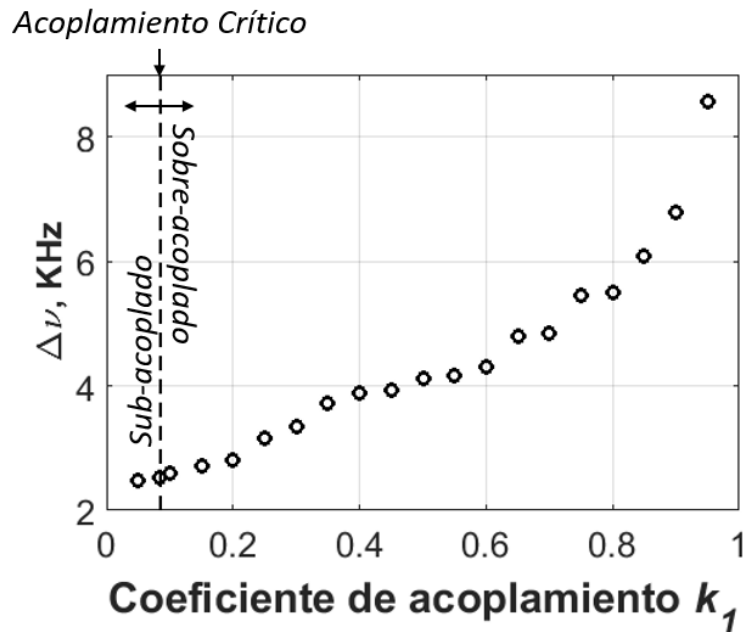


Figura 24 Anchos de línea del láser DFB encadenado contra el factor de acoplamiento k .

El ancho de línea depende fuertemente de las condiciones de acoplamiento; se reduce más de 1000 veces en régimen sub-acoplado y acoplamiento crítico, un poco menos en régimen sobre-acoplado.

Para comprender mejor la estabilidad de la emisión del láser encadenado en acoplamiento crítico se plantea la observación del comportamiento de la polarización, visto en la siguiente sección.

El acoplador C2 es usado para redireccionar una parte de la potencia circulando en el FORR a través del acoplador C3 y el circulador CO de regreso al láser DFB proporcionando retroalimentación a la operación del láser DFB. Cuando el interruptor óptico OS está activado, el láser DFB se encadena a la frecuencia de resonancia del FORR. El acoplador variable VRC se ajusta (aproximadamente 96/4) para proporcionar la operación en acoplamiento crítico (López et al 2016).

La figura 26 muestra trazas del osciloscopio registradas con la configuración del láser intencionalmente desprotegidas del ruido ambiental para observar inestabilidades del láser. Las señales en los puertos B y C, reproducen la potencia reflejada y potencia transmitida (usada para la retroalimentación del láser), respectivamente. Usualmente un régimen de encadenamiento por auto inyección estable es observado durante 1-100 s (dependiendo del nivel de ruido del ambiente) y periódicamente interrumpido por eventos de salto de modo.

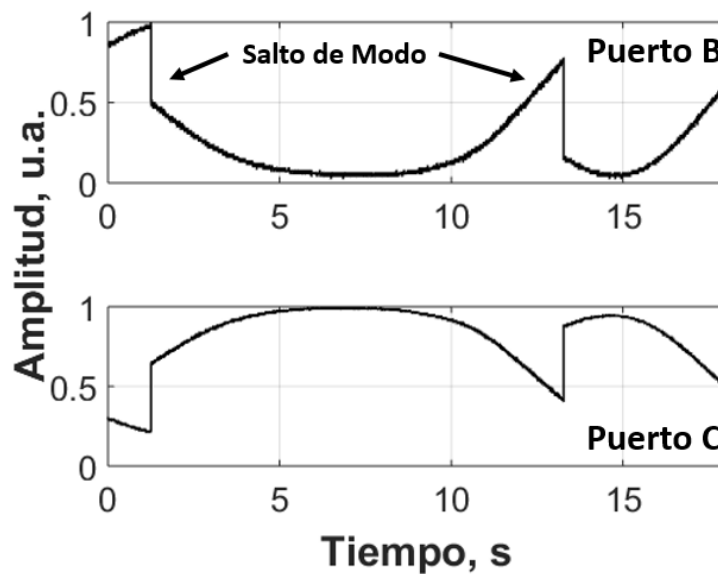


Figura 26 trazas de osciloscopio de los puertos B y C.

En el régimen de acoplamiento crítico la frecuencia del láser DFB es encadenada a la frecuencia de resonancia del FORR, así que el nivel de la potencia reflejada (puerto B) es mínima y la potencia circulando dentro del FORR (registrada en el puerto C) es máxima.

Después de que el salto de modo ocurre, la frecuencia de encadenamiento se hace más débil (probablemente debido a las fluctuaciones térmicas) y por lo tanto

la potencia dentro del FORR registrada en el puerto C disminuye. En algún momento esta disminución es interrumpida por un salto corto de potencia a un nivel más alto resaltando el salto de modo del láser. Este comportamiento de la potencia transmitida se acompaña de un comportamiento inverso de la potencia reflejada (puerto B).

Se observamos dos diferentes regímenes en el comportamiento de salto de modo. La diferencia entre estos dos regímenes es el tiempo que tarda el sistema en recuperar el funcionamiento en estado estacionario durante el evento de salto de modo. En el primer régimen más común, este tiempo es bastante largo, aproximadamente 5 ms. En el segundo, el tiempo de recuperación es aproximadamente $100\mu\text{s}$.

En el primer régimen, los saltos observados en los puertos B y C son acompañados por un salto escalonado de la potencia del láser ($\sim 1\text{-}5\%$) registrado en el puerto A de la figura 27, mientras que en el segundo régimen la potencia de salida del láser no cambia marcadamente.

Las trazas mostradas en la figura 27 muestra dos eventos consecutivos de salto de modo relacionados con los diferentes regímenes. Comúnmente estos dos regímenes no se mezclan.

Para aclarar los mecanismos físicos atribuidos a estos regímenes de estados de polarización de la luz circulando en la configuración del láser DFB han sido monitoreados en los puertos A, B y C sincrónicamente con la grabación de las trazas del osciloscopio y los cambios de polarización.

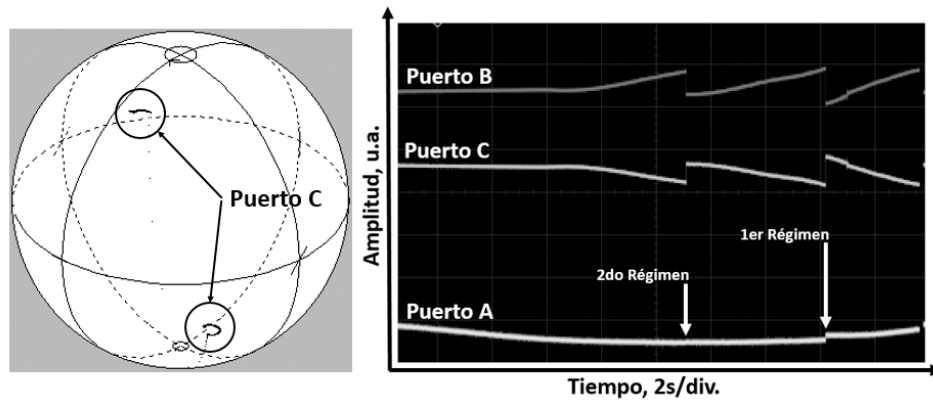


Figura 27 Eventos de salto de modo (figura derecha), las trazas muestran los dos diferentes regímenes de salto de modo; y comportamiento flip-flop de los estados de polarización (figura izquierda) de potencia transmitida (Puerto C) en el segundo.

Primero que nada, tenemos que concluir que el estado de polarización del láser DFB no cambia en ambos regímenes. Esto puede ser observado como un punto estacionario en la esfera de Poincare relacionada al puerto A (mostrado en figura 28 a), puerto A). El monitoreo del estado de polarización de la luz reflejada (puerto B) en ambos casos muestra que los vectores de Stokes exhiben periódicamente procesiones como se muestra en la figura 28. El periodo de procesión coincide con el periodo de salto de modo en el primer régimen. Estas características pueden ser atribuidas a cualquier proceso como fluctuaciones térmicas del medio ambiente que afectan la birrefringencia de la fibra y, simultáneamente, cambian la frecuencia de resonancia del FORR. Cuando esta desviación de frecuencia del FORR es suficientemente larga, el láser cambia su frecuencia a alguna cerca del modo de resonancia del FORR causando eventos de salto de modo observados en las trazas del osciloscopio. Esto explica porque el periodo de comportamiento del estado de polarización y el salto de modo están sincronizados. Importante destacar que esta dinámica no afecta la polarización de la luz transmitida a través del FORR (que es usada para la retroalimentación del láser DFB) representada como un punto estacionario en la esfera de Poincare (puerto C).

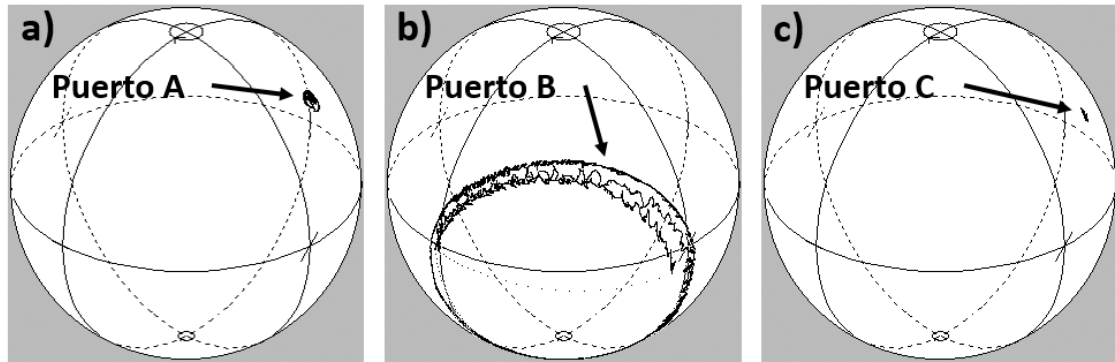


Figura 28 a) puerto A, salida del láser, b) puerto B, potencia reflejada, c) puerto C, potencia transmitida. Las flechas muestran los estados de polarización medidos.

En el segundo régimen, el comportamiento de polarización observado en los puertos A y B son casi los mismos que el descrito, pero la polarización de la luz en el FORR observado en el puerto C exhibe un cambio flip-flop entre dos estados ortogonales de polarización (figura 27 izquierda), es decir, tiene lugar un salto de modo de polarización. Sorprendentemente, este comportamiento no afecta la potencia de salida del láser y su estado de polarización observado en el puerto A (figura 28). El periodo de cambio flip-flop entre los dos estados coincide con el periodo de sato observado en las trazas registradas del osciloscopio en los puertos B y C (figura 27). Importante, el tiempo que le toma al sistema recobrar el estado estable de operación durante el salto de modo de polarización es mucho menor que el tiempo que le toma en el caso de salto de modo entre dos modos cercanos de orden del FORR.

4.4 Resultados.

Se utilizo un resonador de fibra óptica de baja perdida (FORR) con una fibra ordinaria de comunicaciones SMF-28 y acopladores direccionales como un filtro para el encadenamiento por auto-inyección del láser DFB. Variando el coeficiente de acoplamiento, se comparó el encadenamiento del láser con la operación de FORR en regímenes de sub-acoplado, críticamente acoplado y sobre-acoplado. Para el láser encadenado, las potencias transmitidas y reflejada del FORR están acordes con las estimaciones teóricas. El acoplamiento crítico proporciona altas potencias de retroalimentación permitiendo un mejor encadenamiento y también entrega un estrechamiento de ancho de línea superior, demostrando que el láser encadenado DFB, genera una frecuencia de radiación con menos de 2.5 kHz de ancho de línea con el FORR operando en régimen de acoplamiento crítico. El ancho de línea del láser incrementa significativamente en régimen de sobre acoplado.

Se observo el comportamiento de polarización de la luz circulando en el FORR de retroalimentación usado para el encadenamiento por auto-inyección del láser DFB. Se propone que un salto de modo es atribuido al salto entre modos cercanos de orden del FORR de misma polarización, mientras que el segundo es entre diferentes modos de polarización, pero de mismo orden. La diferencia entre ellos es el tiempo de recuperación de estado estable del sistema después de un evento de salto de modo.

Capítulo V, Láser IL-DFB y fibra seleccionada como elemento sensitivo en el sistema ϕ -OTDR.

En este capítulo, se utiliza un láser DFB encadenado por auto-inyección a través de una cavidad de anillo resonante en un sistema ϕ -OTDR para la detección y localización de una vibración hasta una distancia de 10Km.

5.1 Láser IL-DFB en un sistema ϕ -OTDR.

En la figura 29 se muestra el esquema experimental para el láser DFB encadenado a través de un anillo resonador de fibra óptica (FORR). Un láser DFB MITSUBISHI FU-68PDF-V520M27B, construido con un aislador óptico y ancho de línea de 2 MHz con longitud de onda de operación central de ~ 1534.85 nm. La salida de radiación del láser DFB pasa a través de un circulador óptico OC, un acoplador óptico C1, un controlador de polarización PC1 y es inyectado dentro de un anillo resonador de fibra óptica. El FORR consiste de un acoplador 90/10 C2, un acoplador 95/5 C3, y contiene 4 m de fibra óptica estándar SMF-28. El FORR tiene una operación análoga a un interferómetro Fabry-Perot, donde la potencia reflejada va al puerto B y la transmitida pasa a través del acoplador C3. La radiación del puerto A será usada como la salida del láser DFB encadenado por auto-inyección (IL-DFB), mientras que los puertos B y C, son conectados a detectores para monitorear las potencias reflejadas y transmitidas respectivamente. Aisladores ópticos previenen reflexiones de los componentes de fibra que pueden afectar el comportamiento del láser DFB. El controlador de polarización PC2 y el interruptor óptico OS es usado para ajustar la polarización y activar o desactivar la retroalimentación óptica en la configuración de regreso de la potencia transmitida a través del FORR que regresa dentro de la cavidad del láser DFB.

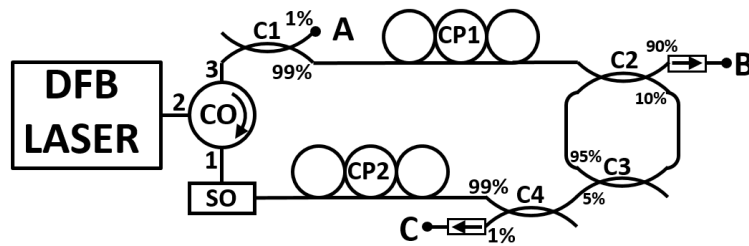


Figura 29 Circuito óptico del láser IL-DFB (DFB encadenado a través del FORR); CO, circulador óptico, C, acoplador, CP, controlador de polarización, SO, interruptor óptico.

La figura 30 muestra el espectro de emisión del láser IL-DFB obtenido con la técnica delayed self-heterodyne, la cual utiliza un interferómetro Mach-Zehnder desbalanceado, el interferómetro comprende 35 km de fibra óptica de retraso en un brazo y un modulador de fase con señal senoidal de 20 MHz en el otro. El batimiento de señal del interferómetro es detectado por fotodetectores y un analizador des espectros de RF. El ancho de línea ($\Delta\nu$) del láser DFB decrece aproximadamente de 2 MHz sin encadenamiento del láser a 2.4 kHz para el láser IL-DFB, es decir el láser DFB en acoplamiento crítico.

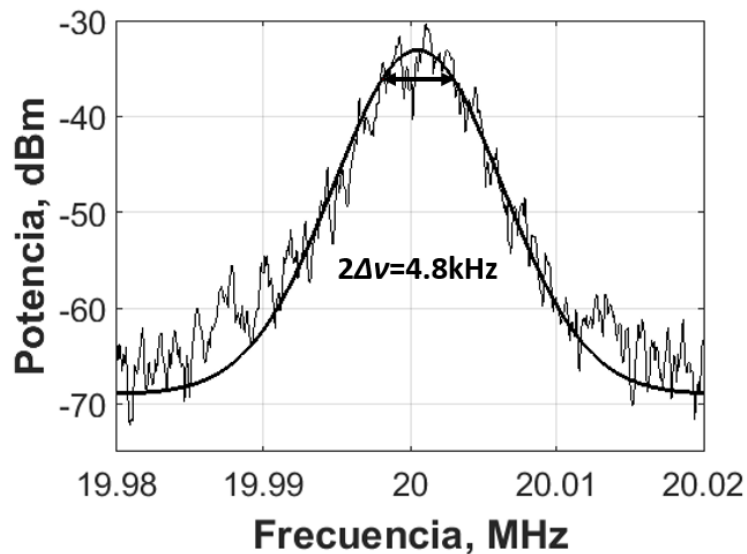


Figura 30 Espectro de emisión bajo la técnica delayed self-heterodyne del láser IL-DFB.

Asumiendo que el perfil del espectro del láser es lorentziano, la longitud de coherencia L_c (Muanenda et al 2016) del láser, está dada por:

$$L_c = \frac{c}{\pi N_{eff} \Delta\nu} \quad (27)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el espacio libre, N_{eff} es el índice de refracción de grupo efectivo de la fibra óptica de prueba igual a 1.468, y $\Delta\nu$ es el ancho de línea del láser.

Por lo tanto, la longitud de coherencia es incrementada aproximadamente de 26m (sin encadenamiento del láser) a 27.2 Km para el láser IL-DFB. Este incremento en la longitud de coherencia del láser permite implementarlo como fuente de luz en el sistema φ -OTDR de larga distancia.

La figura 31 muestra trazas típicas de la potencia transmitida y reflejada en el régimen de acoplamiento crítico en los puertos C y B respectivamente. Se observa un régimen de encadenamiento del láser a la frecuencia del FORR, que son interrumpidos por intervalos de saltos de modo. El intervalo de tiempo estable de la figura opera los 60 segundos, durante este tiempo la desviación de la frecuencia es menor al ancho de línea del modo de resonancia del FORR igual a 0.77 MHz.

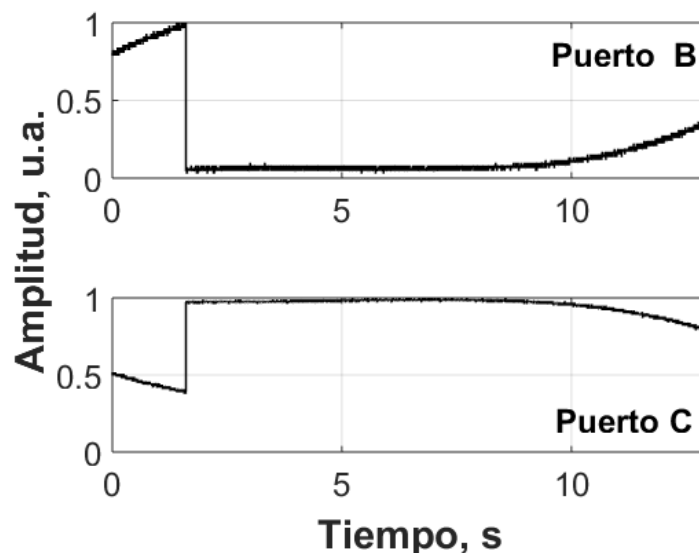


Figura 31 Trazas típicas de osciloscopio de las potencias reflejado (Puerto B) y transmitido (Puerto C) en el régimen de acoplamiento crítico.

El esquema del sistema ϕ -OTDR con el láser IL-DFB como fuente de luz, es presentado en la figura 32. La radiación de salida del láser IL-DFB es amplificada por un EDFA hasta 23mW y pasa a través de un filtro pasabandas BPF para eliminar ruido de emisiones espontaneas. Un modulador de intensidad óptica MOD genera pulsos ópticos con ancho de línea de 350 ns a una repetición de 10 KHz los cuales son inyectados a la fibra de sensado a través del acoplador 1/99 y un circulador óptico OC. La fibra de sensado comprende 8400m de SMF-28e al inicio soldada a 950 m de fibra óptica raman en el final, de la compañía OFS, con una perdida cerca de 0.33 dB/Km. La perturbación de frecuencia senoidal de 50Hz es generada a los 9270m antes hacia el final de la fibra con una membrana de oscilación

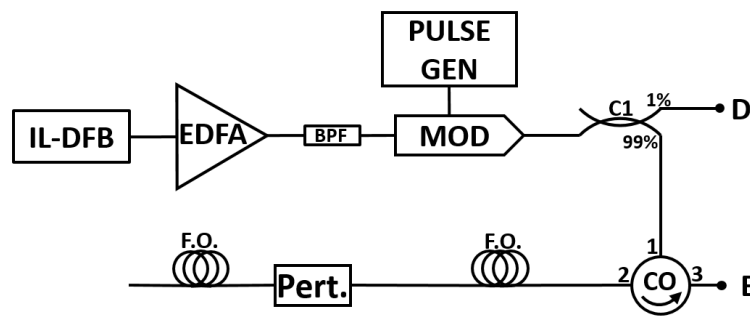


Figura 32 Circuito óptico para la detección de la perturbación en la fibra de sensado.

Las trazas de retrodispersión Rayleigh son registradas en el puerto E con un fotodetector y un osciloscopio. El osciloscopio registra una ventana completa de 100 ms a una velocidad de 20 MSPS, en los cuales existen aproximadamente 1024 trazas de retrodispersión correspondientes cada pulso en la fibra. Una vez registradas las 1024 trazas se procede a analizar las trazas empleando los siguientes 3 pasos.

Primero, se encuentran las sumas parciales $s_i(t)$, promediando N trazas consecutivas con la siguiente formula:

$$S_{j,m}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1+m(j-1)}^{N+m(j-1)} s_i(t) \quad (28)$$

Donde m es un número entero y corresponde a un salto entre trazas, siendo $1 \leq m$, y $j = 1, \dots, \frac{(1024-N)}{m}$ es un número ordinal de la suma parcial.

Después calculamos el valor absoluto de la diferencia $D_{k,m}(t)$ entre cada suma parcial consecutiva, como:

$$D_{k,m}(t) = |S_{k+1,m}(t) - S_{k,m}(t)| \quad (29)$$

Donde $k = 1, \dots, \frac{(1024-N)}{m} - 1$

El último paso del algoritmo incluye el análisis de la superposición de todas las diferencias $D_{k,m}(t)$.

Se encontró que la relación entre la señal y el valor medio del ruido (SNR) depende fuertemente del cambio m . Con estas condiciones experimentales el máximo de SNR se alcanzó para el cambio m igual a 16 (figura 33).

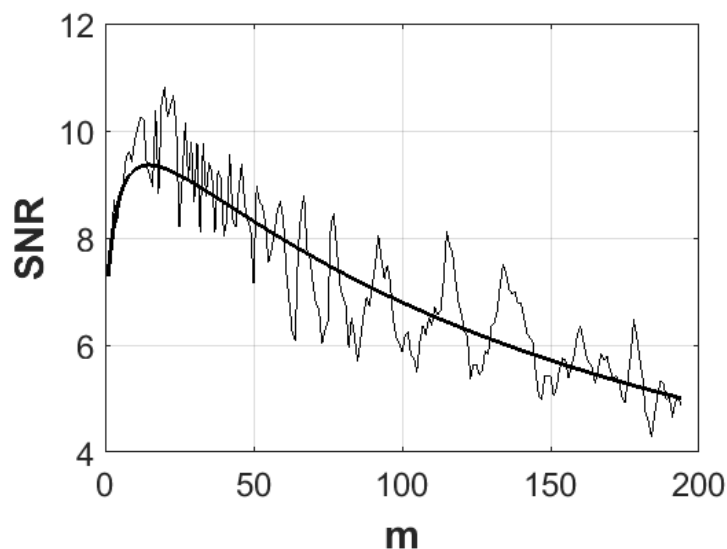


Figura 33 Relación señal-ruido en función del cambio m .

La superposición de todos los valores de $D_{k,m}(t)$, se muestran en la figura 34 para $N = 32$ y $m = 16$. El pico mas alto denota el punto donde ocurre la perturbación a 9270 m en la fibra de sensado. El pico de señal supera el máximo del valor de ruido en 2.3 veces y aproximadamente en 10 dB por encima del valor medio del ruido (SNR).

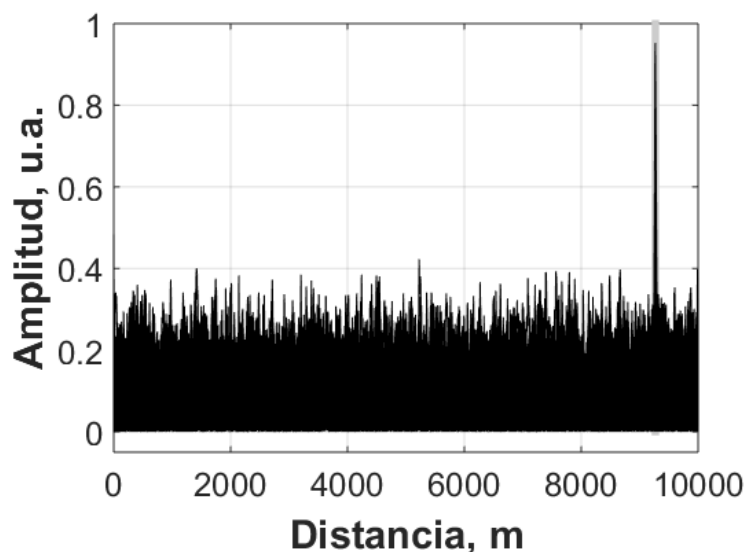


Figura 34 Superposición de los valores absolutos de la diferencia entre las trazas promedio del láser IL-DFB.

El valor de la relación señal ruido permite una correcta localización de la perturbación con el láser IL-DFB a distancias cercanas a 10km con resolución cerca de 20-30m, pero no certifica la calidad relativa de la solución propuesta.

Se destaca, que para el láser DFB no encadenado, nunca se registra la perturbación una distancia que exceda los 100m.

Con el fin de estimar el rendimiento del láser IL-DFB para el uso del sistema ϕ -OTDR, se presenta la misma medición, bajo las mismas condiciones de experimentación, pero utilizando un láser comercial de ultra-estrecho ancho de línea (~ 300 Hz), el láser OEwaves láser OE4020-155000-PA-00. La figura 34 muestra la superposición de la diferencia de los promedios de trazas, para las mediciones utilizando el láser OEwaves. El pico de la señal a la distancia igual a 9270 m supera la señal de ruido más grande alrededor de 2,25 veces, lo que es casi el mismo resultado, para la medición con el láser IL-DFB.

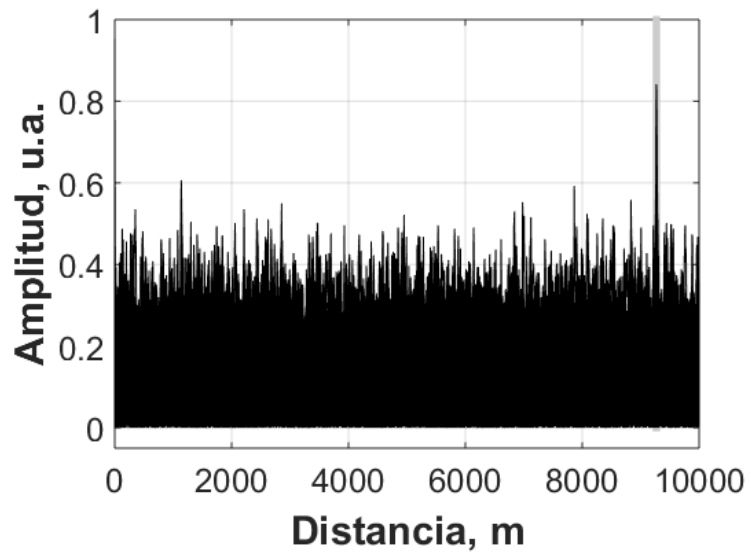


Figura 35 Superposición de los valores absolutos de la diferencia entre las trazas promedio del láser ultra-estrecho ancho de línea OEwaves OE4020-155000-PA-00.

5.2 Resultados.

Se emplea la configuración del láser IL-DFB para la detección y localización de perturbaciones a lo largo de una fibra óptica mediante el sistema φ -OTDR. El láser DFB encadenado tiene un ancho de línea de 2.4kHz que permite una medición a largas distancias de una perturbación. El láser IL-DFB permite una localización de una perturbación de 50Hz a la distancia de 9270m con la misma relación señal ruido que un láser de alto costo de ultra-estrecho ancho de línea, láser OEwaves.

Capítulo VI. Conclusiones generales.

En los sistemas ϕ -OTDR es necesaria una fuente de luz cuyo ancho de banda sea reducido para lograr una mayor longitud de sensado (en el orden de los kHz para kilómetros de sensado). Mientras que su potencia de radiación debe ser baja (11 mW) para evitar ruido en las trazas de retrodispersión causado por la radiación que no elimina el modulador de intensidad.

La energía de retrodispersión observada en las trazas, se puede incrementar por medio del ancho de pulso inyectado en la fibra óptica de sensado, donde experimentalmente se observó un incremento de 10% cuando se incrementa el pulso de 150 a 250 ns y un 30% al incrementar a 350ns.

Dos parámetros afectan la resolución espacial del sistema ϕ -OTDR, el ancho de pulso relacionado con la señal que emite el inicio de pulso y el final de pulso (con un ancho de pulso de 100 ns se obtiene 10 m de resolución), y la velocidad de muestreo, la cual se traduce en la distancia que existe entre una muestra y otra, así en una velocidad de muestreo de 20 MSPS registra muestras cada 5m. Mientras que el rango de frecuencias que puede detectar es función de la longitud de la fibra de sensado, se requiere ventanas de adquisición de datos de por lo menos 2 segundos para lograr una transformada rápida de Fourier fiable.

La caracterización realizada a las fibras ópticas de sensado con la técnica de EDS muestra el germanio como elemento variante en el núcleo de las fibras, por lo que se definen como fibras ópticas de germanosilicato. Observándose, concentraciones menores al 3% en el núcleo de las fibras ópticas de telecomunicaciones y 27% en la fibra raman de alta pérdida. Destacando que las fibras ópticas empleadas en telecomunicaciones no contienen más del 3% de germanio en su núcleo (Agrawal, 2001).

Se observó una respuesta experimental entre la potencia retrodispersada y el porcentaje de germanio, siendo el germanio el encargado de generar los centros de esparcimiento rayleigh y por tal mayor potencia retrodispersada. La relación señal ruido mejora 50% de la fibra con menor contenido de germanio (fibra SMF28e+) a la que mayor contenido tiene (fibra raman).

Para el desarrollo de una fuente de luz coherente especial se observó el encadenamiento de láser DFB mediante la técnica de auto-inyección utilizándose un anillo resonador de fibra (FORR) como filtro. Variando el coeficiente de acoplamiento, se comparó el encadenamiento del láser con la operación de FORR en regímenes de sub-acoplado, críticamente acoplado y sobre-acoplado.

El acoplamiento crítico proporciona altas potencias de retroalimentación permitiendo un mejor encadenamiento y entregando un estrechamiento de ancho de banda del láser superior, generando una frecuencia de radiación de 2.5 kHz de ancho de banda.

Al observar el comportamiento de polarización de la luz circulando en el FORR de retroalimentación usado para el encadenamiento por auto-inyección del láser DFB. Se proponen que un salto de modo es atribuido al salto entre modos cercanos de orden del FORR de misma polarización, mientras que el segundo es entre diferentes modos de polarización, pero de mismo orden. La diferencia entre ellos es el tiempo de recuperación de estado estable del sistema después de un evento de salto de modo (siendo 5 ms para el primero y 100 μ s en el segundo).

La configuración del láser IL-DFB es un láser DFB encadenado por auto-inyección en el régimen de acoplamiento crítico y es utilizado para la detección y localización de perturbaciones a lo largo de una fibra óptica mediante el sistema ϕ -OTDR. En este sistema el láser DFB encadenado tiene un ancho de línea de 2.4kHz que permite un sensado de aproximadamente 13 km. Empleándose dos fibras ópticas como elemento sensor, siendo la fibra raman donde ocurre la perturbación para incrementar la relación señal ruido del sistema.

El láser IL-DFB propuesto permite una localización de una perturbación de 50Hz a la distancia de 9270m con la misma relación señal ruido (SNR de 10dB) que un láser de alto costo de ultra-estrecho ancho de línea, laser OEwaves.

Referencias.

Baney, D. M., and W.V. Sorin, (1998) in: Derickson, D. Fiber Optic Test and Measurement. Chap. 5.

J. L. Bueno Escobedo, V. V Spirin, C. A. López-mercado, P. Mégret, I. O. Zolotovskii, and A. A. Fotiadi, “Results in Physics Self-injection locking of the DFB láser through an external ring fiber cavity : Polarization behavior,” vol. 6, pp. 59–60, 2016.

L. Cardoza-Avenidaño, V. Spirin, R. M. López-Gutiérrez, C. A. López-Mercado, C. Cruz-Hernández, Experimental characterization of DFB and FP chaotic láseres with strong incoherent optical feedback, *Opt.LáserTechnol.*43, 949–955. 2011.

Choi, John M., Reginald K. Lee, and Amnon Yariv. *Control of critical coupling in a ring resonator–fiber configuration: application to wavelength-selective switching, modulation, amplification, and oscillation.* *Optics Letters* 26(16) 1236-38. 2001.

D. Derickson, Fiber optic test and measurement. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, c 1998.

K.T.V. Grattan, Dr. T. Sun, “Fiber optic sensor technology: an overview”, *Sensors and Actuators*, 82, 40-61, 2000.

Eugene Hecht, *Óptica*, 3er edición, Pearson 2010.

Heebner, John E., Vincent Wong, Aaron Schweinsberg, Robert W. Boyd, and Deborah J. Jackson. *Optical Transmission Characteristics of Fiber Ring Resonators.* *IEEE Journal of Quantum Electronics.* 40(6) 726-730. 2004.

Gerd Keiser, *Optical Fiber Communications*, 2da ed, McGraw-Hill, 1991

Q. Li, C. Zhang, L. Li, and X. Zhong, “Localization mechanisms and location methods of the disturbance sensor based on phase-sensitive OTDR,” *Optik (Stuttg).*, vol. 125, no. 9, pp. 2099–2103, 2014.

Q. Li, C. Zhang, and C. Li, "Fiber-optic distributed sensor based on phase-sensitive OTDR and wavelet packet transform for multiple disturbances location," *Optik (Stuttg.)*, vol. 125, no. 24, pp. 7235–7238, 2014.

E.G Lizárraga Medina, *Estudio y caracterización de la estadística en la señal del sensor óptico basado en reflectometría óptica coherente en el dominio del tiempo.*, CICESE 2012.

López-Mercado CA, Spirin VV, Bueno Escobedo JL, Márquez Lucero A, Mégret P, Zolotovskii IO, Fotiadi AA. Locking of the DFB laser through fiber optic resonator on different coupling regimes. *Optics Commun*;359:195–9. 2016.

Sébastien Loranger, Mathieu Gagné, Victor Lambin-lezzi and Raman Kashyap, "Rayleigh scatter based order of magnitude increase in distributed temperature and strain sensing by simple UV exposure of optical fibre" *Scientific Reports*, Vol 5, 2015

Y. Lu, T. Zhu, L. Chen, and X. Bao, "Distributed Vibration Sensor Based on Coherent Detection of Phase-OTDR," *Lightwave*, vol. 28, no. 22, pp. 3243–3249, 2010.

Y. Muanenda, C. J. Oton, S. Faralli, and F. Di Pasquale, "A Cost-Effective Distributed Acoustic Sensor Using a Commercial Off-the-Shelf DFB Laser and Direct Detection Phase-OTDR," *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, 2016.

Robert E. Noons, Robin Devonshire, Terry V. Clapp, Suresh M. Ojha, Orla McCarthy, *Analysis of waveguide silica glasses using Raman microscopy*, *Journal of Non-Crystalline Solids* 354 pp. 3059–3071, 2008.

J. OthsubO, *Semiconductor Laser, Stability, Instability and Chaos*, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008 .

F. Peng, H. Wu, X.-H. Jia, Y. J. Rao, Z.-N. Wang, and Z.-P. Peng, "Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines," *Opt. Express*, vol. 22, no. 11, p. 13804, 2014.

Rao, Wei., Siliang Niu, Nan Zhang, Chunyan Cao, Yongmin Hu., *Phase generated carrier demodulation scheme for fiber Fabry-Pérot interferometric sensor with high finesse*. Optical Engineering 50(9) 094401. 2011

Meiqi Ren, Ping Lu, Liang Chen, and Xiaoyi Bao, Theoretical and Experimental Analysis of ϕ -OTDR Based on Polarization Diversity Detection, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 28, NO. 6, 2016.

Seraji, Faramarz E. *Steady-state performance analysis of fiber-optic ring resonator*. Prog. Quantum Elect. 33(1)1-16. 2009.

John M. Senior, Optical Fiber Communications, 3er ed, Pearson 2009

Y. Shi, H. Feng, and Z. Zeng, "Distributed fiber sensing system with wide frequency response and accurate location," Opt. Lasers Eng., vol. 77, pp. 219–224, 2016.

W. T. Silfvast, Láser Fundamentals, 2nd ed., Cambridge University 2004.

Spirin, V.V., J. Kellerman, P.L. Swart, A.A. Fotiadi. *Intensity noise in SBS with injection locking generation of Stokes seed signal*. Opt. Exp. 14, 8328–8335, 2006.

V. V Spirin, C. a López-Mercado, P. Mégret, and a a Fotiadi, "Single-mode Brillouin fiber láser passively stabilized at resonance frequency with self-injection locked pump láser," Láser Phys. Lett., vol. 9, no. 5, pp. 377–380, 2012.

Stokes L. F., M. Chodorow, and H. J. Shaw, All-single-mode fiber resonator. Optics. Letters. 7(6) 288-290, 1982

Urquhart, Paul. *Compound optical-fiber-based resonators*. OSA A, 5(6) 803-812. 1988

C. Wang, C. Wang, Y. Shang, X. Liu, and G. Peng, "Distributed acoustic mapping based on interferometry of phase optical time-domain reflectometry," Opt. Commun., vol. 346, pp. 172–177, 2015.

Chai Yeh, Handbook of Fiber Optics Theory and Applications, 1^a edición, Academic Press, United Kingdom, 1989.

Francis T. S. Yu, Shizhuo Yin, Fiber Optic Sensors, 1er ed, Marcel Dekker, 2002

Y. Zhan, Q. Yu, K. Wang, F. Yang, and B. Zhang, "Optimization of a distributed optical fiber sensor system based on phase sensitive OTDR for disturbance detection," Sens. Rev., vol. 35, no. 4, pp. 382–388, 2015.

Fan Zhu, Xuping Zhang, Lan Xia, Zheng Guo, and Yixin Zhang, Active Compensation Method for Light Source Frequency Drifting in ϕ -OTDR Sensing System, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 27, NO. 24, 2015