

Tesis defendida por

Éder Germán Lizárraga Medina

y aprobada por el siguiente comité

Dr. Serguei Miridonov

Director del Comité

Dra. Diana Tentori Santa Cruz

Miembro del Comité

Dr. Mikhail Shlyagin

Miembro del Comité

Dr. Santiago Camacho López

Miembro del Comité

Dr. Iouri Orlov Kuchina

Miembro del Comité

Dr. Pedro Negrete Regagnon

Coordinador del programa de
Posgrado en Óptica

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de la Dirección de Estudios de Posgrado

23 de Agosto del 2012

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Óptica con orientación en Optoelectrónica**

**Estudio y caracterización de la estadística en la señal del sensor óptico
basado en reflectometría óptica coherente en el dominio del tiempo**

Tesis

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Éder Germán Lizárraga Medina

Ensenada, Baja California, México

2012

Resumen de la tesis de Éder Germán Lizárraga Medina, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Óptica con orientación en Optoelectrónica. Ensenada, Baja California, Agosto de 2012.

**Estudio y caracterización de la estadística en la señal del sensor óptico
basado en reflectometría óptica coherente en el dominio del tiempo**

Resumen aprobado por:

Dr. Serguei Miridonov

Director de Tesis

El siguiente trabajo presenta el estudio de un sensor basado en COTDR y de las características de los cambios observados en la estadística de la señal. Las variaciones de la señal en este sensor hacen posible detectar la aplicación de una fuerza externa en la fibra óptica y estimar la distancia al segmento perturbado de la fibra. En la práctica la fuente de luz es imperfecta (la frecuencia del láser puede cambiar), el fotodetector es ruidoso y la temperatura en los segmentos de la fibra varía con el tiempo, causando falsas alarmas. Para eliminar esto, el procesamiento de señal debe ser capaz de distinguir entre una condición provocada por una falsa alarma y una perturbación real en la fibra. Esta investigación se enfoca en la estadística de la señal retrodispersada obtenida con un fotodetector para hacer posible el evaluar la sensibilidad del sensor y la probabilidad de una falsa alarma.

Palabras Clave: **Señal retrodispersada, COTDR.**

Abstract of the thesis presented by Éder Germán Lizárraga Medina, in partial fulfillment of the requirements of the degree of Master in Sciences in Optics with orientation in Optoelectronics. Ensenada, Baja California, August 2012.

Study and characterization of the statistic in the signal of the optic sensor based on coherent optical time domain reflectometry

This work presents the study of a COTDR-based sensor and characteristics of the observed changes in the statistics of the signal. Signal variations in this sensor make possible to detect an application of external force in the optical fiber and to estimate the distance to the disturbed fiber segment. In practice, the light source is imperfect (the laser frequency may change), the photodetector is noisy and the temperature of the segments varies in time, causing false alarms. To eliminate this, the signal processing must be able to distinguish between a false alarm condition and real disturbance in the fiber. This research focuses on the statistics of backscattered signal obtained with a photodetector to make it possible to evaluate the sensor sensitivity and false alarm probability.

Keywords: **Backscattered signal, COTDR.**

A mi Mamá y a mi esposa.

Agradecimientos

A Dios por poner los medios que me permitieron cumplir esta meta.

A mi director de tesis Dr. Serguei Miridonov por su paciencia al explicar y el gran apoyo a mis planes.

A los miembros del comité de tesis, Dra. Diana Tentori, Dr. Mikhail Shlyagin, Dr. Santiago Camacho y Dr. Ioury Orlov por su valiosa aportación para el desarrollo y culminación de este proyecto de tesis.

A mis amigos y compañeros que siempre me brindaron su apoyo incondicional.

Al personal académico y técnico que compartió su conocimiento para mi crecimiento educativo.

Al personal administrativo de óptica y Centro de Educación Científica y de Educación Superior de Ensenada por su disposición a facilitar los procesos administrativos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por proveer el costo de mi manutención durante este periodo.

Gracias.

Tabla de Contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Contenido	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas	xi
1. Introducción	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Contenido de la tesis	3
2. Sensores de Fibra Óptica Basados en Reflectometría Óptica en el Dominio del Tiempo	5
2.1 Introducción a Sensores de Fibra Óptica	5
2.2 Clasificación de los Sensores de Fibra Óptica	6
2.3 Sensores OTDR	8
2.3.1 OTDR por esparcimiento de Rayleigh	9
2.3.2 Brillouin OTDR (BOTDR)	14
2.3.3 Raman OTDR (ROTDR)	18
2.3.4 Sensor COTDR	20
2.3.5 Estudio estadístico	24
2.4 Aplicaciones de Sensores de Fibra Óptica	27
3. Metodología del Experimento	28
3.1 Generación de pulsos ópticos	28
3.2 Aplicación de perturbación en la fibra óptica	29
3.3 Adquisición de datos	30
4. Caracterización Fotodiodo - Amplificador	33
4.1 Introducción	33
4.2 Análisis	36
4.3 Conclusión	39
5. Estudio y Caracterización de la Señal del OTDR Coherente	40
5.1 Introducción	40

Tabla de Contenido

	Página
5.2 Análisis	41
5.2.1 Relación señal a ruido (SNR)	43
5.2.2 Estabilidad de la señal retrodispersada	44
5.2.3 Detección de la perturbación inducida	46
5.3 Conclusiones	48
6. Conclusiones	49
6.1 Conclusiones	49
6.2 Trabajo a Futuro	51
Referencias Bibliográficas	53
Apéndice A. Equipo usado	56

Lista de Figuras

Figura		Página
1	Configuración básica de un sensor. Modificado de Howe (1984), p. 2. .	5
2	Clasificación de sensores. a) Extrínseco . b) Intrínseco. Arenas (2009), p. 6.	6
3	Fibra óptica que en su terminal tiene un elemento sensible compuesto de una membrana que contiene agentes reactivos a la perturbación a monitorear. Modificado de Seitz (1988), p. 142.	6
4	Clasificación de sensores basada en región de sensado. a) Sensores puntuales. b) Sensores quasi-distribuidos. c) Sensores distribuidos. Modificado de Grattan y Sun (2000), p. 41.	8
5	Espectro de dispersión de Rayleigh, Raman y Brillouin. Modesto (2009), p. 7.	9
6	Dispersión por Rayleigh dentro de una fibra óptica. Juarez (2005), p. 7.	10
7	OTDR por dispersión de Rayleigh. a) Arreglo optoelectrónico para efectuar la reflectometría óptica en el dominio del tiempo. b) Señal retrodispersada. Modificado de Yun y Yin (2002), p. 205.	10
8	Figura que representa el viaje del pulso a lo largo de la fibra en diferentes tiempos.	12
9	a) Arreglo optoelectrónico del sensor P-OTDR. b) Traza de la señal retrodispersada, en donde se ha aplicado una fuerza externa en la fibra óptica. Modificado de Ross (1981), p. 3492.	14
10	a) Proceso de esparcimiento espontáneo de Brillouin. b) Proceso de esparcimiento estimulado de Brillouin. Modificado de Kobayakov <i>et al.</i> (2010), p. 5.	16
11	Esquema y medición de un sensor BOTDR. Modesto (2009), p. 19. . .	17
12	Esquema de un sensor ROTDR. Modificado de Yun y Yin (2002), p. 207.	19
13	Espectro de la señal retroesparcida para diferentes temperaturas en la fibra óptica. Liu <i>et al.</i> (2000), p. 154.	20
14	Esquema optoelectrónico de un sensor COTDR.	20
15	a) Pulsos ópticos que viajan hacia delante en la fibra óptica. b) Señal retrodispersada en respuesta a los pulsos ópticos.	21

Lista de Figuras

Figura	Página
16 Diferencia de trazas de señal ante una perturbación externa sobre la fibra óptica. Modificado de Juarez <i>et al.</i> (2005), p. 2082.	22
17 a) 2 señales retrodispersadas simuladas con una mala sincronización en su adquisición. b) Resta de estas 2 señales.	23
18 Diagrama a bloques del interior del láser modulado de alta coherencia.	29
19 Esquema del arreglo optoelectrónico del sensor COTDR con modulador externo al láser para disminución del nivel de luz indeseado.	29
20 Esquema de las conexiones para la adquisición de la señal retrodispersada. En color negro se muestra el camino del pulso óptico. El camino del pulso electrónico retardado y no retardado se muestra en azul y rojo respectivamente.	31
21 Arreglo optoelectrónico para caracterización de fotodiodo-amplificador.	35
22 Se grafica el promedio de la intensidad de corriente eléctrica, con su respectiva desviación estándar para los valores de la potencia óptica que emulan a la luz retrodispersada. a) Medición efectuada con un coeficiente de amplificación de $1 \times 10^5 V/A$ con bajo ruido y un ancho de banda de 1 MHz. b) Medición efectuada con un coeficiente de amplificación de $1 \times 10^5 V/A$ con alta velocidad de respuesta y un ancho de banda de 10 MHz. c) Medición efectuada con un coeficiente de amplificación de $1 \times 10^7 V/A$ con alta velocidad de respuesta y un ancho de banda de 220 KHz.	37
23 Densidad espectral de potencia. a) Para un coeficiente de amplificación de $1 \times 10^5 V/A$ con bajo ruido y un ancho de banda de 1 MHz. b) Para un coeficiente de amplificación de $1 \times 10^5 V/A$ con alta velocidad de respuesta y un ancho de banda de 10 MHz. c) Para un coeficiente de amplificación de $1 \times 10^7 V/A$ con alta velocidad de respuesta y un ancho de banda de 220 KHz.	38
24 Señal retrodispersada	41
25 Espectro de potencia del ruido fuera de la fibra óptica.	42
26 Relación entre la corriente promedio en la señal retrodispersada y la desviación estándar que manifiesta.	43

Lista de Figuras

Figura		Página
27	Señal retrodispersada en los primeros y últimos 2 kilómetros de la fibra óptica para 1 minuto.	44
28	Señal retrodispersada en los primeros y últimos 2 km de la fibra óptica para 1 hora.	45
29	Comportamiento de intensidad en la señal retrodispersada en distancias que están alrededor del kilómetro 1.2 para 1 hora.	46
30	Comportamiento de intensidad en la señal retrodispersada en distancias que están alrededor del kilómetro 1.2 para 1 segundo. a) No hay perturbación aplicada. b) Se aplica una perturbación senoidal de 10 Hz. c) Se aplica una perturbación cuadrada de 10 Hz.	47
31	Espectro de potencia de la señal para distancias alrededor de la aplicación de la perturbación. En rojo se representa el espectro de la señal retrodispersada de la distancia donde la perturbación es introducida. Los colores negro y azul corresponden a señales de distancias ubicadas metros antes y después de esta perturbación. a) Se aplica una perturbación senoidal de 10 Hz. b) Se aplica una perturbación cuadrada de 10 Hz. c) Se aplica una perturbación senoidal de 0.1 Hz.	48

Lista de Tablas

Tabla		Página
1	Parámetros del Fotodiodo EPM 705. Modificado de JDSU (2011), p. 4.	33
2	Parámetros del Amplificador DHPA - 100. FEMTO (2010), p. 2. . .	34

Capítulo 1

Introducción

La fibra óptica ha tenido un aumento en su demanda en el mundo de la telecomunicación, por ser un medio de transporte de información, de alta velocidad, que es inmune a la interferencia electromagnética. Al no haber señales eléctricas en la fibra no hay peligro de corto circuito, por lo que se pueden instalar en zonas de riesgo, como en ambientes explosivos. La fibra óptica es ligera. La comunicación es segura, pues estas no pueden ser intervenidas sin ser percibido. Estas ventajas la convierten en un transporte de información muy atractivo.

Los sensores de fibra óptica adquieren todas las ventajas de la fibra óptica, es por ello que resulta llamativo el investigarlos. Se han realizado investigaciones para usar a la fibra óptica como sensor desde principios de la década de los 70's y aún se siguen descubriendo nuevas técnicas y perfeccionando las ya existentes.

Una técnica usada por los sensores de fibra óptica es la reflexión óptica en el dominio del tiempo (OTDR), la cual consiste en emitir un pulso de láser de corta duración, el cual viajará a través de la fibra. Este pulso producirá una señal de luz que viaja opuesta al pulso del láser, llamada señal retrodispersada, debido a la dispersión de Rayleigh, Brillouin y/o Raman. Esta señal retrodispersada es la que nos proporciona información del enlace de fibra óptica por el cual viajó el pulso láser. La captura de esta señal óptica se hace mediante un fotodiodo, para su futuro procesamiento electrónico.

Esta técnica nació a principios de 1976 (Barnoski y Jensen, 1976) en el área de las líneas de telecomunicación, por el deseo de saber en qué lugar del enlace de fibra óptica

está ubicada y la importancia de una falla, ya sea provocada por conectores, reflexiones, rupturas u otros eventos.

Los sensores basados en la técnica de reflexión óptica en el dominio del tiempo tienen como característica especial ser capaces de predecir con una buena resolución donde está ubicado el evento ocurrido; brindándonos la posibilidad de usar toda la extensión de la fibra como un sensor, lo que se le llama sensor distribuido.

A la reflectometría óptica en el dominio del tiempo se le han hecho modificaciones, buscando así tener una gama de posibilidades para elegir la mejor opción a la hora de llevar a cabo un proyecto. En esta investigación se trabajará con una variación denominada reflectometría óptica coherente en el dominio del tiempo.

Un sensor basado en reflectometría óptica coherente en el dominio del tiempo consiste en lanzar un pulso de un láser de alta coherencia temporal, a lo largo de la fibra óptica. La distribución aleatoria de las inhomogeneidades en el núcleo de la fibra óptica provocará que la fase de las ondas retrodispersadas sea aleatoria, produciendo interferencia en forma de un patrón moteado (speckle temporal), por lo que la señal medida por el fotodiodo será de amplitud aleatoria, pero siempre igual ante cada pulso de láser. Las inhomogeneidades pueden cambiar su distribución dentro de la fibra óptica debido al alargamiento de la fibra por tensión o cambio de temperatura. Esto provocará un cambio en la señal retrodispersada.

Existen otros factores ajenos a una perturbación externa de la fibra óptica que nos producen cambios en la señal: variaciones en frecuencia que puedan presentarse entre los pulsos del láser, que no se mantenga una frecuencia a lo largo del pulso láser, temperaturas distintas para diferentes segmentos de la fibra óptica y el ruido que pueda introducir el fotodiodo. Los anteriores son algunos ejemplos de factores en los que al no tener un control absoluto, inevitablemente se introduce ruido a nuestra señal,

propiciando una diferencia entre señales, que al detectarse puede confundirse con una alarma por perturbación.

Este problema será enfrentado haciendo un procesamiento de señal, estudiando la estadística de la señal producida por nuestro sistema, para seleccionar así el modo de operación óptimo del sensor.

1.1 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es estudiar la estadística en la señal retrodispersada, cuando el sensor se encuentra sin perturbación y con perturbación. Con esto se pretende identificar los límites del sensor y saber dentro de que parámetros es posible identificar perturbaciones en la fibra óptica, evitando así, falsas alarmas.

Entre los objetivos también se encuentra evaluar el ruido del subsistema fotodiodo-amplificador. Este es un componente que introduce ruido al sistema, haciendo vital la elección de un modo operación adecuado para el mismo.

1.2 Contenido de la tesis

En el capítulo 2, se estudian trabajos previos de sensores de fibra óptica, así como el principio de operación del sensor COTDR, y otras técnicas basadas en OTDR para sensado.

En el capítulo 3, se plantea la metodología implementada para realizar el experimento que permite estudiar la señal retrodispersada.

En el capítulo 4, se explica la caracterización hecha a un componente importante en el sistema, el fotodiodo-amplificador, para elegir un modo de operación del mismo que nos ofrezca una relación señal a ruido (SNR) adecuada.

En el capítulo 5, se expone el estudio estadístico en la señal proveniente del sistema COTDR, sin perturbación y con perturbación inducida.

En el capítulo 6, se presentan comentarios y conclusiones basados en los resultados obtenidos durante los experimentos y se indican las recomendaciones pertinentes para darle continuidad al trabajo.

Capítulo 2

Sensores de Fibra Óptica Basados en Reflectometría Óptica en el Dominio del Tiempo

2.1 Introducción a Sensores de Fibra Óptica

Un sensor es aquel dispositivo que toma la medición de un parámetro físico y lo convierte en otro parámetro físico que se puede medir con instrumentación disponible. Reciben el título de sensores de fibra óptica, aquellos dispositivos en los que se involucra a la fibra óptica en la medición de un parámetro físico. Esta medición es posible porque el parámetro físico modifica las propiedades ópticas de la fibra óptica (Pollock, 1995).

El esquema básico de un sensor de fibra óptica consta de una fuente de luz, la fibra óptica, un fotodetector y un equipo para el procesamiento de señales.

En la figura 1 podemos ver un ejemplo de una configuración de un sensor de fibra óptica, esta incluye una fuente de luz láser, la fibra óptica, que en este caso se encuentra bajo tierra; un detector que monitorea el parámetro de interés a través del cambio de la señal óptica en la fibra, después convierte la señal óptica a eléctrica, la analiza y si es necesario se activa una alarma.

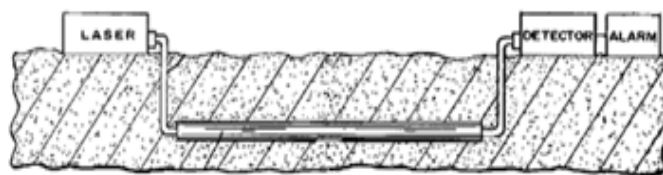


Figura 1. Configuración básica de un sensor. Modificado de Howe (1984), p. 2.

2.2 Clasificación de los Sensores de Fibra Óptica

Existen distintas clasificaciones en los sensores de fibra óptica. De acuerdo a su modo de operación los sensores pueden ser divididos en extrínsecos e intrínsecos (Grattan y Sun, 2000).

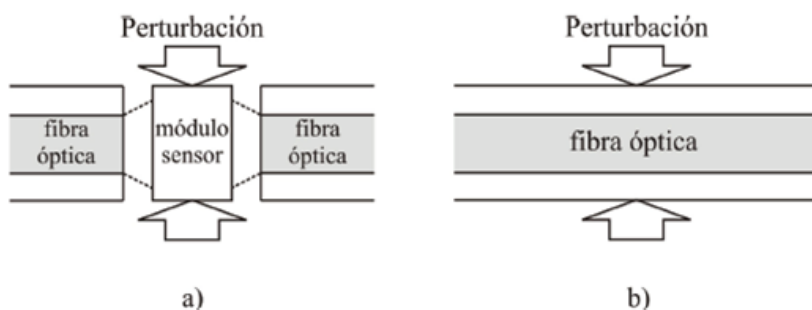


Figura 2. Clasificación de sensores. a) Extrínseco . b) Intrínseco. Arenas (2009), p. 6.

Los sensores extrínsecos usan a la fibra óptica como guía de luz para su transporte hacia el punto de sensado y al fotodetector (Pérez, 1996). Los sensores extrínsecos resultan útiles en situaciones en las que el parámetro físico de medición no produce cambios en las propiedades de la fibra óptica.

En los sensores extrínsecos el elemento sensible se encuentra enlazado en la fibra óptica, ya sea mecánica o químicamente. En la figura 2 a) podemos ver como la perturbación que afecta al módulo sensor, que es el elemento sensible, es la que será medida.

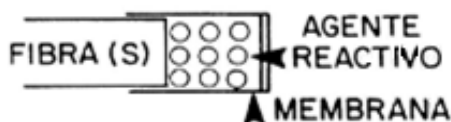


Figura 3. Fibra óptica que en su terminal tiene un elemento sensible compuesto de una membrana que contiene agentes reactivos a la perturbación a monitorear. Modificado de Seitz (1988), p. 142.

La figura 3 muestra un arreglo de un sensor extrínseco, en el que el módulo sensor

está compuesto por una sustancia reactiva al parámetro físico por medir y se encuentra envuelta en una membrana tubular permeable a la sustancia a analizar. La membrana tubular se adapta al extremo de la fibra o se envuelve la fibra con ella. La membrana tubular se cubre para bloquear la radiación incidente de la muestra.

El sensor de pH desarrollado por Peterson (Peterson *et al.*, 1980), es un buen ejemplo de un sensor que utiliza este arreglo. El sensor esta basado en un indicador colorante. Cuando el pH de una muestra varía, el espectro de absorción cambia en proporción a la concentración relativa de los ácidos y bases en el indicador colorante. Este sensor permite determinar el pH en un rango de 7.0 a 7.4 con una resolución de 0.01 unidades pH.

Los sensores intrínsecos se caracterizan por usar a la fibra óptica como transductor del parámetro físico de interés al alterar sus propiedades ópticas, ver figura 2 b). Algunas de las propiedades ópticas que pueden ser modificadas son el índice de refracción, las características de absorción o fluorescencia de la fibra, la interfaz núcleo revestimiento, entre otros. Mientras esta alteración ocurre, la fibra óptica funciona también como transporte de la luz hacia su destino.

De acuerdo a la región en el espacio que son capaces de sensar, los sensores de fibra óptica se pueden clasificar en tres grupos: a) Sensores puntuales, b) Sensores quasi-distribuidos y c) Sensores distribuidos.

Los sensores de fibra óptica puntuales, figura 4 a) son aquellos que miden el parámetro físico en un solo punto del espacio, tal como el sensor extrínseco descrito anteriormente.

Los sensores quasi-distribuidos figura 4 b) son los que tienen diversos puntos sensibles a lo largo de la fibra óptica, permitiendo así, cubrir un área de monitoreo mayor que los sensores puntuales.

Los sensores distribuidos son aquellos que utilizan a toda la fibra óptica como un

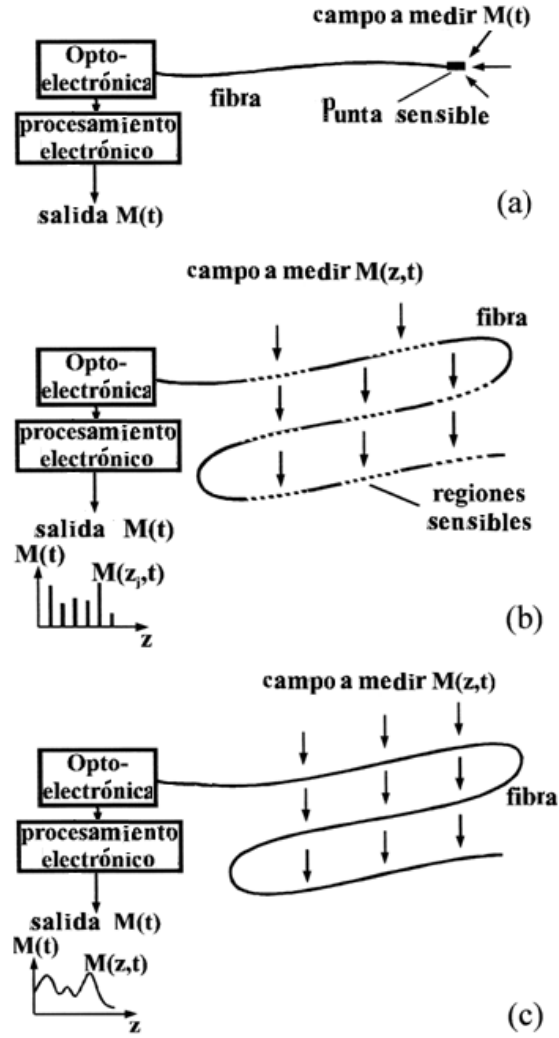


Figura 4. Clasificación de sensores basada en región de sensado. a) Sensores puntuales. b) Sensores quasi-distribuidos. c) Sensores distribuidos. Modificado de Grattan y Sun (2000), p. 41.

sensor, figura 4 c).

2.3 Sensores OTDR

Los sensores OTDR están dentro del sector de los sensores intrínsecos y distribuidos; estos usan la dispersión de Rayleigh, Brillouin ó Raman para monitorear la fibra óptica. En nuestro contexto la dispersión es un proceso físico mediante el cual la luz es desviada por inhomogeneidades en el núcleo de la fibra óptica (Horiguchi *et al.*, 1995).

En la figura 5 se puede ver el espectro de la dispersión producida por Rayleigh, Raman y Brillouin. El componente espectral del esparsamiento de Rayleigh no tiene un cambio en frecuencia, al no haber un cambio de la energía en los fotones se dice que es un proceso elástico. En el esparsamiento de Raman y Brillouin si tiene lugar un cambio de energía en los fotones, lo cual los convierte en procesos inelásticos, por lo tanto sus componentes espectrales sufren un corrimiento frecuencial. En una fibra óptica típica de telecomunicaciones la dispersión de Brillouin produce un corrimiento frecuencial del orden de 10 GHz, mientras que el corrimiento espectral de Raman es del orden de THz.

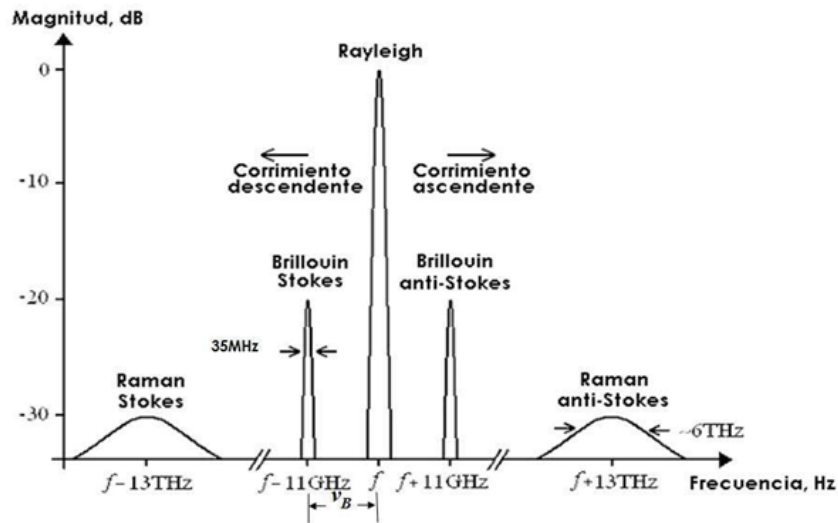


Figura 5. Espectro de dispersión de Rayleigh, Raman y Brillouin. Modesto (2009), p. 7.

2.3.1 OTDR por esparsamiento de Rayleigh

El esparsamiento de Rayleigh en la fibra óptica es un efecto elástico (lineal) e intrínseco debido a las inhomogeneidades aleatorias del índice de refracción, que actúan como pequeños centros de dispersión.

La intensidad que es dispersada por efecto Rayleigh es proporcional a λ^{-4} (λ es la longitud de onda de la luz) y se dispersa en todas direcciones, tal como se muestra en

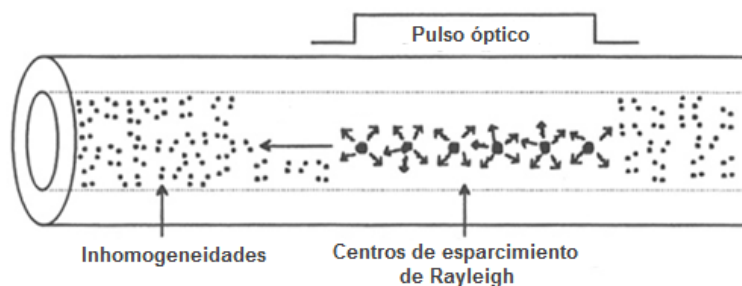


Figura 6. Dispersión por Rayleigh dentro de una fibra óptica. Juárez (2005), p. 7.

la figura 6. La luz que ha sido dispersada y viaja opuesta al pulso láser es llamada luz retrodispersada. Esta debe cumplir con la condición del ángulo crítico para que exista reflexión interna total y así no escape de la fibra óptica.

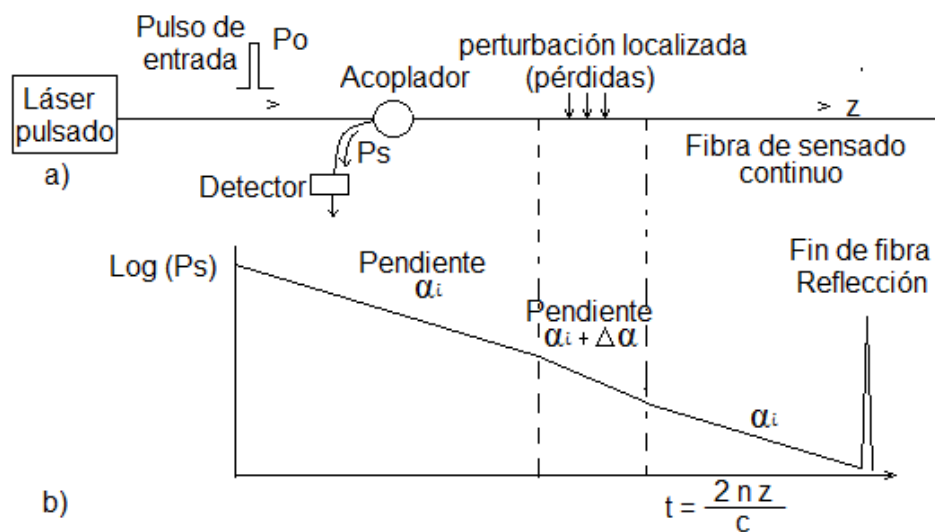


Figura 7. OTDR por dispersión de Rayleigh. a) Arreglo optoelectrónico para efectuar la reflectometría óptica en el dominio del tiempo. b) Señal retrodispersada. Modificado de Yun y Yin (2002), p. 205.

La intensidad de la luz retrodispersada es medida con un detector, tal como se muestra en la figura 7 a). En la figura 7 b) se observa como el logaritmo de la intensidad de la luz retrodispersada decae exponencialmente con el tiempo, debido a las pérdidas intrínsecas en la fibra (α_i), hasta llegar a la zona de la perturbación en la fibra óptica, la cual produce una atenuación $\Delta\alpha$. La potencia retrodispersada está dada por la

ecuación 1

$$P_s(t) = P_o r(z) e^{-\int_0^z 2\alpha(z) dz}, \quad (1)$$

donde P_o es la potencia del pulso de entrada, $r(z)$ es el coeficiente de retrodispersión efectivo por unidad de longitud, que toma en cuenta el coeficiente de retrodispersión de Rayleigh y la apertura numérica de la fibra óptica, y α es el coeficiente de atenuación (Yun y Yin, 2002).

Para llevar a cabo un cambio en el análisis de la intensidad de la luz retrodispersada como función temporal a función espacial se aplica la siguiente relación.

$$z = \frac{V_g t}{2}, \quad (2)$$

donde V_g es la velocidad de grupo y t es el instante de tiempo que corresponde a una posición espacial específica (Yun y Yin, 2002).

Los sensores distribuidos poseen un parámetro llamado resolución espacial, el cual determina la región de distancia a la que hubo algún evento, el tamaño de estas regiones de distancia, ó resolución espacial, está determinado por el ancho del pulso del láser y la velocidad de grupo de la luz en la fibra óptica. Si el pulso de entrada tiene un ancho τ , entonces la resolución espacial, ΔZ , está dada por

$$\Delta Z = \frac{V_g \tau}{2} = \frac{c\tau}{2n}, \quad (3)$$

donde V_g es la velocidad de grupo, c es la velocidad de la luz y n es el índice de refracción en el nucleo de la fibra (Yun y Yin, 2002).

En la figura 8 se puede ver que mientras el pulso óptico va trasladándose a través de la fibra, la señal retrodispersada retorna en dirección opuesta a él. Por citar un ejemplo, si nuestro láser emite un pulso de 10 ns de ancho, la resolución espacial es de

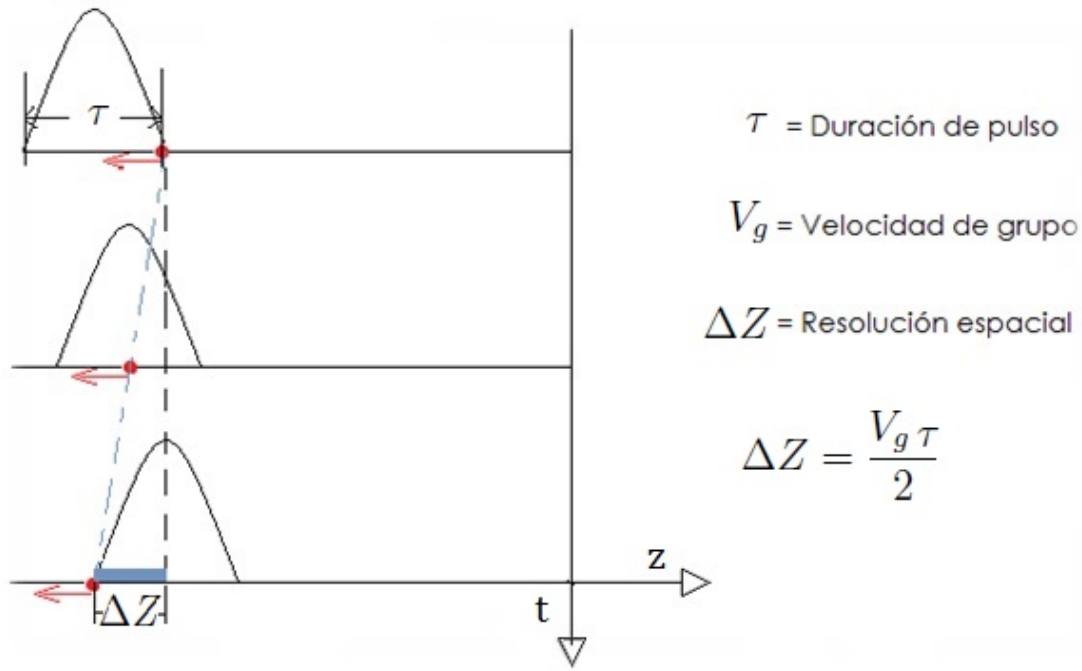


Figura 8. Figura que representa el viaje del pulso a lo largo de la fibra en diferentes tiempos.

1 metro.

La relación señal a ruido ó por sus siglas en ingles SNR , es un parámetro de la señal que caracteriza la habilidad de un dispositivo para diferenciar la señal deseada del ruido. La SNR está dada por la siguiente ecuación (Saleh y Teich, 1991)

$$SNR = \frac{ValorPromedio}{DesviaciónEstándar}, \quad (4)$$

En el capítulo 4, para la realización de la caracterización de la señal en el fotodiodo, tomaremos a *ValorPromedio* como el promedio de la corriente del fotodiodo y *DesviaciónEstándar* como la desviación estándar de esta señal de corriente.

El ruido del fotodetector óptico está relacionado con la SNR , es por ello que debe ser minimo para obtener una SNR óptima. El total de potencia de ruido es proporcional al ancho de banda del fotodiodo, que está determinado por el pulso óptico de entrada a la fibra. Entre más corto el pulso mejor la resolución espacial, también más grande

el ancho de banda del fotodiodo; consecuentemente mayor la potencia del ruido y la desviación estándar de la señal, provocando así una SNR menor. Es por ello que en los OTDR debe haber un análisis de prioridades, basado en las necesidades de la medición, para definir correctamente estos parámetros.

Uno de los métodos para reducir la influencia del ruido y por ende la desviación estándar, es método de promediación de señal. La idea básica de esta solución consiste en el hecho de que tras aplicar un promedio entre las mediciones de varias señales, el ruido disminuye.

Puede mostrarse que tras promediar N señales, las mediciones del SNR obtenido por este procesamiento de señal es $\sqrt{N}$ veces mayor que el SNR obtenido en una medición. Este efecto resulta del hecho de que en repetidas mediciones la señal se incrementa proporcionalmente con el número de repeticiones, mientras que el ruido solo proporcionalmente a $\sqrt{N}$ (Sischka *et al.*, 1988).

OTDR Polarimétrico (POTDR)

Un ejemplo de la aplicación de esta técnica para sensado de un parámetro físico, es el sensor OTDR Polarimétrico (POTDR), el cual estudia el estado de polarización de la luz retrodispersada por efecto Rayleigh. (Rogers, 1980, 1981).

Al determinar el estado de polarización de la señal retrodispersada a lo largo de la fibra óptica, es posible detectar perturbaciones que influyen en el estado de polarización de la señal retrodispersada. Algunos parámetros físicos que pueden ser medidos con esta configuración son tensión, presión, campos magnéticos, campos eléctricos y temperatura, entre otros.

En la figura 9 a) se muestra el esquema básico para el sensor POTDR, el cual consiste en lanzar un pulso a través de una fibra óptica, hacer incidir la luz retrodispersada por

esparcimiento de Rayleigh en un analizador de polarización y después capturarla con un fotodetector. En la figura 9 b) se presenta una gráfica que ha sido el resultado de aplicar una fuerza en la fibra óptica. Para saber a qué ubicación espacial corresponde el punto temporal en el que tuvo lugar la tensión se utiliza la ecuación 2

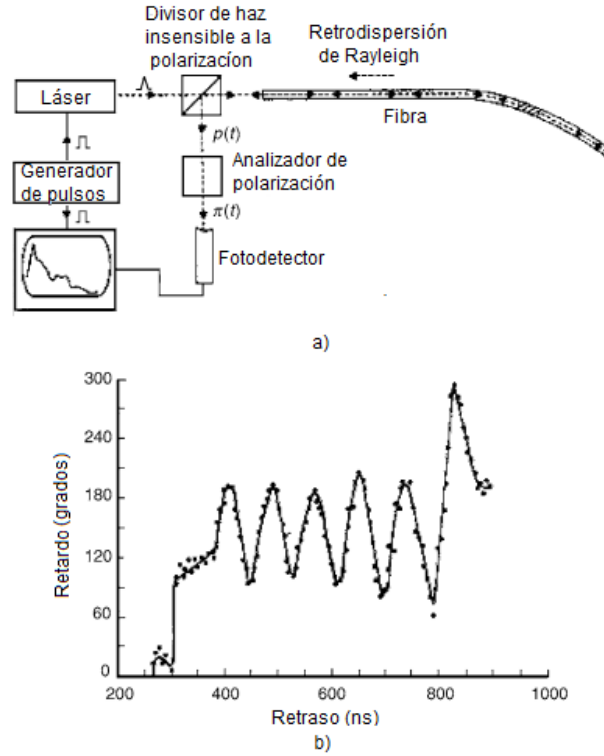


Figura 9. a) Arreglo optoelectrónico del sensor P-OTDR. b) Traza de la señal retrodispersada, en donde se ha aplicado una fuerza externa en la fibra óptica. Modificado de Ross (1981), p. 3492.

Una desventaja que manifiesta esta técnica es que no es posible determinar que parámetro físico modifíco el estado de polarización en la fibra óptica (tensión, temperatura, presión, etc) (Cho, 2003).

2.3.2 Brillouin OTDR (BOTDR)

El esparcimiento de Brillouin ocurre cuando la luz interactúa con fonones acústicos. Puede ser estimulado o espontáneo dependiendo del nivel de potencia de luz que se introduzca a la fibra óptica. Una forma simple de entender el efecto Brillouin es pensar

en la onda acústica como una rejilla de Bragg en movimiento, la cual refleja la luz del haz de entrada en dirección opuesta. Como la rejilla está en movimiento, la luz reflejada se corre en frecuencia por efecto Doppler a una frecuencia óptica menor (Derickson, 1998). El corrimiento en frecuencia debido al efecto Brillouin está dado por la ecuación 5

$$\nu_B = \frac{2n\nu_A}{\lambda}, \quad (5)$$

donde ν_B es el corrimiento en frecuencia de Brillouin, ν_A es la velocidad de la onda acústica, n es el índice de refracción del medio y λ es la longitud de onda de la luz incidente (Kobyakov *et al.*, 2010).

En el proceso de dispersión espontánea de Brillouin las ondas acústicas se generan por la excitación térmica del medio. Si al interactuar la luz con la onda acústica se cumple la condición de Bragg, esta será dispersada por este efecto. La onda dispersada que sufre un corrimiento hacia menores frecuencias y viaja principalmente opuesta al pulso óptico de entrada es el componente Stokes, mientras que el componente Anti-Stokes tiene un corrimiento hacia mayores frecuencias.

Si el nivel de potencia del pulso óptico de entrada cruza cierto umbral, el proceso se convierte en Brillouin estimulado. El fenómeno físico que origina la dispersión estimulada de Brillouin (SBS) es el de electrostricción, que es una variación de la densidad del medio (índice de refracción) por la acción de la luz. La luz de la onda de Stokes retrodispersada interfiere con la luz del haz de entrada y genera una onda acústica a través del efecto de electrostricción. La luz que se propaga crea una rejilla de densidad móvil, desde la cual se retrodispersa la luz.

En la figura 10 se muestran los procesos de esparcimiento de Brillouin. La luz retrodispersada (Stokes) por el ruido acústico (provocado por temperatura o tensión)

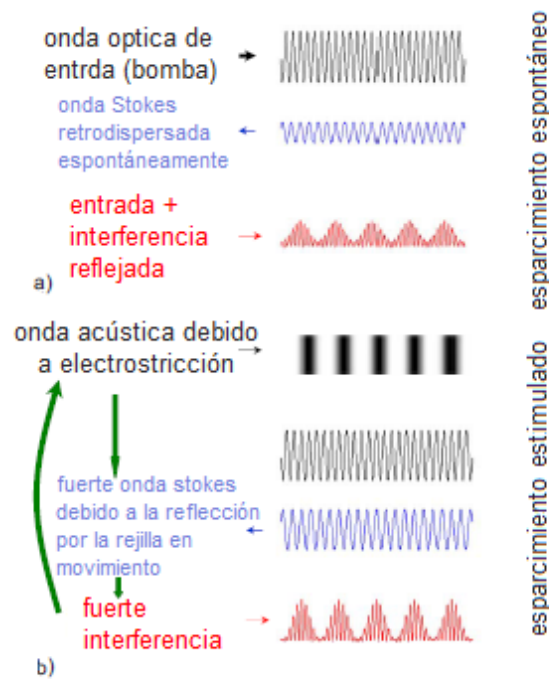


Figura 10. a) Proceso de esparcimiento espontáneo de Brillouin. b) Proceso de esparcimiento estimulado de Brillouin. Modificado de Kobyakov *et al.* (2010), p. 5.

interfiere con la luz que entra a la fibra óptica. El patrón de interferencia se muestra en rojo. La amplitud de la onda acústica es proporcional a la intensidad óptica. La onda acústica generada como resultado de la electrostricción estimula aun más la retrodispersión, lo que aumenta la interferencia entre la bomba y la onda Stokes y refuerza la onda acústica (Kobyakov *et al.*, 2010).

Se ha encontrado que el corrimiento de la frecuencia por efecto Brillouin se incrementa linealmente con la tensión (Horiguchi *et al.*, 1989) y la temperatura (Kurashima *et al.*, 1990). Esto ha sido aprovechado para desarrollar sensores basados en este efecto. Se introduce un pulso óptico a la fibra y se obtiene como respuesta luz retrodispersada por efecto Brillouin espontáneo; esta se mezcla con un oscilador local óptico, generando así un batimiento entre la onda retrodispersada y la onda de frecuencia conocida. La onda resultante se captura con un fotodetector y se almacena. El procedimiento se

repite variando ordenadamente la frecuencia del oscilador local, para después generar una forma de onda de ganancia de Brillouin para detectar el máximo y el valor de corrimiento de frecuencia, haciendo posible el determinar valor del parámetro físico. En la figura 11 se presenta el esquema del BOTDR, la distribución de la potencia de batimiento detectada para 3 distintas frecuencias del oscilador local y las gráficas del coeficiente de ganancia en función de la frecuencia que nos permite determinar la temperatura.

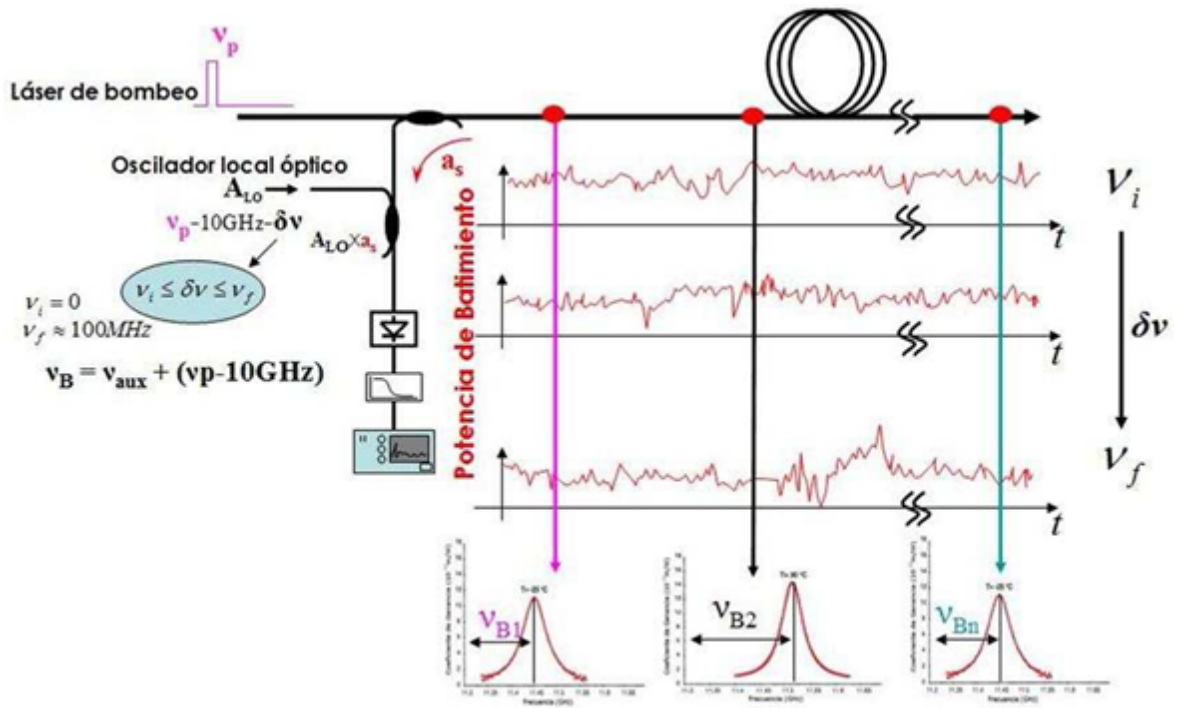


Figura 11. Esquema y medición de un sensor BOTDR. Modesto (2009), p. 19.

La retrodispersión espontánea de Brillouin tiene una potencia baja, por lo que es conveniente utilizar un esquema de fotodetección coherente para mejorar la precisión del sistema. Esta técnica permite un rango de medida superior a los 10 km sin regeneración de señal (Eisler *et al.*, 2008). Un inconveniente es que su resolución espacial no puede ser inferior a 1 metro. Además el corrimiento en frecuencia se debe a temperatura y

tensión, por lo que es necesario implementar la relación Landau- Placzek (LPR), que permite discriminar entre los efectos de temperatura y tensión (Wait y Newson, 1996).

2.3.3 Raman OTDR (ROTDR)

El efecto Raman ocurre cuando un fotón interactúa con un fonón óptico. Estos fonones ópticos están relacionados con las vibraciones moleculares del medio de la fibra óptica. Estas vibraciones moleculares modulan la intensidad de luz incidente para generar una frecuencia óptica nueva y proveer amplificación para la nueva señal generada (Derickson, 1998).

Se acopla un pulso láser a la fibra óptica que actúa como el componente sensible. La señal es retrodispersada mientras el pulso se propaga a través de la fibra debido a los cambios en la densidad del medio y vibraciones moleculares. La composición espectral y de intensidad de la luz retrodispersada están determinadas por las moléculas en la fibra óptica. La señal retrodispersada incluye diferentes componentes espectrales, que son producidos por distintos mecanismos de interacción entre la intensidad de la luz que se propaga y la fibra óptica. El componente de dispersión de Raman es influenciado por las vibraciones moleculares producidas por temperatura; por lo tanto su intensidad depende de la temperatura.

La señal retrodispersada por efecto Raman contiene 2 componentes: Stokes y anti-Stokes, los cuales presentan distintas intensidades. La intensidad del componente anti-Stokes depende fuertemente de la temperatura, caso contrario del Stokes.

El principio básico de la medición de la temperatura consiste en filtrar el Stokes y el Anti- Stokes de la señal retrodispersada. Tomar la relación de las intensidades del Stokes y el anti.Stokes, para así eliminar las influencias externas como los cambios en la fuente de luz o en la fibra óptica. En la figura 12 se presenta el esquema de un ROTDR,

el cual tiene como principal diferencia el uso de un espectrómetro para el análisis del componentes, Stokes y anti-Stokes.

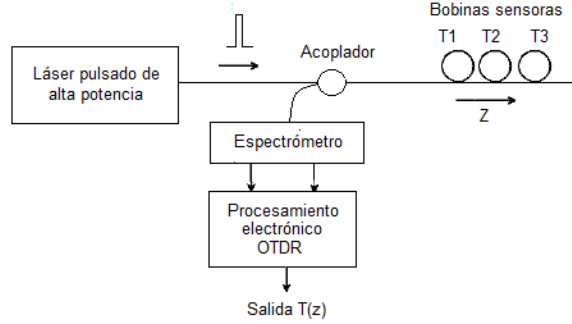


Figura 12. Esquema de un sensor ROTDR. Modificado de Yun y Yin (2002), p. 207.

Una vez obtenida la relación entre los componentes Stokes y anti-Stokes, se despeja de la ecuación 6 para obtener la temperatura como función del tiempo.

$$R_r = \left\{ \frac{\lambda_s}{\lambda_a} \right\}^4 e^{-hcK/(kT)}, \quad (6)$$

donde R_r es la relación entre el componente Stokes (λ_s) y el anti-Stokes (λ_a) en la luz retrodispersada, h es la constante de Planck, K es el corrimiento del número de onda desde la longitud de onda de bombeo, k es la constante de Boltzman y T es la temperatura (Hurtig *et al.*, 1997).

Si se desea conocer la distribución de la temperatura en función de la distancia, se debe utilizar la ecuación 2

En la figura 13 se observa como el componente anti-Stokes es el más sensible a la temperatura, y el componente de Rayleigh es prácticamente insensible a la temperatura.

Uno de los inconvenientes de esta técnica es que el coeficiente de dispersión de Raman es bajo, 3 órdenes de magnitud menos que el coeficiente de Rayleigh, por lo que se necesita introducir una alta potencia óptica en la entrada de la fibra (Yun y Yin,

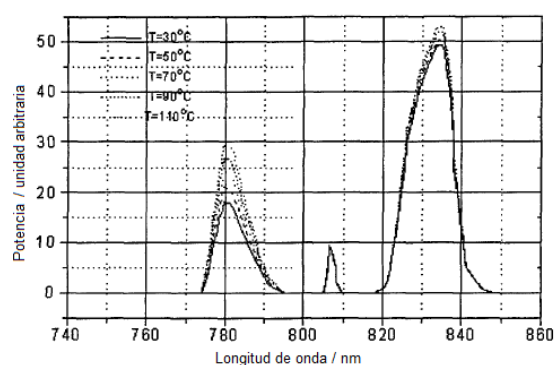


Figura 13. Espectro de la señal retroesparcida para diferentes temperaturas en la fibra óptica. Liu *et al.* (2000), p. 154.

2002).

2.3.4 Sensor COTDR

El sensor objeto de estudio en este trabajo es el sensor COTDR, el cual envía un pulso altamente coherente. Este pulso viaja a través de la fibra óptica perdiendo potencia, parte de la cual será retrodispersada y redirigida con un circulador óptico hacia un fotodiodo-amplificador. El fotodiodo-amplificador acondicionara la señal para ser capturada con una tarjeta de adquisición de datos conectada a una computadora, tal como se muestra en la figura 14.

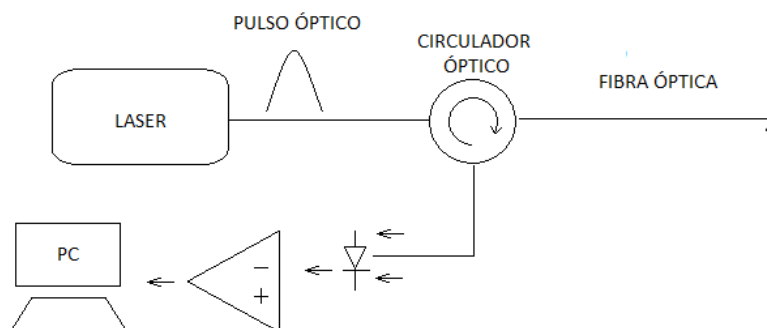


Figura 14. Esquema optoelectrónico de un sensor COTDR.

La alta coherencia en el pulso provoca interferencia dentro de la fibra óptica, entre las

ondas retrodispersadas por Rayleigh que se encuentran dentro de la resolución espacial del sensor. Debido a que los centros de esparcimiento de Rayleigh, que son los que reflejan la luz, están distribuidos en forma aleatoria dentro de la fibra óptica, habrá un camino óptico distinto para las ondas retrodispersadas lo que producirá un patrón moteado (speckle) como resultado de esta interferencia.

Una simulación de lo que se espera será la señal retrodispersada se muestra en la figura 15, donde se muestra que para cada pulso óptico introducido en la fibra óptica habrá una traza de señal retrodispersada en respuesta.

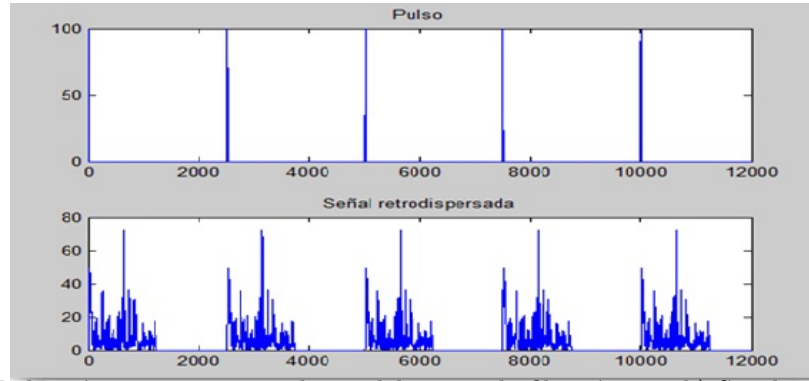


Figura 15. a) Pulsos ópticos que viajan hacia delante en la fibra óptica. b) Señal retrodispersada en respuesta a los pulsos ópticos.

Aunque las trazas de señal tienen una intensidad aleatoria, las trazas de señal retrodispersada son iguales para cada pulso, pues los centros de esparcimiento por Rayleigh idealmente no cambian con el tiempo. La diferencia de fase entre las ondas retrodispersadas por las inhomogeneidades con la distancia Δz entre ellas, está dada por la ecuación:

$$\Delta\phi = 4\pi n\Delta z/\lambda, \quad (7)$$

donde n es el índice de refracción, y λ es la longitud de onda de la luz. La distribución de las inhomogeneidades en la fibra óptica cambia debido a cambios de tensión y/o

de temperatura en la fibra óptica, causando un cambio de fase en las ondas retrodispersadas. Estas ondas al interferir, producirán un cambio en la intensidad de la luz correspondiente a determinada distancia. Al ser los cambios de intensidad dependientes de un cambio de fase, es posible tener cambios significativos en la intensidad de la luz para tensiones de baja amplitud (Shiyong *et al.*, 2009). Esto permite que este sensor posea una sensibilidad alta (Davis, 1985).

Es posible detectar el cambio de un parámetro físico, como presión ó tensión, en algún punto de la fibra óptica analizando las trazas de señales retrodispersadas. Mediante una resta de trazas es posible detectar si hubo un cambio en la traza de la señal con respecto a la anterior. Si la resta entre trazas es diferente de 0 para uno ó varios puntos, significa que hubo alguna perturbación en la fibra óptica que modificó las condiciones de interferencia dentro de la fibra (ver figura 16) y es posible detectar su ubicación espacial utilizando la ecuación 2.

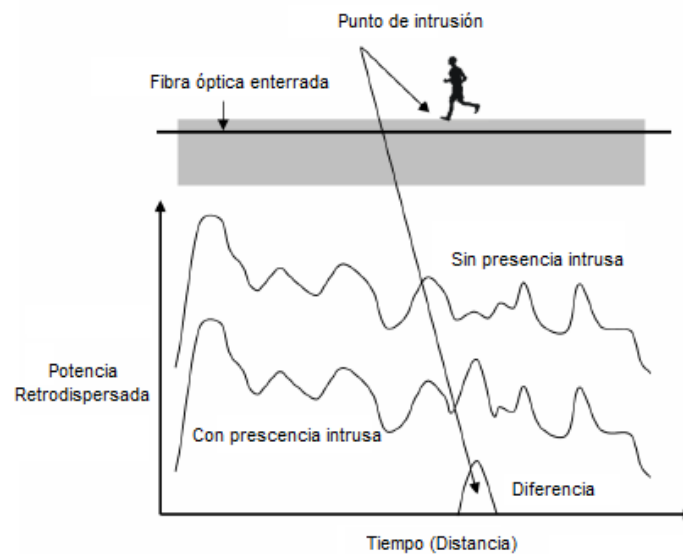


Figura 16. Diferencia de trazas de señal ante una perturbación externa sobre la fibra óptica. Modificado de Juárez *et al.* (2005), p. 2082.

Cuando experimentalmente se desea desarrollar este sensor, se tiene el problema

que la resta entre trazas nunca es 0, aun cuando no existen perturbaciones en la fibra óptica. Esto se debe a que la frecuencia del pulso láser no es constante, esta varía indeseablemente provocando que las condiciones de interferencia dentro de la fibra óptica cambien, produciendo así una señal retrodispersada diferente a la anterior. Otro problema que se presenta en el pulso óptico es que el modulador utilizado para generar los pulsos generalmente permite el paso de un nivel de luz, cuando idealmente debería de obstruirla por completo. Esta parte continua de la luz también presenta esparcimiento por Rayleigh e interfiere con la luz retrodispersada del pulso principal.

Otra situación que provoca diferencias en la trazas de señal son los cambios de temperatura en el ambiente. Estos cambios, aunque regularmente son lentos, modifican la densidad dentro del núcleo de la fibra óptica y por consiguiente la señal retrodispersada.

La precisión que se tiene en la sincronización entre la emisión del pulso cada $1ms$ y la grabación de la tarjeta de adquisición de datos es fundamental, una mala sincronización conlleva a una diferencia entre trazas de señal que no corresponde a la real y provocará una falsa alarma, ver figura 17.

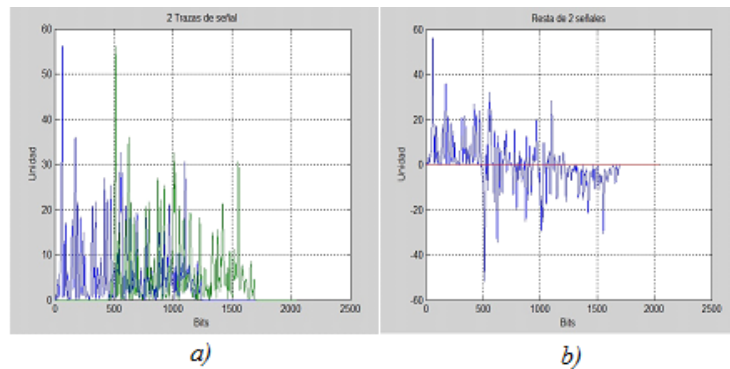


Figura 17. a) 2 señales retrodispersadas simuladas con una mala sincronización en su adquisición. b) Resta de estas 2 señales.

Debido al ruido introducido por el fotodiodo, el amplificador puede modificar la señal retrodispersada, induciendo diferencias entre trazas de señal que llevan a considerar falsas alarmas donde no las hay.

Para evitar una confusión entre detectar una diferencia en las trazas de señal ocasionada por factores no deseados y una diferencia por una perturbación a la fibra, es necesario elaborar un estudio de la estadística en la señal, para ser capaces de distinguir el comportamiento del ruido en la señal y la señal retrodispersada. Esto nos llevará a filtrar hasta cierto punto este ruido y poder señalar la capacidad para distinguir una perturbación.

2.3.5 Estudio estadístico

En condiciones ideales el COTDR produce la misma traza de respuesta para cada pulso óptico introducido en la fibra óptica. Si no existe un cambio en algún parámetro físico externo que influya en la fibra óptica, el resultado de restar una traza de respuesta con la siguiente es 0. En condiciones normales una traza no es idéntica con la siguiente, por los cambios explicados en la sección del sensor COTDR. Estos cambios son aleatorios, generando así un proceso estocástico. Por lo tanto es necesario un estudio estadístico en la señal retrodispersada para caracterizar al sistema y ser capaces de distinguir el modo de operación adecuado para un buen funcionamiento.

El valor promedio de una señal nos indica la media sobre el tiempo en el cual se registró la señal

$$\bar{x} = \frac{1}{b-a} \int_a^b x(t) dt, \quad (8)$$

donde suponemos que el cálculo empezó en un tiempo $t = a$ y terminó en $t = b$. Para señales discretas el promedio se obtiene mediante la siguiente ecuación

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i, \quad (9)$$

donde N es el número de muestras de la señal a promediar (Otnes y Enochson, 1972).

Ya que nuestro estudio consiste en analizar múltiples trazas de señal retrodispersada y encontrar diferencias entre ellas que representen perturbaciones, se realizará un promedio para las mismas distancias entre las trazas, usando la ecuación 10:

$$\bar{s}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} s_i(t), \quad (10)$$

donde N es el número de trazas de señal a promediar y $s_i(t)$ es una traza retrodispersada.

La función de valor cuadrático medio nos describe la intensidad general de la señal eléctrica, es simplemente el promedio de los valores cuadrados en el tiempo (Bendat y Piersol, 1971). La raíz cuadrada positiva del valor cuadrático medio es llamada raíz cuadrática media o valor rms.

Se puede pensar que la señal eléctrica es una combinación de un componente estático, invariante en el tiempo, descrito por el valor promedio, el cual es el valor medio de todos los valores y un componente dinámico. El componente dinámico puede ser descrito como la fluctuación que existe entre el valor de la señal y el valor medio de dicha señal, al cuadrado: este componente es conocido como varianza:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [x(t) - \bar{x}]^2 dt, \quad (11)$$

Para señales muestreadas, la definición de la varianza está dada por la siguiente ecuación (Otnes y Enochson, 1972)

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2, \quad (12)$$

Para nuestro estudio la varianza se tomará como la fluctuación en intensidad de

la señal retrodispersada para determinada distancia, con respecto al valor medio entre trazas de dicha distancia:

$$\sigma_{s^2} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (s_i(t) - \bar{s}(t))^2, \quad (13)$$

donde N es el número de trazas de señal involucradas en la obtención de la varianza, $s_i(t)$ es una traza retrodispersada y $\bar{s}(t)$ es la señal retrodispersada promedio de N trazas.

La raíz cuadrada positiva de la varianza es llamada desviación estándar y presenta información de la media de distancias que tienen los datos con respecto a su promedio. La desviación estándar, a diferencia de la varianza, presenta las mismas unidades que la variable en cuestión.

Otra función estadística que nos da información útil de las propiedades de la señal es la función de densidad espectral de potencia, la cual describe la composición general de la frecuencia de la señal en términos de la densidad espectral de su valor cuadrático medio.

El análisis de la señal en el dominio de la frecuencia nos proporciona información de gran utilidad para lograr una mejor caracterización del sistema. La función de densidad espectral de potencia es una herramienta que nos permite caracterizar la señal en función de la frecuencia. Dimensionalmente, Ψ_i^2 es proporcional al valor cuadrático de la energía por unidad de tiempo, lo cual es la definición de potencia. La siguiente ecuación representa la densidad espectral de potencia (Otnes y Enochson, 1972)

$$G_x(f) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j\omega t} dt \right|^2. \quad (14)$$

En nuestro estudio aplicaremos esta función al espectro de la señal en el fotodiodo

cuando no se aplica luz, para ver cual es cual es la densidad espectral del ruido en el fotodetector. También se aplicará entre trazas de señal para las mismas distancias, con el fin de obtener las características de las señales que serán usadas para detectar las perturbaciones. Para esto se deberán tomar muestras a las mismas distancias para las múltiples trazas y calcular la transformada discreta de Fourier.

2.4 Aplicaciones de Sensores de Fibra Óptica

El sensor COTDR se puede usar para detectar intrusiones en fronteras de países, ofreciendo como ventajas el permanecer escondido bajo tierra, para evitar producir alertas o su destrucción. La fibra óptica que se necesita para este sensor es de bajo costo y tiene disponibilidad comercial. El sensor no necesita estar siendo monitoreado constantemente para operar y presenta una buena sensibilidad a las perturbaciones.

Basados en este ejemplo y las ventajas propuestas, es posible imaginar un gran número de aplicaciones similares en las que es posible aplicar el sensor basado en reflectometría óptica coherente en el dominio del tiempo.

Capítulo 3

Metodología del Experimento

En este capítulo se presentan los métodos utilizados para adquirir la señal retrodispersada del sensor COTDR con el procedimiento más conveniente. Se hace referencia a la optoelectrónica y como fue implementada para hacer posible el estudio de la estadística en la señal retrodispersada. Se enfatiza como fueron generados los pulsos ópticos, como fue aplicada la perturbación en la fibra óptica y como se adquirió digitalmente la señal para su estudio. Los nombres de los dispositivos utilizados se encuentran en el apéndice A.

3.1 Generación de pulsos ópticos

El pulso óptico es generado por el láser y se introduce a la fibra óptica a través del circulador óptico (ver fig 14). Este pulso debe tener una alta coherencia temporal para no generar ruido en el análisis de la señal retrodispersada. La alta coherencia en el pulso óptico es una característica del láser, por lo que el láser que se usa para este trabajo ha sido diseñado para emitir pulsos altamente coherentes. La duración de estos pulsos puede ser seleccionada de entre 3 opciones: 50 *ns*, 100 *ns* y 200 *ns*.

El láser utilizado es el “EOM - Modulated Single Frequency Pulsed Light Source” de la compañía Fibotec, el cual es un láser de semiconductor que emite luz en modo continuo, a una longitud de onda de 1530 *nm*. Esta luz es amplificada mediante un amplificador de fibra óptica y finalmente la luz amplificada entra a un modulador electro-óptico que obstruye el paso de la luz a intervalos preestablecidos para generar las 3

duraciones de pulso que ofrece el láser. En la figura 18 se muestra un diagrama a bloques de los componentes optoelectrónicos principales dentro del láser.

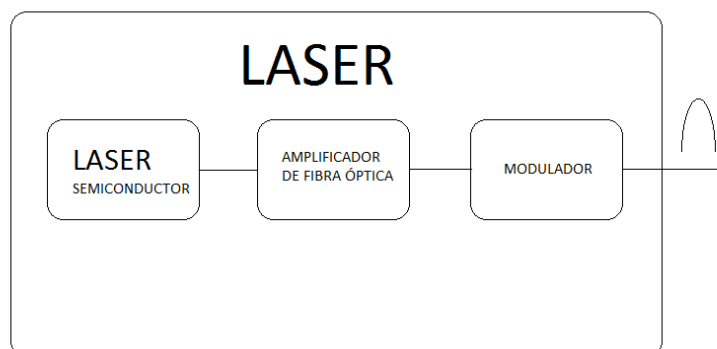


Figura 18. Diagrama a bloques del interior del láser modulado de alta coherencia.

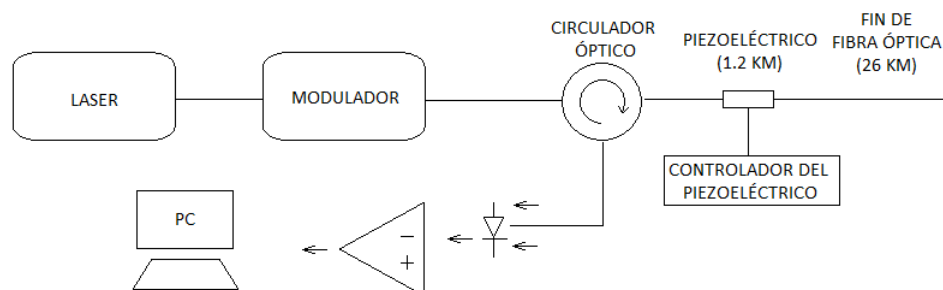


Figura 19. Esquema del arreglo optoelectrónico del sensor COTDR con modulador externo al láser para disminución del nivel de luz indeseado.

3.2 Aplicación de perturbación en la fibra óptica

Después de generar y optimizar el pulso óptico, se hace pasar por un circulador óptico que permite el paso de la luz hacia el final de la fibra óptica, ver figura 19. Tras haber viajado 1.2 *km* en la fibra óptica, la luz pasa a través de una sección de la fibra

tensionada por un dispositivo piezoeléctrico, el cual es un dispositivo electromecánico que genera un movimiento mecánico basado en la señal electrónica que recibe. La idea de usar este dispositivo, es aplicar una tensión dinámica a un segmento de la fibra óptica en una posición (distancia) preestablecida. El valor de la tensión es menor a 1×10^{-5} μm y la longitud del segmento es aproximadamente 0.1 m .

La señal electrónica que permite que el dispositivo piezoeléctrico aplique la tensión a la fibra óptica proviene de un controlador compatible con el dispositivo piezoeléctrico. Mediante este controlador es posible elegir entre diferentes formas de onda que se aplicarán al dispositivo piezoeléctrico y por consiguiente a la fibra óptica.

Para la realización del estudio de la señal retrodispersada se aplicará una tensión dinámica, con una frecuencia de 0.1 Hz y 10 Hz . Con esto se pretende modificar las condiciones de interferencia dentro de la fibra óptica y así estudiar y caracterizar los cambios en la intensidad de la luz retrodispersada por la aplicación de una perturbación.

3.3 Adquisición de datos

La luz que se retrodispersa, mientras el pulso viaja hacia el final de la fibra óptica, es redirigida a través del circulador óptico (ver figura 19) hacia el fotodiodo. El fotodiodo recibe una señal óptica y la convierte en una señal electrónica de corriente. Sin embargo esta señal no tiene una amplitud adecuada para ser procesada, por lo que debe ser introducida a un amplificador de transimpedancia, el cual además de amplificar la señal, convierte la señal de corriente en una señal de voltaje. El estudio y caracterización del sistema fotodiodo-amplificador se desarrolla en el capítulo 4 del presente trabajo.

Se instaló una tarjeta de adquisición de datos en una computadora. La tarjeta cuenta con 4 puertos, de los cuales 2 son canales para adquirir señales de voltaje, otro

es para emitir o recibir un pulso de sincronización electrónico y el puerto restante emite el pulso de reloj interno de la tarjeta.

La tarjeta de adquisición de datos se configuró para emitir un pulso por el puerto de sincronización, trigger, al iniciar la captura de muestras. Este pulso es el que indica al láser que debe emitir un pulso óptico para interrogar a la fibra óptica. Una mala sincronización entre el láser y la tarjeta de adquisición de datos hará que las trazas sean muestreadas en puntos diferentes, por lo tanto al momento de compararlas serán distintas y provocará un ruido grande. Otro elemento que debe estar sincronizado con estos 2 componentes del sistema es el modulador que disminuye el nivel de ruido en el pulso óptico.

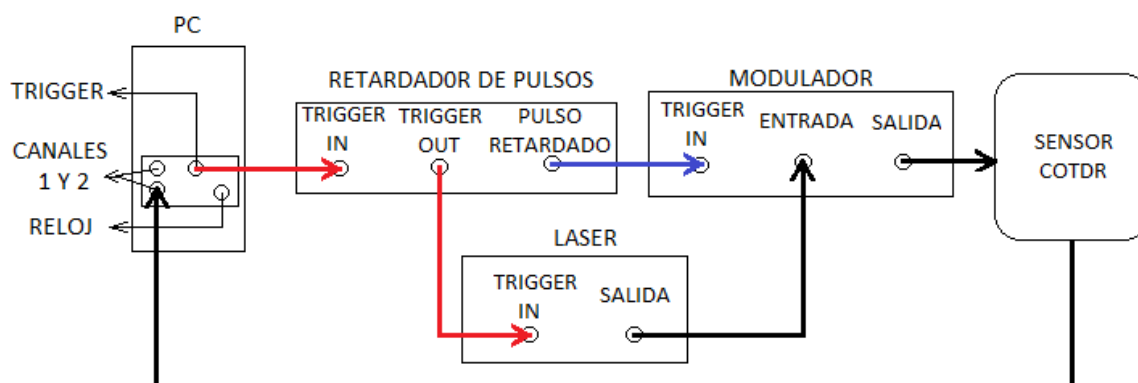


Figura 20. Esquema de las conexiones para la adquisición de la señal retrodispersada. En color negro se muestra el camino del pulso óptico. El camino del pulso electrónico retardado y no retardado se muestra en azul y rojo respectivamente.

En la figura 20 se muestra la configuración de los dispositivos involucrados en la adquisición de datos. Un pulso de sincronización sale de la tarjeta de adquisición, instalada en la PC, este llega a un dispositivo electrónico que genera y retarda pulsos. El retardador de pulsos tiene 2 puertos de salida. La primera que denominamos Trigger out envía un pulso de sincronización al láser para que este emita el pulso óptico. El segundo puerto de salida envía un pulso electrónico al modulador. El modulador permitirá el

paso de luz mientras persista el pulso electrónico.

La sincronización que se logra con este método es adecuada para nuestros propósitos. Un resultado colateral de usar este método es que la frecuencia del pulso de sincronización, de 1 KHz, es ligeramente inestable. Esto se debe a que el programa encargado de emitir el pulso desde la tarjeta de adquisición de datos en la PC se encuentra implementado en Windows 7, un sistema operativo que no trabaja en tiempo real. De cualquier forma esto no representa un problema grave en nuestro experimento, pues la diferencia de tiempos entre pulsos no es significativa; además esto no afecta la sincronización en la grabación de trazas de señal.

Capítulo 4

Caracterización Fotodiodo - Amplificador

4.1 Introducción

El fotodiodo y el amplificador son elementos del sistema que deben ser estudiados con atención, ya que estos elementos introducen ruido al sistema. Resulta trascendental el hacer una caracterización de los mismos, la cual también nos proporcione información para seleccionar el régimen de amplificación adecuado, lo que convergerá en el éxito del sistema. En este capítulo se estudian el fotodetector y el amplificador como un subsistema fotodetector-amplificador. La salida de este subsistema es una señal eléctrica, la cual será sometida a un análisis estadístico para su estudio. El fotodiodo utilizado es el EPM 705 cuyos parámetros se muestran en la Tabla 1

Tabla 1. Parámetros del Fotodiodo EPM 705. Modificado de JDSU (2011), p. 4.

Parámetro	Condición	Valor
Responsividad	Mínima ($\lambda = 1550nm$)	0.85 A/W
Reflexión	Máxima	-40 dBc
Corriente Oscura	Máxima	5.0 nA
Capacitancia	Máxima	0.75 pF
Ancho de banda	Típico	2 GHz

El amplificador empleado en el subsistema fotodiodo-amplificador es el DHPCA - 100, el cual es un amplificador de corriente, de alta velocidad, cuyos coeficientes de

amplificación con sus respectivas características se exponen en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del Amplificador DHPCA - 100. FEMTO (2010), p. 2.

Ganancia (Bajo ruido) [V/A]	1×10^2	1×10^3	1×10^4	1×10^5	1×10^6	1×10^7
Frecuencia de corte (-3 dB)	200MHz	80MHz	14MHz	3.5MHz	1.8MHz	220KHz
Tiempo de subida	1.8ns	4.4ns	25ns	100ns	0.2μs	1.6μs
Densidad de potencia del ruido($\sqrt[3]{Hz}$)	200pA	16pA	2.1pA	500fA	170fA	60fA
Medido a	1MHz	1MHz	1MHz	10KHz	10KHz	10KHz
Corriente máxima de entrada ($\pm$)	10mA	1mA	0.1mA	10μA	1μA	0.1μA
Impedancia de entrada	50Ω	50Ω	60Ω	100Ω	1KΩ	10KΩ
Ganancia (Alta velocidad) [V/A]	1×10^3	1×10^4	1×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8
Frecuencia de corte (-3 dB)	175MHz	80MHz	14MHz	3.5MHz	1.8MHz	220KHz
Tiempo de subida	2ns	4.4ns	25ns	100ns	0.2μs	1.6μs
Densidad de potencia del ruido($\sqrt[3]{Hz}$)	140pA	6pA	1.5pA	450fA	150fA	55fA
Medido a	1MHz	1MHz	1MHz	10KHz	10KHz	10KHz
Corriente máxima de entrada ($\pm$)	1mA	0.1mA	10μ	1μA	0.1μA	10nA
Impedancia de entrada	50Ω	50Ω	60Ω	100Ω	1KΩ	10KΩ

Para la realización de esta caracterización se procedió a armar el arreglo opto-electrónico mostrado en la Figura 21, donde se emite luz desde el láser y para obtener la potencia que se espera de la luz retrodispersada se coloca un atenuador óptico. El rango de valores de potencia con los que se trabaja en la caracterización van de 0 a 100 nW. La potencia óptica que incide en el fotodiodo puede ser evaluada con un medidor de potencia que se encuentra después de un divisor óptico de señal 50/50.

Por el otro brazo del divisor 50/50 viaja una señal óptica que teóricamente debe tener la misma potencia que la capturada por el medidor de potencia, un fotodiodo recibe esta señal óptica para convertirla en una señal de corriente. Al entrar la corriente en el amplificador DHPCA - 100, esta se convierte en una señal de voltaje amplificada ya

que el DHPCA - 100 es un amplificador de transimpedancia. El amplificador puede ser configurado para tener un ancho de banda de 1 MHz, 10 MHz o ancho de banda completo y sus coeficientes de amplificación son ajustables de 2 a 7 órdenes de magnitud para ganancia con ruido bajo, y de 3 a 9 órdenes de magnitud para ganancia con alta velocidad de respuesta (ver Tabla 2).

La señal amplificada es capturada con la tarjeta de adquisición de datos Spectrum UF2 3100 conectada a una computadora. La resolución del convertidor analógico/digital de esta tarjeta es de 12 bits. Parámetros importantes en la adquisición de la señal como la frecuencia de muestreo, rango de voltaje de la señal, tiempo de captura de la señal (tamaño de la muestra), entre otros, son establecidos mediante el programa Sbench6, el cual almacena la señal adquirida para su posterior análisis.

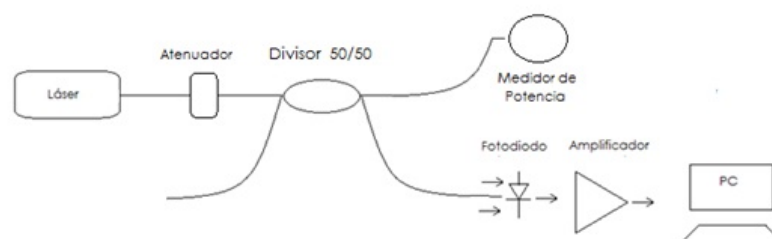


Figura 21. Arreglo optoelectrónico para caracterización de fotodiodo-amplificador.

Para hacer un análisis estadístico completo se adquirieron señales variando la potencia óptica introducida al fotodiodo-amplificador en 8 niveles distintos (dentro del rango previamente especificado), las 12 diferentes ganancias y los 3 anchos de banda del amplificador. Estas mediciones se guardaron en archivos para su respectivo análisis.

4.2 Análisis

Los archivos guardados con las mediciones de cada señal mediante el programa sbench6 fueron cargados con el programa Matlab, con el objetivo de someterlos a un análisis estadístico. Para cada señal adquirida se obtuvo el promedio de la corriente eléctrica del fotodiodo, su desviación estándar correspondiente y su densidad espectral de potencia para un análisis frecuencial.

La Figura 22 nos muestra el comportamiento de la corriente del fotodiodo para los valores de potencia dados, así como la desviación estándar que presenta. Esto nos permite analizar cualitativamente la relación señal a ruido (SNR) al efectuar una relación entre la amplitud de la intensidad de corriente promedio y su respectiva desviación estándar.

Otro criterio para la elección del régimen de amplificación óptimo es el ancho de banda que ofrece el amplificador para una ganancia dada. El pulso óptico (gaussiano), que es productor de la señal retrodispersada tiene una duración de 100 ns. Para conocer el ancho de banda de la señal retrodispersada se aplica la ecuación :

$$\Delta\nu = \frac{2 \ln 2/\pi}{\tau_c} \approx \frac{0.66}{\tau_c}, \quad (15)$$

donde τ_c es el ancho del pulso óptico. Por lo tanto tenemos que el ancho de banda de la luz retrodispersada es de aproximadamente 6.6 MHz, por lo que elegir régimen de amplificación del amplificador que tengan un ancho de banda menor a este removería información de nuestra señal. Basados en esta declaración y examinando la Tabla 2 podemos descartar 6 regimenes de amplificación por esta condición.

De las gráficas a), b), y c), de la figura 22 se concluye que la que tiene una mejor SNR es la gráfica c), ya que posee una menor desviación estándar. Pero al observar su

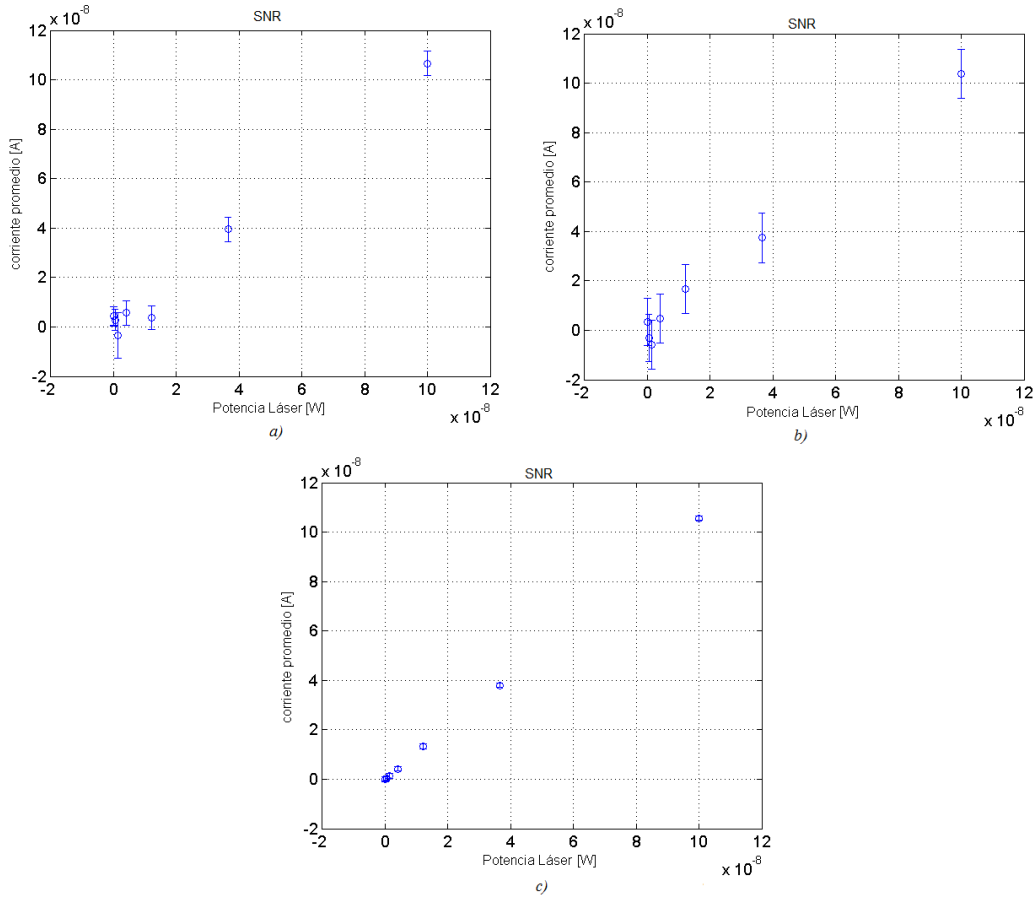


Figura 22. Se grafica el promedio de la intensidad de corriente eléctrica, con su respectiva desviación estándar para los valores de la potencia óptica que emulan a la luz retrodispersada. a) Medición efectuada con un coeficiente de amplificación de $1 \times 10^5 V/A$ con bajo ruido y un ancho de banda de 1 MHz. b) Medición efectuada con un coeficiente de amplificación de $1 \times 10^5 V/A$ con alta velocidad de respuesta y un ancho de banda de 10 MHz. c) Medición efectuada con un coeficiente de amplificación de $1 \times 10^7 V/A$ con alta velocidad de respuesta y un ancho de banda de 220 KHz.

ancho de banda en la Tabla 2 destaca que no cumple con lo requerido por la señal, por lo que se perdería parte de la señal retrodispersada. En el régimen de amplificación graficado en b), se tiene una menor relación señal a ruido y pero un mayor ancho de banda. La baja SNR induce ruido que pudiera ocasionar el enmascaramiento de nuestra señal deseada. Cabe aclarar que los valores de corriente promedio negativos se deben a que la señal de salida del amplificador esta desbalanceada y no se ajusto el offset para corregir este nivel, lo cual no es un problema para el propósito del análisis.

Se compararon 36 regímenes de amplificación distintos (resultado de combinar las

12 distintas ganancias que ofrece el amplificador para 3 anchos de banda) buscando el régimen óptimo, el cual se presenta en la siguiente sección del capítulo.

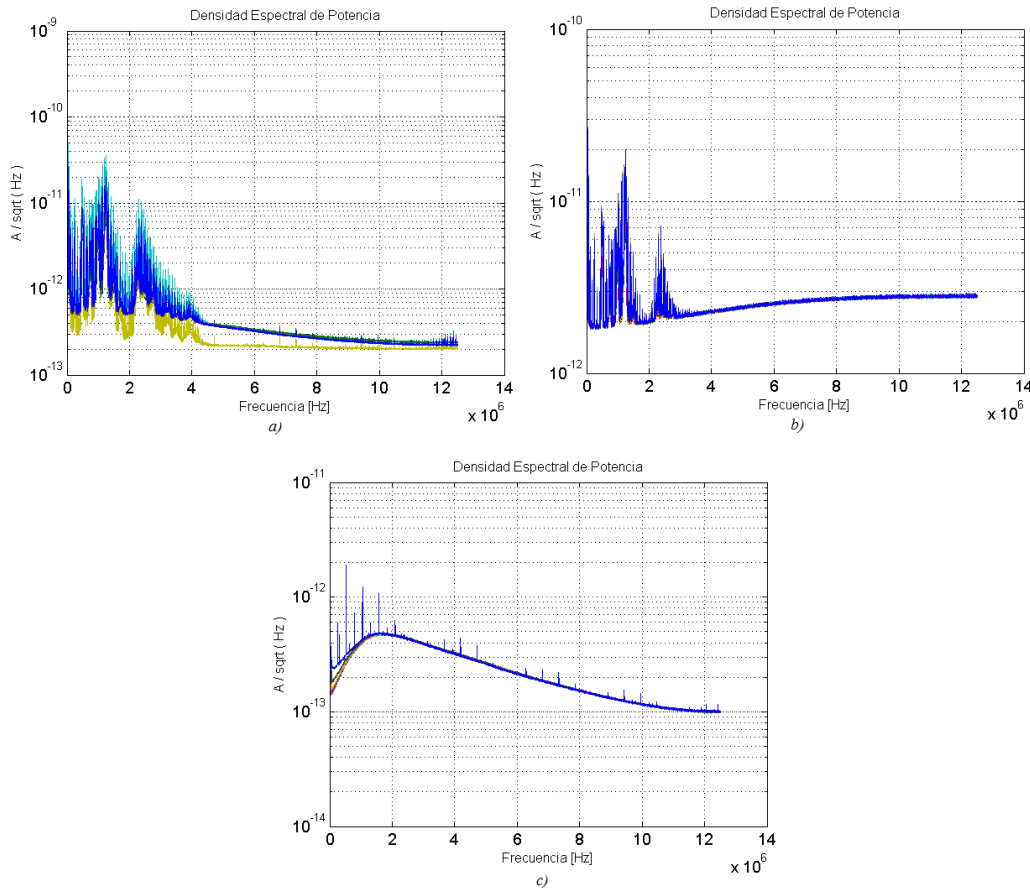


Figura 23. Densidad espectral de potencia. a) Para un coeficiente de amplificación de $1 \times 10^5 V/A$ con bajo ruido y un ancho de banda de 1 MHz. b) Para un coeficiente de amplificación de $1 \times 10^5 V/A$ con alta velocidad de respuesta y un ancho de banda de 10 MHz. c) Para un coeficiente de amplificación de $1 \times 10^7 V/A$ con alta velocidad de respuesta y un ancho de banda de 220 KHz.

En la Figura 23 se presenta el espectro de potencia, en el que se muestra la distribución de la intensidad en el dominio de las frecuencias. Se puede ver la existencia de ruido en las bajas frecuencias, el cual es atribuido a ruido que ha sido introducido en la alimentación eléctrica por dispositivos electrónicos que estén operando.

4.3 Conclusión

Después de hacer un análisis entre los regímenes de amplificación del amplificador se eligió el que tiene una ganancia de $1 \times 10^5 V/A$ y un ancho de banda de 10 MHz. Las Figuras 22 b) y 23 b) muestran su intensidad y densidad espectral de potencia respectivamente. La elección resulta evidente al notar en la Figura 22 que entre mayor sea el coeficiente de amplificación menor resulta la desviación estándar, y por lo tanto mayor la SNR. Este régimen de amplificación también cumple con el requerimiento de un ancho de banda mayor a 6.6 MHz, por lo que la señal completa pasa a través del subsistema fotodiodo-amplificador.

Capítulo 5

Estudio y Caracterización de la Señal del OTDR Coherente

5.1 Introducción

Para la realización del estudio estadístico de la señal obtenida del OTDR coherente se usó el arreglo mostrado en la figura 19. En este arreglo se lanza un pulso óptico a través de la fibra óptica; la luz retrodispersada por efecto Rayleigh es capturada y convertida a corriente eléctrica por un fotodiodo y después esta señal se amplifica y se convierte a voltaje con un amplificador. Finalmente la señal se digitaliza con una tarjeta de adquisición de datos montada en una computadora.

Para nuestro experimento se usa un láser de semiconductor altamente coherente, el cual emite un pulso con una duración de 100 ns cada 1 ms (1 KHz). La fibra óptica tiene una longitud de 26 km . La tarjeta de adquisición tiene una ventana de grabación de $327\text{ }\mu\text{s}$ (8192 muestras) cada 1 ms , con una frecuencia de muestreo de 25 Mbits/s . Dado que el largo de la fibra es de 26 km , el tiempo que tarda en llegar la luz del final de la fibra al fotodetector es de:

$$\tau = \frac{2d}{V_g} = \frac{2dn}{c} = \frac{(2)(26 \times 10^3[m])(1.46)}{3 \times 10^8[m/s]} = 253\mu\text{s}, \quad (16)$$

La señal retrodispersada tendrá una duración de $253\text{ }\mu\text{s}$, lo que hace viable el uso de nuestra ventana de grabación.

La tarjeta de adquisición de datos Spectrum puede ser controlada mediante el programa Matlab. A través de él se creó una rutina para capturar la señal y guardar las

características importantes de la misma. Promedios entre trazas y espectros de potencia para cada segundo, cada minuto y la última señal de cada minuto son guardados para su futuro análisis. El análisis de estas funciones estadísticas nos permite conocer la estabilidad de la señal retrodispersada a través del paso del tiempo y determinar si es posible identificar una perturbación en nuestro sistema.

5.2 Análisis

Para el análisis de la señal retrodispersada en el sensor OTDR coherente se realizaron grabaciones cuando la fibra no presenta perturbaciones y cuando una perturbación es inducida mediante un dispositivo piezoeléctrico que aplica una tensión con forma de onda cuadrada y senoidal.

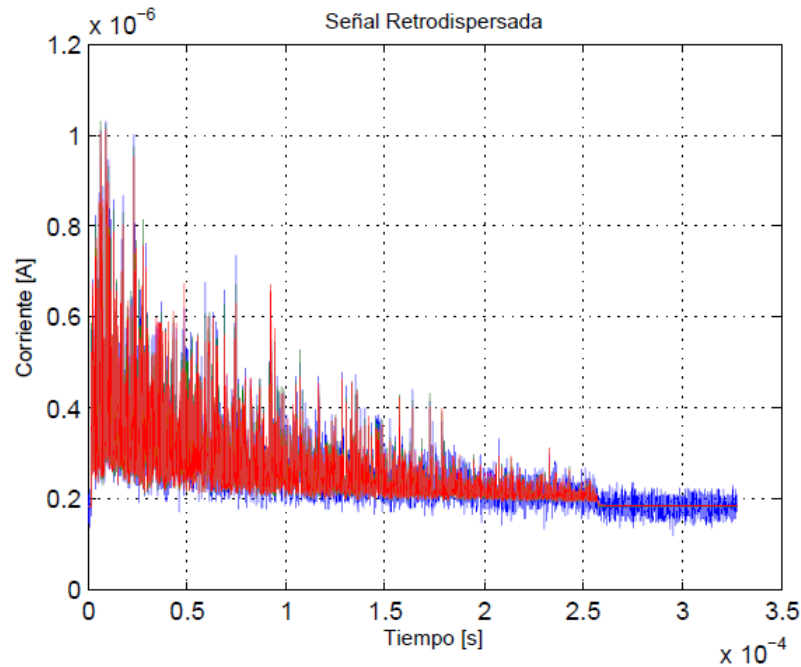


Figura 24. Señal retrodispersada

La señal retrodispersada capturada por el fotodetector [A] se muestra en la figura 24, donde la señal en color rojo es el promedio de trazas durante 1 *minuto*, la señal

verde es el promedio en 1 s y el azul es una traza de señal. Es claro como a partir de los $260 \mu s$ (aproximadamente kilómetro 26) termina la señal que pertenece a la retrodispersión dentro de la fibra óptica y lo que vemos es ruido de la corriente oscura del fotodetector. Esta región que no pertenece a la fibra óptica tiene su razón de ser por tiempo de captura programado en la tarjeta de adquisición de datos, que tiene una duración de $327 \mu s$. Al promediar durante un minuto la señal la aleatoriedad en la corriente oscura desaparece.

Al hacer un análisis espectral del ruido fuera de la fibra óptica (ver figura 25) se observan niveles de intensidad mayores en las bajas frecuencias, esto se debe a que el modulador en el láser que se encarga de efectuar su pulsado no es perfecto y permite que un nivel no deseado de luz pase, ver figura 25.

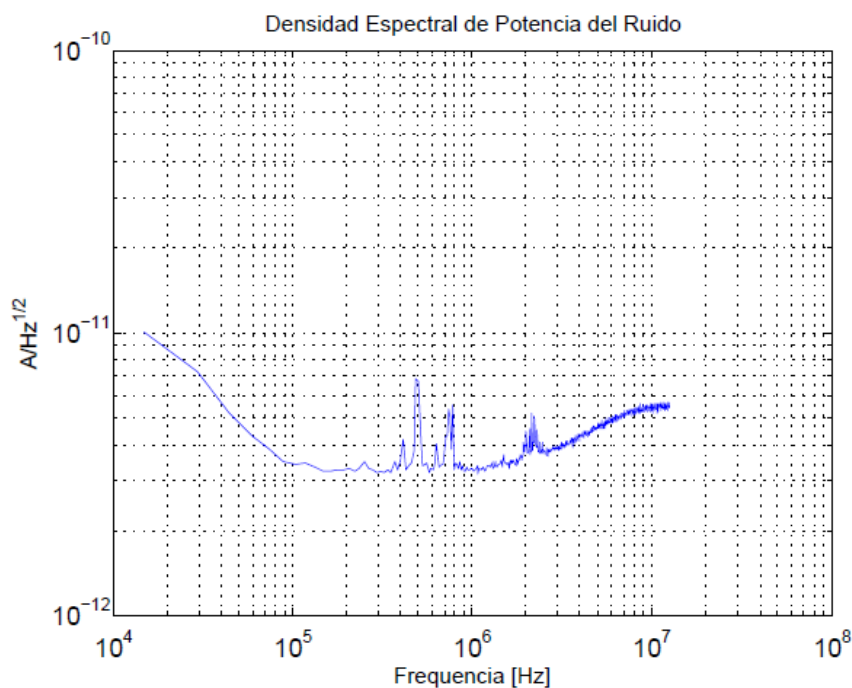


Figura 25. Espectro de potencia del ruido fuera de la fibra óptica.

5.2.1 Relación señal a ruido (SNR)

Con el objetivo de identificar cualitativamente la SNR, se hizo un promedio entre 1000 trazas (corresponde a 1 segundo) de señales retrodispersadas y se obtuvo la desviación estándar para cada muestra. En la figura 26 se presenta la gráfica, para una señal retrodispersada sin perturbación aplicada, donde cada punto representa la desviación estándar que corresponde al valor promedio de una determinada distancia.

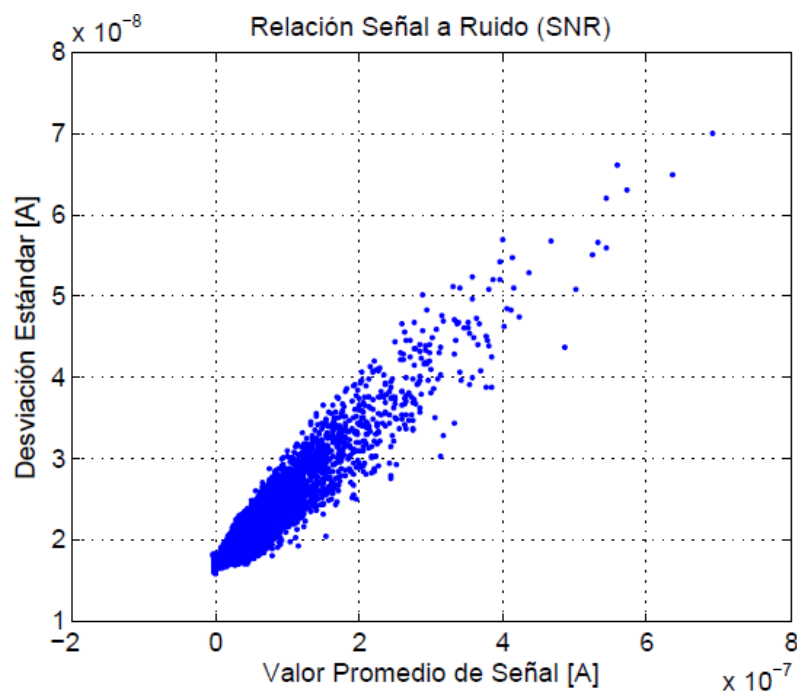


Figura 26. Relación entre la corriente promedio en la señal retrodispersada y la desviación estándar que manifiesta.

La desviación estándar de la señal aumenta conforme la potencia es mayor, sin embargo este aumento no es significativo para perjudicar la fiabilidad de la señal, pues la señal promedio es aproximadamente 10 veces mayor que la variabilidad de la misma en todo momento (ver ecuación 4). Por lo tanto hay una buena señal a ruido, que permite detectar la perturbación de la fibra óptica, porque las variaciones de intensidad inducidas por la perturbación se espera que sean del mismo orden de magnitud que el valor promedio de la señal. Resultados similares se obtienen al analizar las gráficas

cuando existen perturbaciones en algún punto de la fibra óptica.

5.2.2 Estabilidad de la señal retrodispersada

Una señal retrodispersada estable es aquella que sus trazas no sufren variaciones de intensidad entre ellas, o sea con el paso del tiempo. Sabemos que las trazas de señal retrodispersada no pueden ser completamente estables por factores, ya mencionados, que introducen ruido. El estudio de la estabilidad de la señal retrodispersada, nos proporciona una idea del tiempo que tarda esta en sufrir cambios significativos.

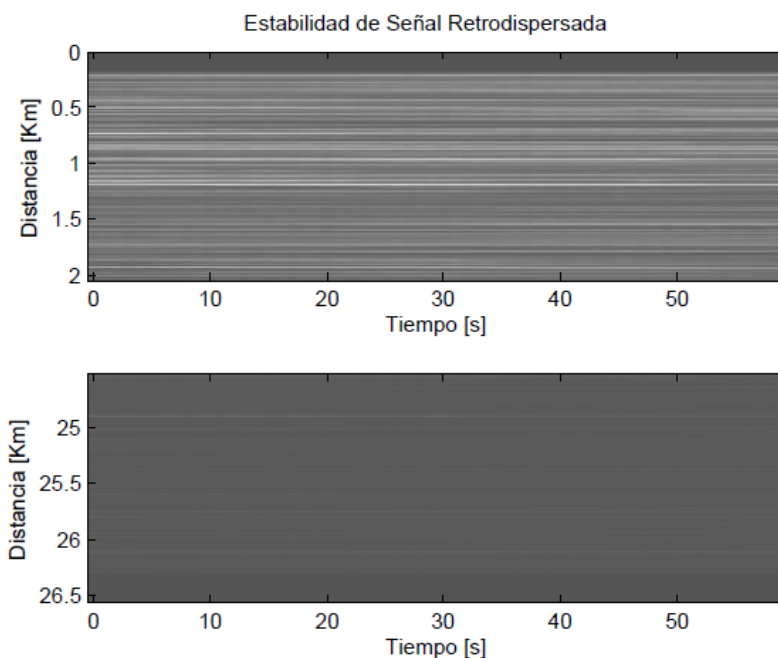


Figura 27. Señal retrodispersada en los primeros y últimos 2 kilómetros de la fibra óptica para 1 minuto.

En la figura 27 se despliega una gráfica que muestra como la intensidad varía al paso de 1 minuto (60,000 trazas). Cada columna de la gráfica representa una traza de señal, por cuestión de espacio solo se muestran los primeros y los últimos 2 kilómetros de la fibra óptica. Al analizar esta figura se observa que la señal permanece prácticamente constante ante el paso del tiempo, por lo que los cambios en las condiciones de interfe-

rencia ocurridos dentro de la fibra óptica son más lentos que este tiempo, permitiendo que la señal sea estable durante 1 minuto.

La figura 28 grafica los cambios de la intensidad de la señal retrodispersada durante 1 hora. Estos son lentos y aleatorios, atribuibles a cambios en la frecuencia del láser y temperatura en el ambiente; ya que estos factores alteran las condiciones de interferencia dentro de la fibra óptica. Por lo tanto, no hay estabilidad en la señal retrodispersada durante una hora.

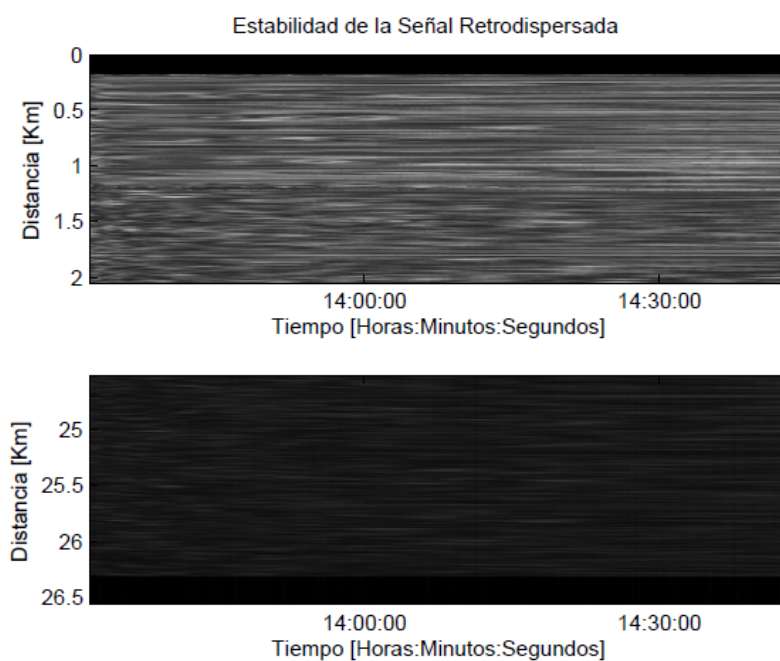


Figura 28. Señal retrodispersada en los primeros y últimos 2 km de la fibra óptica para 1 hora.

Con el fin de analizar la estabilidad que introduce la perturbación a aproximadamente 1.2 km, en la figura 29 se despliegan las variaciones de intensidad a lo largo del tiempo para distancias alrededor de la perturbación. Se observa que los cambios en la señal retrodispersada son lentos y que el comportamiento aleatorio de la señal retrodispersada permanece para cuando hay y no hay perturbación.

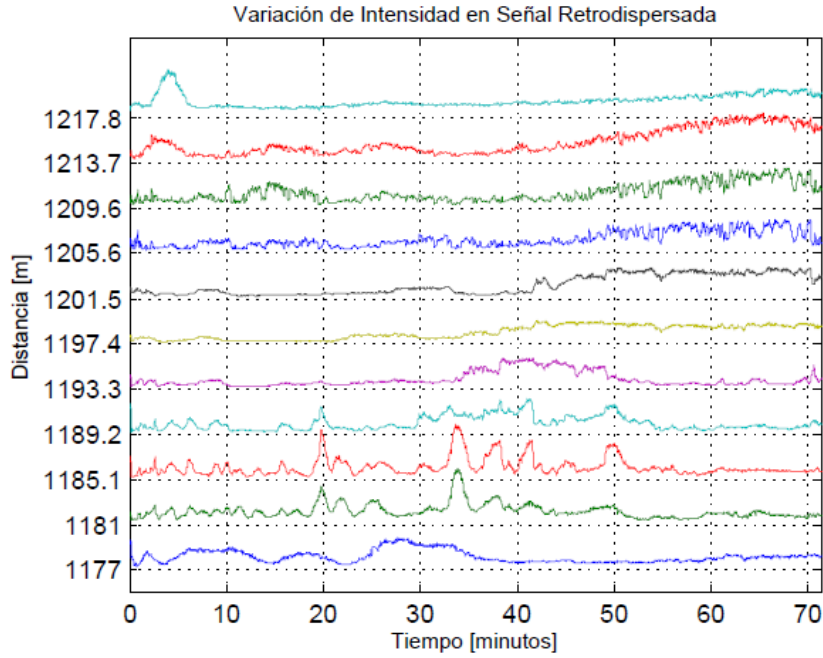


Figura 29. Comportamiento de intensidad en la señal retrodispersada en distancias que están alrededor del kilómetro 1.2 para 1 hora.

5.2.3 Detección de la perturbación inducida

Aplicar una tensión en la fibra óptica provoca un cambio en la posición de las inhomogeneidades en el núcleo de la fibra, teniendo como resultado un cambio en la señal retrodispersada. Para nuestro estudio se aplicó una tensión modulada por una señal senoidal y una cuadrada a través de un dispositivo piezoeléctrico.

En la figura 30 se muestran gráficas de las intensidades, alrededor de la perturbación, a lo largo de 1 segundo. Se observa como la tensión aplicada modula la intensidad a la frecuencia (10 Hz) y forma de onda correspondiente (senoidal y cuadrada) para la distancia donde es aplicada la perturbación.

Analizando a el espectro de la señal retrodispersada en la distancia donde se aplica una perturbación de 10 Hz, ver figura 31 a) y b), se observa como la potencia está concentrada en las bajas frecuencias. Esto se debe a que los cambios en la señal debido a factores de ruido son lentos. Se presenta también un pico en la frecuencia para la

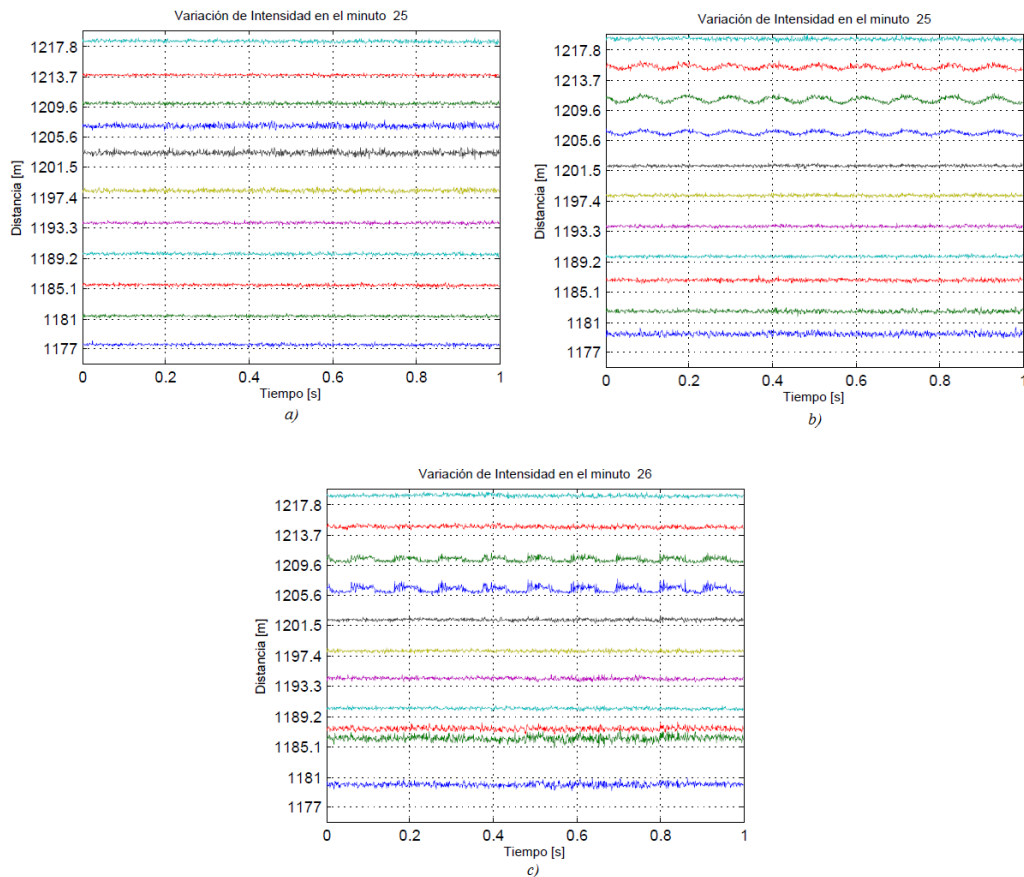


Figura 30. Comportamiento de intensidad en la señal retrodispersada en distancias que están alrededor del kilómetro 1.2 para 1 segundo. a) No hay perturbación aplicada. b) Se aplica una perturbación senoidal de 10 Hz. c) Se aplica una perturbación cuadrada de 10 Hz.

cual es perturbada la fibra; para las gráficas a) y b), 10 Hz. Se puede ver que la energía en el pico de potencia para esta frecuencia es aproximadamente 1 orden de magnitud mayor a la distancia donde la perturbación es aplicada por el dispositivo piezoeléctrico.

En la gráfica c) podemos observar el pico de potencia en la frecuencia de 0.1 Hz. El pico no se presenta tan definido debido a la cantidad de ruido que existe alrededor de esta zona frecuencial. Al igual que para las perturbaciones con frecuencia de 10 Hz, se puede ver que la energía en el pico de potencia para la frecuencia de 0.1 Hz es aproximadamente 1 orden de magnitud mayor en la señal donde se ha aplicado la perturbación.

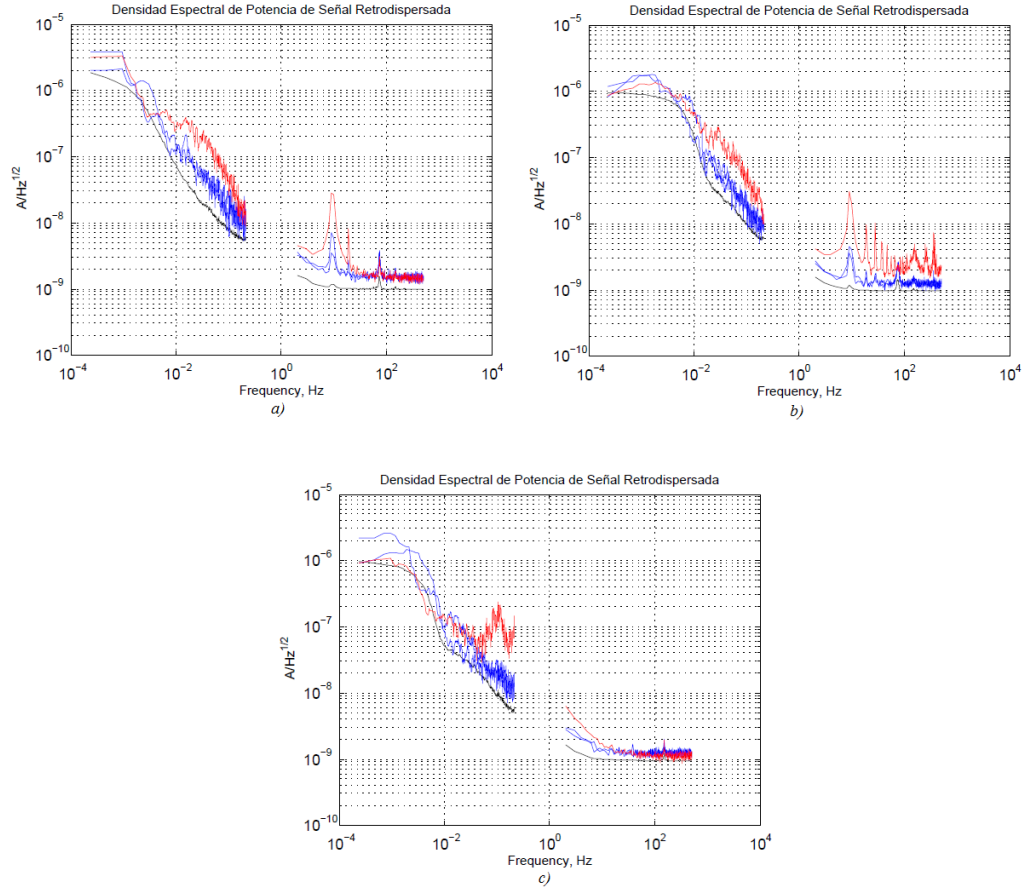


Figura 31. Espectro de potencia de la señal para distancias alrededor de la aplicación de la perturbación. En rojo se representa el espectro de la señal retrodispersada de la distancia donde la perturbación es introducida. Los colores negro y azul corresponden a señales de distancias ubicadas metros antes y después de esta perturbación. a) Se aplica una perturbación senoidal de 10 Hz. b) Se aplica una perturbación cuadrada de 10 Hz. c) Se aplica una perturbación senoidal de 0.1 Hz.

5.3 Conclusiones

Tras haber estudiado la estadística en la señal del sensor COTDR podemos concluir que la señal es muy estable para tiempos menores a 1 minuto. Es decir los cambios en su intensidad ante la existencia de perturbaciones son lentos.

Existe una buena relación de señal a ruido, ya que la potencia promedio es 10 veces mayor a su desviación estándar. Lo que hace posible la distinción de la señal del ruido. También analizando su espectro de potencia se pudo discriminar por 1 orden de magnitud la frecuencia a la cual se perturba la señal del ruido.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1 Conclusiones

En este trabajo se realizó un estudio experimental de un sensor de fibra óptica distribuido basado en reflectometría óptica coherente en el dominio del tiempo. El objetivo principal fue investigar las características de la señal retrodispersada y su ruido, para poder determinar la viabilidad de operación de este sensor. También se caracterizaron las etapas el fotodiodo y amplificador (del fotodiodo-amplificador), componentes que interactúan activamente en el sistema.

El sensor COTDR está basado en esparcimiento de luz coherente de una fibra óptica monomodal utilizada en telecomunicación. La fuente de luz láser lanza un pulso de una sola frecuencia hacia la fibra óptica. La luz se esparce debido a esparcimiento de Rayleigh, una pequeña parte de ella regresa y a través de un circulador óptico va hacia el fotodetector produciendo una corriente de respuesta similar a la que se tiene en reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR).

Cuando la fibra óptica se encuentra estable, la distribución de sus centros de esparcimiento se encuentra “congelada”, y la frecuencia de la luz no cambia, la misma traza de respuesta es repetida para cada pulso. Sin embargo, cuando en la fibra se aplica alguna fuerza externa o existe un cambio de temperatura, la distribución de los centros de esparcimiento en el espacio se modifica. Esto provoca un cambio las condiciones de fase en la interferencia, lo que se traduce en un cambio en la traza de respuesta. Entonces, analizando la señal de respuesta es posible detectar la influencia en la fibra

por alguna fuerza externa.

El sistema de procesamiento de señal del sensor debe detectar variaciones de señal entre las trazas o entre múltiples trazas y proveer significado para poder evaluar la fuerza de la influencia externa y estimar la posición del segmento de la fibra perturbado.

En aplicaciones prácticas, con una fuente de luz imperfecta, un fotodetector ruidoso y el típico ambiente donde la temperatura de los diferentes segmentos de la fibra varía en el tiempo, el sensor debe distinguir entre las diferencias provocadas por condiciones ordinarias y las diferencias por algún evento digno de alarma.

La sincronización entre el pulso óptico y la señal de adquisición es también crítica, porque un pequeño corrimiento en tiempo en la captura de la señal de respuesta puede producir una gran diferencia entre las trazas de señal adyacentes.

A continuación se presentan las tareas llevadas a cabo para resolver estas situaciones, así como sus respectivos resultados.

1. Para encontrar la operación óptima del fotodetector y el amplificador de transimpedancia, el valor promedio de la señal y su desviación estándar, debida al ruido, fueron evaluados en condiciones oscuras y con una entrada de luz calibrada en rangos menores a los 100 nW. Se encontró, que la relación señal a ruido aumentó con el incremento de la ganancia del amplificador. Sin embargo, esto lleva, de acuerdo a las especificaciones del amplificador, a una reducción del ancho de banda de la señal. Es por eso, que se tomó la decisión de tomar como modo de operación final, a aquel que incluyera el ancho de banda de la señal definido por la resolución espacial del sensor. Este modo de operación es el que trabaja con una amplificación de $1 \times 10^5 \text{ V/A}$ y tiene un ancho de banda de 10 MHz, suficiente para no perder los 6.6 MHz de la señal.

2. Para investigar la habilidad del sensor para detectar influencias mecánicas en la fibra, se aplicó una perturbación en un segmento corto de la fibra, colocado a una

distancia de 1.2 km, usando un dispositivo piezoeléctrico. Como se demostró en la figura 30, la señal puede ser detectada en forma clara.

3. Para estudiar la habilidad del sensor para reconocer condiciones de alarma de situaciones ordinarias, la señal fue grabada durante varias horas sin perturbación en la fibra óptica. Se encontró, que las variaciones en sus condiciones fueron muy lentas. En otras palabras, el espectro de dichas variaciones cae en una banda de frecuencias mucho más baja que la banda de frecuencias donde se espera esté la señal de alarma. Típicamente la mayor parte de la potencia del ruido de las variaciones de señal ordinarias está por debajo de 0.01 Hz; mientras que la señal esperada por condiciones de alarma debe estar por encima de 0.1-1 Hz. Por lo tanto, debe ser posible en el futuro diseñar un filtro óptimo para rechazar las frecuencias muy bajas y aumentar las señales correspondientes a situaciones peligrosas.

4. Para proveer una adecuada sincronización entre los pulsos ópticos y el muestreo de la señal, se diseñó un sistema que usa un único reloj global, el cual se encuentra en la tarjeta de adquisición de datos. La tarjeta manda un pulso de sincronización al láser y después de un retardo al modulador óptico adicional, para así reducir el componente continuo de la luz coherente. Al ser la misma tarjeta la que adquiere la señal del fotodetector, las muestras digitalizadas están automáticamente sincronizadas con el pulso láser. Es por ello que las trazas tienen una capacidad de repetitividad muy alta.

6.2 Trabajo a Futuro

Usando los métodos desarrollados durante este proyecto y los resultados del estudio experimental, se sugiere el siguiente desarrollo:

1. Evaluación de las características estadísticas de la señal en condiciones de campo.
2. Desarrollo del algoritmo de supresión del ruido en frecuencias ultra-bajas debido a las variaciones de señal en situaciones ordinarias y para aumentar la señal de condiciones de alarma.

Referencias Bibliográficas

- Arenas, G. F. (2009). *Desarrollo de sensores de fibra óptica: aplicación de un interferómetro Fizeau al estudio de polímeros*. Tesis de doctorado, (Universidad Nacional de Mar del Plata).
- Barnoski, M. K. y Jensen, S. M. (1976). Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics. *Applied Optics*, 15(9): 2112–2115.
- Bendat, J. S. y Piersol, A. G. (1971). *Random data: Analysis and measurement procedure*. Wiley-Interscience, New York.
- Cho, H. (2003). *Opto-mecatronics system handbook, technics and applications*. CRC Press LLC, New York. 152-160.
- Davis, C. M. (1985). Fiber optic sensors: an overview. *Optical Engineering*, 24(2): 347–351.
- Derickson, D. (1998). *Fiber optic test and measurement*. Prentice Hall PTR, New York. 617 pp.
- Eisler, B., Lanan, G., Nikles, A., y Zuckerman, L. (2008). Distributed Fiber Optic Temperature Sensing System for Buried Subsea Arctic Pipelines. *Deep Offshore Technology conference DOT*.
- FEMTO (2010). Dhpca-100. Reporte técnico, FEMTO Messtechnik GmbH.
- Grattan, K. T. V. y Sun, T. (2000). Fiber optic sensor technology: an overview. *Sensors and actuators*, 82: 41–60.
- Horiguchi, T., Kurashima, T., y Tateda, M. (1989). Tensile strain dependence of Brillouin shift frequency in silica optical fibers. *IEEE photon technology letters*, 1(5): 107–108.
- Horiguchi, T., Shimizu, K., Kurashima, T., Tateda, M., y Koyamda, Y. (1995). Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering. *Journal of lightwave technology*, 13(7): 1296–1302.
- Howe, D. R. (1984). Fiber optic sensor. US Patent No. 4488040.
- Hurtig, E., Grobwig, S., y Kuhn, K. (1997). Distributed Fibre Optic Temperature Sensing: A New Tool for Long-Term and Short-Term Temperature Monitoring in Boreholes. *Energy Sources*, 16(1): 55–62.
- JDSU (2011). Epm 705. Reporte técnico, JDS Uniphase Corporation.

- Juarez, J. C. (2005). *Distributed fiber optic intrusion sensor system for monitoring long perimeters*. Tesis de doctorado, (Texas A&M University).
- Juarez, J. C., Maier, E. W., Choi, K. N., y Taylor, H. F. (2005). Distributed fiber optic intrusion sensor system. *Journal of lighthwave technology*, 23(6): 2081–2087.
- Kobyakov, A., Sauer, M., y Chowdhury, D. (2010). Stimulated brillouin scattering in optical fibers. *Advances in optics and photonics*, 2: 1–59.
- Kurashima, T., Horiguchi, T., y Tateda, M. (1990). Thermal effects on Brillouin frequency shift in jacketed optical silica fibers. *Applied Optics*, 29(5): 2219–2222.
- Liu, D., Wang, J., y S., L. (2000). Temperature performance of Raman scattering in a data fiber and its application in a distributed temperature fiber-optic sensor. *Defense Technical Information Center Compilation Part Notice ADPO 11232*, páginas 151–156.
- Modesto, A. C. (2009). *Fundamentos para sensor distribuido de fibra óptica basado en efecto brillouin para medición de temperatura y tensión utilizando configuración de encadenamiento por inyección óptica*. Tesis de doctorado, (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada).
- Otnes, R. K. y Enochson, L. (1972). *Digital time series analysis*. Wiley-Interscience. 1-28 pp.
- Peterson, J. I., Golstein, S. R., Fitzgerald, R. V., y Buckhold, D. K. (1980). Fiber optic ph probe for physiological use. *Analytical Chemistry*, 52: 864.
- Pollock, C. R. (1995). *Fundamentals of optoelectronics*. Irwin, New York. 533 pp.
- Pérez, C. (1996). *Sensores ópticos*. Universitat de Valencia, Valencia. 32 pp.
- Rogers, A. J. (1980). Polarization optical time domain reflectometry. *Electrononics Letters*, 16(13): 489–490.
- Rogers, A. J. (1981). Polarization optical time domain reflectometry: a new technique for the measurement of field distributions. *Applied Optics*, 20(6): 1060–1074.
- Ross, J. N. (1981). Birrefringence measurements in optical fibres by potdr. *Applied Optics*, 21(19): 3489–3495.
- Saleh, B. E. A. y Teich, M. C. (1991). *Fundamentals of photonics*. Wiley-Interscience, New York, segunda edición. 729 pp.
- Seitz, W. R. (1988). Chemical sensors based on immobilized indicators and fiber optics. *CRC Critical reviews in analytical chemistry.*, 19(2): 135–173.

- Shiyong, F., Shaofeng, Q., Yijia, W., Liangchuan, L., Gordon, N. L., y Qianjin, X. (2009). Coherent otdr used for fibre fault detection. *Communications and photonics conference and exhibition.*, 7634: 1–5.
- Sischka, F., Newton, S. A., y Nazarathy, M. (1988). Complementary correlation optical time-domain reflectometry. *Hewlett-Packard Journal*, 39(6): 14–21.
- Wait, P. C. y Newson, T. P. (1996). Landau-Placzek ratio applied to distributed fibre sensing. *Optics Communications*, 12(4).
- Yun, F. T. S. y Yin, S. (2002). *Fiber optic sensors*. Marcel Dekker, New York. 205-207 pp.

Apéndice A

Equipo usado

Equipo Óptico

- a) Fibra óptica SMF 28 de la compañía Corning. Numero de parte: 7910446-A.
- b) Circulador óptico de la compañía Global Opticom. Numero de parte: CIR15AL20.

Equipo Optoelectrónico

- a) Laser EOM- Modulated Single Frequency Pulsed Light Source de la compañía Fibotec.
- b) Piezoeléctrico de la compañía Thorlabs. Numero de parte: AE0203D08F.
- c) Fotodiodo EPM 705 de la compañía JDSU.

Electrónico

- a) Amplificador de corriente de alta velocidad y ganancia variable DHPCA - 100 de la compañía FEMTO.
- b) Tarjeta de adquisición de datos Spectrum UF2 3100 de la compañía Strategic Test.
- c) Generador de funciones GFG-8210 de la compañía GW instek.
- d) Generador/Retardador de puso digital, modelo DG535, de la compañía Stanford Research Systems, Inc.

Software

- a) Matlab R2010a de la compañía Mathworks.