



**Universidad** Zaragoza



# **ESTUDIO DE UN SISTEMA PROTOTIPO PARA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN PERIMETRAL BASADO EN LA FIBRA ÓPTICA COMO SENSOR ACÚSTICO**

Trabajo Fin de Grado-Grado en Física

Autora: María Pilar Urizar Ursua

Tutor: Jesús Mario Subías Domingo

Entrega: 28 de Junio de 2017



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Fenomenología: interacción luz-materia en la fibra</b>	<b>1</b>
2.1. Procesos elásticos de dispersión Rayleigh . . . . .	2
<b>3. Sistemas de medida</b>	<b>5</b>
3.1. Sistema de medida OTDR . . . . .	5
3.2. Esquema básico de un sistema $\phi$ -OTDR . . . . .	6
<b>4. Caracterización del sistema de sensado</b>	<b>9</b>
4.1. Simulación de la señal detectada . . . . .	10
4.2. Medidas experimentales . . . . .	14
<b>5. Desarrollo del sistema prototipo</b>	<b>16</b>
5.1. Esquema básico para detección heterodina . . . . .	16
5.2. Medidas experimentales . . . . .	18
5.2.1. Pruebas sobre las condiciones de sensado . . . . .	21
<b>6. Conclusiones</b>	<b>23</b>



## 1. Introducción

La vigilancia de infraestructuras ferroviarias, presas, muros o cercas, instalaciones industriales o estaciones eléctricas resulta una tarea complicada ya que se trata de ubicaciones que normalmente cuentan con poca iluminación y difícil acceso; además de presentar un mayor riesgo durante la noche. Es por ello por lo que en el desarrollo de las tecnologías ópticas de sensado se ha prestado un especial interés en aquellas que permitan detección y localización perimetral.

En este trabajo se plantea el estudio de un sistema prototipo con el que se pueda obtener detección perimetral empleando la fibra óptica como elemento sensor. Para ello se va a emplear el análisis de la retrodifusión Rayleigh que presenta la fibra cuando a través de ella se propaga un haz de luz. De esta forma, cuando se observa un cambio en la señal registrada corresponderá a la presencia de perturbaciones en la fibra empleada.

Para la detección y análisis de dicha señal retrodifundida se ha propuesto una estructura de reflectometría óptica de fase en dominio temporal ( $\phi$ -OTDR). Así, la detección se realizará en tiempo real y las perturbaciones se detectarán por los cambios en fase que suponen en la retrodifusión.

Estas variaciones en la señal registrada pueden producirse por diversos fenómenos como cambios de temperatura, tensión o presión. Por ello presentan un gran interés en la detección de intrusos, ya que las pisadas pueden traducirse como ondas acústicas de presión, que generan un cambio en el índice de refracción de la fibra y por lo tanto un cambio en la retrodifusión detectada.

Así, los objetivos de esta trabajo se centran en el estudio fenomenológico de la fibra y desarrollo del sistema prototipo. Finalmente se realizarán de una serie de medidas experimentales con el fin de comprobar la viabilidad del sistema.

## 2. Fenomenología: interacción luz-materia en la fibra

El primer objetivo de este trabajo consiste en entender el principio físico básico en el que se basará el sistema prototipo. Para ello es necesario estudiar la fenomenología que tiene lugar en la fibra óptica cuando a través de ella viaja un haz de luz. Más concretamente, en esta sección se va a presentar el resultado de la interacción luz-materia en el interior de la fibra.

De un modo general podemos decir que las características de la luz difundida en la interacción luz-materia se presenta en forma de bandas más o menos estrechas, como se muestra en la figura 2.1.

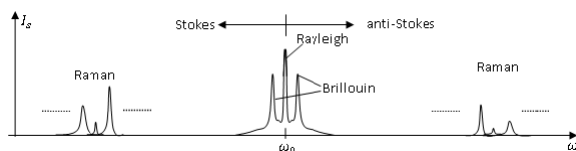


Figura 2.1: Espectro de dispersión típico de un sólido.

Este tipo de comportamiento se debe a que el medio material está formado por átomos y moléculas, permitiendo realizar un estudio de este fenómeno desde el punto de vista de la

interacción de los fotones con los electrones y fonones del material. Estos procesos de interacción fotón-fonón y fotón-electrón se clasifican en 2 tipos:

- Procesos elásticos de difusión:

Son el caso de interacción en que el fotón generado es igual al incidente, dando lugar a la componente Rayleigh mostrada en el espectro de la figura 2.1. Este tipo de procesos va a analizarse con más detalle en el punto siguiente.

- Procesos inelásticos de difusión:

Situación en que se ha producido un intercambio energético entre el material y el fotón incidente a través de un fonón. Si se considera que la emisión incidente tiene frecuencia  $\omega_0$ , las componentes que aparecen con  $\omega$  superior se deben a la absorción de un fonón, mientras que las que lo hacen menor  $\omega$  aparecen por creación. En la figura 2.1 se identifican como las componentes anti-Stokes y Stokes respectivamente.

Entre estos procesos se pueden diferenciar nuevamente dos tipos:

- Procesos de dispersión Brillouin:

Engloban los procesos generados por las vibraciones térmicas de las moléculas del material, es decir, las interacciones del fotón con los fonones acústicos del núcleo de la fibra.

- Procesos de dispersión Raman:

Son el resultado de la interacción del fotón con la red cristalina que forman los iones del material.

Ambos procesos se observan a frecuencias características del material. Son además procesos a 3 cuerpos, por lo que su emisión es muy débil e implicaría mucha energía de excitación. Por ello van a ser los procesos elásticos en los que se va a centrar el estudio.

Se ha mencionado también el concepto de retrodifusión. Esto es debido a que la luz puede ser difundida por el medio en cualquier dirección del espacio, de forma que, al menos una fracción de ella será devuelta en dirección contraria a la transmisión. Esta será la retrodifusión que se va a tratar de registrar y estudiar.

## 2.1. Procesos elásticos de dispersión Rayleigh

Como ya se ha indicado, los procesos de dispersión elástica se denominan procesos Rayleigh y se caracterizan por la generación de un fotón con la misma frecuencia que el fotón incidente. De todos los procesos de interacción luz-materia es el más fácilmente observable. Predomina principalmente en las regiones del espectro: IR y UV; y tiene lugar incluso para situaciones de muy bajas potencias de señal.

En ausencia de luz incidente se puede considerar que el campo EM en el núcleo de la fibra es nulo, dado que las moléculas presentan fluctuaciones muy débiles y son incoherentes entre sí. Sin embargo, la presencia de un haz de luz implica la presencia de un campo EM excitante, por lo que las moléculas tenderán a reorientarse en la dirección del campo eléctrico incidente prioritariamente. Esta repuesta se manifiesta como la aparición de una polarización inducida:  $\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$  donde  $\chi = \epsilon - 1$ . Por ello, si se considera un volumen infinitesimal de la fibra, este puede aproximarse a un conjunto de antenas dipolares eléctricas, todas ellas orientadas aleatoriamente por ser la fibra un medio inhomogéneo. Cuando sobre ellas incida luz linealmente polarizada,

los dipolos que estén paralelos a ella se verán excitados. En este caso, por las propiedades de radiación de los dipolos eléctricos, la potencia se dispersará isotrópamente en el plano normal a la dirección del campo  $\vec{E}$ , pero será nula en la dirección paralela. Sin embargo, si se incide con luz circularmente polarizada, la intensidad dispersada se obtiene como la suma de dos antenas dipolo perpendiculares entre sí. De esta forma la luz dispersada será independiente del ángulo azimutal y proporcional a  $(1 + \cos^2(\theta))$ .

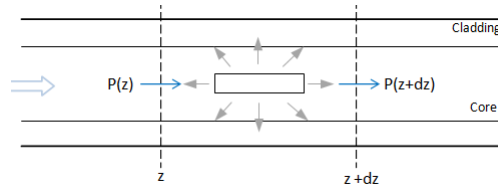


Figura 2.2: Esquema de dispersión en un elemento infinitesimal de la fibra óptica.

Si se analiza cualitativamente la emisión generada [1], hay que partir del hecho de que un cambio en el índice de refracción implica un cambio en la constante dieléctrica del material ya que  $n \propto \sqrt{\epsilon}$ . Se van a ver afectadas también tanto la polarizabilidad como el vector desplazamiento del núcleo de la fibra, de forma que se obtiene:

$$\epsilon \rightarrow \epsilon + \Delta\epsilon$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \vec{P} \rightarrow \vec{D} = (\epsilon + \Delta\epsilon) \vec{E}$$

Una vez obtenida la dependencia de  $\vec{D}$  se puede obtener el campo eléctrico a partir de las ecuaciones de Maxwell. Para ello se ha considerado además que el núcleo de la fibra no es un material magnético, obteniendo lo siguiente:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \rightarrow \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \nabla^2 \vec{E} - \vec{\nabla} \left[ \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \ln(\epsilon + \Delta\epsilon) \right] + \mu_0 \frac{\partial^2 (\Delta\epsilon \vec{E})}{\partial t^2} = 0$$

Donde: los dos primeros términos describen el proceso normal de propagación, mientras los dos segundos son los responsables de la difusión Rayleigh espontánea producida por las fluctuaciones  $\Delta\epsilon$ .

Esta expresión puede simplificarse suponiendo que las perturbaciones del índice no dependen del tiempo y el campo eléctrico presenta una dependencia temporal exponencial ( $e^{-i\omega t}$ ). Además, en el caso particular de la fibra óptica puede despreciarse la contribución de las componentes transversales, tomando únicamente la longitudinal ( $z$ ). Con todo ello se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \mu_0 \epsilon \omega^2 \left( 1 + \frac{\Delta\epsilon(z)}{\epsilon} \right) E = 0$$

A partir de esta última ecuación y definiendo la constante de propagación  $\beta$  como  $\beta^2 = \mu_0 \epsilon \omega^2$ ; se obtiene finalmente la expresión para el campo eléctrico, formada por una componente copropagante y otra contrapropagante:

$$E = E_o e^{i\beta z} + \Psi(z, \beta) e^{-i\beta z}$$

Considerando ahora el caso en que la emisión Rayleigh es muy débil, puede obtenerse la siguiente aproximación para la retrodifusión Rayleigh dependiente de las fluctuaciones producidas en la permitividad de la fibra:

$$\Psi(z, \beta) - \Psi(0, \beta) \approx \frac{\beta E_o}{2i} \int_0^z \frac{\Delta\epsilon(\zeta)}{\epsilon} e^{2i\beta\zeta} d\zeta$$

De esta forma se ha obtenido una expresión para la señal de retrodifusión Rayleigh que podría interpretarse como una transformada de Fourier de las alteraciones generadas en la permitividad. Estas perturbaciones que se alcanzan a observar puede haberse generado por factores externos como vibraciones, presiones o cambios de temperatura. Por ello, mediante la detección de esta señal es posible registrar los cambios de índice de refracción de la fibra y, por lo tanto, el control del estado de la fibra y la detección perimetral deseada.

En este desarrollo no se ha considerado la atenuación que sufre la propagación en la fibra. Esta se podría incorporar simplemente sustituyendo  $\beta$  por  $\beta + i\alpha$ .

Por otro lado, al tratarse de procesos de disolución elástica, la potencia de emisión es proporcional a la potencia incidente, influyendo en la atenuación del haz propagante en la fibra. Esta pérdida de potencia en la dirección copropagante por dispersión Rayleigh puede calcularse. Para ello se va a considerar un  $dz$  de la fibra como el mostrado en la figura 2.2. En este tramo se puede definir un  $dP_t$  tal que:

$$dP_t = P(z) - P(z + dz) = 2\alpha' P(z) dz$$

Donde:  $\alpha' \equiv \text{coef. atenuación}$

Resolviendo esta ecuación diferencial se obtiene que la potencia propagada y el coeficiente de atenuación son de la siguiente forma:

$$P(z) = P(0) e^{-2\alpha' z}$$

$$\alpha' = \frac{1}{2P} \frac{dP}{dz} [\text{dB/km}]$$

Sólo la parte de luz que haya sido dispersada con  $\theta = \pi$  será capaz de excitar modos fundamentales de propagación en dirección contrapropagante, dando lugar a la retrodifusión Rayleigh que será registrada al inicio de la fibra. Para caracterizar esta cantidad se puede definir una “fracción de captura” como:

$$S = \frac{3}{8\pi^2 n_{eff}^2 (w_G/\lambda)^2}$$

Este parámetro S toma valores muy pequeños, por lo que la señal retrodifundida será muy débil. La señal propagante apenas se ve afectada y generalmente en los tendidos de telecomunicaciones es un factor despreciable. Sin embargo, en este caso en que se quiere estudiar las variaciones generadas en la retrodifusión ( $\Psi$ ) será necesario diseñar un método de amplificación de esta señal.



### 3. Sistemas de medida

Una vez presentado el principio físico que se pretende emplear para el sensado, se va a centrar la atención en el estudio de la técnica de medida empleada.

Existen distintas tecnologías de sensado distribuido en función tanto del rango espacial que se quiera estudiar (desde unos pocos metros hasta decenas de kilómetros) como de la resolución que se necesite (desde los metros hasta las decenas de micra). Influye además el modo en que se quiera realizar la detección: directa, homodina o heterodina. Algunos ejemplos de estas tecnologías son: BOTDA, Raman OTDR, OFDR Rayleigh, POTDR. Dado que el objetivo en este trabajo es detección y localización perimetral, interesa poder realizar detecciones directas y dinámicas; por lo que se propone con un sistema basado en  $\phi$ -OTDR (sensado distribuido basado en la retrodispersión Rayleigh coherente en dominio temporal).

#### 3.1. Sistema de medida OTDR

El esquema básico en que se basará el dispositivo prototipo es un sistema de detección OTDR. Este es el más empleado cuando se busca encontrar eventos distribuidos en sistemas de fibra óptica, buscando tanto identificarlos como ubicarlos en el tendido. Típicamente se han empleado en la localización de fallos en la fibra o la certificación de enlaces. Permiten además realizar medidas en tiempo real permitiendo ser empleados como método de vigilancia, o promediadas, lo que ayuda a disminuir el ruido de la traza y mejorar la SNR. Se emplean también para la medición de longitudes ópticas en fibra, atenuación y pérdidas totales del trayecto por potencia óptica.

El método básico de operación de un OTDR es el aspecto principalmente interesante para el desarrollo del sistema prototipo que se está estudiando [2]. En primer lugar, por un extremo de la fibra bajo análisis se inyectan una serie de pulsos ópticos. Estos pulsos interactúan con el núcleo de la fibra y devuelven luz retrodifundida en todas las direcciones. Parte de ella se acoplará en dirección contrapropagante y será extraída por el extremo inicial. Esta detección será muy débil exceptuando los momentos en los que, por factores como conectores estropeados (soldaduras o empalmes) o fisuras en la fibra, se haya producido una fuerte reflexión. Así, a partir del tiempo que ha tardado el haz emitido en llegar a un punto y la señal reflejada en volver se puede calcular la distancia a la que se encuentra respecto al punto de medida.

Cuando se realizan este tipo de medidas hay que tener en cuenta distintos aspectos. Uno de ellos de gran importancia es la atenuación que sufre un pulso cuando se propaga a través de una fibra. Esta contribuye de forma exponencial y es fácilmente observable en las medidas: si se representan los datos de intensidad registrados en escala logarítmica se obtiene una dependencia lineal descendiente cuya pendiente será el coeficiente de atenuación de la fibra por unidad de longitud (dB/km). Este factor depende únicamente del cable de fibra óptica empleado, por lo que en condiciones normales puede considerarse constante.

De esta forma, la salida típica de un OTDR es una representación gráfica de la atenuación en función de la distancia sobre la que se sitúan subidas puntuales debidas a las reflexiones. Estas pueden llegar incluso a saturar el detector generando zonas muertas.

Otro aspecto a tener en cuenta es la sensibilidad del sistema de medida. Este parámetro se

ve especialmente afectado por la anchura del pulso, ya que una menor anchura implica menor energía y por lo tanto mayor tiempo de promediado y peor sensibilidad. Las características del pulso influyen también en la resolución espacial, ya que esta viene determinada por el fragmento de fibra que ilumina el pulso en cada instante. Por ello, cuanto mayores sean los rangos a observar y menores la anchura de los pulsos serán necesarios mayores tiempos de promediado.

En cuanto a los aspectos a considerar, cabe destacar por último la importancia del rango dinámico y la resolución de muestreo.

Sin embargo, en el caso que nos ocupa no buscamos la medida de las reflexiones mencionadas. Se quiere conseguir la observación de la señal de retrodifusión Rayleigh con el objetivo de estudiar sus variaciones concretas debidas a alteraciones del índice de refracción de la fibra por la presencia de perturbaciones en su entorno. Para ello es necesario un sistema de medida  $\phi$ -OTDR. Estos últimos se diferencian con los OTDR convencionales en que la emisión empleada, ya que además de ser pulsada es muy coherente en fase. Con ello se favorece la posterior interferencia a la salida de la fibra de las señales generadas en cada uno de los puntos de retrodifusión Rayleigh. Así, mediante el análisis de estos patrones interferenciales obtenidos se recoge la información del  $\Delta n$  producido y por lo tanto la posición concreta de la perturbación responsable.

### 3.2. Esquema básico de un sistema $\phi$ -OTDR

A continuación se presenta un estudio del esquema básico de un sistema de medida  $\phi$ -OTDR analizando cada uno de los bloques que lo forman. Para ello se va a seguir la figura 3.1 [3] [4].

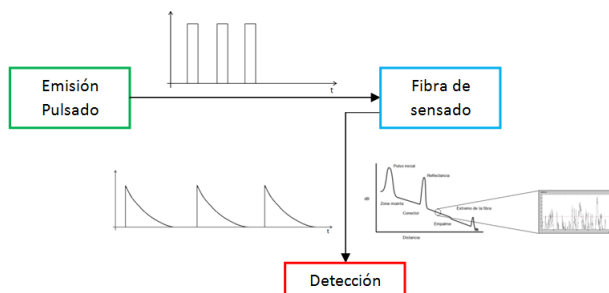


Figura 3.1: Diagrama de bloques de un sistema de medida  $\phi$ -OTDR.

#### Emisión y pulsado

La necesidad de un haz muy coherente y mantener muy estables las condiciones de interferencia posteriormente en el detector, implica el empleo de un láser de fibra o cavidad externas. Concretamente se ha empleado un láser de anillo emitiendo en tercera ventana caracterizado por su elevada coherencia, estabilidad en fase y frecuencia, y su baja anchura espectral. De esta forma se consigue formar patrones interferenciales y asegurar en la medida de lo posible que las variaciones en la señal se deban sólo a las variaciones del índice de la fibra.

Por otro lado, a la emisión le sigue el pulsado de la señal. La necesidad de esta emisión pulsada se debe a que, si únicamente viaja a través de la fibra de sensado un pulso de luz, en cada instante queda iluminada una pequeña sección y la detección en ese instante corresponderá sólo a los centros dispersivos que se encuentren en este fragmento. De esta forma se consigue la

“visualización” y control de la fibra conforme el pulso se desplaza e iluminando la fibra progresivamente. Sin embargo, si la emisión es introducida de forma continua la dispersión Rayleigh se produciría constantemente en todos los puntos de la fibra, y los patrones de interferencia serían debidos a dispersiones producidas a lo largo de toda la fibra, perdiendo así la posibilidad de localización. Para la decisión de que modulador emplear es necesario fijar los requisitos necesarios en la calidad de los pulsos:

- Alta razón de extinción: ya que baja razón de extinción implica la presencia de cierta emisión entre pulsos y ruido de fondo añadido y limitando la sensibilidad.

- Capacidad de repetibilidad, ya que el análisis de datos se va a basar en medidas diferenciales, que se ven muy afectadas por inestabilidades o ruido.

De esta forma se decidió emplear inicialmente un modulador externo Mach-Zhender, cuya razón de extinción es superior a los 40dB.

### Detección de la señal

En cuanto a la detección existen distintas posibilidades. Las principales son la detección directa, homodina y heterodina, mostradas en la figura 3.2.

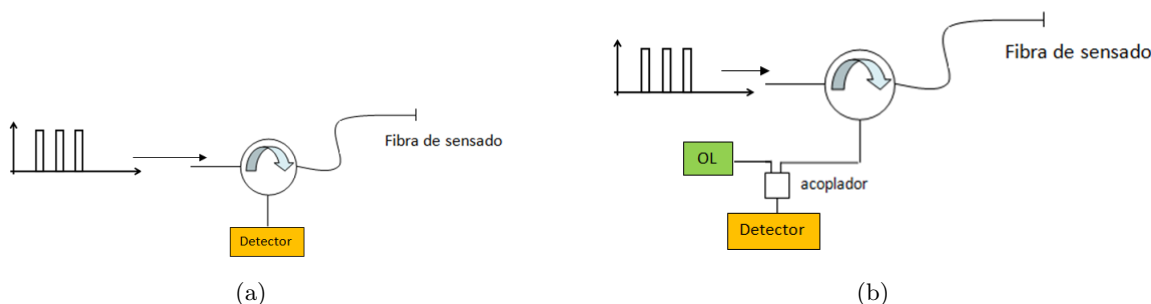


Figura 3.2: Esquemas de sistemas de detección: (a) directa, (b) heterodina y homodina.

El sistema más sencillo corresponde a la detección directa. Este consiste en el registro de la señal conforme es extraída de la fibra, lo que se consigue de modo sencillo mediante una circulator. Así, en el último de los terminales se colocará un detector en el que se crearán las interferencias debidas a las señales de retrodifusión de la fibra generadas a lo largo de la fibra.

El principal problema que presenta este tipo de detección se encuentra en que la potencia recibida en el detector es muy reducida, por lo que se tiene poca sensibilidad y por lo tanto mala resolución.

La solución a este problema se encuentra en la detección homodina y heterodina, ya que ambos consisten en sumar a la señal retrodifundida en la fibra un haz de referencia con una frecuencia y fase concretas, fijadas de antemano. A este haz de referencia se le llamará en adelante oscilador local (OL). El esquema básico de este tipo de detección se describe en la figura 3.2(b).

Cualitativamente este tipo de detección se representa mediante la siguiente expresión:

$$I_d(t) = R_d (A_0^2 + A_L^2) + 2R_d A_0 A_L \cos [(\omega_0 - \omega_L) t + \phi_0(t) - \phi_L]$$

Donde:  $R_d$  es la responsabilidad del fotodetector,  $\omega_0$  y  $\phi_0$  las características de la emisión,  $\omega_L$  y  $\phi_L$  las del oscilador local.

La diferencia entre estos dos métodos de detección es la frecuencia empleada en el OL. En el caso de la detección homodina la frecuencia de OL es la misma que la de la emisión introducida en la fibra, mientras que en el caso del heterodinaje se emplean frecuencias diferentes.

En la expresión anterior caben destacar dos aspectos. El primero es el factor multiplicativo de amplitudes, representando una ventaja frente a la detección directa. El segundo es el término frecuencial del segundo sumando, que toma valores diferentes en función de la detección empleada. Para el caso de detección homodina se anula, quedando la señal generada en banda base (a  $\omega = 0$ ) junto con el ruido de fondo que presente el sistema. Sin embargo en la situación heterodina esto no ocurre. Con ella se obtiene una señal del tipo batido de ondas en la que la envolvente contendrá la información de la retrodifusión y su transporte se hará con la frecuencia y amplitud que imponga el oscilador local. De esta forma se consigue un desplazamiento en frecuencia de la información que se desea analizar, permitiendo un fácil filtrado del resto de componentes.

Estos 3 sistemas de detección comparten el hecho de que el resultado de la detección es un patrón interferencial, aunque de distintas componentes en cada caso. Así, en el caso de la detección directa, se registra en cada instante la superposición de las ondas retrodifundidas correspondientes a los emisores Rayleigh iluminados en ese tiempo; mientras en el caso del heterodinaje la interferencia es también debida a la suma con el OL.

Finalmente, la observación de las alteraciones producidas en la fibra se va a conseguir mediante un estudio comparativo entre trazas consecutivas registradas en la detección. El hecho de que se elija este método se debe a que, cuando se produzca un cambio en la fibra por la presencia de ondas acústicas, se obtendrá un patrón diferente a los anteriores en los que no había perturbación. Esto se analizará con más detalle más adelante al tratar el análisis de datos.

### **Cable de fibra empleado en el sensado**

Es importante también el estudio de las características del cable de fibra óptica empleado ya que este puede ser un factor importante en el límite de sensibilidad del sistema implementado.

En este caso, se propuso que el sistema desarrollado pudiese utilizar los tendidos de fibra óptica oscura (inutilizada) existentes. Por ello la fibra óptica empleada será siempre de silicio monomodo típicamente empleada en redes de comunicaciones y el factor limitante será el cable, es decir, el recubrimiento que acompañe a la fibra.

Otros aspectos a tener en cuenta son las condiciones de la instalación.

El objetivo inicial de este sistema es el sensado de fibra en tendidos soterrados, lo que presenta la ventaja de un bajo nivel de exposición y vulnerabilidad frente a perturbaciones externas. Por otro lado, si se está en ambientes hostiles, hay que considerar la deriva de temperaturas tanto a lo largo de la medida como entre diferentes registros ya que pueden llegar a generar efectos de dilatación o contracción excesivos haciendo errónea la detección.

Otra aplicación es la posibilidad de sensar fibra situada en vallas perimetrales. En este caso es necesaria una mayor robustez del cable, y permitiría no sólo la identificación de intrusos sino también riesgos de ruptura por la presencia de tensiones elevadas.

## 4. Caracterización del sistema de sensado

Como ya se ha mencionado anteriormente, lo que hace posible la localización de eventos en la fibra es la utilización de pulsos de luz que iluminan la fibra conforme se propagan a través de ella.

Los principales parámetros que caracterizan estos trenes de pulsos son 2 factores temporales y juegan un papel fundamental en la caracterización del sistema de sensado. Son los mostrados en la imagen 4.1.

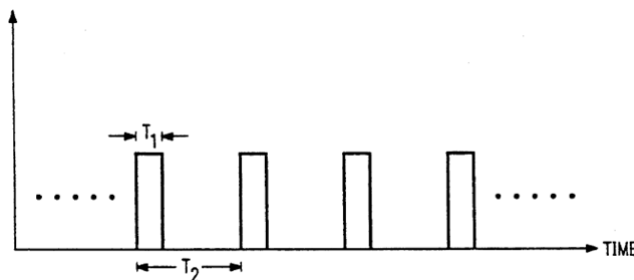


Figura 4.1: Pulso de láser que es introducido en la fibra de sensado.

- $T_1$ : Duración del pulso.

Este es un de los parámetros más limitantes ya que dependiendo de lo ancho que sea el pulso se obtendrán mejores o peores condiciones de resolución y sensibilidad. Su influencia sobre la resolución viene determinada por la siguiente expresión:

$$S < \frac{cT_1}{2n_g}$$

En cuanto a su influencia sobre la sensibilidad se debe a que cuanto menor sea la duración del pulso, menor será la potencia media emitida, pudiendo incluso perder el pulso por atenuación antes de llegar al final de la fibra.

- $T_2$ : Periodo de emisión de los pulsos.

Este periodo  $T_2$  debe ser tal que se asegure que en todo momento haya un solo pulso en la fibra. Por ello debe ser mayor que el tiempo que le cueste al pulso recorrer la fibra, pero no demasiado elevado ya que habría un determinado tiempo sin registro de señal y se dejaría de observar la fibra. Por lo que puede expresarse como:

$$T_2 = \frac{2L_s n_g}{c}$$

Donde  $L_s$  es la longitud de la fibra de sensado.

Hay que suponer además que la emisión entre pulsos debe ser idealmente nula, donde juega un factor fundamental la razón de extinción del modulador empleado.

Así, la señal registrada en función del tiempo corresponderá a las ondas retrodifundidas por el paso de los sucesivos pulsos a lo largo de la fibra. De forma que, si además del tiempo de emisión se conoce la velocidad de propagación del haz en la fibra, es posible identificar el fragmento de la fibra que corresponde a cada detección. Consiguiendo por lo tanto la localización en el tendido de

fibra.

$$T_i = \frac{2L_i n_g}{c} \rightarrow L_i = \frac{cT_i}{2n_g}$$

Por otro lado, la onda retrodifundida por la perturbación se registrará sólo en una de las trazas interferenciales si se trata de perturbaciones puntuales en el tiempo. Por lo que mediante un análisis comparativo entre trazas consecutivas no resulta complicado obtener el instante y posición en que se produce.

#### 4.1. Simulación de la señal detectada

Con el objetivo de tener una idea previa sobre la señal que se va a registrar se ha trabajado con una simulación en la que se pretende hacer una aproximación a la detección directa. De esta forma se puede hacer un estudio sobre la señal que registraría el detector según el montaje propuesto.

En primer lugar se trabajó sobre un código en el que se consideraba únicamente la creación de las ondas retrodifundidas por los centros dispersivos y su interferencia en el detector. A continuación se añadieron los estímulos y la evolución de las ondas a lo largo de la fibra considerando la atenuación y los cambios en la polarización que sufren al propagarse.

Otro aspecto importante en la simulación ha sido la necesidad de emplear notación matricial para poder poner de manifiesto el diferente comportamiento en función de la polarización. Para ello se han considerado los ejes X e Y como los correspondientes a la sección transversal siendo Z la dirección de propagación.

Se van a explicar ahora cada uno de estos elementos con los que se define la fibra en la simulación.

#### Emisores Rayleigh

En la definición de centros de dispersión Rayleigh, o emisores Rayleigh se siguen dos pasos:

1- Se definen emisores uniformemente equidistantes entre sí a lo largo de la fibra. De forma que quedan separados entre sí una distancia  $L_R$

Sin embargo, dado que la detección experimental se va a realizar en dominio temporal, es necesario cambiar los indicadores de emisores Rayleigh del dominio espacial al temporal. Para ello, se define un “tiempo medio” equivalente al tiempo que le correspondería al pulso recorrer  $L_R$ .

$$t_{medio} = \frac{L_R}{v} \quad \text{Donde: } v \equiv v_{prop.medio}$$

2-A estas posiciones fijas se les añade un término aleatorio en el rango de  $(0, 1/f)$ , donde  $f$  es la frecuencia óptica del haz pulsado introducido en la fibra. Por lo que se le está dando un carácter aleatorio con desfases menores de  $2\pi$  (lo que correspondería con un desfase temporal de un periodo).

De esta forma se consigue una distribución uniforme con un cierto carácter aleatorio de los emisores Rayleigh que pueden presentarse a lo largo del interior de la fibra. Además, cada

vez que se generen, a pesar de que el número de ellos sea siempre el mismo se encontrarán en momentos distintos de la fibra y darán lugar a patrones interferenciales diferentes, obteniendo así una situación similar a lo que se puede observar en las experiencias.

Una vez definidos los emisores, hay que identificar cuáles de ellos se encuentran activos en cada instante de tiempo, ya que sólo emitirán un pequeño grupo de ellos en un tiempo dado. Estos serán aquellos que se encuentren en el tramo de fibra iluminado por el pulso, ya que al no ser este puntual cubrirá más de uno. Para seleccionarlos se toma únicamente los que cumplan la siguiente condición:

$$|t - \frac{t_{pulso}}{2} - t_{emisor}| < \frac{t_{pulso}}{2}$$

### Ondas Rayleigh reflejadas

Como ya se sabe, la dispersión Rayleigh corresponde a procesos de dispersión elástica. Por ello, las ondas generadas en los emisores tendrán la misma frecuencia que la fuente emisora. Sin embargo estarán además desplazadas en el tiempo ya que se toma como origen de tiempo el momento en que el pulso es introducido en la fibra. Así, el momento de detección corresponde a la ida y vuelta de la onda desde el inicio de la fibra hasta la posición del emisor Rayleigh correspondiente.

La expresión de las ondas generadas o reflejadas en función del tiempo es la siguiente:

$$\vec{E}_{reflej} = Ae^{i2\pi f(t-t_{emisor})}$$

De esta forma en el detector se registra en cada instante la suma de las ondas generadas por los emisores activos en ese momento, lo que da lugar al patrón de interferencia mencionado.

$$\vec{E}_T = \sum_i \vec{E}_{i,ref} \quad \text{Donde } i = \text{emisores activos}$$

### Propagación de las ondas reflejadas en la fibra

En cuanto al estudio de la propagación de las ondas en la fibra, se van a considerar dos aspectos importantes:

- Atenuación de la fibra:

Para una mayor sencillez del modelo, se consideró que la atenuación uniforme en todas las direcciones y constante a lo largo de la fibra. Por lo tanto, la atenuación en intensidad transmitida en cualquier dirección vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\vec{E}(t) = \Lambda \cdot \vec{E}(0)$$

Donde:  $\Lambda = 10^{-\frac{\alpha}{20}ct} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

- Evolución de la polarización:

Dado que se busca simular una situación lo más realista posible, hay que tener en cuenta que no se trata de una fibra perfectamente circular. En consecuencia, el material presenta una

determinada birrefringencia con 2 ejes principales ortogonales entre sí y diferentes velocidades de propagación cada uno. Esto implica que, conforme la onda avance en la fibra, la velocidad sufrirá sucesivos cambios y por lo tanto también su polarización.

Esta dispersión por polarización del modo depende de la longitud recorrida en la fibra y se determina mediante el parámetro DGD, que representa el desfase relativo entre las componentes de la polarización.

La dificultad de la simulación de este punto radica en el hecho de que los ejes principales están orientados de forma aleatoria entre sí en cada punto de la fibra [7]. Para abordar este problema se ha dividido la fibra en pequeños fragmentos iguales, a los que se denominan “trunk”. Cada uno de ellos tendrá sus propios ejes principales con su correspondiente DGD.

En la simulación, a cada uno de estos *trunks* se les ha asociado aleatoriamente: la rotación de sus ejes aleatoria según una distribución uniforme ente 0 y  $2\pi$ , y los valores de DGD de cada uno de ellos con distribución Maxwelliana.

Es necesario además introducir la notación matricial mencionada mediante el formalismo de Jones. Así el campo eléctrico queda determinado por un vector con componentes X e Y y los desfases de los trunks por matrices 2x2.

Para facilitar el cálculo se ha definido por un lado las matrices de rotaciones de los ejes principales y por otro lado las correspondientes a los DGD.

$$DGD_i(\omega) = \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Delta\tau_i}{2}\omega} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\Delta\tau_i}{2}\omega} \end{pmatrix}$$

$$R_i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i)e^{-i\frac{\phi}{2}} & \text{sen}(\theta_i)e^{-i\frac{\phi}{2}} \\ -\text{sen}(\theta_i)e^{i\frac{\phi}{2}} & \cos(\theta_i)e^{i\frac{\phi}{2}} \end{pmatrix}$$

$$J(\omega) = \prod_{i=1}^N DGD_i(\omega)R_i$$

De esta forma el resultado de la propagación hasta un punto concreto de la fibra será el producto de las matrices correspondientes a todos los trunks que se hayan atravesado. Es necesario tener en cuenta además que esta evolución hay que aplicarla tanto en sentido copropagante como contrapropagante.

$$\Gamma = J_{coprop} \cdot J_{contraprop}$$

## Estímulos inducidos

Como ya se ha explicado, se espera obtener la observación de los cambios de índice en el núcleo de la fibra producidos por perturbaciones en el entorno a partir de cambios de fases inducidos en las ondas retrodifundidas. Por ello, estas perturbaciones o estímulos se han definido directa como desfases diferenciales entre la situación sin estímulo y con él.

Para la determinación de las posiciones de los estímulos se ha continuado con la definición trunks empleada en la polarización, aprovechando que ya se había introducido una notación fasorial al definir el término DGD. De esta forma se podrá decidir en que trunk se quiere



perturbar la fibra y el desfase que esto implicará en la retrodifusión.

Por otro lado, se ha considerado que el desfase inducido por el estímulo es el mismo en ambas componentes.

### Modelo de retrodifusión del pulso

Una vez se han definido todos los elementos que intervienen en la simulación queda la generación de las ondas resultante de los emisores Rayleigh. Para ello se define una onda plana con igual frecuencia que la emisión del láser y un cierto desfase temporal, tiempo que le cuesta al pulso llegar hasta el emisor Rayleigh, y se multiplica por las matrices correspondientes a la atenuación y a la propagación de ondas en la fibra.

$$\vec{E}_{final}(t) = Ae^{i2\pi f(t-t_{emisor})} \cdot \Lambda \cdot \Gamma$$

Finalmente, lo que registra el detector no es campo eléctrico sino intensidad, la cual se obtiene como la parte real del producto del campo final con su conjugado.

$$I = Re \left[ \vec{E}_{final} \cdot \vec{E}_{final}^* \right]$$

### Resultados obtenidos en la simulación

Para la realización de la simulación se tomaron los siguientes datos:

Características de la fibra:	Pulso láser:	Heterodinaje:	Estímulo:
$L_{fibra} = 1000m$	$\lambda = 1550nm$	$f_{modulacion} = 100 \cdot 10^6 Hz$	$\phi_1 = \pi/3$
$L_R = 1m$	$t_{pulso} = 100ns$		$\phi_2 = \pi/3$
$L_{Trunk} = 10m$	$A = 1/nEmisores$		$\phi_3 = \pi/3$
$\Delta_\tau = 0.5 \cdot 10^{-12}s$			
$v_{prop} = 2 \cdot 10^8 m/s$			
$\alpha = 0.15 dB/km$			
$DGD = 0.5 \cdot 10^{-12} s$			

A partir de estos datos y siguiendo los pasos indicados anteriormete, se obtiene el registro de datos que se tendría cuando el sistema opera en detección directa. Esta simulación se ha realizado de igual forma para dos casos: situación en que la fibra no sufre alteraciones (figura 4.2(a)) y caso en que sufre 3 estímulos iguales en distintas posiciones: 100m, 500m y 900m respecto del origen de la fibra (figura 4.2(b)).

En la representación de estos datos (figura 4.2) se ha mantenido el tratamiento bidimensional realizado en la simulación, por lo que se muestran los datos obtenidos para ambas componentes. De la observación directa de las trazas obtenidas no es posible apreciar ninguna diferencia entre ellas. Por ello se ha incorporado la representación (c), en la que se muestra la diferencia entre las dos situaciones para ambas componentes. En este caso ya se observa con total claridad las perturbaciones realizadas y las posiciones concretas en las que se han realizado.

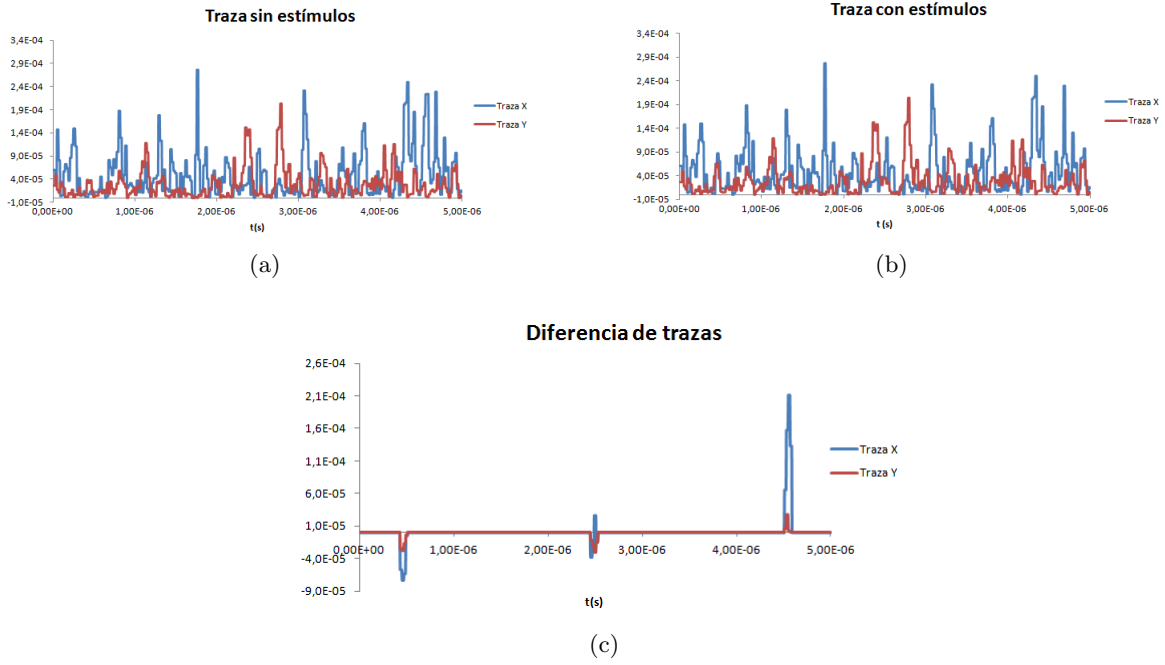


Figura 4.2: Representación de los datos obtenidos en la simulación para los casos en que: (a) no se tiene estímulos, (b) la fibra presenta una serie de estímulos, (c) diferencia de las trazas obtenidas con estímulos y sin estímulos.

Si se toman ahora los instantes en los que se ha registrado presencia de los estímulos, se puede obtener la posición correspondiente en la que se ha producido. Estos valores se muestran en la tabla siguiente, y se observa que son próximos a los puntos en los que se han fijado las perturbaciones.

t(s)	$x_{sim}$ (m)
$4.56 \cdot 10^{-7}$	91.2
$2.49 \cdot 10^{-6}$	498
$4.56 \cdot 10^{-6}$	912

En el caso en que se quisiera simular la detección heterodina, sería necesario sumar a la señal registrada en el caso anterior un oscilador local. Este último se representa nuevamente como una onda plana con una frecuencia y amplitud definidos de antemano.

$$\vec{E}_T = \vec{E}_{suma} + \vec{E}_{het} = \vec{E}_{suma} + A_{het}e^{i2\pi f_{het}t}$$

$$\text{Donde: } f_{het} = \frac{c}{\lambda} + f_{modulacion}$$

$$A_{het} = A \cdot nE_{emisores}$$

## 4.2. Medidas experimentales

Estos resultados obtenidos de modo teórico fueron comprobados en una primera prueba experimental empleando el dispositivo en detección directa. Para ello se colocó la fibra sobre la

barandilla de unas escalares de incendios en la Facultad de Ciencias, con el objetivo de comprobar si el dispositivo detectaba a una persona subiendo las escaleras.

En la figura 4.3 se muestra en primer lugar cómo fue la instalación del sistema prototipo. Se muestra la bobina de fibra, de aproximadamente 3km, que sirve de lanzamiento a la fibra situada en la escalera. Esta es la razón por la que en la representación de datos la perturbación se observa entre los kilómetros 3 y 4. Además, se eligió esta escalera ya que es de metal y se espera que transmita las vibraciones producidas al pisarla.

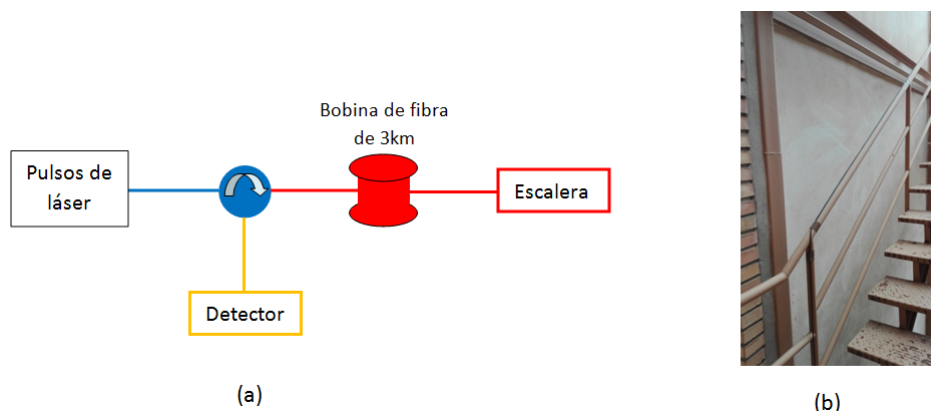


Figura 4.3: Instalación del sistema prototipo: (a) esquema de la instalación, (b) fotografía de la escalera con la fibra de sensado.

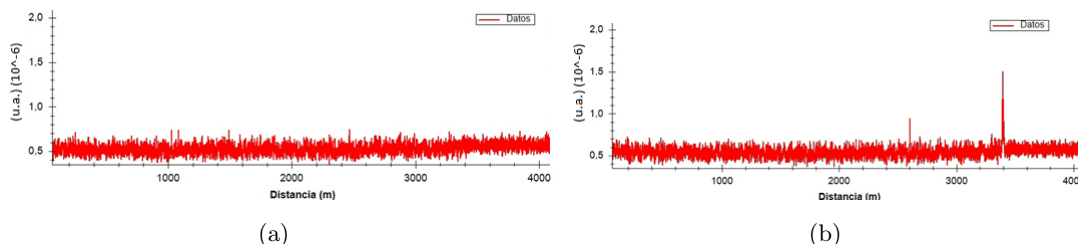


Figura 4.4: Medidas experimentales obtenidas midiendo en las escaleras de la Facultad de Ciencias cuando: (a) no hay perturbación, (b) se pisa la escalera.

Los datos obtenidos experimentalmente se muestran en la figura 4.4. En ella no se representan diferencias entre registros como en la simulación, sino varianzas. Esto se debe a que en la simulación se estudia la señal cuando únicamente se ha lanzado un pulso, mientras en el caso experimental se han emitido una serie de ellos, necesitando por lo tanto hacer un promediado de la medida registrada. En primer lugar se ha representado la señal con la escalera vacía (a), y a continuación cuando una persona subía los escalones (b). Con estas representaciones se observa claramente donde se ha genera la perturbación en el tendido, coincidiendo con la posición de la escalera. De forma que se comprobó experimentalmente la posibilidad de localización de eventos.

## 5. Desarrollo del sistema prototipo

### 5.1. Esquema básico para detección heterodina

Una vez analizados los distintos aspectos a tener en cuenta en el sistema de medida, se procede a la implementación del sistema prototipo completo operando en detección heterodina [5] [6]. Se van a tratar las características y requisitos de los principales elementos fotónicos que lo constituyen siguiendo el esquema de la figura 5.1. En él se muestran con diferentes colores cada una de las ramas o etapas del sistema.

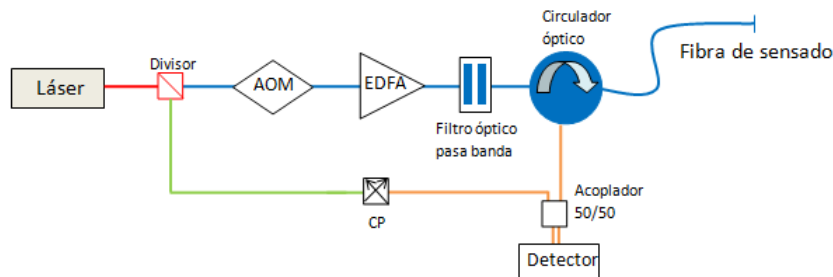


Figura 5.1: Esquema de un sistema básico de detección heterodina

La primera fase es la obtención de los dos haces necesarios para el heterodinaje. En este caso se ha propuesto la división del haz láser empleado como fuente emisora mediante un divisor de, inicialmente, 90/10. De esta forma se obtienen dos haces que seguirán caminos diferentes. Este factor de acoplo del divisor de haz será uno de los puntos de estudio para la optimización en el registro de la señal del sistema.

#### Rama del oscilador local

Esta rama corresponde a la de menor potencia obtenida en el divisor. Está representada en la figura 5.1 por la rama verde y juega el papel de oscilador local mencionado anteriormente.

La fracción correspondiente viaja a través de una fibra tomada como referencia y aislada del medio que se quiere sensar. Así, ignorando las posibles pérdidas producidas por propagación, se obtiene una señal continua y de igual frecuencia a la emisión del láser.

El único elemento que se incluye al final de esta rama es un controlador de polarización (CP), con el que se puede modificar el estado de polarización del OL buscando la situación óptima para la posterior interferencia. En este punto juega un papel fundamental la polarización de la señal retrodifundida. Esta no se puede conocer ya que depende tanto del estado de polarización de la emisión Rayleigh (que varía aleatoriamente a lo largo de la fibra al tratarse de un medio inhomogéneo) como de la evolución que sufra a lo largo de la fibra. Por ello, no se puede garantizar que la situación óptima del CP en un momento de detección lo vaya a ser en los demás.

#### Rama de modulado, pulsado y amplificación

Esta rama corresponde a la mostrada en azul en la figura 5.1. En ella tiene lugar tanto el desplazamiento en frecuencia del haz como de la generación de pulsos, y termina siendo

introducido el láser en la fibra de sentido tras haber sido amplificado.

Como ya se ha mencionado anteriormente, para el modulado y pulsado del haz es necesario emplear un modulador que posibilite realizar el desplazamiento en frecuencia necesario para el heterodinaje al mismo tiempo que la modulación. Debe cumplir además requisitos como capacidad de repetibilidad y alta razón de extinción para que la generación de pulsos sea adecuada. Por ello se cambió el Mach-Zender seleccionado inicialmente por un modulador acusto óptico (mostrado en la figura 5.1 como AOM) [8].

Este tipo de moduladores consisten en una pieza de cristal, transparente a la longitud de onda empleada, que modifica su índice de refracción por efecto acusto óptico cuando se le aplica una onda de presión. Esta onda es aplicada de forma mecánica y externa mediante un transductor piezoeléctrico en uno de los extremos del cristal. En su paso por el cristal, crea variaciones en el índice de refracción periódicas, de forma que cuando el haz láser incide sobre él sufrirá difracción de Bragg. Por último la onda acústica es absorbida al final del cristal, evitando así crear reflexiones y segundas difracciones. De todos los órdenes de difracción se utiliza únicamente el primero ya que es el que mayor potencia tiene (típicamente más del 90 % de la incidente). De esta forma, como resultado tras el AOM la frecuencia del haz dispersado puede haberse aumentado o disminuido, en función de la dirección de propagación de la onda acústica del cristal.

Así, con el AOM se consigue un tren de pulsos de láser desplazados en frecuencia necesario para conseguir la detección heterodina, cuyos parámetros  $T_1$ , y  $T_2$  presentados en la caracterización del sistema pueden ser modificados. El AOM empleado en el sistema prototipo a continuación presentaba una eficiencia del 85 %-90 % y ancho de banda de 20MHz.

A continuación se observa una etapa amplificadora anterior a la detección óptica formado por un EDFA y un filtro, con el objetivo de aumentar la sensibilidad del sistema y extender el alcance de la medida. El EDFA es un sistema de amplificación basado en Erblio. Su elección se debe a que presenta una transición entre sus bandas de energía en 1550nm muy intensa que puede llegar a dotar el sistema con una ganancia próxima a los 20dB cuando se trabaja con señales medias o débiles.

Sin embargo, este tipo de dispositivos tienen el inconveniente de presentar emisión espontánea en un amplio ancho de banda (ASE). Esta emisión incrementa el ruido del sistema, reduciendo tanto el rango dinámico como la sensibilidad al ser una señal continua. Para reducirlo se ha incorporado después del EDFA un filtro óptico pasa banda, de forma que se eliminan las componentes de ruido alejadas en el espectro de la longitud de onda de la emisión.

## Sistema de detección

La última etapa que presenta este sistema consiste en la detección y análisis de las señales. En ella se lleva a cabo en primer lugar la combinación de la señal retrodifundida con el OL mediante un acoplador 50/50, de forma que la señal final se obtiene con la misma proporción de ambas. Este es uno de los puntos críticos del sistema y requiere ser optimizado.

Entre los factores limitantes se encuentran la baja potencia del fenómeno Rayleigh y las grandes longitudes de fibra de sentido. Además es necesario maximizar la sensibilidad ya que se busca detectar pequeños cambios de fase. Por ello la calidad del sistema final va a estar

fuertemente determinada tanto por la SNR como por la capacidad de estabilidad.

Estos parámetros van ser especialmente limitantes para la observación de regiones de bajo contraste interferencial. Una posible solución podría ser sustituir el CP propuesto por un diversificador de polarización. Con él la detección se realiza en diferentes direcciones de polarización, de forma que combinando la información obtenida en cada una se podría llegar a observar mejor estas “zonas oscuras”.

De esta forma se pone de manifiesto de nuevo la complejidad del problema de la polarización por depender de factores que no son controlables. Con el objetivo de resolverlo se propone la combinación de varias longitudes de onda de emisión, aunque no se ha implementado. Con esto se busca poder reducir las zonas oscuras ya que la probabilidad de que varias longitudes de onda presenten las mismas zonas oscuras de la fibra es muy baja.

Por otro lado, cuando se trabajó inicialmente en detección directa, se emplearon detectores de fotodiodo tipo PIN (unión de semiconductores tipo P y tipo N mediante un aislante) y APD (fotodiodo de avalancha). Ambos presentan un ancho de banda en torno a 180MHz. Sus diferencias se encuentra en que: la ventaja de los fotodiodos PIN es que presentan ganancia logarítmica, mientras los APD son superiores para señales elevadas y no se ven afectados por el modulador, aunque son más inestables. Sin embargo ambos incorporan al sistema otro factor limitante: el ruido intrínseco que presenten y la difícil detección en rangos de señal baja.

Al cambiar a un sistema de detección heterodina coherente fue necesario modificar la forma de detección. En este caso se busca extraer la información codificada en la modulación en amplitud de la envolvente de la señal registrada, de forma que es necesario una sistema de detección balanceado. Por ello se optó por llevar a cabo una detección IQ que implica un aumento de ganancia en la detección y rango dinámico. Con este modo de detección se busca obtener la componente en fase (I) y la componente de amplitud (Q) como dos señales de salida separadas [9].

En cuanto al análisis de los datos, se necesita diseñar un sistema que permita mantener en tiempo real la visualización de los eventos. Por ello es necesaria una tarjeta de adquisición de datos con una tasa de muestreo elevada, aproximadamente de 1GS/s. Este parámetro puede también resultar limitante.

## 5.2. Medidas experimentales

### Análisis de datos

El siguiente problema que se plante se centra en el tratamiento de los datos registras experimental. El análisis de estos datos para el estudio de la perturbación se ha realizado en función de dos parámetros principales:

- Nivel de la señal:

Se centra el estudio en las variaciones del niveles de la señal registrada. Consiste en un método comparativo que se puede realizar mediante:

-Diferencias entre trazas consecutivas: se obtendrá una línea base con un nivel de ruido reducido y la perturbación se identificará como una subida puntal de la señal, ya que se únicamente está presente en una de las trazas registradas y no se anula al realizar la diferencia.

-Varianzas entre señales consecutivas: las trazas son agrupadas en bloques de forma ordenada conforme son registradas, se dividen en pequeños bloques y se calcula la varianza entre ellas, y finalmente se obtiene la diferencia entre varianzas consecutivas. De esta forma se consigue reducir la densidad de datos y reducir tanto el ruido de fondo como el error. Este último tipo de representación es el mostrado en el punto siguiente en la figura 5.3.

- Información frecuencial:

En este caso se trata de aprovechar el hecho de que, si se trata de perturbaciones periódicas, se producirán a una determinada frecuencia característica. Para este estudio frecuencial se emplea la trasformada de Fourier que se puede representar de las siguientes formas:

-FFT local: caso en que se realiza la FFT de las varianzas de trazas registradas correspondientes a un punto concreto de la fibra a lo largo del tiempo de medida.

-Espectrograma: representación en que se representa a lo largo del tiempo el espectro frecuencial de la señal en un punto concreto. Un ejemplo de este tipo de análisis de datos es el mostrado en la figura 5.4, caso en que se empleó un compresor con una frecuencia de vibración constante y fácilmente identificable en un espectrograma.

### Primeras medidas con detección heterodina

En este caso se estudió la sensibilidad del sistema cuando la fibra de sensado se encuentra soterrada. Para ello se empleó el dispositivo enterrando la fibra en una zanja de poca profundidad en el Campus Rio Ebro de Zaragoza, como se indica en la figura 5.2.

Sobre este sistema las primeras medidas que se hicieron tuvieron como objetivo comprobar si se podía hacer un seguimiento de la perturbación cuando se desplaza a lo largo de la fibra. Para la medida se emplearon pulsos de anchura de 50ns y frecuencia 10000Hz. Se midió durante 60s en los que la perturbación en las 5 posiciones fijadas de la muestra empezando en la posición 1 y avanzando a lo largo de la fibra. Esta puede ser observada en la representación de la figura 5.3 con claridad. En ella se muestran las varianzas registradas frente al tiempo de medida para cada posición. Dado que las representaciones son varianzas, el eje vertical corresponde a unidades arbitrarias.

En la posición 1 y al inicio de la medida se observan una serie de picos en la señal que no se observan en ese instante en ninguna de las demás posiciones. A continuación, la señal desaparece en la posición 1 para estar presente en la 2, muy levemente en la 3, y anularse prácticamente en la 4 ni en la 5. Así, si se avanzando en el tiempo, se observa cómo la señal correspondiente a la perturbación va apareciendo en todas las posiciones hasta el segundo 30. En este momento ya se había completado una vuelta entera al cable de fibra de sensado, por lo que se volvió a empezar desde la posición 1 y se repitió el camino.



Figura 5.2: Montaje experimental del sistema soterrado en el Campus Rio Ebro. Las cruces blancas indica las posiciones concretas que se van a estudiar.

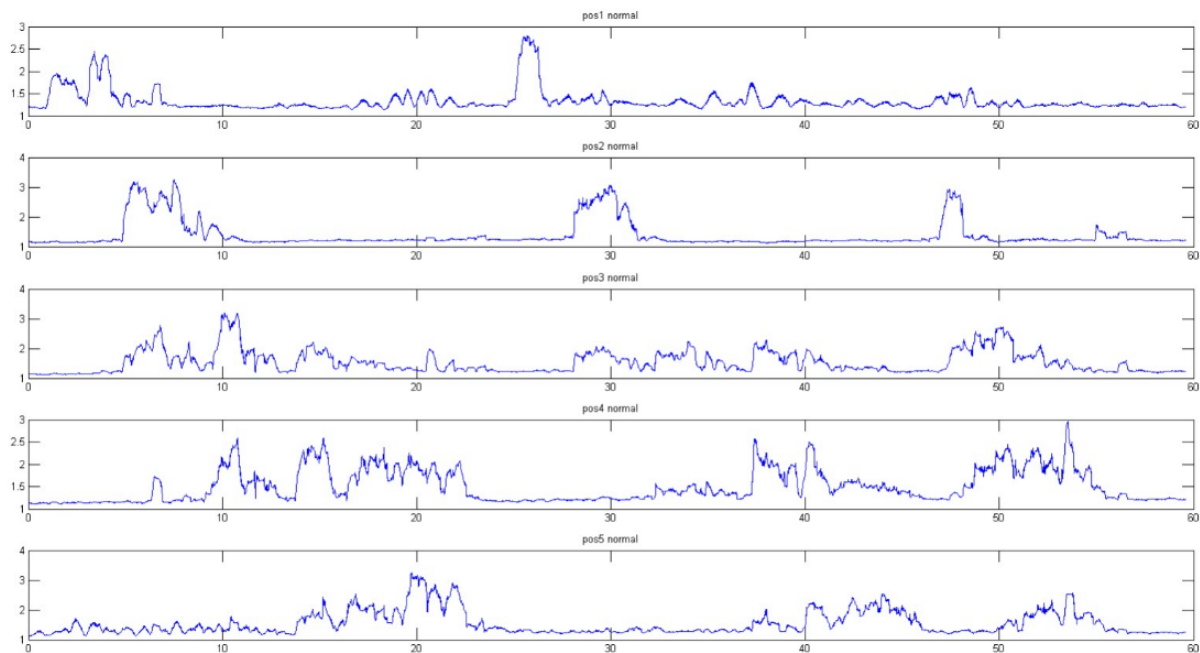
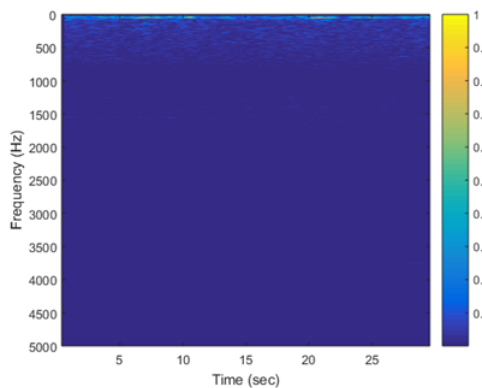


Figura 5.3: Representación de la evolución temporal de la varianza de las señales registradas para distintos puntos de la fibra.

Sobre este sistema se propuso también el estudio de si necesario que la perturbación fuera directamente sobre la fibra o podía ser detectada aunque esté alejada de ella. La señal registrada en este caso es la mostrada en la figura 5.4. En primer lugar se muestra el caso en que no existe perturbación alguna sobre la fibra. De ella cabe destacar la presencia de una banda base próxima a 0Hz. Esto es debido al ruido de fondo existente en todas las medidas. A continuación se muestran dos situaciones de perturbación diferentes. En el caso en que el compresor se sitúa encima de la fibra (b) se observa, además de un aumento en las componentes de banda base, una componente en torno a 50Hz entre a partir de los 5s desde que se inicia la medida hasta 10s, y desde 15s hasta 25s; de forma que se concluye que esta es la frecuencia característica del compresor. En la representación (c) en que se encuentra a 2m de la fibra es muy similar a la anterior, con una clara componente en 50Hz, pero al encontrarse alejado la perturbación conlleva un aumento el ruido registrado, haciendo más intensa la banda base. Se pueden observar además los términos de segundo orden de la transformada de fourier de la contribución del compresor en torno a los 100Hz.



(a)



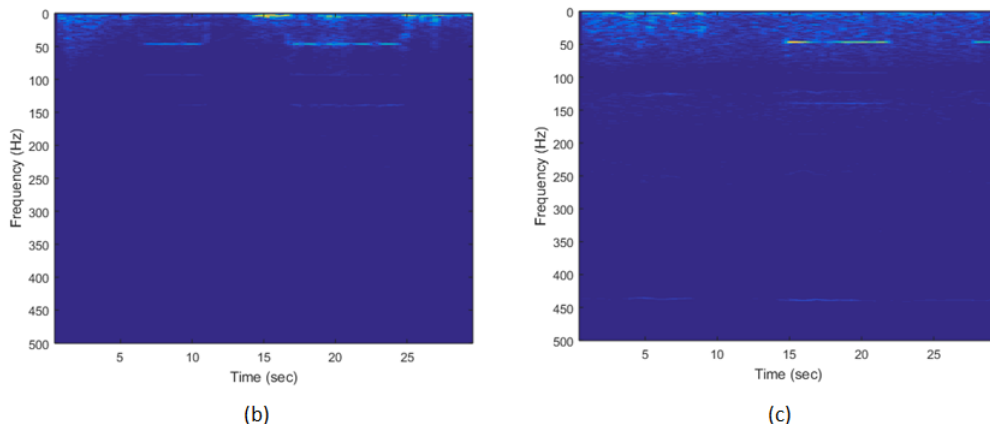


Figura 5.4: Espectrograma realizada sobre las señales temporales registradas cuando: (a) no existe perturbación sobre la fibra, (b) se ha colocado un compresor sobre la fibra, (c) se desplaza el compresor a 2m de distancia de la fibra de sensado.

### 5.2.1. Pruebas sobre las condiciones de sensado

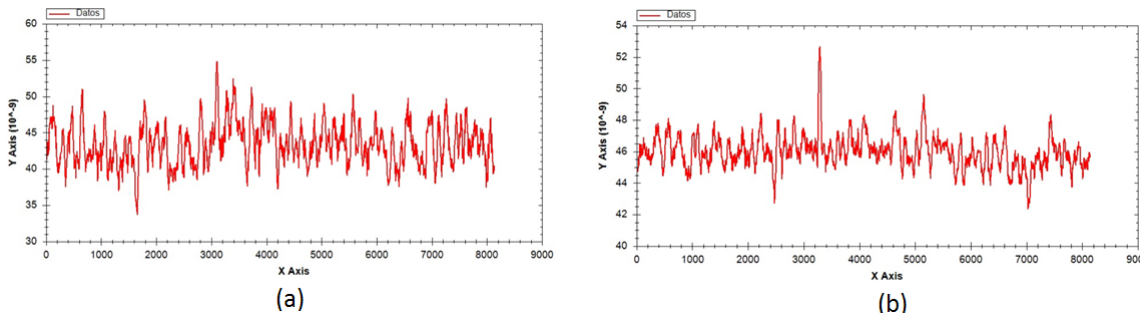
Una vez presentadas las distintas formas de análisis de datos se centró el estudio en la optimización de las condiciones de medida para una mejor observación de las perturbaciones. En este caso se trasladó el sistema desarrollado al laboratorio y la perturbación se generó con un vibrador en un punto fijo de la fibra. De esta forma resultaba más sencillo conseguir una situación de medida estable, permitiendo realizar sucesivas medidas con distintos parámetros del sistema diseñado.

En esta línea de trabajo se abren una amplia variedad de aspectos a estudiar. En este trabajo se han abordado alguno de ellos:

- Estudio en función del número de trazas registradas para el cálculo de varianzas.

En este caso se buscaba observar cómo afecta en la observación de la perturbación el número de trazas registradas. Para ello, dado que un mayor número de trazas implica mayor número de pulsos emitidos en la fibra, se realizaron 3 medidas inyectando en cada caso: (a) 100 pulsos, (b) 1000 pulsos, (c) 1500 pulsos. Los resultados son los mostrados en la figura 5.5.

Se muestran las varianzas realizadas directamente sobre los datos obtenidos. De ellas cabe destacar el hecho de que entre los casos (a) y (b) existe una gran diferencia, mientras entre el (b) y (c) apenas se aprecia. Esto es debido a que, cuando se tiene un nivel de promediado bajo, un ligero aumento implica mejoras notables; mientras que cuando se ha alcanza un promediado suficiente, aumentarlo deja de significar una ventaja, pudiendo incluso llegar a ser perjudicial.



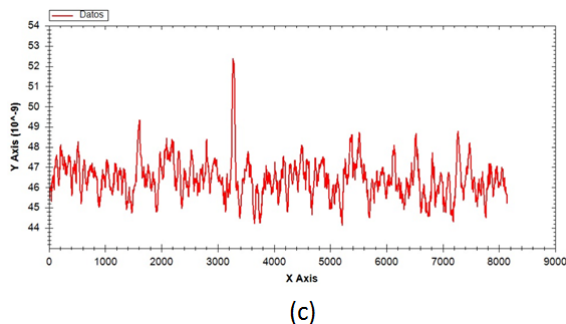


Figura 5.5: Varianzas de señales registradas emitiendo en cada caso: (a) 100 pulsos, (b) 1000 pulsos, (c) 1500 pulsos.

- Estudio en función de la anchura de los pulsos generados:

En este caso se realizaron varias medidas cambiando la anchura con que se generaban los pulsos, de forma que en cada una de las medidas presentaba una resolución diferente.

Se han analizado los datos registrados cuando la anchura de los pulsos era: 50ns (figura 5.6), 200ns (figura 5.7) y 300ns (figura 5.8); y en cada uno de los casos se ha presenta tanto el análisis variacional (a) como frecuencial (b). Por otro lado, en todas las medidas los pulsos estaban siendo igualmente amplificados y la división de haces se consiguió mediante un acoplador 99/1. La detección se realizó con un fotodiodo PIN y una etapa de transimpedancia de ganancia unidad y ancho de banda de 180MHz.

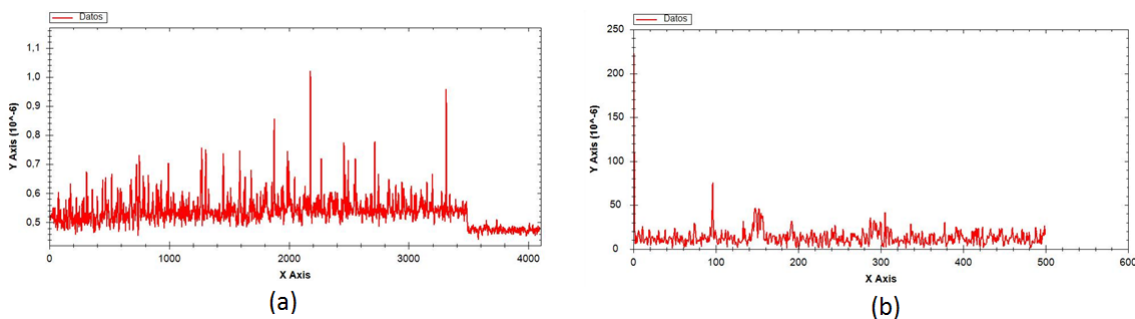


Figura 5.6: Detección realizada con pulsos de 50ns: (a) análisis variacional, (b) transformada de fourier.

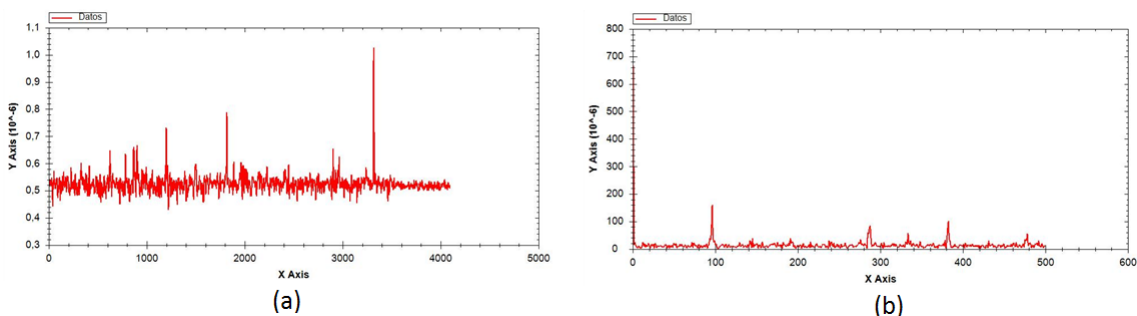


Figura 5.7: Detección realizada con pulsos de 200ns: (a) análisis variacional, (b) transformada de fourier.

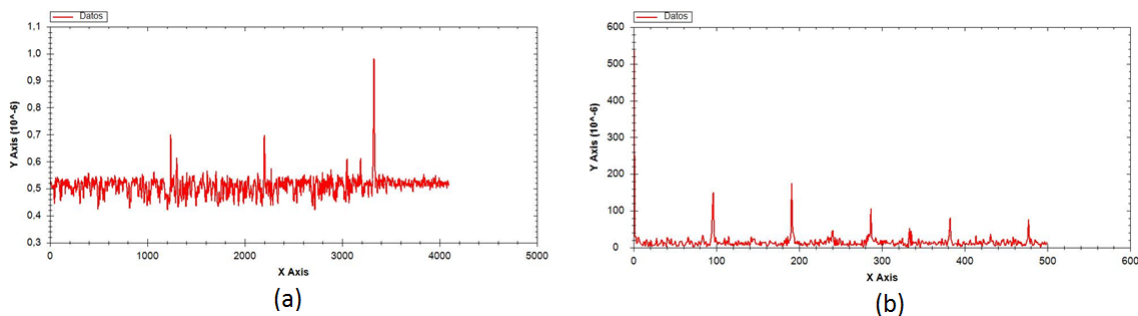


Figura 5.8: Detección realizada con pulsos de 300ns: (a) análisis variacional, (b) transformada de fourier.

Analizando estas representaciones se observa una clara evolución conforme aumenta la anchura de los pulsos. Cuando el pulso tiene una anchura de 50ns somos incapaces observar las señales correspondientes a las perturbaciones ya que el ruido es muy intenso. Al aumentar la anchura a 200ns el ruido disminuye notablemente. En este caso se observa la frecuencia de la perturbación en la transformada de Fourier, aunque analizando la varianza de las tramas no se distingue fácilmente dónde se encuentra. Por último, al llegar a una anchura de 300ns se consigue la situación en que la perturbación se distingue sin problemas tanto en el análisis de variancias como en la transformada de fourier, pudiendo obtener así su frecuencia.

Así, se podría concluir que la anchura de 50ns de los pulsos representaría el límite con que la perturbación es registrada.

Se comprobó además que sin amplificación, es decir, si no actúa el EDFA, el ancho de pulso necesario para poder distinguir una perturbación es de  $1 \mu s$ . Con lo que se concluyó que incrementando la amplificación se tiene una peor detectabilidad en el análisis varianzal, pero mejora en el espacio frecuencial.

•Estudio de la distribución en potencia entre el oscilador local y la emisión para el sensado:

En este caso se trabajó sobre las distintas combinaciones de relaciones de acoplo que puede presentar el divisor haz con que se genera el oscilador local. Se comprobó que cuanto mayor es la fracción de potencia que se emplea como OL mayor es la sensibilidad del sistema. Sin embargo esto presenta la desventaja de dejar el pulso sin suficiente potencia.

Finalmente se decidió que la situación de detección óptima se obtenía empleando un acoplador 80/20, de forma que el 80% de la potencia del láser es invertida en la excitación de la fibra de sensado, y el 20% en el OL.

## 6. Conclusiones

Este trabajo se ha centrado en el estudio de las distintas fases seguidas en el desarrollo e implementación de un sistema prototipo para la detección y localización perimetral. En este proceso se han encontrado tres puntos claves a destacar:

- Fuente de emisión muy coherente:

Dado que el objetivo del sistema desarrollo es detectar pequeños cambios de fase generados

en el núcleo de la fibra, es necesario poder asegurar la estabilidad de las condiciones de la medida. Esto se consigue empleando como fuente emisora un láser de anillo, ya que tienen una elevada coherencia y estabilidad en fase y frecuencia.

- Mejor detectabilidad cuando se opera en detección heterodina:

Por un lado, se encuentra la necesidad de que en cada medida debe haber un único pulso en la fibra, de forma que la detección se deba únicamente a los emisores Rayleigh contenidos en el fragmento de fibra iluminada en cada instante. Esto implica la necesidad de un pulsado de la emisión continua del láser. Por otro lado, se ha comprobado que las mejores condiciones de detección se encuentran operando en detección heterodina, para lo que es necesario emplear un oscilador local.

Para conseguir estos dos requisitos se ha propuesto la división del haz inicial del láser, y la modulación mediante un AOM de forma que se consigue desplazar en frecuencia la excitación que será introducida en la fibra.

- Problema de la polarización:

Se ha observado que la polarización representa uno de los grandes problemas a la hora de optimizar la detección, ya que, al depender de factores intrínsecos a la fibra, no puede ser controlada.

Por último se realizaron una serie de medidas de campo. En ellas se comprobó la viabilidad del sistema en la detección de distintas excitaciones como pueden ser pasos de intruso.

Se inició también un estudio buscando las condiciones óptimas de detección en función del número de pulsos empleados o sus anchuras. Este tipo de pruebas se podrían continuar tratando de estudiar, por ejemplo, la influencia de la polarización y ruido ASE del amplificador, ya que son problemas que han aparecido a lo largo del desarrollo teórico del sistema.

## Referencias

- [1] X. Bao, L. Chen, *Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors*, University of Ottawa, Physics Department, Sensors 2012, 12, 8601-863
- [2] J. P. Urrea Duque, J. E. Aedo Cobo *Técnica no paramétrica para la detección de eventos de atenuación en fibra óptica*, Scientia et Technica Año XIV, Junio de 2008, N° 38, 101-106, Universidad Tecnológica de Pereira.
- [3] F. Peng, H. Wu, XH. Jian, YJ. Rao, ZN. Wang, ZP. Peng *Ultra-long high-sensitivity  $\phi$ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines*, OSA, 2 June 2014, Vol. 22, N° 11
- [4] Henry F. Taylor, Chung E. Lee, *Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing*, U.S.Patent N° 5,194,847
- [5] Y. Lu, T. Zhu, Senior Member, IEEE, L. Chen, X. Bao, *Distributed Vibration Sensor Based on Coherent Detection of Phase-OTDR*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 28, N° 22, NOVEMBER 15, 2010
- [6] ZN. Wang, J. Li, Q. Fan, L. Zhang, F. Peng, H. Wu, JJ. Zeng, Y. Zhoy, YJ. Rao, *Phase-sensitive optical time-domain reflectometry with Brillouin amplification*
- [7] L. Rojas, J. Matheus, J. Marín, *Estudio de fenómenos de dispersión por el modo de polarización de onda (PMD) en sistemas de comunicaciones por fibra óptica*, Universidad de Zulia, Escuela de Ingeniería Eléctrica.
- [8] D. J. McCarron, *A Guide to Acousto-Optic Modulators*, December 7, 2007
- [9] Z. Wang, L. Zhang, S. Wang, N. Xue, F. Peng, M. Fan, W. Sun, X. Qian, J. Rao, Y. Rao, *Coherent  $\phi$ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection*, OSA, 25 Jan 2016 — Vol. 24, N° 2