

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**Automatización de montajes BOTDA para  
sensores distribuidos de fibra óptica**

**(BOTDA setup automation for optical  
fiber distributed sensor systems)**

Para acceder al Título de

***Graduado en Ingeniería de Tecnologías de  
Telecomunicación***

Autor: Jaime García Castillo  
Mayo - 2016



## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

### **CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Realizado por: Jaime García Castillo**

**Director del PFC: Jesús Mirapeix Serrano / Rubén Ruiz Lombera**

**Título:** “Automatización de montajes BOTDA para sensores distribuidos de fibra óptica”

**Title:** “BOTDA setup automation for optical fiber distributed sensor systems“

**Presentado a examen el día: 20/05/2016**

Para acceder al Título de

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

Composición del tribunal:

Presidente: Quintela Incera, María Ángeles

Secretario: Mirapeix Serrano, Jesús

Vocal: Irastorza Teja, José Ángel

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG

(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº

(a asignar por Secretaría)

# Agradecimientos

A mi familia, por confiar en mí en todo momento.

A Jesús y Rubén, por estar siempre disponibles y hacer que todo haya sido mucho más fácil.

A todo el mundo que ha confiado en mí y que ha aportado su granito de arena para que todo esto sea posible.

# ÍNDICE GENERAL

1. CONTEXTO Y OBJETIVOS .....	6
1.1 Contexto.....	6
1.2 Objetivos .....	7
1.3 Estructura del documento .....	7
2. INTRODUCCIÓN.....	8
2.1 Sensores y su necesidad e importancia.....	8
2.2 Sensores de fibra óptica.....	10
2.2.1 La fibra óptica como canal de comunicaciones .....	10
2.2.2 La fibra óptica como elemento sensor .....	14
2.2.3 Sensores puntuales/cuasi-distribuidos y distribuidos.....	15
2.2.4 Ejemplo sensor puntual: Red de difracción (FBG).....	17
2.3 Sensores distribuidos .....	19
2.3.1 Fenómenos de <i>scattering</i> : elástico e inelástico .....	19
2.3.2 Scattering Rayleigh.....	20
2.3.3 <i>Scattering</i> de Raman y de Brillouin.....	22
3. ESTADO DEL ARTE EN SENSORES DISTRIBUIDOS BASADOS EN EL SCATTERING DE BRILLOUIN .....	29
3.1 Brillouin: Scattering espontáneo.....	29
3.1.1 Sistemas BOTDR .....	29
3.2 Brillouin: Scattering estimulado .....	31
3.2.1 Sistemas BOTDA.....	31
3.2.2 Sistemas BOCDA .....	34
3.2.3 Sistemas BOFDA.....	36
4. DESARROLLO DE LA AUTOMATIZACIÓN CON MATLAB.....	38

4.1	Explicación detallada del setup experimental.....	38
4.2	Explicación del concepto automatización vía Matlab y GPIB.....	41
4.3	Objetivos e Implementación de la automatización .....	47
5.	MEDIDAS EXPERIMENTALES PARA VALIDAR EL DESARROLLO .....	51
6.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....	67
6.1	Conclusiones.....	67
6.2	Líneas futuras .....	68

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Localización de los diferentes tipos de sensores en el centro de Santander.....	9
Figura 2: Ejemplo de sensores de aparcamiento. ....	9
Figura 3: (a) Salto de índice, (b) Gradiente de índice, (c) Fibra monomodo. ...	12
Figura 4: Atenuación de una fibra óptica y representación de las diferentes ventanas [10].....	13
Figura 5: Esquema sensor puntual.....	16
Figura 6: Esquema sensor cuasi-distribuido.....	16
Figura 7: Esquema sensor distribuido. ....	17
Figura 8: Principio de funcionamiento de la FBG. ....	17
Figura 9: Representación del desplazamiento de la longitud de onda. ....	18
Figura 10: Dispersión de la luz azul en la atmósfera.....	21
Figura 11: Diagrama sobre las transiciones energéticas de electrones en una molécula debidos a la interacción con un fotón incidente [16].....	22
Figura 12: Diagrama de medida BOTDR [19].....	30
Figura 13: Configuración típica de un sistema BOTDR [20].....	30
Figura 14: Esquema de configuración BOTDA.....	32
Figura 15: Esquema de configuración BOTDA.....	32
Figura 16: Principio de operación de Slope-assisted .....	34
Figura 17: (a) Distribución de un espectro bombeo-prueba cerca de un pico de correlación (CP). (b) estructura de una señal BOCDA compuesta por una afilada BGS y una estructura de ruido [28].....	35
Figura 18: Esquema de la configuración de los sistemas BOCDA [29].....	36
Figura 19: Esquema de la configuración de los sistemas BOFDA. ....	36
Figura 20: Montaje experimental del laboratorio. ....	38

Figura 21: Función de transferencia del modulador. ....	39
Figura 22: Asignación de señales de un conector GPIB. ....	41
Figura 23: Esquema de la topología tipos bus. ....	42
Figura 24: Esquema de la topología de tipo estrella. ....	42
Figura 25: Esquema de la topología de configuración híbrida. ....	43
Figura 26: Estructura de programación de un sistema GPIB. ....	43
Figura 27: Interfaz de usuario del programa.....	45
Figura 28: Código Matlab de la conexión del láser.....	48
Figura 29: Código de Matlab de la inicialización del generador de funciones. .	49
Figura 30: Interfaz con una fibra “Plasma fiber” de 50 km con un promediado bajo. ....	52
Figura 31: Interfaz con una fibra “Plasma fiber” de 50 km con un promediado alto. ....	53
Figura 32: Espectro de ganancia para una fibra “Plasma fiber” de 50 km.....	53
Figura 33: Espectro de ganancia para una fibra “Plasma fiber” de 50 km.....	54
Figura 34: Espectro de ganancia para una fibra “Plasma fiber” de 50 km desde otra perspectiva.....	54
Figura 35: Frecuencia central de 10.69 GHz.....	55
Figura 36: Frecuencia central de 10.68 GHz.....	56
Figura 37: Frecuencia central de 10.66 GHz.....	56
Figura 38: Representación de la ganancia en función de la distancia para las tres frecuencias seleccionadas. ....	57
Figura 39: Representación de la ganancia en función de la frecuencia marcando la frecuencia de 10.69 GHz. ....	58
Figura 40: Representación de la ganancia en función de la frecuencia marcando la frecuencia de 10.68 GHz. ....	58
Figura 41: Representación de la ganancia en función de la frecuencia marcando la frecuencia de 10.66 GHz. ....	59
Figura 42: Interfaz con una anchura espectral de 10 ns. ....	60

Figura 43: Espectro de ganancia.....	60
Figura 44: Espectro de ganancia.....	61
Figura 45: Primera bobina de fibra de tipo “Teralight” de 6 km aproximadamente.....	62
Figura 46: Segunda bobina de fibra tipo “S3MC” de 4 km aproximadamente..	62
Figura 47: Espectro de ganancia.....	63
Figura 48: Representación de la ganancia en función de la distancia para cada frecuencia.....	64
Figura 49: Interfaz en una fibra con cambio de temperatura. ....	65
Figura 50: Espectro de ganancia en una fibra con cambio de temperatura. ....	65
Figura 51: Frecuencia de Brillouin de la fibra en cada punto. ....	66

# **1. CONTEXTO Y OBJETIVOS**

## **1.1 Contexto**

Actualmente la monitorización de la integridad de estructuras (SHM, *Structural Health Monitoring*) ha incrementado notablemente el interés sobre su aplicación. Una sencilla razón es que cada vez se necesitan unas infraestructuras más seguras como cuando hablamos de puentes o presas, y se precisa que dichas infraestructuras no sufran ningún tipo de situación que ponga en peligro su seguridad. Esto hace que se requieran sistemas de supervisión en tiempo real para, por ejemplo, la detección de tensiones internas que en un futuro pueden originar fallos en la infraestructura.

La creciente demanda en calidad en este ámbito ha hecho que se genere una gran necesidad de sistemas que puedan monitorizar la temperatura y la deformación de una infraestructura en tiempo real y de manera distribuida. La distancia que debe cubrir este sistema será muy variable dependiendo de la infraestructura a analizar, por lo que puede oscilar desde unas pocas decenas de metros hasta cientos de kilómetros. Una buena técnica con estas características es la que utiliza sensores distribuidos con fibra óptica, en especial los basados en la dispersión de Brillouin [1].

Gracias a estos sensores distribuidos se puede tener un solo sensor que mida temperatura, vibración o deformación, mediante la dispersión de la luz, en lugar de utilizar un gran número de sensores puntuales. La finalidad de esta técnica es encontrar una resolución espacial y sensibilidad determinada para las distintas aplicaciones. Estos sensores distribuidos para medir deformación y temperatura se adaptan a distintos usos con gran precisión espacial mientras se cubren áreas de gran tamaño.

Los sensores distribuidos basados en la dispersión de Brillouin se pueden dividir en función de si hacen uso de la dispersión estimulada o espontánea [2]. En la dispersión estimulada se necesitan dos señales ópticas que se propagarán en la fibra en sentidos opuestos, una señal óptica de bombeo, y una onda de Stokes que es una señal modulada con un desplazamiento en frecuencia igual a la frecuencia de Brillouin de la fibra empleada [3]. Mediante el fenómeno de electrostricción [4], en el que la onda de prueba interfiere con la onda de bombeo generando una onda acústica, la cual modula el índice de refracción de la fibra. La velocidad de propagación de la onda acústica dependerá de la elongación y la temperatura en la fibra, por lo que se producirán cambios en la frecuencia de la señal recibida (onda de prueba o Stokes) si se tienen cambios de temperatura o elongación en la fibra.

## 1.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo fin de grado es el desarrollo de un sistema que permita controlar la instrumentación de un sistema BOTDA (*Brillouin Time Domain Analysis*) [5] y automatizar las medidas a realizar teniendo en cuenta diferentes esquemas.

Se debe realizar una interfaz en Matlab en la cual se pueden introducir todos los datos de entrada de la medida y se ocupe de cargarlos en las librerías, que a través de un estándar GPIB enviará dichos datos a los diferentes componentes. Esta misma interfaz incluirá una ventana en la que se podrán ver los resultados de medidas como si se tratase de un osciloscopio común con la ayuda de una tarjeta adquisidora que irá conectada al ordenador. La misión de esta interfaz es la cómoda introducción de datos y su visualización constante de los resultados para facilitar las medidas de los cambios de temperatura y deformación en un sistema en fibra óptica.

## 1.3 Estructura del documento

El documento se divide en seis capítulos, en el actual se ha descrito el contexto y los objetivos, con el fin de realizar un breve introducción sobre todo el desarrollo del trabajo fin de grado.

En los dos siguientes se encuentran los aspectos teóricos sobre los sensores, en primer lugar tratando todo tipo de sensores pero, a continuación, centrando la atención en los sensores basados en fibra óptica y con especial hincapié en los sensores distribuidos. Dentro de este grupo se explicará en especial los sensores distribuidos basados en el *scattering* de Brillouin.

A continuación se tratará el desarrollo de la automatización con Matlab, donde se detallará el setup experimental desarrollado en el laboratorio, también se definirá la programación Matlab orientada a la automatización y el estándar GPIB gracias al cual se pueden conectar los diferentes componentes con el ordenador.

En el capítulo sucesivo se podrán ver las medidas experimentales realizadas para comprobar que se ha realizado correctamente el desarrollo del control de la instrumentación y su automatización. Por último, se presentarán las conclusiones del proyecto y las líneas futuras.

## **2. INTRODUCCIÓN**

### **2.1 Sensores y su necesidad e importancia**

Un sensor es un dispositivo que pretende medir un parámetro físico o químico (temperatura, la humedad, concentración de un gas, etc.) ya sea de manera cuantitativa o cualitativa. Normalmente las magnitudes se transforman en variables eléctricas para su posterior tratamiento por parte de algún tipo de electrónica. Podemos decir que un sensor es un instrumento que obtiene información del entorno con el que interactúa, al igual que los humanos tienen su propio sistema sensorial.

A continuación se muestran algunos ejemplos de sensores:

- Sensores de posición: detectan la posición de un objeto respecto al espacio, como pueden ser los captadores fotoeléctricos.
- Sensores de contacto: Su funcionamiento es muy sencillo ya que es un interruptor que se activa si está en contacto con un objeto.
- Sensores de movimiento: Sensores de gran importancia sobre todo en la robótica, como pueden ser los sensores de velocidad, aceleración, deslizamiento...
- Sensores de imagen: Son sensores ópticos utilizados en las cámaras fotográficas que captan la luz y la transforman en señales de tipo eléctrico para su almacenamiento.

Las aplicaciones de los sensores son muy extensas, en la actualidad utilizamos gran cantidad de sensores en nuestro día a día. Por ejemplo un termómetro, que no es más que un sensor de temperatura; los sensores de movimiento en las puertas automáticas; sensores de luz que existen en algunos vehículos para activarse los focos...

Dentro de este apartado es interesante destacar el proyecto de investigación de la ciudad de Santander llamado "SmartSantander" [6] que propone una infraestructura dentro de la ciudad donde se incluyen servicios y aplicaciones de una ciudad inteligente, en el que están instalados alrededor de 12.000 sensores en el entorno urbano. Algunos ejemplos son:



Figura 1 : Localización de los diferentes tipos de sensores en el centro de Santander.

### Sensores de aparcamiento

Con estos sensores los ciudadanos pueden comprobar las plazas libres de aparcamiento en diferentes zonas de la ciudad, buscando un tráfico más fluido y evitando que los conductores den vueltas por la ciudad buscando aparcamiento lo que produce un ahorro de gasolina y una menor contaminación.

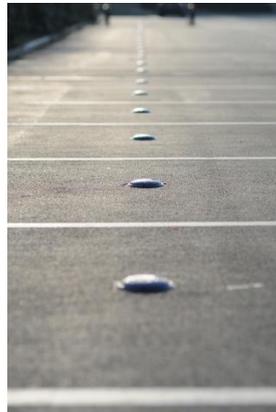


Figura 2: Ejemplo de sensores de aparcamiento.

### Sensores midiendo parámetros ambientales ligados a la emisión de ciertos gases

Se utilizan sensores meteorológicos para monitorizar ciertos parámetros ambientales como la calidad del aire, pero también se puede medir la calidad del agua, el ruido...

## Sensores de humedad

Estos sensores de humedad se utilizan en parques y jardines, haciendo que el riego se produzca solo cuando sea necesario y limitando su tiempo. Es una gran medida para el ahorro de agua.

Otros sensores de ciudades inteligentes pueden ser: sensores de recogida y tratamiento de residuos urbanos, sensores de paso, sensores de control de consumo de agua y electricidad...

Cabe destacar que el proyecto de SmartSantander ha sido reconocido con el premio *Future Internet Award*, Budapest, mayo 2011 [7].

## **2.2 Sensores de fibra óptica**

### **2.2.1 La fibra óptica como canal de comunicaciones**

En las últimas décadas la fibra óptica se ha convertido en un elemento clave en los sistemas de comunicación: internet es un claro ejemplo ya que al fin y al cabo su implementación física se basa fundamentalmente en el despliegue de fibra óptica. Por ejemplo, la velocidad máxima que se puede contratar con ADSL es sobre 30 Mb, en cambio con fibra óptica en España se comercializan velocidades de hasta 300 Mb. La fibra óptica permite transmitir información enviando señales de luz y es ideal para abarcar grandes distancias. Una gran ventaja es su inmunidad a campos eléctricos y obviamente es muy importante su bajo coeficiente de atenuación de 0.2 dB/Km [8].

De una forma sencilla, una fibra óptica tiene un núcleo de vidrio con un índice de refracción  $n_1$  mayor al índice de refracción  $n_2$  de la capa que es el material que le rodea (cubierta) para que se produzca el fenómeno de reflexión total interna entre los medios. Dos parámetros a destacar en las fibras son la diferencia relativa entre los índices  $\Delta$  y el parámetro  $V$ :

$$\Delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \quad (2.1)$$

$$V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.2)$$

$$(k_0 = 2\pi/\lambda)$$

Siendo “ $\lambda$ ” la longitud de onda y “ $a$ ” el radio del núcleo. Las fibras en las que solo se puede propagar si  $V < 2.405$  son las fibras monomodo, en caso contrario estaríamos hablando de fibras multimodo [9].

En una fibra multimodo la luz circula por diferentes caminos, esto quiere decir que los haces de luz no llegan al mismo tiempo al final de la fibra; por esta razón es más común utilizarla en corta distancia. Una gran ventaja es que son fáciles de diseñar y más económicas, el diámetro del revestimiento suele ser de 125  $\mu\text{m}$  y el del núcleo entre 50 y 62.5  $\mu\text{m}$ , gracias al gran tamaño del núcleo es más fácil de conectar y necesita una menor precisión que equivale a un coste menor. En este caso se tienen dos tipos de formas de propagación:

- Salto de índice: el índice del núcleo no cambia y habrá mucha dispersión modal.
- Gradiente de índice: el índice varía debido a los diferentes materiales del núcleo. Se tendrá una dispersión modal menor.

El otro tipo de fibras son las monomodo donde hay un único camino por el que puede circular la luz. El diámetro del núcleo es mucho menor (sobre 9  $\mu\text{m}$ ) y el diámetro del revestimiento es similar a las fibras multimodo. Con este tipo de fibra se transmiten altas tasas de información en grandes distancias.

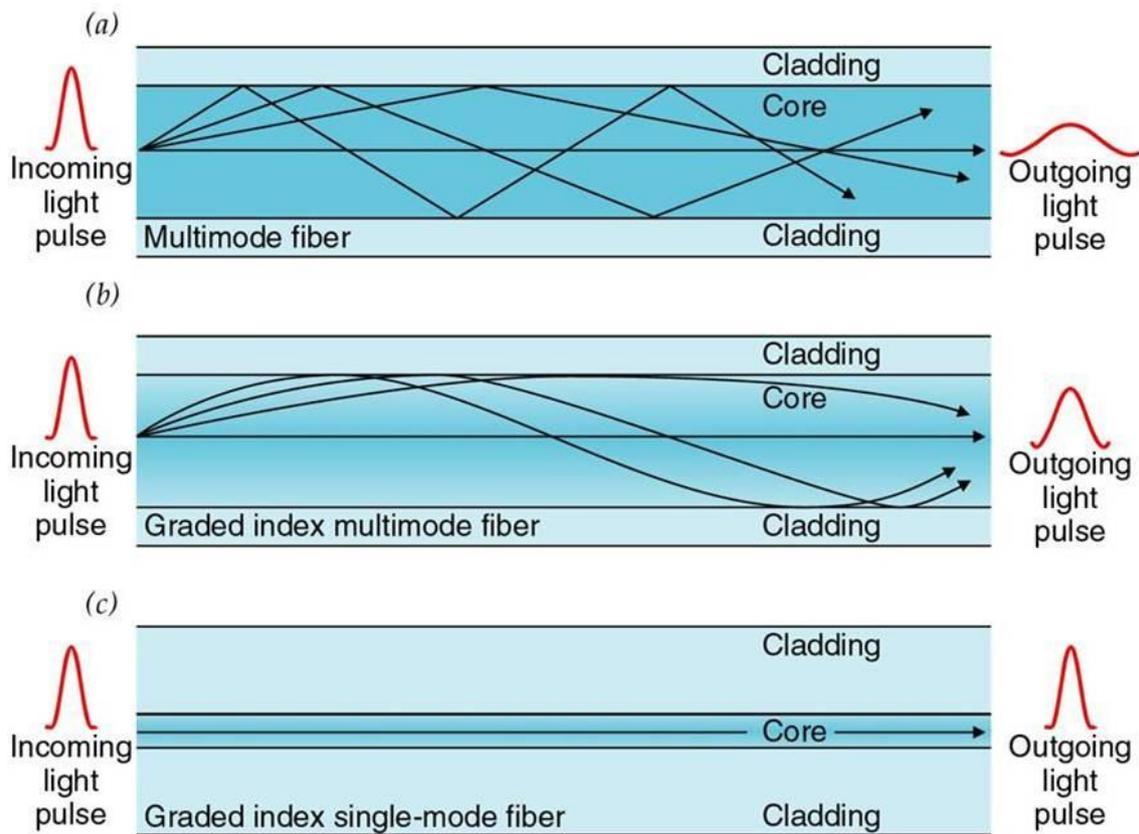


Figura 3: (a) Salto de índice, (b) Gradiente de índice, (c) Fibra monomodo.

La atenuación, que es la reducción de potencia de la señal óptica (se expresa en dB/Km que es la pérdida de luz, en dB, en un kilómetro), es uno de los parámetros más importantes en un sistema de comunicaciones de fibra óptica, Los dos principales factores que influyen en la atenuación son:

- Las pérdidas por absorción: se producen por las impurezas del material que absorben la luz y la transforman en calor.
- Las pérdidas por dispersión: son dispersiones del material (pequeñas irregularidades) que provocan que cuando el haz de luz choque con dicha impureza se disperse y no sea propagado en la dirección deseada (hacia el receptor).

La longitud de onda en la que se trabaja depende en gran medida de la atenuación como se puede ver a continuación:

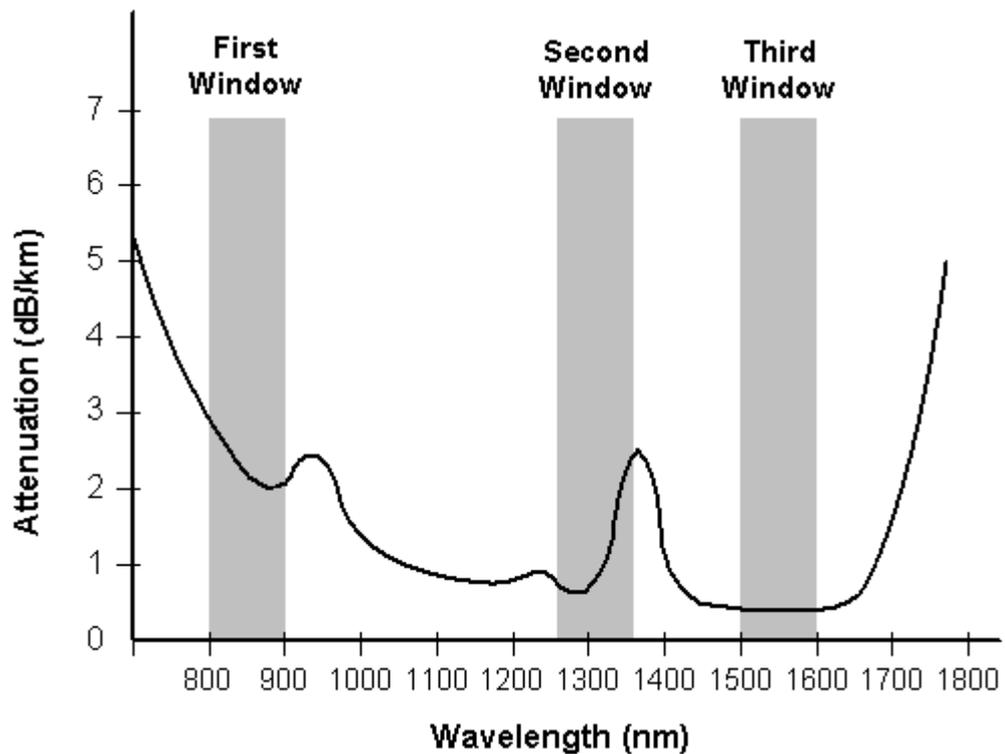


Figura 4: Atenuación de una fibra óptica y representación de las diferentes ventanas [10].

Normalmente se utilizan tres ventanas o zonas características a 850, 1310 y 1550 nm. La tercera ventana tiene una atenuación menor a las dos anteriores (0.2 dB/Km), por esta razón en los sistemas de telecomunicación es la más utilizada. En la figura 4 se puede ver que la segunda y tercera ventana están separadas por un pico de atenuación causado por la absorción de OH, pero se realizan procesos para eliminar las moléculas de agua del material de la fibra y así reducir este pico de atenuación.

Los fenómenos de dispersión constituyen una de las principales causas de atenuación de la fibra óptica, como por ejemplo los fenómenos de dispersión elástica, cuyos principales procesos son: Rayleigh y Mie, que se explicarán con más detalles en apartados posteriores.

### 2.2.2 La fibra óptica como elemento sensor

La fibra óptica es muy útil no sólo para transportar las señales de comunicaciones, sino también como sensor del propio elemento. Los sensores de fibra óptica (*Optical Fiber Sensors*) tienen importantes ventajas sobre los sensores eléctricos y los voluminosos sensores ópticos. Algunos sensores de fibra óptica muestran características insustituibles, como la ya mencionada inmunidad electromagnética, o la posibilidad de desplegar sensores distribuidos.

Un sensor es una parte muy importante en diferentes sistemas. En equipos controlados automáticamente, los sensores proporcionan señales para el control de las operaciones; en el campo de la salud, se usan para detectar y transmitir información bioquímica; en la ingeniería industrial y civil, los sensores indican características como la tensión, la vibración o los cambios de temperatura. Estas últimas características (captar los cambios de tensión y de temperatura) son las que se desarrollarán en este trabajo gracias al *scattering* de Brillouin.

Los sensores de fibra óptica tienen ciertas ventajas como:

- Pequeño tamaño y peso
- A prueba de agua y humedad
- Inmunidad a las interferencias electromagnéticas y de radiofrecuencia
- Capacidad de teledetección y detección distribuida
- Capacidad de multiplexación
- Gran ancho de banda y sensibilidad
- Tolerancia a altas temperaturas

Los dispositivos y componentes utilizados en tecnologías de sensores pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- De acuerdo a las funciones, los dispositivos de fibra se dividen en activos y pasivos. Los activos puede alterar o generar señales ópticas por medios eléctricos, como láser, amplificadores, moduladores... Los pasivos no tienen medios eléctricos para alterar las señales, su principal función es definir los caminos de señales ópticas y configurar diversos sistemas de fibra óptica, destacan los acopladores, conectores, atenuadores, aisladores, circuladores...
- De acuerdo a los materiales y estructuras, se dividen en dispositivos intrínsecos e extrínsecos. Si el material principal es la propia fibra es un dispositivo intrínseco. Mientras que el dispositivo extrínseco utiliza otros materiales ópticos incorporados a la fibra.

Los parámetros principales de la luz incluyen la amplitud, frecuencia, fase, estado de polarización e intensidad. Todos pueden llevar información y por tanto se pueden ser utilizados como elemento sensor de parámetros. De acuerdo a los parámetros los sensores de fibra óptica se dividen en dos: sensores modulados en intensidad y modulados en fase. Normalmente, el coste de los sensores modulados en intensidad es menor, y los modulados en fase proporcionan una mayor sensibilidad y precisión.

De acuerdo con los elementos de detección, similar a los dispositivos ópticos comunes, se puede establecer una división entre sensores intrínsecos y extrínsecos. En los primeros la magnitud a medir afecta a las características ópticas de la fibra, bien directamente, o bien por algún recubrimiento dispuesto expresamente. Un ejemplo de estos sensores es el modulado por intensidad por microcurvaturas. En los sensores extrínsecos la finalidad de la fibra es guiar la luz hasta un elemento sensor externo donde bajo la acción de la magnitud a medir, será modificada y a continuación nuevamente guiada por la fibra óptica hasta el fotodetector. Un ejemplo de estos sensores son los basados en transmisión, reflexión y fluorescencia.

De acuerdo con las propiedades de los parámetros detectados, los sensores de fibra óptica se categorizan en diferentes tipos:

1. Geométrico: Posición, desplazamiento, distancia, nivel de líquido...
2. Mecánico: Tensión, presión...
3. Dinámico: Velocidad, aceleración, velocidad angular, frecuencia de vibración...
4. Físico: Temperatura, corriente eléctrica, voltaje, campo magnético...
5. Químico/biomecánico: Gases inflamables, gases tóxicos...
6. Varios: Detección de rotura, pérdida de fibra, detección de intrusos... [11]

### **2.2.3 Sensores puntuales/cuasi-distribuidos y distribuidos**

Una importante clasificación de los sensores de fibra óptica es la que se centra en la forma de monitorizar del sensor. Se tienen tres tipos de sensores: puntuales (interferométricos, espectrométricos, polarimétricos...), cuasi-distribuidos (redes de Bragg) y distribuidos (Brillouin, Raman).

Los sensores puntuales son utilizados a la hora de monitorizar un parámetro físico que está en un lugar determinado.



Figura 5: Esquema sensor puntual.

La fibra óptica de sensores cuasi-distribuidos contiene diferentes sensores puntuales separados por una distancia determinada. De una manera sencilla, este tipo de sensores no son más que diferentes sensores puntuales, pero con la gran ventaja que se pueden multiplexar más de uno en una fibra óptica, lo que quiere decir que se puede medir en más de un lugar diferente utilizando la misma fibra. Un ejemplo de este tipo de sensores son las redes de Bragg (*Fiber Bragg Gratings*) [12]. En un sistema cuasi-distribuido se pueden hacer medidas en aquellos lugares de la fibra óptica donde se ha grabado un FBG, sin embargo tiene unas características muy limitadas a la hora de por ejemplo de la detección de fugas de una tubería de varios kilómetros, por lo que sería necesario utilizar otro tipo de sistemas ópticos.

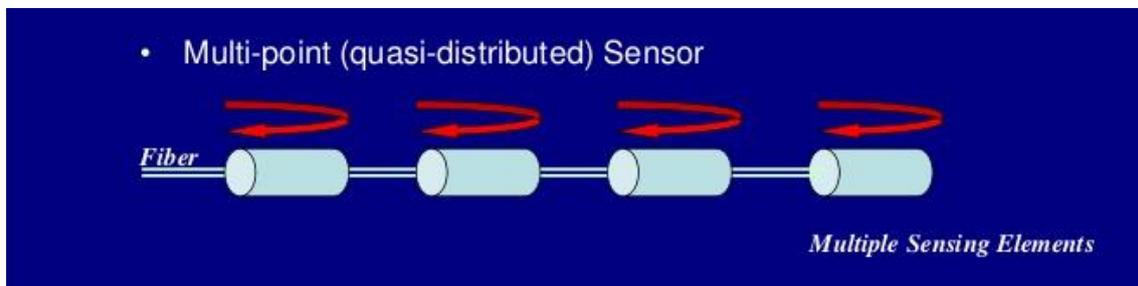


Figura 6: Esquema sensor cuasi-distribuido.

Este sistema es el basado en los sensores distribuidos: en estos sensores la monitorización se lleva a cabo a lo largo de toda la fibra. Puede abarcar grandes distancias llegando incluso a las centenas de kilómetros, de esta manera se pueden tener un número muy elevado de puntos de medida dependiendo de la resolución espacial. En estos sistemas se produce una modulación en frecuencia o intensidad de la luz, y debido a su sincronización se puede saber la posición en la que hay una perturbación de la luz, provocada por ejemplo por cambios de temperatura o de deformación en la fibra. Estos sensores son especialmente utilizados en la monitorización de infraestructuras como tuberías o puentes. Se pueden dividir en los sistemas basados en dispersión lineal como la dispersión de Rayleigh o los basados en dispersión no lineal como Raman o Brillouin. [13]



Figura 7: Esquema sensor distribuido.

### 2.2.4 Ejemplo sensor puntual: Red de difracción (FBG)

Actualmente las redes de difracción de Bragg (*Fiber Bragg Gratings*) basadas en fibra óptica se utilizan para la fabricación de multitud de dispositivos en el ámbito de las comunicaciones ópticas y en el industrial. Se basan en una modulación periódica o cuasi-periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica. Cuando cierto haz de luz con un ancho espectral determinado alcanza la red de Bragg, una banda espectral se refleja, pero el resto de componentes espectrales no sufre ningún cambio, esto hace que pueda usarse como un filtro en una longitud de onda muy selectivo, y esa longitud de onda se ve reflejada a lo largo de la fibra como se puede ver en la siguiente figura:

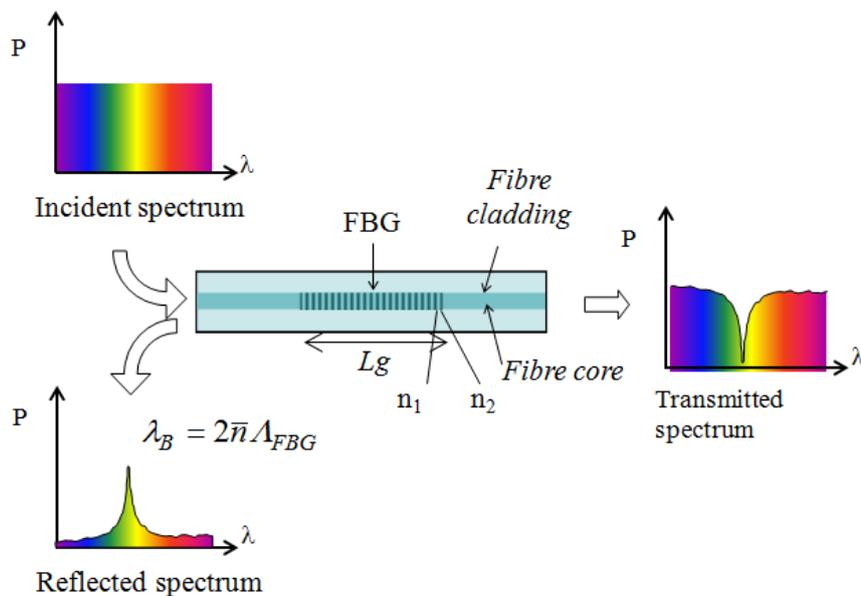


Figura 8: Principio de funcionamiento de la FBG.

La reflexión de determinadas longitudes de onda permite utilizar la fibra óptica como sensor de perturbaciones externas. La variación de temperatura o elongación que se produce en la fibra se traduce en un cambio del periodo de la red que produce un cambio en la longitud de onda reflejada " $\Delta\lambda_B$ " que se expresa en términos de la elongación y la temperatura en (2.3). El primer término de la ecuación está asociado con el cambio en la longitud de la fibra " $\Delta l$ " y el segundo término refleja el efecto de los cambios en la temperatura " $\Delta T$ " en la fibra óptica.

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.3)$$

Si se mide este cambio de longitud de onda, se puede calcular la deformación que se ha sufrido.

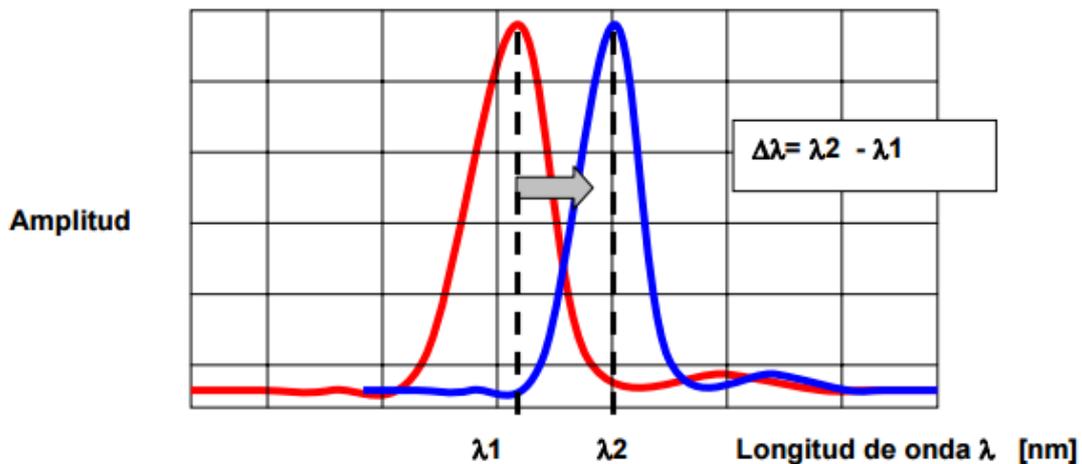


Figura 9: Representación del desplazamiento de la longitud de onda.

La longitud de onda que cumple la condición de Bragg será:

$$\lambda_{B_0} = 2 \cdot n_0 \cdot \Lambda_0 \quad (2.4)$$

Donde  $\Lambda_0$  es la separación entre dos puntos seguidos de la red con el mismo índice de refracción, el periodo del perfil longitudinal; y  $n_0$  es el índice de refracción efectivo de la fibra. Si el cambio en el índice de refracción es constante al igual que su índice efectivo, entonces la red de difracción de Bragg es constante. En el espectro de reflexión de una red de Bragg con una modulación uniforme del índice de refracción se pueden ver lóbulos secundarios en las longitudes cercanas a la central. Para eliminarlos o reducirlos es necesario realizar una modulación del índice de refracción, que reduce el índice en los extremos de la red de Bragg.

Si se utiliza una red de difracción de Bragg como un sensor puntual, se obtienen aplicaciones muy útiles como la detección de cambios de temperatura o deformación, pero la característica principal es que en un sensor puntual solo podemos medir en un punto de la fibra y esto es una gran desventaja en un gran número de aplicaciones como por ejemplo detectar una fuga en una tubería donde necesitamos que el elemento sensor se encuentre a lo largo de toda la tubería. En estos casos se tendrán que utilizar sensores distribuidos.

## 2.3 Sensores distribuidos

### 2.3.1 Fenómenos de *scattering*: elástico e inelástico

Uno de los fenómenos más destacables de la fibra óptica es la dispersión o *scattering*, que se puede definir como el cambio de dirección de la luz causado por la colisión de los fotones con átomos o moléculas del medio. Se divide en *scattering* elástico o inelástico. Esta división es debida al intercambio de energía entre el medio dieléctrico por el que la señal es propagada y el campo magnético. En el *scattering* elástico no se produce cambio de frecuencia en los fotones dispersados, pero en el caso del inelástico los fotones dispersados si cambian de frecuencia por lo que se produce un intercambio de energía. Generalmente se producen ambas dispersiones simultáneamente en el medio, pero con diferentes intensidades.

#### Scattering elástico

La dispersión elástica decrece su intensidad a medida que aumenta la longitud de la fibra, como se ha explicado en este tipo de dispersión no se produce un cambio frecuencial en los fotones dispersados y es producida normalmente por

inhomogeneidades que se encuentran en el núcleo de la fibra y según la relación de su tamaño con la longitud de onda se tiene dos tipos de *scattering* elástico, el de Rayleigh y el de Mie. Si las partículas con las que interacciona la onda son bastante más pequeñas que la longitud de onda ( $< \frac{1}{10} \lambda$ ) se trata de dispersión de Rayleigh y para que se produzca dispersión de Mie el tamaño de las partículas debe ser del orden de la longitud de onda. En el momento en el que los fotones se dispersan en el núcleo se cumplen las condiciones de propagación, quedan confinados y se propagan a través de la fibra de nuevo.

### Scattering inelástico

En estos procesos se tiene una transferencia de energía entre el medio y la onda, y para conservar dicha energía, se producen ondas de frecuencia inferior llamadas Stokes y ondas de frecuencia superior llamadas Anti-Stokes. En este caso existen dos tipos de dispersión la de Raman y la de Brillouin. En la dispersión de Raman se tiene más energía transferida al medio. Teniendo en cuenta el cambio de la longitud de onda es mucho mayor en Raman, sobre unos 100 nm que en Brillouin, alrededor de 80 pm. Una gran diferencia entre estos dos procesos es que en la dispersión de Brillouin aparece un fonón acústico que se propaga a través del material, en cambio en la dispersión de Raman el fonón que participa en el proceso es óptico.

### **2.3.2 Scattering Rayleigh**

La dispersión de Rayleigh se descubrió en 1899 por Lord JWS Rayleigh [14]. Como se ha explicado es causada por la interacción de la onda con inhomogeneidades más pequeñas que la longitud de onda transmitida. Mejorando el proceso de fabricación de la fibra se pueden reducir hasta cierto punto las variaciones, pero las fluctuaciones en el índice de refracción debido a la densidad de las inhomogeneidades no se pueden evitar. Esta dispersión provoca una atenuación proporcional a  $\lambda^{-4}$ .

Un gran ejemplo que se utiliza a la hora de explicar la dispersión de Rayleigh es la razón por la cual se ve el cielo de color azul, o el porqué del color rojo de las puestas de sol. La longitud de onda de la luz azul se sitúa sobre 400 nanómetros, y la de la luz roja a unos 700 nanómetros. Según el *scattering* de Rayleigh el porcentaje de la luz dispersada es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Por esta razón las partículas pequeñas de la atmósfera dispersarán un porcentaje mayor de la luz de longitud de onda corta que de longitud de onda larga. Una diferencia pequeña de longitud de onda puede producir una diferencia significativa en la dispersión de la eficiencia. En las longitudes de onda azul y roja, pequeñas partículas dispersan la luz azul cerca de diez veces más que la roja.

La atmósfera contiene un gran número de partículas. Las partículas de polvo dispersan la luz, pero suelen ser demasiado grandes para que se cumpla la condición del *scattering* de Rayleigh. En cambio, las partículas de nitrógeno y oxígeno son suficientemente pequeñas para dispersar la luz azul diez veces más que la luz roja. Cuando el Sol está en lo alto se dispersa la luz azul, pero gran parte de ella se dispersa más de una vez antes de llegar a nuestros ojos, por lo que vemos el azul de todo el cielo y no solo el que viene directamente del Sol, como se puede apreciar en la figura 10. Cuando el Sol está bajo en el cielo (situado cerca del horizonte, por ejemplo al atardecer), la luz tiene que viajar a través de más atmósfera y por tanto los rayos de luz interactúan más veces con las partículas antes de llegar a nuestros ojos, de esta forma los azules y violetas son esparcidos con más fuerza que los rojos que siguen propagándose, por esta razón se ve el cielo más rojo durante el amanecer y atardecer.

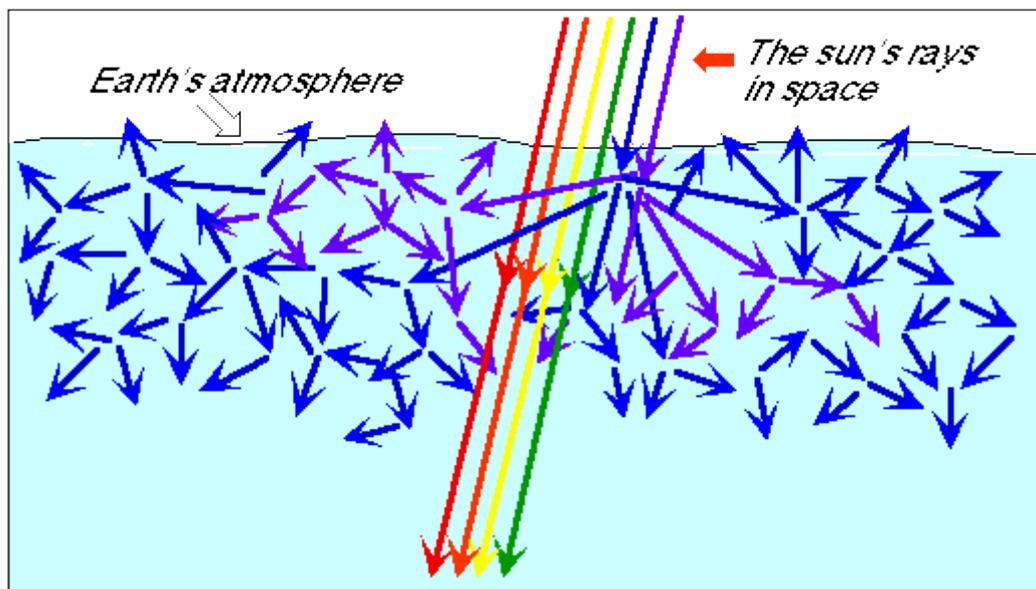


Figura 10: Dispersión de la luz azul en la atmósfera.

Cuando los fotones se dispersan en la fibra quedan confinados y se propagan de nuevo a través de ella. En este aspecto cabe destacar un dispositivo cuyo principio de funcionamiento se basa en el fenómeno de *scattering* llamado reflectómetro óptico en el dominio del tiempo o más conocido como OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) que es una de las herramientas más utilizadas para saber el estado de una red de transmisión de fibra óptica. El OTDR interpreta la dispersión contrapropagante al inicio de la fibra en función del tiempo para calcular la distancia que ha recorrido la luz y así localizar el punto donde se ha podido producir algún problema. El OTDR se puede utilizar para medir la longitud de la fibra, y su atenuación, contando las pérdidas por conectores o empalmes. Además puede detectar fallos como pueden ser roturas de la fibra.

### 2.3.3 Scattering de Raman y de Brillouin

#### Scattering de Raman

El *scattering* de Raman fue descubierto por C. Raman en 1926 [15]. Cuando la radiación óptica que incide (bombeo) entra en contacto con las moléculas, y se crea el efecto Raman, cierta energía se absorbe lo que produce vibraciones en las moléculas. Dichas moléculas producen fotones a diferentes frecuencias y energía que los incidentes. Estos fotones se agrupan en dos bandas: Stokes y anti-Stokes. Si el material absorbe energía quiere decir que el fotón absorbido tiene una energía superior al emitido, en este caso se tiene señal de Stokes. En el caso que el material pierda energía, ocurre lo contrario, el fotón generado es el que tiene una energía mayor, teniendo una señal de anti-Stokes.

La energía de los fonones del proceso equivale a la diferencia de frecuencia entre los fotones incidentes y reflejados. Como se trata de vibraciones del medio y fonones ópticos, se puede tener cientos de nanómetros o incluso micrómetros de longitud de onda de la luz dispersada dependiendo del material.

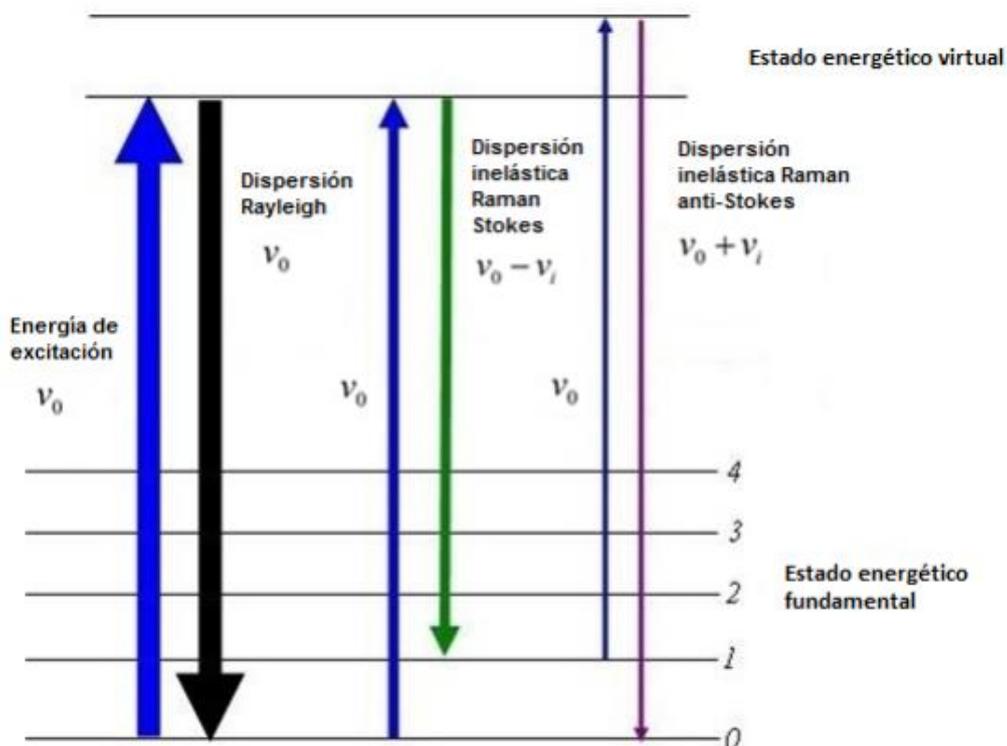


Figura 11: Diagrama sobre las transiciones energéticas de electrones en una molécula debidos a la interacción con un fotón incidente [16].

Desafortunadamente, el efecto Raman es muy débil por lo que es más utilizado el *scattering* de Raman estimulado, conocido como SRS (*Stimulated Raman Scattering*).

El SRS es un efecto de banda ancha por el cual se introducen dos o más señales a diferentes longitudes de onda por una fibra produciendo una transferencia de potencia de la señal de más frecuencia a la que tiene una frecuencia menor. La relación entre la onda Stokes y la onda incidente se rige por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s \quad (2.5)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} g_R I_p I_s - \alpha_p I_p \quad (2.6)$$

Donde  $I_p$  es la intensidad de la onda que incide,  $I_s$  la intensidad de la onda de Stokes,  $\alpha_s$  es el coeficiente de absorción de la onda de Stokes y  $\alpha_p$  el de la onda incidente y  $g_R$  el coeficiente de ganancia de Raman.

En el SRS existe una potencia umbral que es igual a la potencia de la onda que incide para la cual la onda de Stokes y la onda incidente tienen la misma potencia a la salida de la fibra.

$$P_{umbral} \approx 16 b \frac{A_e}{L_e g_R} \quad (2.7)$$

Donde la longitud de la fibra es  $L_e$  y  $b$  es un valor entre uno y dos, este valor depende de las polarizaciones relativas de la onda Stokes y la incidente. La potencia umbral más pequeña se obtendrá cuando el valor de  $b$  es uno.

La onda Stokes también tiene una potencia umbral para ser generada en sentido inverso al de la propagación de la onda incidente. La razón por la que no se tiene mucho en cuenta en los sistemas de comunicaciones ópticas es porque se alcanza primero el umbral para la SRS hacia delante que el umbral hacia atrás. Es importante decir que para minimizar los efectos de la SRS es conveniente no sobrepasar la potencia umbral y reducir el espacio entre canales, siempre que se hable de comunicaciones ópticas y no de aplicaciones de sistemas sensores distribuidos.

## Scattering de Brillouin

En este caso no hay interacción entre la luz y fonones ópticos como ocurría en el caso de Raman, ya que este tipo de dispersión proviene de fonones acústicos. La dispersión de Brillouin, llamada así por el científico francés León Brillouin, es uno de los más importantes efectos ópticos no lineales.

En los procesos espontáneos, un fotón de una onda de luz incidente se convierte en un fotón y un fonón dispersado. La onda dispersada es bajada en frecuencia (onda *Stokes*), la cual suele tener una intensidad muy baja, pero se puede propagar a gran distancia (decenas de kilómetros) en una fibra óptica sin apenas verse atenuada. Por esta razón el *scattering* de Brillouin suele ser un efecto indeseable en las comunicaciones por fibra óptica, ya que parte de la señal transmitida se puede ver dispersada y no llegar al detector.

La dispersión de Brillouin tiene una gran cantidad de aplicaciones como: filtros activos sintonizables, láseres de efecto Brillouin con ancho de banda muy estrecho, medida distribuida de la elongación y la temperatura... [17]

La SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*) o dispersión de Brillouin estimulada ocurre cuando la potencia de entrada supera un determinado umbral (*SBS threshold*), un valor que está claramente por debajo del que se precisa para producir dispersión estimulada de Raman. Una característica importante de la dispersión de Brillouin es que la onda de *Stokes* contrapropagante lleva la gran parte de la energía de entrada. Esto no es positivo para los sistemas de comunicaciones debido a la pérdida de energía en la dirección de propagación de las señales. Pero esta característica es muy útil en el caso de los láseres o amplificadores basados en el efecto Brillouin o la utilización de la señal contrapropagante para crear sensores distribuidos de deformación o temperatura.

## Dispersión de Brillouin espontánea

En la dispersión espontánea de Brillouin existe una interacción de fotones acústicos y fonones ópticos en la fibra óptica, como resultado se tiene un fonón retrodispersado, es decir, la dirección de propagación será opuesta a la luz incidente. Los sensores de sistemas BOTDR (*Brillouin Optical Time Domain Reflectometry*) utilizan esta dispersión de Brillouin espontánea durante la obtención de información en los cambios de deformación y temperatura de la fibra óptica.

La onda acústica con la que interacciona la luz en la dispersión de Brillouin se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial^2 \Delta \bar{p}}{\partial t^2} - \Gamma \nabla^2 \left( \frac{\partial \Delta \bar{p}}{\partial t} \right) - V_A^2 \nabla^2 \Delta \bar{p} = 0 \quad (2.8)$$

Donde  $\Delta \bar{p}$  es el parámetro de variación de presión local, que muestra la variación de la onda acústica en el espacio y tiempo.  $\Gamma$  es el parámetro de amortiguamiento de la onda,  $V_A$  es la velocidad acústica de la onda, a continuación se presenta la ecuación para una onda unidimensional que se propaga por un medio:

$$\Delta \tilde{P} = \Delta P e^{i(qz - \Omega t)} + c. c. \quad (2.9)$$

Se puede representar las variaciones de densidad en función de la presión y la entropía a través de la siguiente ecuación:

$$\Delta \rho = \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_S \Delta p + \left( \frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_p \Delta S \quad (2.10)$$

El primer término corresponde a los cambios de densidad adiabáticos, la onda acústica que causa la dispersión de Brillouin. Por otro lado, el segundo término describe los cambios de densidad isobáricos, la entropía o fluctuaciones de temperatura que causa el *scattering* de Rayleigh. Teniendo en cuenta la ecuación (2.10) y la ecuación del campo dispersado se puede reescribir la ecuación de la polarización:

$$P(r, t) = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_S \Delta p(r, t) E_0(r, t) = \frac{1}{4\pi} \gamma_e C_S \Delta p(r, t) E_0(r, t) \quad (2.11)$$

Donde  $\gamma_e$  es la constante de electrostricción, y  $C_S$  es la compresibilidad adiabática.

Si se sustituye una perturbación de presión  $\Delta p = \Delta p e^{i(qr - \Omega t)} + c. c.$  se obtiene la ecuación de la onda:

$$\nabla^2 E - \frac{n^2 \partial^2 E}{c^2 \partial t^2} = \frac{1}{4\pi} \frac{\gamma_e C_S}{c^2} [(\omega_0 - \Omega)^2 E_0 \Delta p^* e^{i[(k_p - q)r - (\omega_0 - \Omega)t]} + c. c. + (\omega_0 - \Omega)^2 E_0 \Delta p e^{i[(k_p - q)r - (\omega_0 - \Omega)t]} + c. c.] \quad (2.12)$$

En el primer término de la parte derecha corresponde a la componente de *Stokes* de la onda dispersada, mientras que el segundo sumando de la componente de *anti-Stokes*.

### Dispersión de Brillouin estimulada

El *scattering* de Brillouin espontáneo se produce solamente a causa de variaciones térmicas, ya que se asume que la intensidad luminosa es lo suficientemente reducida para no alterar las propiedades ópticas del medio. En cambio, en el *scattering* de Brillouin estimulado existe un cambio en la densidad del medio debido al fenómeno de electrostricción [4], a través de este fenómeno la onda de *Stokes* retrodispersada al interferir con el bombeo de luz incidente genera una onda acústica, siendo ésta la que modula el índice de refracción del medio. Debido a que la SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*) produce una banda de amplificación a otra frecuencia, la potencia del canal en la dirección de propagación es muy limitada, por lo que es perjudicial para los sistemas de comunicaciones por fibra óptica.

En la siguiente ecuación  $\Omega$  es la frecuencia de la onda acústica, el valor de  $\beta$  depende del ángulo  $\theta$  entre los vectores de bombeo y de *Stokes*, por último  $V_A$  es la velocidad acústica del medio:

$$\Omega \approx V_A \beta \quad (2.13)$$

Si se sustituye el valor de  $\theta$  se llega a la siguiente ecuación que indica el desplazamiento frecuencial de Brillouin:

$$\Omega \approx 2 V_A \frac{\omega_p n}{c} \text{sen} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.14)$$

El desplazamiento frecuencial depende del ángulo de dispersión, para  $\theta = \pi$  se obtiene la máxima dispersión. Con  $\theta = 0$ , es la dispersión hacia delante, y el desplazamiento frecuencial se aproxima a cero. Por esto, la dispersión de Brillouin estimulada solo se produce hacia atrás, con una frecuencia de Brillouin dada por:

$$\nu_B = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{2nV_A}{\lambda_p} \quad (2.15)$$

La electrostricción, es el fenómeno producido por la tendencia de los materiales dieléctricos a comprimirse en presencia de un campo eléctrico intenso. Esta compresión produce una presión interna llamada presión electrostrictiva. Las variaciones de presión en la fibra producen variaciones en la densidad del medio, que a su vez produce una variación de la constante dieléctrica. Como resultado, las variaciones de densidad del medio hacen que aparezca una onda acústica.

En la dispersión de Brillouin estimulada se tiene una anchura espectral muy estrecha en su espectro de ganancia en contraste con la dispersión de Raman. Esto se debe a que en la dispersión de Brillouin la interacción es con ondas acústicas, y está muy relacionada la anchura espectral con el tiempo de amortiguamiento de la onda acústica o el tiempo de vida del fonón generado.

En la SBS, siempre que se supongan duraciones del pulso de bombeo superiores al tiempo de vida del fonón acústico, el proceso estimulado se rige por las siguientes ecuaciones de intensidad para el estado estacionario:

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B I_p I_S - \alpha I_p \quad (2.16)$$

$$\frac{dI_S}{dz} = -g_B I_p I_S - \alpha I_S \quad (2.17)$$

Donde  $\alpha$  es la atenuación de la fibra,  $I_S$  es la intensidad de la onda de Stokes y por último  $I_p$  es la intensidad de la onda de bombeo (*pump*). Si no hay pérdidas en la fibra, es decir, si la atenuación es cero, se puede ver que la diferencia de intensidades es constante a lo largo de la fibra:

$$\frac{d}{dz} (I_p - I_S) = 0 \quad (2.18)$$

Para la estimación de la potencia umbral, se tiene en cuenta que no hay agotamiento del bombeo. El valor de la potencia de la onda Stokes tras recorrer toda la fibra se calcula a través de la ecuación (2.17). La intensidad de la onda Stokes crece de manera exponencial siguiendo la expresión:

$$I_S(0) = I_S(L) e^{\frac{g_B P_0 L_{eff}}{A_{eff}} - \alpha L} \quad (2.19)$$

Donde  $A_{eff}$  es el área efectiva del núcleo,  $L_{eff}$  es la longitud efectiva y  $P_0 = I_p(0)A_{eff}$  es la potencia de bombeo en el extremo de la fibra. Se puede observar en la anterior ecuación que la onda *Stokes* crece de manera exponencial en la dirección de  $Z$  decreciente debido a la amplificación de Brillouin, porque es una onda contrapropagante a la onda de bombeo.

La potencia umbral que genera el SBS se obtiene a través de la ecuación:

$$P_{th} \approx \frac{21A_{eff}}{g_B L_{eff}} \left(1 + \frac{\Delta v_s}{\Delta v_B}\right) \quad (2.20)$$

Esta potencia umbral es una aproximación debido a que la ganancia de Brillouin puede verse reducida por diversos factores, como las variaciones con el dopado, las no homogeneidades de la fibra, los estados de polarización de la luz...

En ocasiones la transferencia de energía entre la onda de *Stokes* y la onda de bombeo es demasiado grande. En el caso de que esto suceda se dice que hay agotamiento de bombeo, debido a que por transferir esta onda de bombeo tanta cantidad de energía a la onda de *Stokes*, el bombeo se queda sin energía para seguir propagándose. Si esto sucede, no se tendrá ganancia por dispersión de Brillouin a partir del punto de la fibra en el que ha sucedido este agotamiento.

### **3. ESTADO DEL ARTE EN SENSORES DISTRIBUIDOS BASADOS EN EL SCATTERING DE BRILLOUIN**

#### **3.1 Brillouin: Scattering espontáneo**

##### **3.1.1 Sistemas BOTDR**

Los sensores basados en el *scattering* de Brillouin espontáneo utilizan una señal incidente única en la fibra para producir dispersión, esto es, no es necesario otro estímulo o señal óptica adicional.

Los sistemas BOTDR (*Brillouin Optical Time Domain Reflectometry*) [18], proporcionan un sensor distribuido basado en la ganancia-pérdida de Brillouin, al igual que los sensores OTDR estándar que utilizan la dispersión de Rayleigh en el mismo sentido. Con estos sistemas se puede obtener información de la deformación y temperatura a lo largo de la fibra óptica. Se utiliza una onda pulsada como señal de bombeo, la cual se encarga de generar la dispersión de Brillouin contrapropagante al bombeo.

Cuando la deformación se produce en la dirección longitudinal de la fibra, la luz retrodispersada de Brillouin se somete a un desplazamiento en frecuencia que es proporcional a la deformación. El desplazamiento de la frecuencia de Brillouin en función de este *strain* (elongación)  $\varepsilon$  se puede expresar por la ecuación:

$$v_B(\varepsilon) = v_B(0) + \frac{dv_B(\varepsilon)}{d\varepsilon} \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

Donde  $v_B(\varepsilon)$  es el desplazamiento en frecuencia con deformación,  $v_B(0)$  es la frecuencia de Brillouin de la fibra sin deformación,  $dv_B(\varepsilon)/d\varepsilon$  es el coeficiente proporcional de *strain* que es de unos 0.5 GHz (% *strain*) en una longitud de onda de  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ ; por último  $\varepsilon$  es el *strain*. La luz pulsada se lanza por un extremo de la fibra óptica, y se produce la onda de Brillouin retrodispersada que se detecta en el mismo extremo. La distancia  $Z$  desde el extremo de la fibra óptica está dada por la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{cT}{2n} \quad (3.2)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $n$  es el índice de refracción de la fibra, y  $T$  es el intervalo de tiempo entre el lanzamiento de la luz pulsada y la recepción de la luz dispersada.

En el principio de detección del BOTDR, la luz retrodispersada de Brillouin tiene lugar cuando la luz pulsada lanzada en la fibra óptica interactúa con los fonones acústicos, de modo que el cambio de frecuencia de la luz retrodispersada se produce en comparación con la frecuencia de la luz pulsada lanzada. La cantidad de desplazamiento en frecuencia es proporcional a la tensión longitudinal de la fibra óptica.

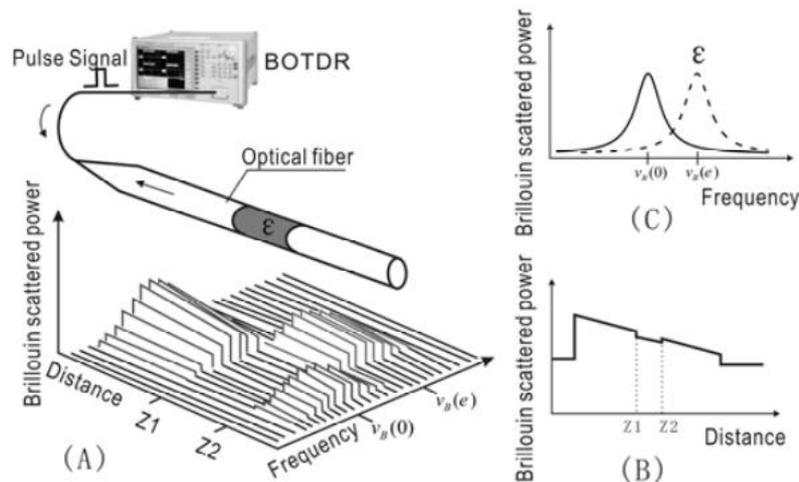


Figura 12: Diagrama de medida BOTDR [19]

Esta técnica tiene un rango de medida por encima de los 10 kilómetros sin regeneración de señal, y cientos de kilómetros con regeneración de señal en línea, aunque la longitud de onda de la fibra reduce su rango dinámico. Tiene una gran limitación en su resolución espacial, que no puede ser inferior a 1 metro. Se necesita introducir un filtrado para quitar la componente de dispersión de Rayleigh, ya que el desplazamiento en frecuencia depende de la deformación y de la temperatura de manera simultánea.

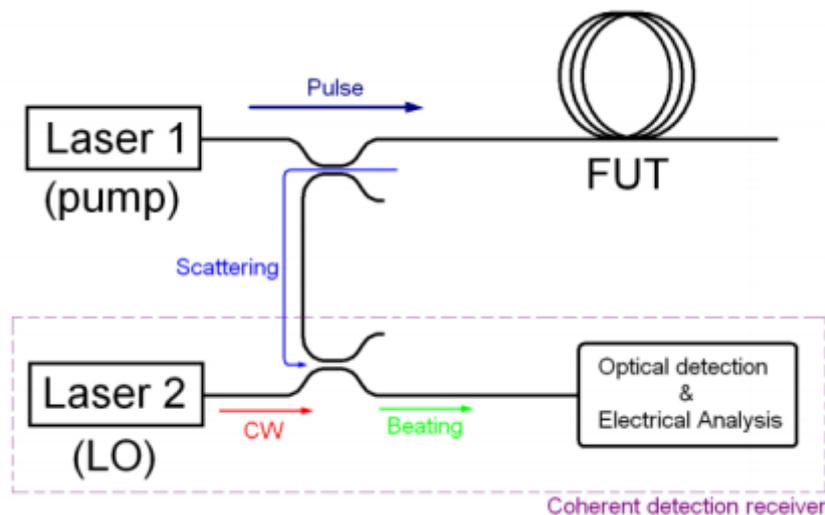


Figura 13: Configuración típica de un sistema BOTDR [20].

## 3.2 Brillouin: Scattering estimulado

### 3.2.1 Sistemas BOTDA

Es la técnica más utilizada en los sensores basados en el *scattering* de Brillouin. Como es un sistema basado en dispersión estimulada, se tiene una señal de bombeo y otra de prueba.

Normalmente la señal de bombeo es una señal pulsada, que excita la onda acústica y produce la onda *Stokes* retrodispersada. La señal de prueba se inyecta por el lado opuesto de la fibra, y se le hace un barrido en frecuencia para conseguir reconstruir el espectro de ganancia de Brillouin, el cual puede ser definido por la ecuación (3.3), cuando la diferencia frecuencial de la onda de bombeo y la sonda varía sobre la frecuencia  $\nu_B$ .

$$g_B(\nu) = \frac{g_{B0}}{1 + \frac{4(\nu - \nu_B)^2}{\Delta\nu_B^2}} \quad (3.3)$$

Siendo  $\Delta\nu_B^2$  la anchura espectral de Brillouin y  $g_{B0}$  el coeficiente de ganancia de Brillouin. La temperatura o deformación de la fibra es proporcional a la frecuencia en la ganancia de Brillouin máxima.

Se puede calcular la temperatura o deformación a lo largo de la fibra, gracias al valor de la frecuencia de Brillouin, que se puede saber en cada punto de la fibra gracias a que el bombeo es pulsado. La interacción entre las ondas solo se produce en la posición del pulso, si se analiza la ganancia en función de la frecuencia y el tiempo, se calcula el valor de la frecuencia de Brillouin en cada punto. 10 ns de anchura de pulso se traduce a 1 m de resolución.

A continuación se presentan dos esquemas de diferentes implementaciones BOTDA:

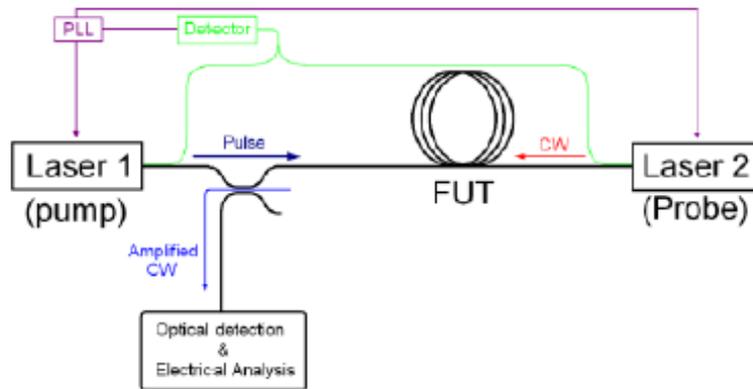


Figura 14: Esquema de configuración BOTDA.

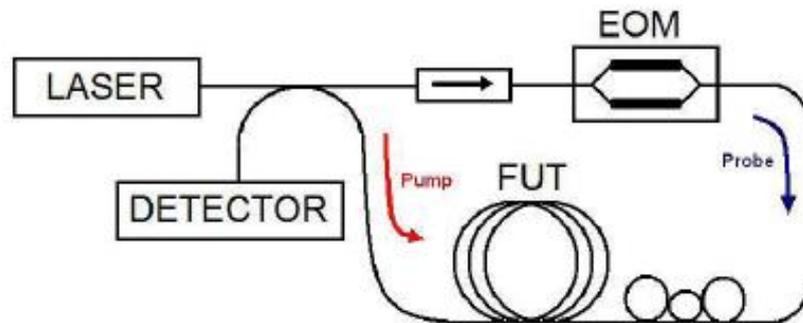


Figura 15: Esquema de configuración BOTDA.

En primer lugar, en la figura 14 se muestra la implementación propuesta por Horiguchi [21]. Se tienen como señal de bombeo y sonda dos fuentes láser distintas. La señal de bombeo es una señal pulsada, con un modulador electro-óptico, la frecuencia de separación de cada láser puede ser controlada por un detector heterodino y un oscilador de enganche de fase (PLL).

Por otro lado, en la figura 15 se observa el esquema diseñado por Nikles [22], en este caso el bombeo y la sonda son proporcionados por la misma fuente láser. Este tipo de esquema se ha impuesto en los últimos años gracias a la gran ventaja que supone el poder trabajar con una única fuente óptica. Gracias a un modulador óptico se genera la sonda y se sintoniza sus bandas laterales en la frecuencia de la onda de bombeo. Si la frecuencia de Brillouin de la fibra es igual a la frecuencia de modulación, la onda de bombeo interacciona con la banda inferior por la dispersión de Brillouin estimulada, la banda inferior en el interior de

la fibra se amplifica y se obtiene el espectro de ganancia de Brillouin haciendo un barrido frecuencial de la banda lateral de la onda de prueba o sonda.

Existen diferentes técnicas para mejorar la resolución espacial y la longitud de medida distribuida. Una de ellas es la técnica *dark-pulse* [23], en la que se añade un amplificador óptico semiconductor para generar el pulso de bombeo ya que tiene una alta relación de extinción. Existen otras técnicas para reducir la resolución espacial como añadir un pulso de pre-excitación para generar el fonón [24] o el método *echo-Brillouin* propuesto por Thévenaz [25].

Hay otros métodos con el fin de conseguir un sistema insensible a la polarización de la luz, donde se descompone el pulso de bombeo en dos ramas las cuales tienen polarizaciones ortogonales, a continuación una de las ramas es retrasada un tiempo proporcional a la anchura del pulso y por último se vuelven a combinar los dos pulsos [26].

Además de las inestabilidades de las medidas por la alta potencia de las señales, en estos sistemas hay que tener en cuenta que no se puede diferenciar si una medida es provocada por un cambio de temperatura o de deformación, tampoco puede localizar roturas en la fibra, si se quiere mejorar la calidad de la medida es necesario un alto promediado en la detección. Este alto promediado y el barrido frecuencial hacen que las medidas lleven un tiempo algo elevado, lo que impide implementaciones para medidas dinámicas salvo que se usen sistemas BOTDA determinados.

### *Slope-assisted*

En este proyecto se ha implementado la técnica *Slope-assisted*, que es una técnica creada por Romeo Bernini, Aldo Minardo y Luigi Zeni [27], la cual permite guardar un número elevado de frecuencias en el instante del sensado. Además, con esta técnica, se obtiene como una función del tiempo el valor exacto de la deformación en el lugar de detección. También se puede monitorizar varias regiones en una misma configuración ya que se puede mover la posición de la ubicación de la detección a través de la fibra óptica.

En primer lugar, es necesario escanear el desplazamiento de la frecuencia de Brillouin de la fibra. Se utiliza un pulso óptico y una señal continua contrapropagante, la diferencia de frecuencia óptica entre ambas se ajusta a una distancia espectral que es aproximadamente igual a la mitad de la anchura de la ganancia de Brillouin. Así, si existe una modulación incluida por la vibración del desplazamiento en frecuencia de Brillouin se mide como una variación en la intensidad de pico del pulso *Stokes*.

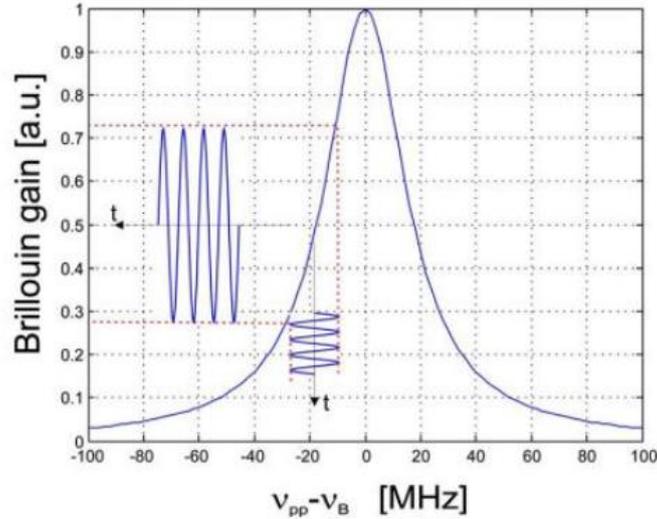


Figura 16: Principio de operación de Slope-assisted

### 3.2.2 Sistemas BOCDA

Los sistemas BOCDA (*Brillouin Optical Correlation-Domain Analysis*) están basados en el dominio correlado, estos sistemas controlan la dispersión a través de la síntesis de la función coherente óptica SOCF (*Synthesis of Optical Coherence Function*). Estos sensores precisan que la onda y el bombeo tengan modulación en fase para que la interacción de Brillouin se produzca donde las fases estén altamente correladas, de esta manera se generan picos de correlación periódicos a través de la fibra.

Cuando se aplica una modulación frecuencial sinusoidal del bombeo contrapropagante y la onda de prueba en el BOCDA, la frecuencia de batido  $f_B$  entre estas dos ondas es dada por la siguiente ecuación:

$$f_B(\Delta x, t) = \Delta v + 2\Delta f \cdot \sin\left(2\pi f \cdot \frac{\Delta x}{V_g}\right) \cdot \cos\left(2\pi f_m \left(t - \frac{\Delta x}{V_g}\right)\right) \quad (3.4)$$

Donde  $\Delta v$  es el desplazamiento en frecuencia,  $\Delta f$  la amplitud de modulación,  $f_m$  la frecuencia de modulación y  $V_g$  la velocidad de grupo de la luz.  $\Delta x$  es la diferencia de longitud de propagación entre el bombeo y la onda de prueba. La señal BOCDA se compone de la suma espacial de la convolución entre el espectro local de  $f_B$  y la BGS (*Brillouin Gain Spectrum*) local a lo largo de la fibra. En la figura 17(a) se muestra un pico de correlación (CP), el término sinusoidal de la ecuación (3.4) desaparece y el espectro se convierte en una  $\delta$ -función añadiendo un BGS afilado y con forma de Lorentz a la señal BOCDA. Como  $\Delta x$

está lejos del pico de correlación, el espectro local de  $f_B$  comienza a ensancharse, contribuyendo a la estructura de ruido de la señal BOCDA. De esta manera, la señal BOCDA se construye por la ganancia del espectro de Brillouin BGS desde un pico de correlación y una estructura de ruido trapezoidal de todas las otras secciones de la fibra de FUT (Fiber Under Test) como se representa en la figura 17(b).

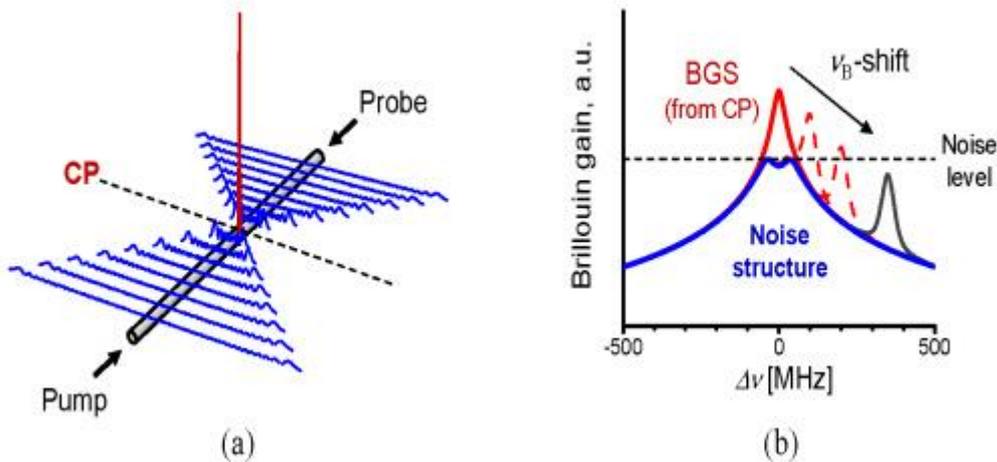


Figura 17: (a) Distribución de un espectro bombeo-prueba cerca de un pico de correlación (CP). (b) estructura de una señal BOCDA compuesta por una afilada BGS y una estructura de ruido [28].

La resolución de estos sensores es mucho mayor que en los sensores BOTDA, ya que emplea señales continuas. A pesar de esta ventaja, el rango de medida tiene limitaciones porque en este sistema la posición de medida es periódica. Otra desventaja es que el montaje es más complejo y sofisticado.

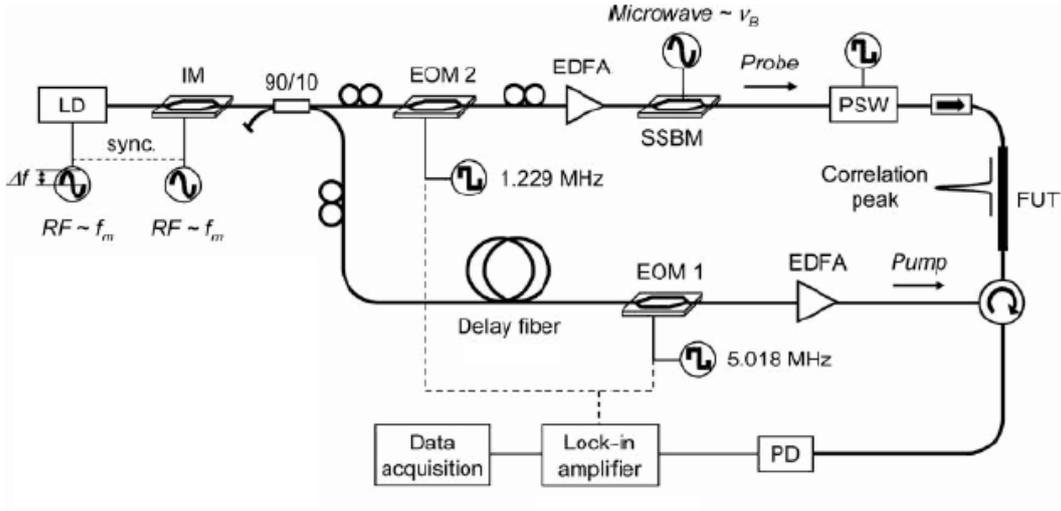


Figura 18: Esquema de la configuración de los sistemas BOCDA [29].

### 3.2.3 Sistemas BOFDA

Por último existe otra técnica llamada BOFDA (*Brillouin Optical Frequency Domain Analysis*) basada en la medida de la función de transferencia compleja en banda base que relaciona las amplitudes de la onda de prueba y la de bombeo a lo largo de la fibra óptica.

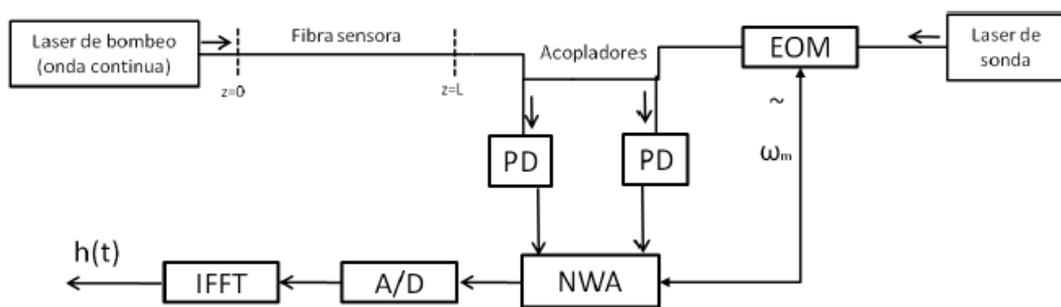


Figura 19: Esquema de la configuración de los sistemas BOFDA.

La onda continua se inyecta a la fibra monomodo sensora al salir del láser de bombeo, por el otro extremo de la fibra se inyecta luz de un láser con la frecuencia desplazada  $\nu_B$ . La onda de prueba es modulada en intensidad con una señal sinusoidal cuyo rango frecuencial está centrado en  $\omega_m$ . El bombeo se modula de manera indirecta por la transferencia de energía hacia la sonda. Los fotodetectores están señalados en la figura con las letras PD, su salida está

conectada con un analizador de redes NWA (*Network Analyzer*), que obtiene la función de transferencia en banda base, la cual se digitaliza en A/D (convertor Analógico-Digital) y a continuación se le aplica la transformada de Fourier inversa para calcular su respuesta al impulso. Con estos datos se puede determinar el perfil de temperatura y deformación en la fibra.

Se puede tomar un ejemplo donde la onda de prueba es modulada por  $\cos(2\pi f_m t)$  con una modulación en frecuencia de diente de sierra. El rango máximo  $\Delta f_m$  determina la resolución espacial:  $\delta_z = v_g/2\Delta f_m$ ; y la distancia de trabajo depende del paso:  $L = v_g/2\delta f_m$ . Por ejemplo, con 20 km de longitud de fibra se requiere un paso frecuencial de 5 kHz; y 1 m de resolución espacial requiere un rango frecuencial de 100 MHz.

En el sistema BOFDA, la evolución del bombeo y la sonda (componente *Stokes*) se describen [30] por las ecuaciones:

$$\left(\frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}\right) I_p = (-\alpha - g_B I_S) I_p \quad (3.5)$$

$$\left(\frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}\right) I_S = (-\alpha + g_B I_p) I_S \quad (3.6)$$

Con la condición inicial  $I_p(0, t) = I_{p0}$  y  $I_S(L, t) = I_{S0}(1 + \cos \omega_m t)$ . Las ecuaciones se resuelven aproximadamente bajo la ecuación de la intensidad de bombeo de la ecuación (3.7) donde  $\alpha_1 = \alpha - g_B I_{p0}$  y  $k_m = n\omega_m/c$ .

$$I_S(z, t) = I_{S0} e^{\alpha_1(z-L)} \{1 + \cos[\omega_m t + k_m(z - L)]\} \quad (3.7)$$

Una desventaja de los sistemas BOFDA es que necesitan gran cantidad de tiempo para realizar una medida, por lo que la deformación y la temperatura deben ser constantes a lo largo del proceso.

## 4. DESARROLLO DE LA AUTOMATIZACIÓN CON MATLAB

### 4.1 Explicación detallada del setup experimental

Después de toda la explicación teórica relacionada con el proyecto, este capítulo está centrado en la descripción del montaje con el que se realizan los experimentos. Dependiendo del tipo de mediciones que se vayan a realizar, se puede configurar de diferentes maneras para mejorar distintas propiedades, como la resolución espacial de la medida, el tiempo de medida, la longitud de monitorización... También hay que contar con la atenuación de la fibra, el tipo de modulación, la longitud de onda del láser o el tiempo de adquisición del sistema.

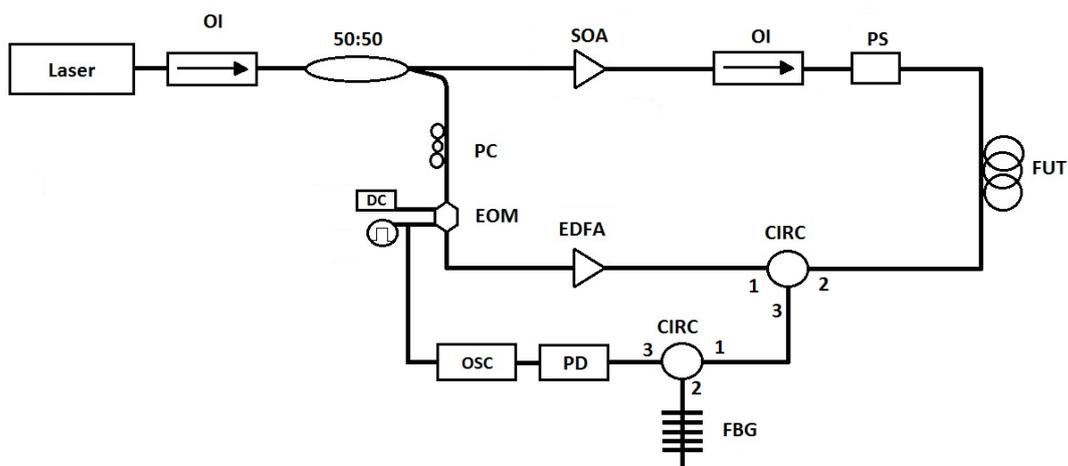


Figura 20: Montaje experimental del laboratorio.

Se ha utilizado el montaje de la figura 20, en primer lugar se tiene un láser en el caso de los test experimentales, a 1550 nm con una potencia de 5.4 dBm, seguido está el aislador óptico (OI, *Optical Isolator*), cuya misión es impedir que alguna reflexión no deseada pueda dañar el láser; a continuación hay un acoplador óptico 50:50 donde la señal se divide en dos señales idénticas, una de ellas que se utilizará en la señal de bombeo (rama inferior) y la otra para para realizar la señal de Stokes (rama superior).

La señal de bombeo llega a un controlador de polarización (PC, *Polarization Controller*), con el cual se modifica la polarización de manera manual ya que la fibra de entrada del modulador es fibra mantenedora de polarización. A continuación, la señal se modula en amplitud a través de un modulador electro-óptico (EOM, *Electro-Optic Modulator*) con el que se pulsa la señal, generando la señal de bombeo. Para generar la señal de RF necesaria para modular la señal óptica se utiliza un generador de RF, pero como la señal generada no tiene la suficiente potencia se utiliza un amplificador de RF. Hay un generador de funciones que aplica un pulso eléctrico al EOM. Dichos pulsos tienen una frecuencia de repetición y una anchura temporal la cual depende de la longitud de la fibra óptica que se quiera monitorizar mediante la expresión:

$$f_p < \frac{c}{2Ln} \quad (3.8)$$

Donde  $f_p$  es la frecuencia de repetición,  $c$  la velocidad de la luz en el vacío,  $n$  el índice de refracción de la fibra y  $L$  la longitud de la fibra, la cual se multiplica por dos porque hay que tener en cuenta el recorrido de la onda al ir y al volver. Para un correcto funcionamiento no pueden coexistir a la vez dos pulsos en el interior de la misma fibra óptica, porque si no se produciría un acoplamiento de estos. Por ello, la frecuencia de repetición  $f_p$  debe ser menor que la inversa del tiempo que tarda el pulso en recorrer la fibra dos veces (la ida y la vuelta). Además es necesario suponer una señal continua para fijar el punto de trabajo del modulador que va a generar el pulso. En este caso el punto de trabajo idóneo es donde la función de transferencia es cero, si el modulador se fija en ese punto se obtiene una gran relación de extinción. En el caso de la función de transferencia de la siguiente figura el punto de trabajo idóneo está en el punto  $V_\pi$ .

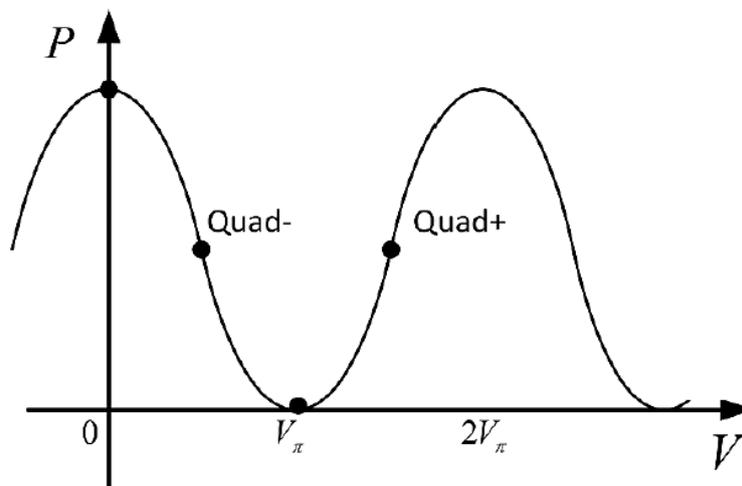


Figura 21: Función de transferencia del modulador.

El siguiente paso es amplificar la señal de bombeo para tener una intensidad suficiente con la que generar el proceso de dispersión, para ello se utiliza un amplificador óptico (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*). El siguiente dispositivo es un circulador, el bombeo llega a la puerta 1 y el circulador hace que la señal salga por la puerta 2, donde se encuentra la fibra óptica que se quiere monitorizar (FUT, *Fiber Under Test*) donde tiene lugar el proceso de la dispersión de Brillouin estimulada.

Por la rama superior esta la señal continua del láser que ha pasado por el acoplador 50:50. La señal de Stokes se modula en amplitud a través de amplificador óptico de semiconductor (SOA, *Semiconductor Optical Amplifier*) con el que se pulsa la señal que viene del acoplador generando la señal de Stokes. Como anteriormente cuando se generaba el pulso, hay que encontrar un punto de trabajo óptimo. Esto se hace para conseguir suprimir la señal portadora del láser o hacer que su valor sea considerablemente inferior al de las bandas laterales, lo que beneficia el proceso de dispersión de Brillouin estimulado.

A continuación, la señal pasa por otro aislador óptico para evitar reflexiones indeseadas. Antes de llegar a la fibra pasa por un aleatorizador de polarización, el cual sirve para cambiar el estado de polarización de la luz en cada momento, ya que la ganancia de Brillouin depende de la polarización. Así que, si se aleatoriza y se promedia, ya no existe esa dependencia en el sistema. En este punto la señal se propaga por la fibra (FUT, *Fiber Under Test*) y se encuentran la señal de prueba y de bombeo. Ya que ambas señales se propagan en direcciones opuestas, la señal de prueba se amplifica si el desplazamiento de frecuencia entre las señales es igual a la frecuencia de Brillouin de la fibra en cada punto.

Por último, la señal de prueba que puede que haya sido amplificada por el efecto Brillouin sale de la fibra FUT y entra por la puerta 2 del circulador, y sale por la puerta 3, llegando a un segundo circulador que hace que la señal pase por una red de difracción de Bragg (FBG, *Fiber Bragg Grating*) explicado con anterioridad en capítulos anteriores. A continuación la señal llega a la salida de la puerta 3 del circulador, donde se encuentra con un fotodetector (PD, *PhotoDetector*) para pasar la señal al dominio eléctrico y visualizar la traza en un osciloscopio (OSC) que utiliza como disparo el generador de pulsos eléctricos.

## 4.2 Explicación del concepto automatización vía Matlab y GPIB

Este proyecto consiste fundamentalmente en el diseño e implementación de un programa desarrollado en Matlab, el cual crea una interfaz de usuario que se encarga de leer datos de configuración previamente definidos, enviarlos a los diferentes dispositivos a través de GPIB y representar gráficamente los resultados obtenidos. Antes de comenzar con el desarrollo del programa es importante tener unos conocimientos previos sobre el software y lenguaje utilizado.

### GPIB

El bus GPIB [31] fue creado en Hewlett-Packard Instrument Bus (HP-IB), que es un estándar de datos digitales de corto rango desarrollado en los años 1970 por Hewlett-Packard para conectar dispositivos de prueba y medida (como osciloscopios, multímetros...) con dispositivos que permitan su control como por ejemplo un ordenador.

El actual bus GPIB consta de 24 pines:

- 8 líneas de transmisión de datos (DI=1-DIO8)
- 3 líneas para el control asíncrono de la comunicación, mediante las que se verifica una correcta transmisión de datos (NRFD, NDAC y NRDAV)
- 5 líneas para gestionar la transmisión de comandos (ATN, IFC, REN, SRQ y EOI)
- El resto forma las tierras de las diferentes líneas

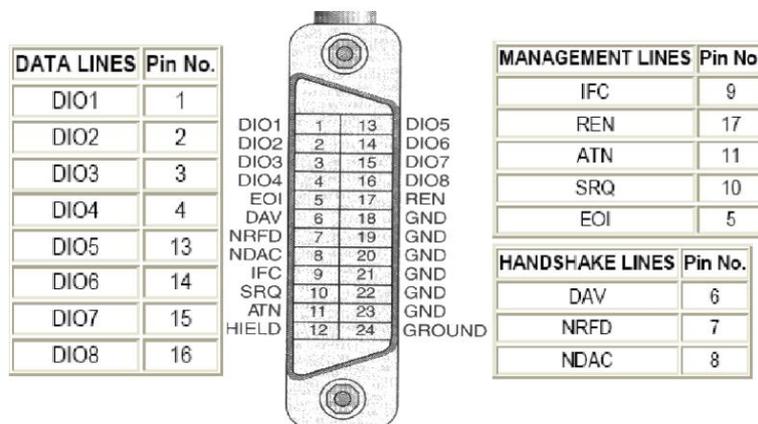


Figura 22: Asignación de señales de un conector GPIB.

A continuación se pueden observar los diferentes tipos de configuraciones que puede adoptar el bus GPIB:

- Topología de bus

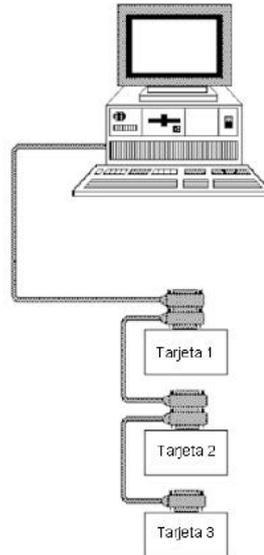


Figura 23: Esquema de la topología tipos bus.

- Topología de estrella

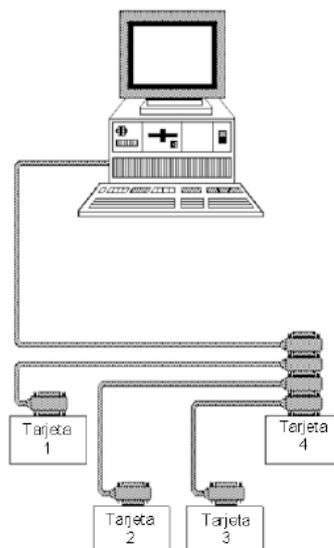


Figura 24: Esquema de la topología de tipo estrella.

- Configuración híbrida



Figura 25: Esquema de la topología de configuración híbrida.

La estructura del bus GPIB para el control de instrumentos se divide jerárquicamente en los niveles que muestra la figura 26. Dicho control se puede llevar a cabo a través de un acceso directo al bus (comandos SCPI) o a través del driver del propio instrumento (IVI). En este proyecto, el entorno de programación elegido es el software Matlab.

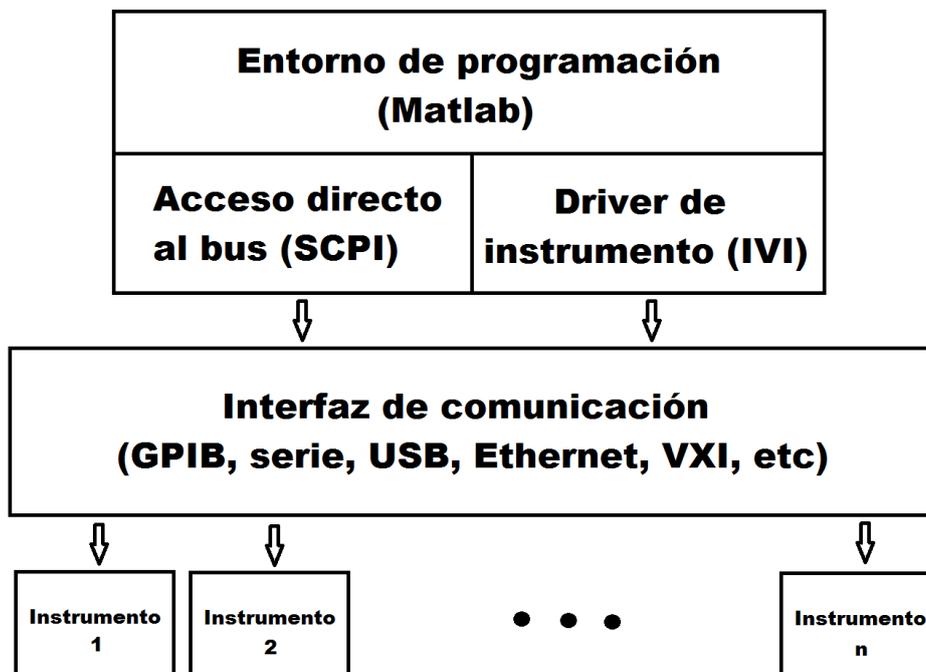


Figura 26: Estructura de programación de un sistema GPIB.

## MATLAB

En primer lugar cabe destacar que el programa utilizado para el desarrollo del setup es MATLAB (MATrix LABoratory) [32], que es un software matemático con un entorno de desarrollo integrado (IDE) y con un lenguaje propio (lenguaje M). Es muy utilizado en universidades y centros de investigación y desarrollo. Fue diseñado por *The MathWorks* en 1984, la primera versión se creó con la idea de emplear paquetes de subrutinas en Fortran en álgebra lineal y análisis numérico. El lenguaje de programación M se creó en 1970 para facilitar un acceso al software de matrices sin la necesidad de utilizar Fortran.

Matlab integra cálculo de matrices, procesamiento de señales, análisis numérico y representación gráfica. Algunas de sus principales prestaciones son: la capacidad para manipular matrices, la representación de funciones y datos, la posibilidad de implementar algoritmos, la comunicación con otros programas y lenguajes y la creación de interfaces de usuario (GUIDE), con esta última herramienta se ha creado la interfaz del proyecto por lo que se explicará con más detalle.

## GUIDE

Las apps de MATLAB son programas autónomos con un frontal gráfico de usuario GUI que se encarga de automatizar un cálculo o una tarea. La GUI tiene controles como botones, controles deslizantes, menús y barras de herramientas. Algunos productos de MATLAB como como Curve Fitting Toolbox, Signal Processing Toolbox y Control System Toolbox, incluyen apps con interfaces de usuario personalizadas.

GUIDE (entorno de desarrollo de GUI) contiene herramientas para la creación de interfaces de usuario para Apps personalizadas. A través del editor de diseño de GUIDE, se puede crear una interfaz de usuario gráficamente. GUIDE genera el código base de MATLAB para construir la interfaz, el cual puede ser modificado para programar el comportamiento de la app.

Para tener un mayor control en el desarrollo y diseño, se puede elaborar código que describa los comportamientos y propiedades de todos los componentes. MATLAB contiene funcionalidad integrada que le ayudará a crear la GUI para su app de forma programática. Se pueden crear controles de interfaz de usuario como botones o controles deslizantes, cuadros de dialogo y contenedores como paneles y grupos de botones.

## Descripción de la automatización

En primer lugar se crea el archivo “BOTDA.m” y “BOTDA.fig” con la ayuda de la app GUI (Graphical User Interfaces) explicada anteriormente, es una manera sencilla de desarrollar un interfaz de usuario de una manera gráfica sin tener que programarlo todo desde el principio. A continuación se puede ver una imagen de la interfaz inicializada, una vez se abre el programa por primera vez:

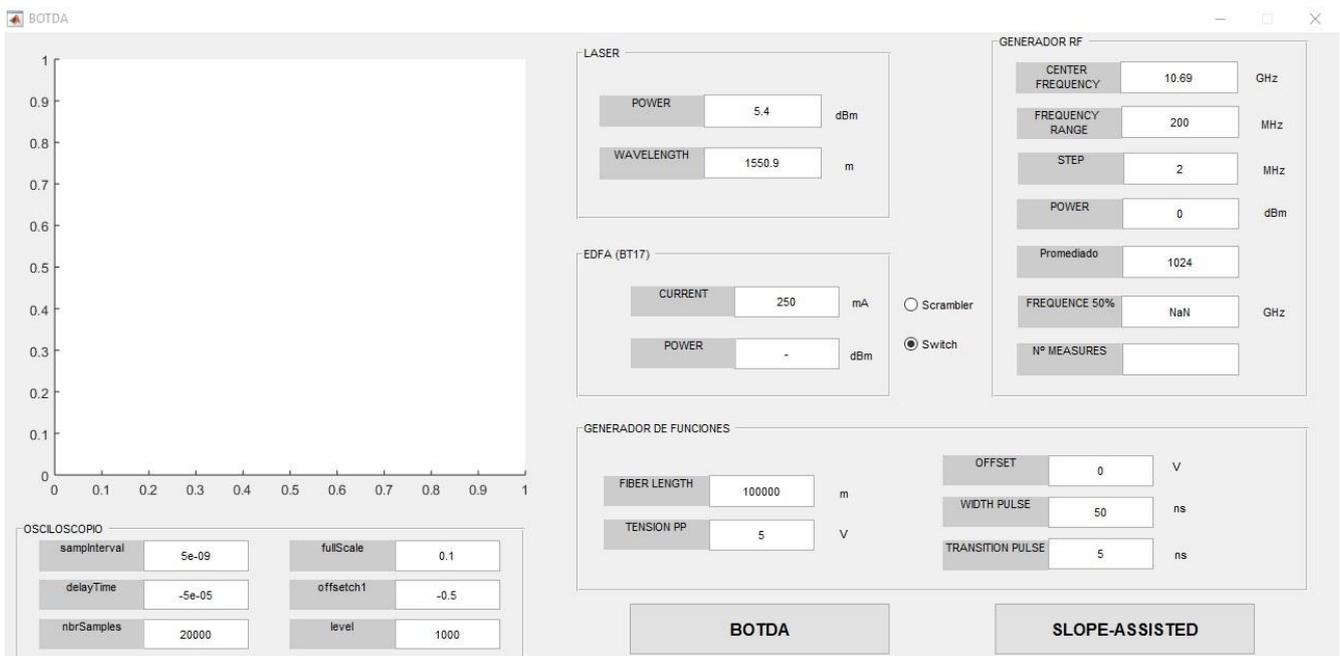


Figura 27: Interfaz de usuario del programa.

Se puede ver que la interfaz está inicializada con unos valores por defecto, esto es, unos valores típicos que serán utilizados en las primeras medidas. Los cuadros para introducir los valores están separados por el dispositivo al que pertenecen y dentro de este por la magnitud física que se puede variar. A continuación se muestran los dispositivos y sus magnitudes que pueden ser variadas a través de la interfaz:

- **Laser**
  - Potencia (dBm)
  - Longitud de onda (m)

Un láser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) es un dispositivo que se basa en la emisión inducida o estimulada, con el fin de generar un haz de luz coherente tanto temporal como espacialmente. La coherencia temporal está relacionada con la posibilidad para concentrar la emisión en un estrecho rango espectral y la coherencia espacial se corresponde con la capacidad para que un haz permanezca con un reducido tamaño al transmitirse por el vacío en largas distancias.

- **Generador RF**
  - Frecuencia central (GHz)
  - Rango frecuencial (MHz)
  - Paso (MHz)
  - Potencia (dBm)
  - Promediado
  - Frecuencia al 50% (GHz)
  - Número de medidas

Un generador de radiofrecuencia es un dispositivo que crea una onda portadora sin modular o modulada en AM o FM según sean las características del circuito bajo prueba. En el caso del valor de "Frecuencia al 50%" es utilizado en las simulaciones de tipo *Slope-assited*.

- **Amplificador Óptico (EDFA)**
  - Corriente (mA)
  - Potencia (dBm)

Es un dispositivo que como indica su nombre amplifica la señal luminosa directamente, evitando convertir la señal al dominio eléctrico, amplificar en eléctrico y volver a pasar al dominio óptico. En este caso el amplificador óptico tiene dos modos de funcionamiento, en el que se le puede dar como magnitud la corriente o la potencia, en ningún caso las dos a la vez.

- **Generador de funciones**

- Longitud de la fibra (m)
- Tensión pico a pico (v)
- Offset (V)
- Anchura del pulso (ns)
- Transición del pulso (ns)

El generador de funciones es un dispositivo con la capacidad de generar señales variables en el dominio temporal las cuales posteriormente se aplican sobre el circuito bajo prueba.

- **Osciloscopio**

- Intervalo de muestreo
- Tiempo de retardo
- Número de muestras
- Escala
- Offset canal 1
- Nivel

El osciloscopio es un equipo de visualización electrónico utilizado para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo. Las señales se representan en forma de coordenadas en una pantalla en la que el eje horizontal (eje X) suele representar los tiempos y por el contrario el eje vertical (eje Y) representará las tensiones. En este caso el osciloscopio será una tarjeta integrada en el ordenador y la representación de las señales será posible gracias a la interfaz creada.

### **4.3 Objetivos e Implementación de la automatización**

Como se ha podido comprobar el montaje experimental basado en la dispersión de Brillouin tiene unas características realmente buenas a la hora de detectar cambios de temperatura o elongación en la fibra, pero su utilización a la hora de realizar experimentos no era la idónea, ya que cada vez que se realizaban unas nuevas medidas se tenía que cambiar a mano todos los valores de cada uno de los dispositivos, un proceso que no es complicado pero en el cual se pierde una gran cantidad de tiempo. Además de esto había que abrir un gran número de archivos de Matlab y cambiar manualmente los valores que se habían ajustado en los dispositivos. Es un proceso pesado si se tiene que repetir en cada test experimental, pero es peor aun cuando los valores introducidos no son los

idóneos y se tienen que cambiar varias veces dichos valores cada vez que se quiere realizar una sola medida.

El objetivo de la interfaz es representar de una manera visual los campos que se pueden cambiar en las simulaciones, una vez se escriben los cambios en ella, automáticamente se cambian en los dispositivos a través de la comunicación GPIB y también en los diferentes programas de Matlab con el que se desarrolla el test experimental. A esto hay que añadirle la posibilidad de ver los resultados del osciloscopio dentro de la misma interfaz, evitando la utilización del programa externo de la tarjeta del osciloscopio el cual tiene un tiempo de inicialización elevado, y lo que es peor, que cada vez que era necesario cambiar valores en los dispositivos había que reiniciar el programa de nuevo.

Una vez creados los archivos “BOTDA.m” y “BOTDA.fig” los cuales se encargan del desarrollo gráfico de la interfaz que ya ha sido explicada con anterioridad, a continuación se describen el resto de archivos necesarios para el correcto funcionamiento del programa:

### On.m

La finalidad de este archivo es conectar los diferentes dispositivos para ello es necesario el conocimiento de las instrucciones de la conexión GPIB las cuales aparecen en las guías de cada instrumento. En la figura 28 se muestra una parte del código, exactamente en la que se conecta el láser:

```
%1.LASER (24):
fprintf(Laser_HP8168F,['power:unit dBm; :power ' num2str(power)]);
fprintf(Laser_HP8168F,['wavelength ' num2str(lamda) 'E-9']);
global Laser_HP8168F connect_Laser_HP8168F
Laser_HP8168F=instrfind('Type','visa','PrimaryAddress','GPIB::24::INSTR','Tag','');
if isempty(Laser_HP8168F)
    Laser_HP8168F = visa('agilent', 'GPIB::24::INSTR');
else
    fclose(Laser_HP8168F);
    Laser_HP8168F = Laser_HP8168F(1);
end
[ErrorConexion]=error_conexion(Laser_HP8168F,'Laser_HP8168F');
if ErrorConexion==0
    fprintf(Laser_HP8168F,'output on');
    connect_Laser_HP8168F=0;
else
    connect_Laser_HP8168F=1;
end
```

Figura 28: Código Matlab de la conexión del láser.

Además de realizar la conexión, es necesario comprobar si se ha conectado correctamente y guardar este resultado en una variable, esto se debe a que se puede dar el caso de que no siempre se conecten todos los dispositivos y es importante saber en todo momento que dispositivos se han conectado y cuales no para que no se originen errores en otras partes del programa.

En la parte final de este proyecto se adjuntará el código de todos los programas, por lo que en este capítulo solo se mostrarán partes del código a modo de ejemplo.

### Inicio.m

En este archivo se inicializan los dispositivos con unos valores por defecto ya predefinidos, esto hace que al arrancar la interfaz los campos estén rellenos con unos valores típicos y se evita al usuario tener que meter todos los valores por primera vez muchos de los cuales, si el tipo de test experimental no cambia, serán los mismos más de una vez. El ejemplo que se muestra a continuación es la inicialización del generador de funciones. Cabe destacar que al generador de funciones hay que indicarle la frecuencia a la que va a trabajar, pero los usuarios que realizan las mediciones están más familiarizados con los valores de la longitud de la fibra a analizar más que con la frecuencia por lo que es necesario esta conversión antes de introducir los valores en el dispositivo.

```

%5.GENERADOR DE FUNCIONES:
global connect_GFunc_A32250A GFunc_A32250A shape5 L5 freq5 tensionPP5 offset5 width5 transition5

shape5='pulse';

L5=100000;
f5=1/(2*1.5*L5/3e8);
freq5=f5-(f5*0.2);

tensionPP5=5;
offset5=0;
width5=50;
transition5=5;

if connect_GFunc_A32250A==0
    fprintf(GFunc_A32250A,['function ' shape5]);
    fprintf(GFunc_A32250A,['frequency ' num2str(freq5)]);
    fprintf(GFunc_A32250A,['voltage ' num2str(tensionPP5) 'v']);
    fprintf(GFunc_A32250A,['voltage:offset ' num2str(offset5) 'v']);
    fprintf(GFunc_A32250A,['pulse:width ' num2str(width5) 'ns']);
    fprintf(GFunc_A32250A,['pulse:transition ' num2str(transition5) 'ns']);
end

```

Figura 29: Código de Matlab de la inicialización del generador de funciones.

## Open BOTDA.m

Este archivo lo único que hace es llamar a “on.m” (conexión), después llamar a “inicio.m” (inicialización) y por último a “BOTDA.m” (abrir la interfaz). Por lo tanto es el archivo principal a la hora de abrir la interfaz, hablando coloquialmente sería el “interruptor ON” que hay que pulsar para abrir la interfaz.

Cuando el usuario ha introducido todos los valores y, gracias a la representación del osciloscopio introducida en la interfaz, comprueba que dichos valores son correctos tiene la opción de pulsar el botón “BOTDA” o “SLOPE-ASSITED” para realizar el test experimental, ambos tipos de medida han sido explicados con anterioridad en la parte teórica. Estas dos opciones llevarán a un archivo diferente según el tipo de medida pero con el que se llega al mismo resultado. Los archivos son “control1.m” para el caso de BOTDA y “control2.m” en el caso de SLOPE-ASSITED.

En este archivo es donde se representan los resultados que se han mostrado con anterioridad. Además una vez se ejecuta este programa, al acabar de realizar la medida se guardan en una carpeta un archivo .mat el cual contiene todos los valores representativos del test experimental, el nombre con el que se guarda este archivo es la fecha y hora del instante en el que finaliza dicho test. Gracias a este archivo es posible observar los valores del test experimental y sus resultados gráficos en cualquier momento y sin necesidad de volver a realizar la medida.

Además de estos archivos descritos, existen otros menos importantes pero si necesarios para el correcto funcionamiento de la interfaz como el de comprobación de errores o el de cierre de la interfaz.

## **5. MEDIDAS EXPERIMENTALES PARA VALIDAR EL DESARROLLO**

Una vez finalizado el programa que facilita la automatización, se realiza el montaje explicado anteriormente necesario para realizar las medidas distribuidas por medio del sistema BOTDA implementado. Se han realizado cuatro tipos diferentes de medida en el que se han ido variando tanto la fibra como su longitud y características. Lo que se quiere comprobar con estas medidas es que la automatización es correcta, es decir, que se envían los datos correctamente a los diferentes dispositivos, que la parte de osciloscopio representa realmente lo que se debe ver, que la medida se realiza sin ningún tipo de error, que la representación de las frecuencias de Brillouin son adecuadas...

En un primer lugar antes de realizar cualquier tipo de medida se comprueba que el programa funciona correctamente, para ello es necesario cambiar todos los valores posibles de cada dispositivo: láser, amplificador óptico, osciloscopio, generador RF y generador de funciones. Para ello, una vez se cambia el valor en Matlab se debe mirar en el *display* del dispositivo si coincide con el valor escrito, de esta manera es posible asegurarse que no hay ningún fallo en la comunicación GPIB entre el ordenador y los dispositivos. Una vez comprobado esto, el siguiente paso es realizar los diferentes experimentos:

### **Medida 1**

En el primer experimento se utiliza una fibra de 50 km de tipo "Plasma fiber" cuya frecuencia de Brillouin es 10.69 GHz, y se ajusta un rango frecuencial de 200 MHz. El pulso de la onda de bombeo tiene una duración de 50 ns, lo que implica una resolución espacial de 5 m. Para observar la ganancia de Brillouin como en la imagen es necesario ajustar los valores del osciloscopio como la escala, el *offset*, el intervalo de puntos... Los valores como la potencia y la longitud de onda del láser o la corriente del amplificador óptico serán los mismos en todas las medidas, ya que son unos valores idóneos para obtener una buena respuesta en este tipo de experimentos. En la figura 30 se puede ver la interfaz con todos los valores que se han utilizado en esta medida, y su representación en el osciloscopio integrado en la interfaz.

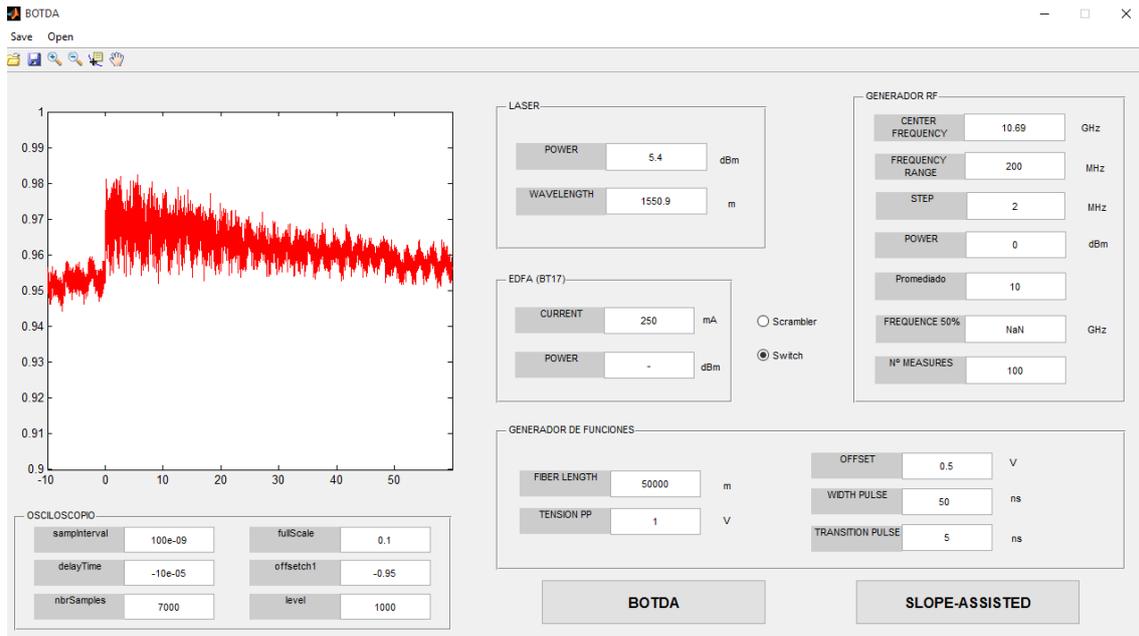


Figura 30: Interfaz con una fibra “Plasma fiber” de 50 km con un promediado bajo.

Cabe destacar que en el generador de funciones la anchura del pulso es 50ns, pero que en un principio hay que poner este valor mucho más grande (500 ns) y a continuación ajustarlo manualmente en el controlador de corriente del SOA. En la imagen anterior aparece 50 ns para evitar confusiones de ningún tipo.

Al tratarse de señales ruidosas se debe realizar un promediado de la señal. El tiempo de duración de este promediado depende de la longitud de la fibra ya que ésta fija el valor de la frecuencia de repetición del pulso; entonces para fibras de menor longitud se requiere un menor tiempo para realizar la medida. En este caso al aumentar el promediado la representación en el osciloscopio es más lenta, pero por el contrario se obtiene una señal menos ruidosa. Por esta razón en un principio se utiliza un promediado bajo para la comodidad de representación y a la hora de realizar mediciones es conveniente ajustar un valor de promediado mayor. También cabe destacar que en estas medidas se está utilizando un *switch* de polarización, por lo que se puede observar ruido de polarización, en el caso de que se utilizase con el *scrambler* el perfil sería menos ruidoso.

En la siguiente imagen se muestran los mismos datos pero con un promediado mayor, con el que se van a realizar las medidas, en este caso su valor es 4096.

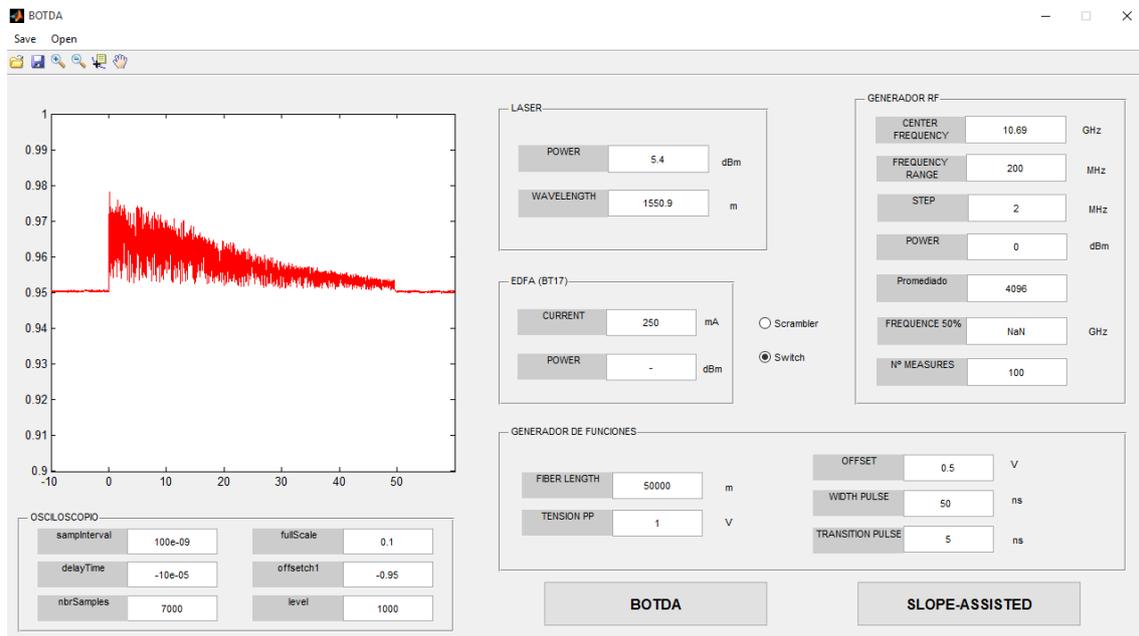


Figura 31: Interfaz con una fibra “Plasma fiber” de 50 km con un promediado alto.

La diferencia de ruido entre estas dos señales es más que significativa, por lo que se observa la importancia del promediado en este tipo de simulaciones.

Una vez tenemos ajustados todos los parámetros, el siguiente paso es realizar la medida a temperatura ambiente, y para ello se debe pulsar el botón BOTDA. Como resultado se tiene la representación del valor de ganancia para cada punto de la fibra y cada valor de frecuencia muestreado.

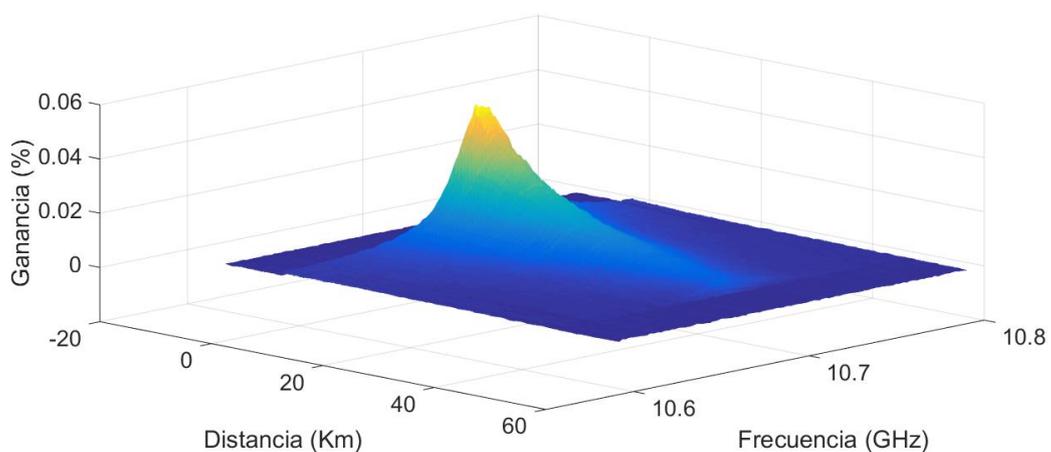


Figura 32: Espectro de ganancia para una fibra “Plasma fiber” de 50 km.

Para comprobar que los valores más altos de ganancia y, por lo tanto, donde se produce mayor interacción se dan para las frecuencias que se encuentran sobre 10.69 GHz (frecuencia de Brillouin de la fibra), se presenta la siguiente figura con otra perspectiva para que se pueda observar de manera más clara:

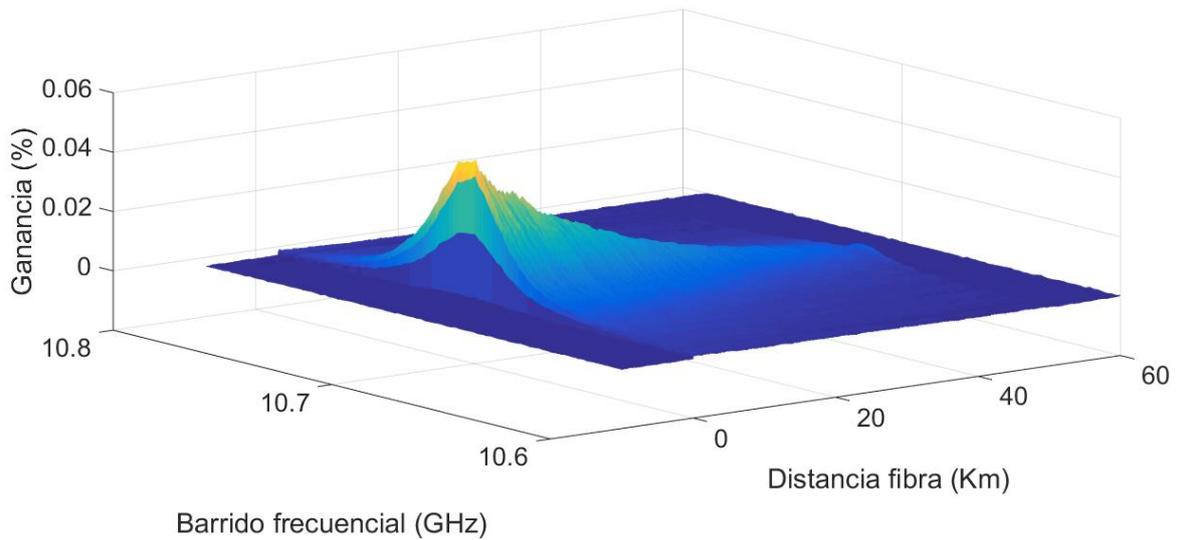


Figura 33: Espectro de ganancia para una fibra "Plasma fiber" de 50 km.

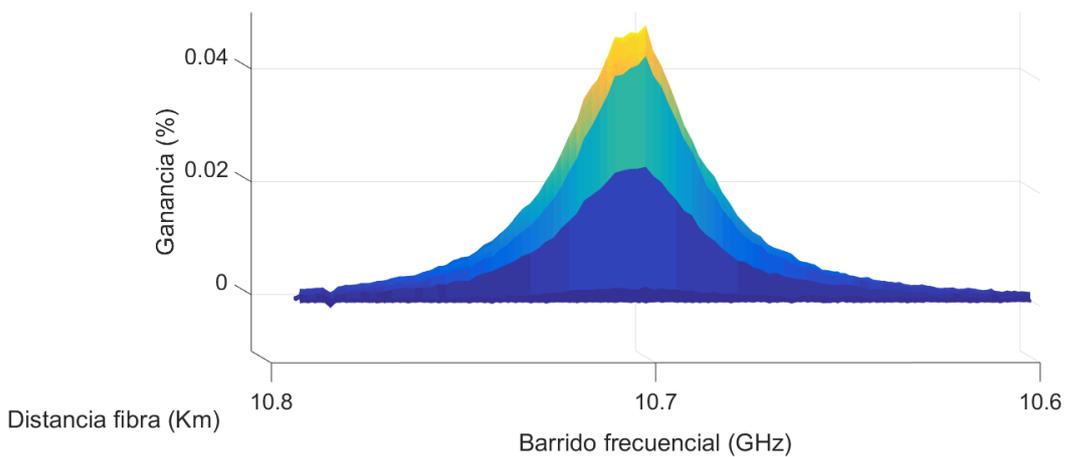


Figura 34: Espectro de ganancia para una fibra "Plasma fiber" de 50 km desde otra perspectiva.

Cabe destacar que en estas representaciones no se observa ninguna anomalía, pues mientras se ha realizado la medida no se ha cambiado la temperatura de la fibra óptica ni se ha producido ningún tipo de deformación en ningún punto; además se ha utilizado la misma fibra a lo largo de los 50km.

En el siguiente caso no se modifica el esquema pero se realizarán unas modificaciones en la frecuencia central para comprobar que la frecuencia que utilizamos antes es la idónea, es decir, se obtiene una ganancia mayor. Se analizarán tres frecuencias diferentes: 10.69 GHz, 10.68 GHz y 10.66 GHz. Y se mostrará la ganancia en función de la distancia para las tres diferentes frecuencias. En primer lugar se muestran las imágenes de la interfaz con las tres diferentes frecuencias centrales, claramente el resultado mostrado por el osciloscopio es diferente, pero para observarlo mejor se realizarán las medidas y una vez obtenidos los datos se representaran las ganancias de las tres frecuencias en una misma gráfica.

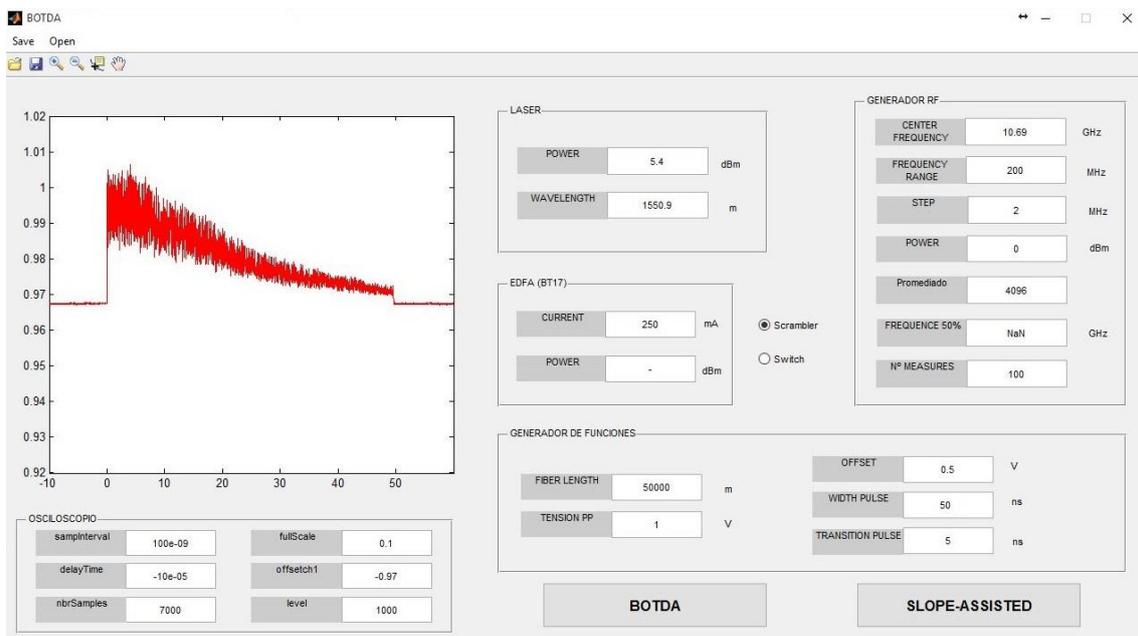


Figura 35: Frecuencia central de 10.69 GHz.

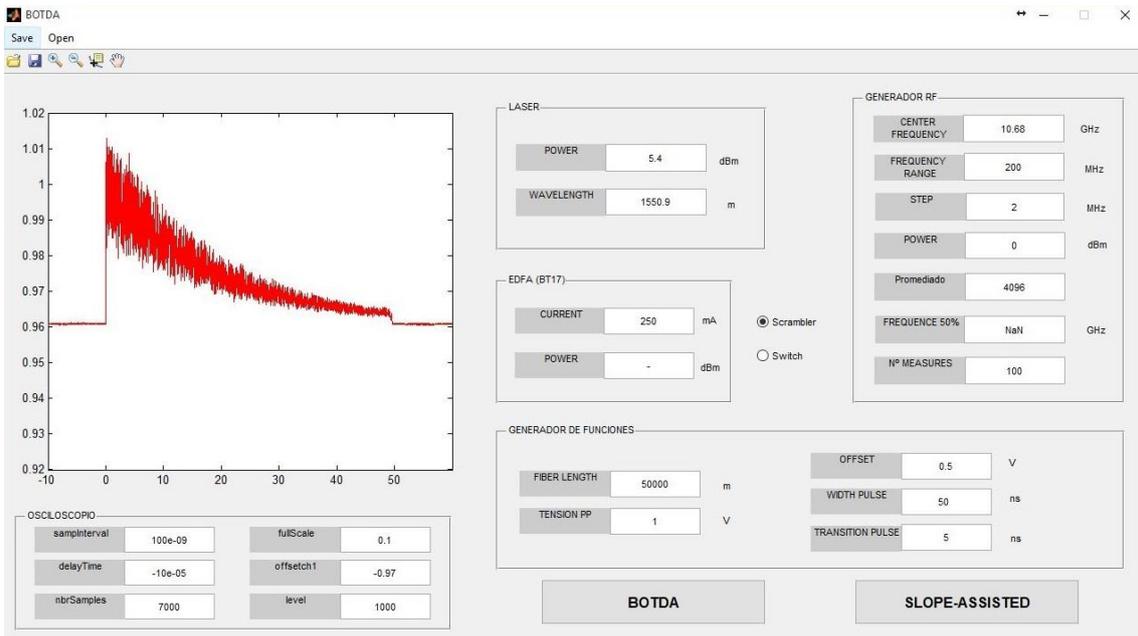


Figura 36: Frecuencia central de 10.68 GHz.

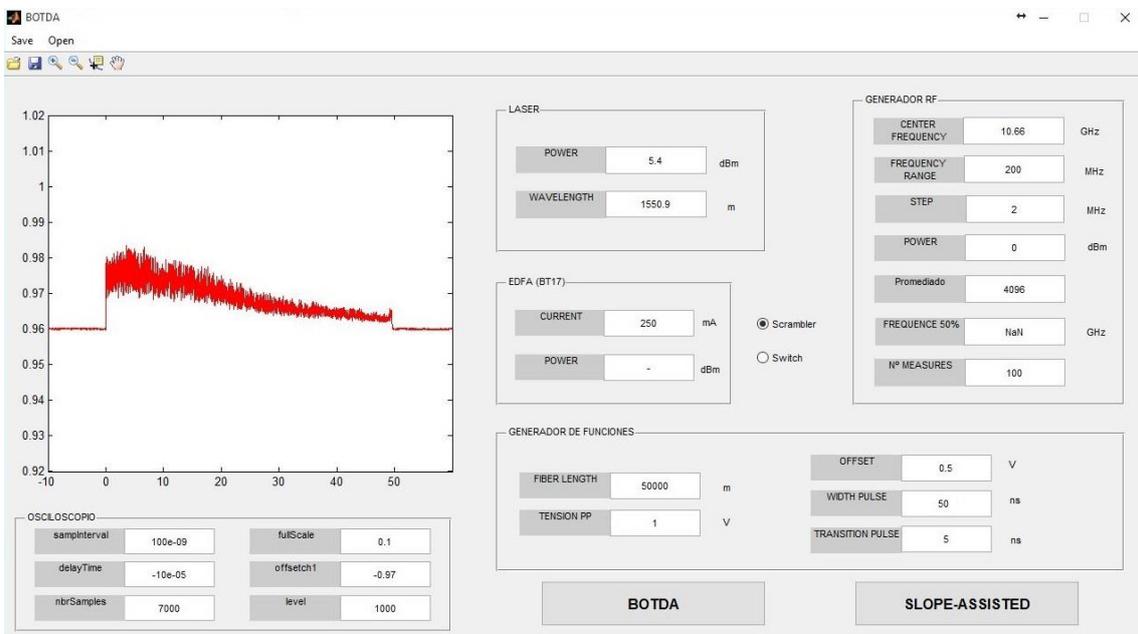


Figura 37: Frecuencia central de 10.66 GHz.

Como se ha mencionado anteriormente, se muestra la representación de la ganancia en función de la distancia para las tres frecuencias diferentes. Se puede comprobar como la frecuencia con una ganancia mayor es 10.69 GHz y esta ganancia va descendiendo a lo largo que se avanza por la fibra óptica. Se puede comprobar que se acertó en la medida anterior al utilizar una frecuencia central de 10.69GHz.

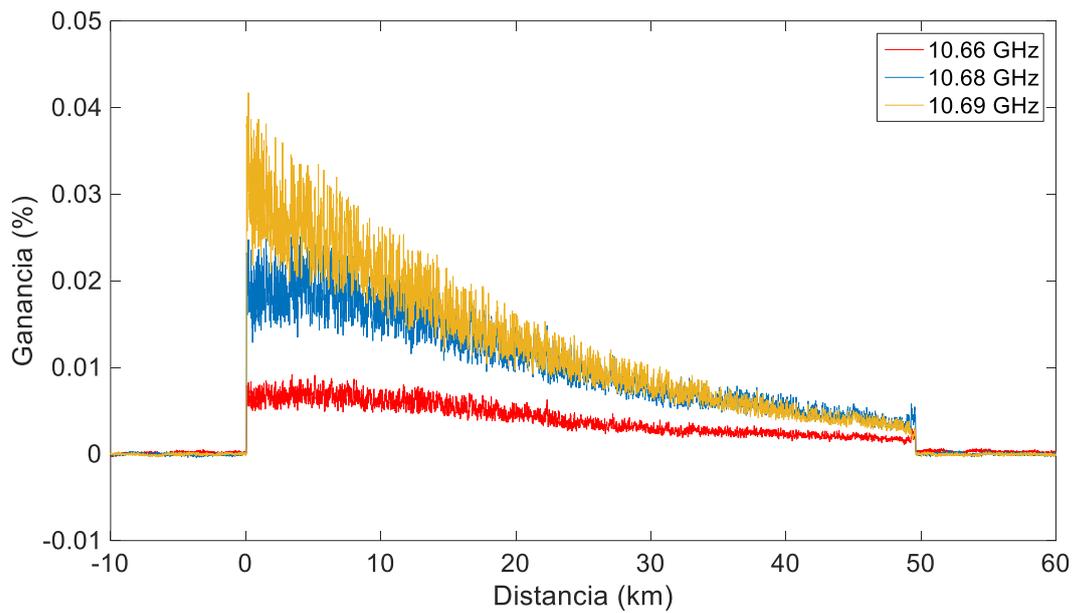


Figura 38: Representación de la ganancia en función de la distancia para las tres frecuencias seleccionadas.

Las tres siguientes figuras muestran la ganancia en función de la frecuencia a una distancia de 1.5 km.

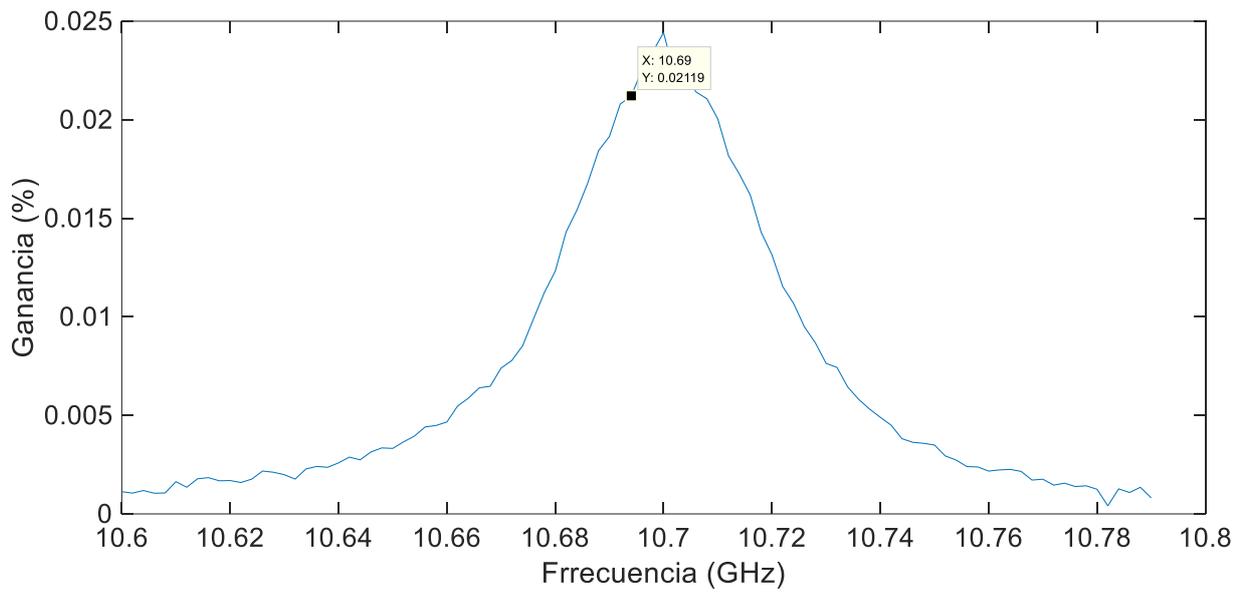


Figura 39: Representación de la ganancia en función de la frecuencia marcando la frecuencia de 10.69 GHz.

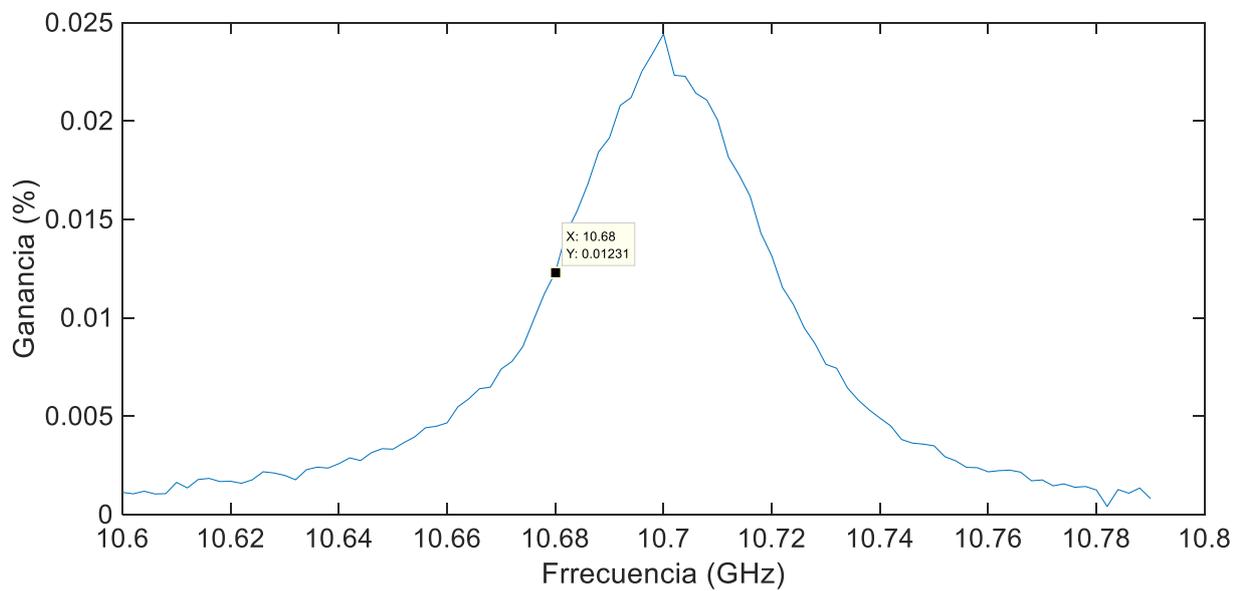


Figura 40: Representación de la ganancia en función de la frecuencia marcando la frecuencia de 10.68 GHz.

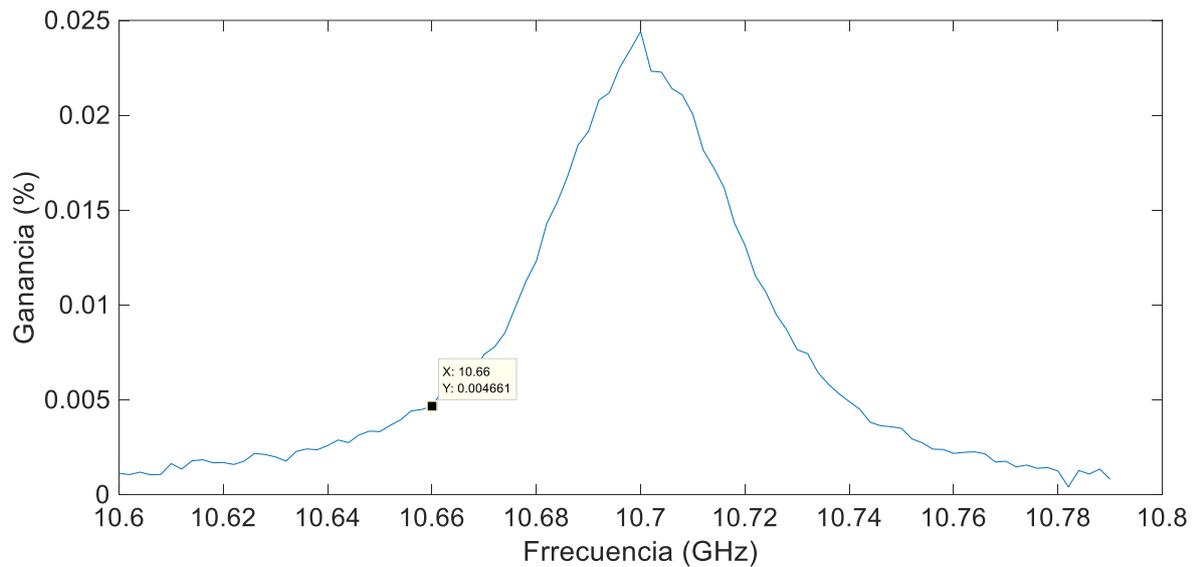


Figura 41: Representación de la ganancia en función de la frecuencia marcando la frecuencia de 10.66 GHz.

Gracias a estas tres representaciones se puede comprobar claramente donde se tiene una ganancia mayor y por tanto centrar la frecuencia a la hora de realizar las medidas. En el caso de la medida anterior la frecuencia central se ajustó a 10.69 GHz, pero se puede comprobar que en 10.7 GHz es donde se encuentra el máximo en ganancia; en realidad, no influirá mucho la selección entre estas dos frecuencias centrales porque el rango frecuencial es de 200 MHz.

## Medida 2

En la siguiente medida se utiliza la misma bobina de fibra por lo que se tendrá la misma distancia (50 km) y el mismo tipo de fibra "Plasma fiber", pero en esta ocasión la anchura del pulso de bombeo se reducirá hasta 10 ns para comprobar en que puede influir este parámetro en la medida. Como en el caso anterior, se muestra la interfaz con los nuevos datos y los resultados del ensayo experimental:

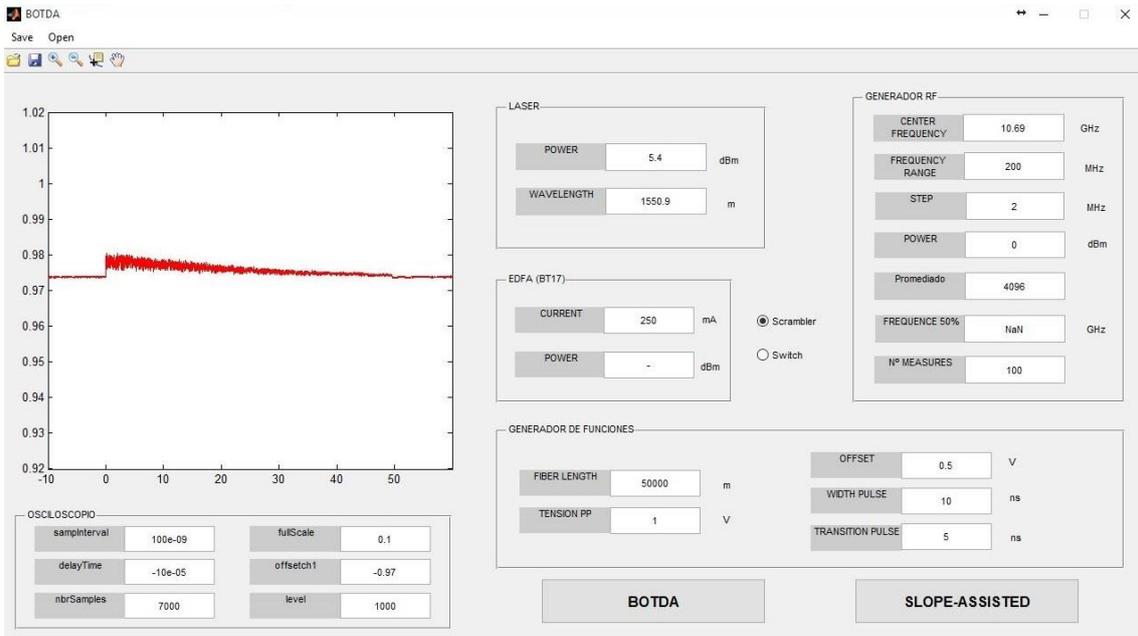


Figura 42: Interfaz con una anchura espectral de 10 ns.

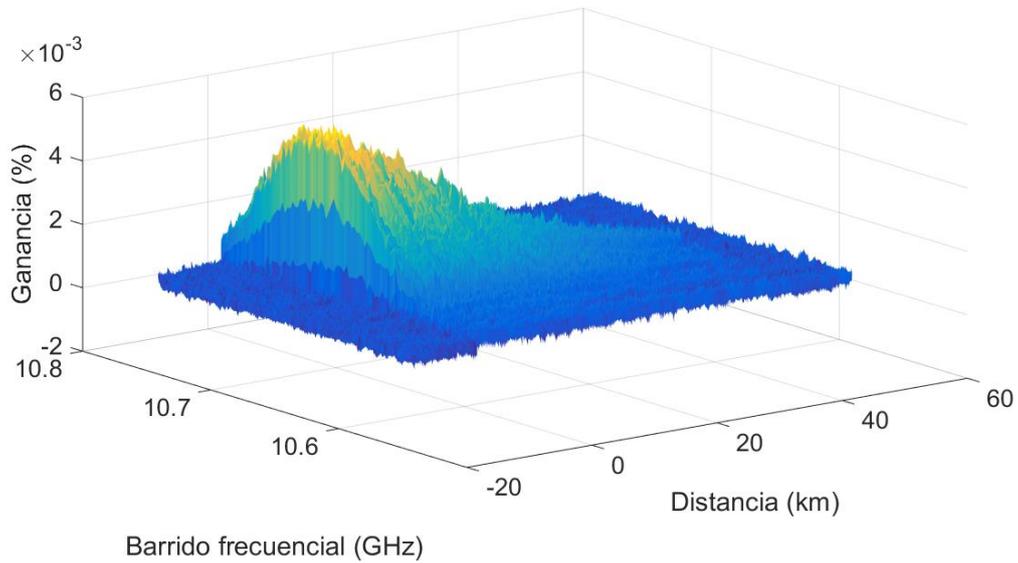


Figura 43: Espectro de ganancia.

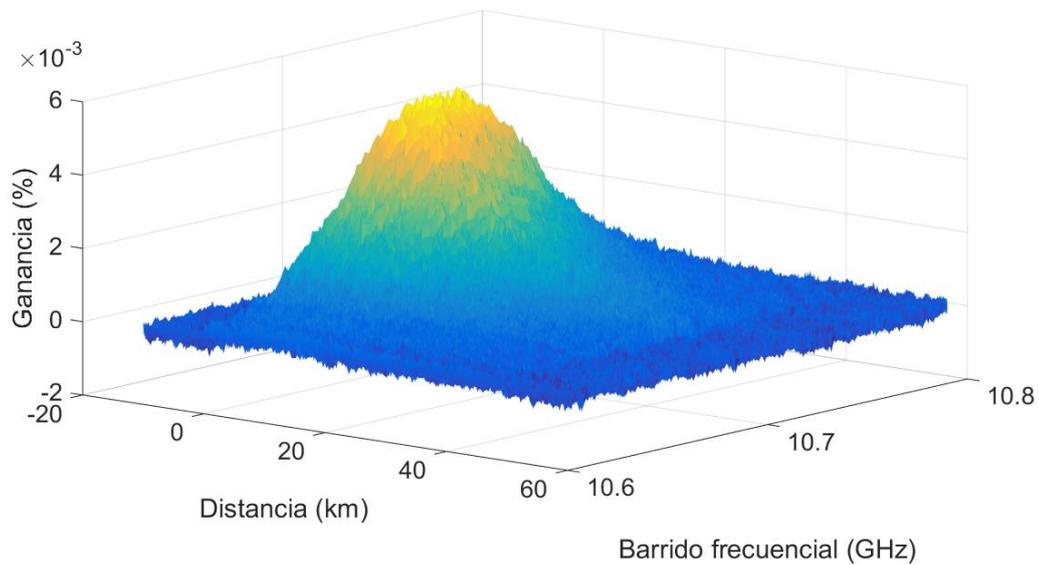


Figura 44: Espectro de ganancia.

Como consecuencia de la reducción de la anchura temporal del pulso de bombeo se puede observar claramente que la señal es más ruidosa. Por un lado, cuanto más estrecho es el pulso menos energía lleva asociada en principio, y más ancha es la *lorentziana* asociada al espectro de ganancia Brillouin y por lo tanto es más costoso realizar las mediciones. Si se quiere mejorar la relación señal a ruido en este caso es necesario aumentar el valor del promediado, aunque de esta manera se aumenta el tiempo de medida, o tratar de ajustar el nivel de potencia de las señales de prueba y bombeo.

### Medida 3

En el tercer test experimental se comprobará el cambio al utilizar dos boninas de fibra diferente. En primer lugar una fibra de tipo "Teralight" de 6 km de longitud y a continuación se ha fusionado a una bobina de 4 km de fibra de tipo "S3MC".

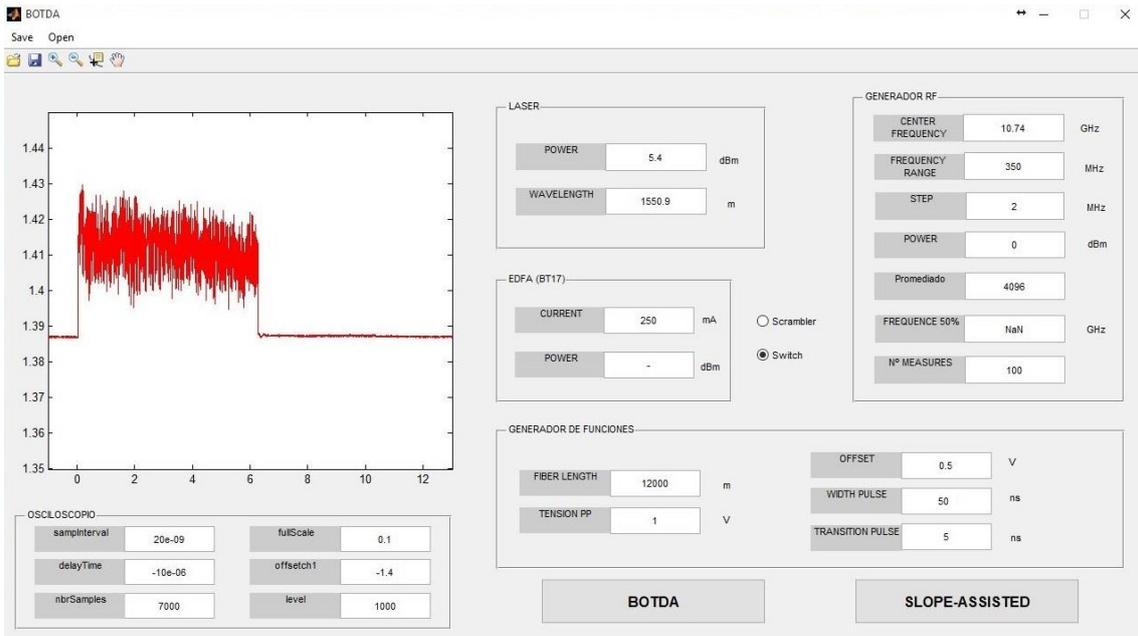


Figura 45: Primera bobina de fibra de tipo "Teralight" de 6 km aproximadamente.

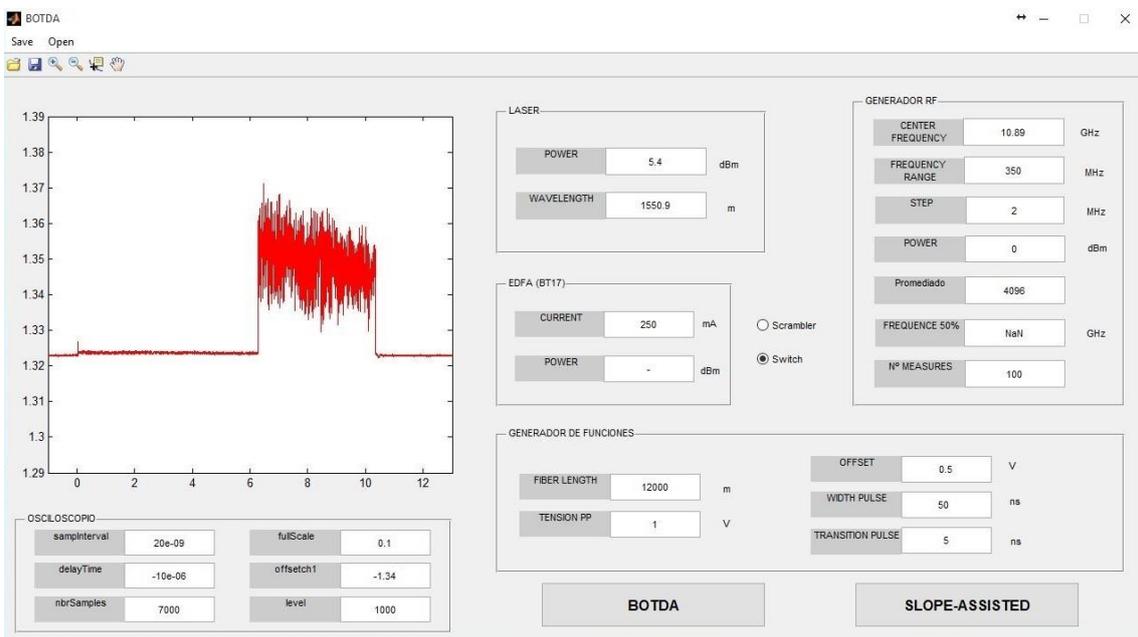


Figura 46: Segunda bobina de fibra tipo "S3MC" de 4 km aproximadamente.

En estas dos imágenes se puede ver la interfaz con los datos pero en el que varía la frecuencia central, ya que al ser fibras de diferentes tipos la frecuencia de Brillouin es diferente. Se observa en la representación del osciloscopio como la primera bobina llega hasta los 6 primeros kilómetros y la segunda de 6 hasta 10 aproximadamente.

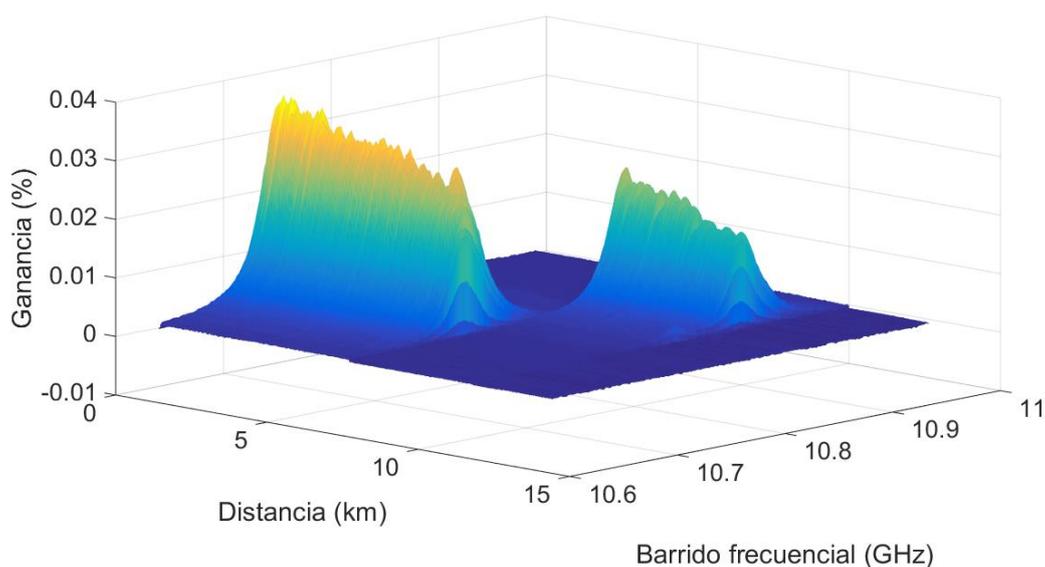


Figura 47: Espectro de ganancia.

Se comprueba en el espectro de ganancia como cada tipo de fibra tiene su ganancia máxima en una zona frecuencial diferente. Obviamente la segunda fibra tiene una ganancia más pequeña ya que la señal se va atenuando durante los primeros 6 km de la primera bobina de fibra óptica.

Al igual que en el primer test experimental, también se va a representar la ganancia en función de la distancia para la frecuencia central de cada tipo de fibra:

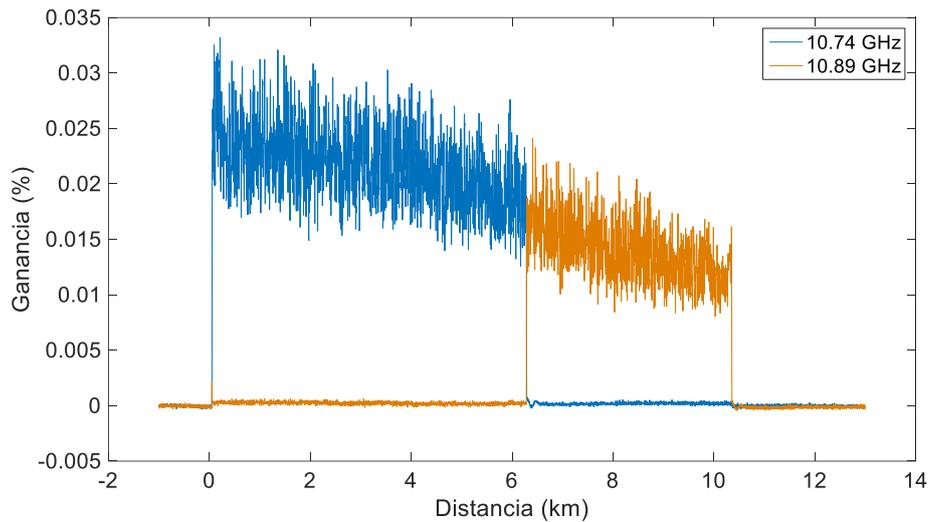


Figura 48: Representación de la ganancia en función de la distancia para cada frecuencia.

#### Medida 4

El último test consiste fusionar dos bobinas de 5 kilómetros cada una, pero en este caso ambas son del mismo tipo de fibra, por lo que su frecuencia de Brillouin será la misma. En la unión entre ambas bobinas introducimos unos 20 metros de fibra aproximadamente en una cámara climática que mantiene la temperatura constante, la temperatura que se ha elegido es 50°C.

En este caso la observación en el osciloscopio es diferente a los anteriores. Se observan dos picos, el primero es debido a la fibra auxiliar, la cual es de otro tipo diferente, que se utiliza para llegar a la zona donde se realiza el cambio de temperatura, debido a que la medida y el cambio de temperatura se realizan en zonas diferentes del laboratorio. El segundo pico corresponde al cambio de temperatura que se puede observar cómo se encuentra aproximadamente a mitad del recorrido de toda la fibra.

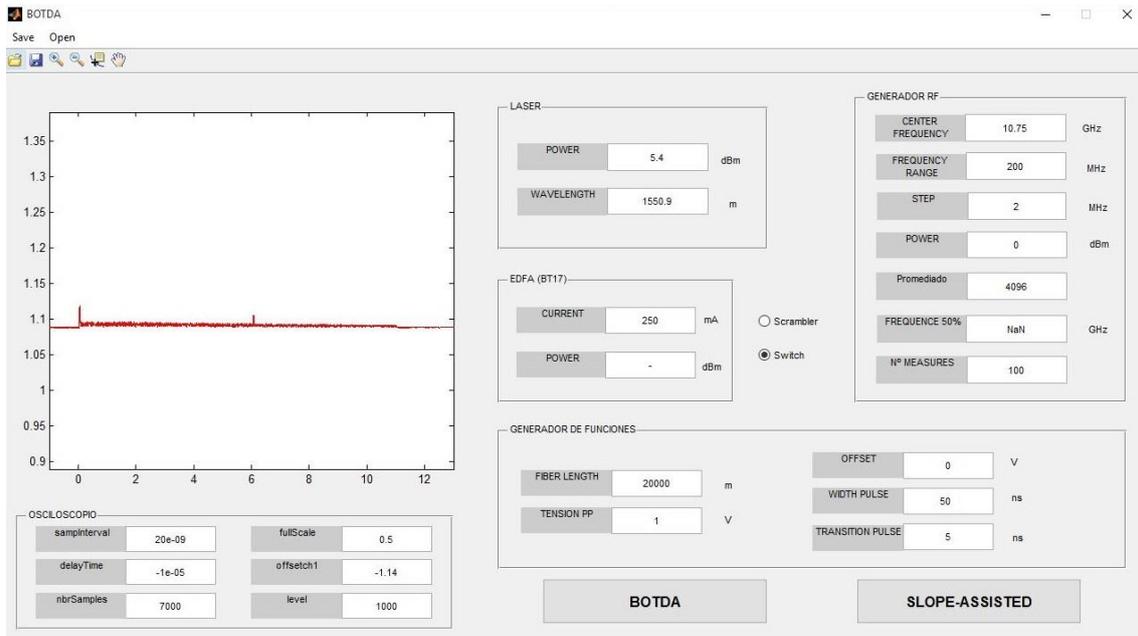


Figura 49: Interfaz en una fibra con cambio de temperatura.

En la representación del espectro de ganancia se ve como a mitad de camino existe un cambio en la frecuencia de Brillouin, la ganancia se desplazada respecto a la frecuencia justo en el punto en el que se ha aumentado la temperatura. También se observa una ganancia desplazada al comienzo de la fibra pero, como se ha explicado antes, esto es debido a que la fibra auxiliar es diferente.

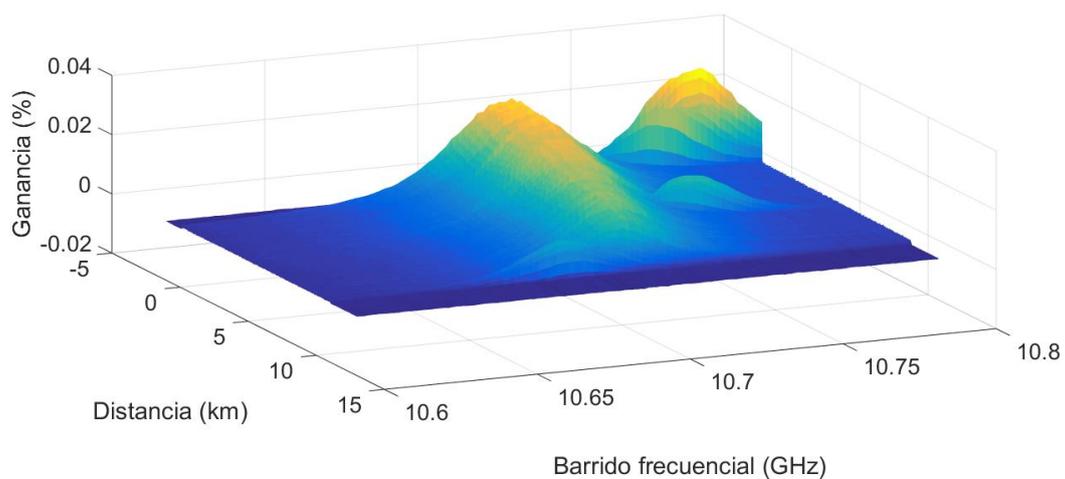


Figura 50: Espectro de ganancia en una fibra con cambio de temperatura.

En la imagen se ve que en la mitad del recorrido la frecuencia de Brillouin ha pasado de 10.71 GHz a 10.74 GHz. Esta variación de 30 MHz se traduce en un cambio de temperatura de 30°C, que es la variación que se ha simulado pues la temperatura ambiente eran 20°C y la temperatura a la que se mantuvo los 20 metros de fibra eran 50°C.

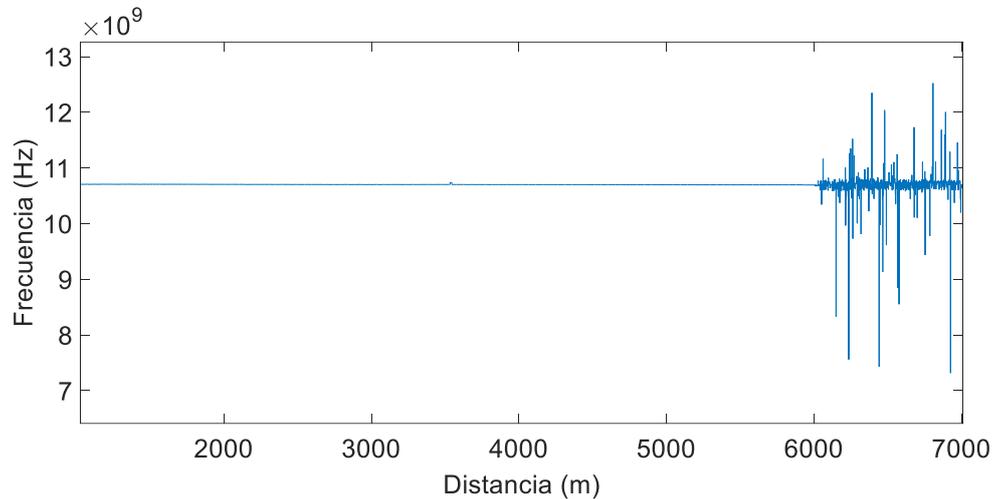


Figura 51: Frecuencia de Brillouin de la fibra en cada punto.

Por último se obtiene la gráfica de la figura 51 tras realizar un ajuste Lorentziano a la gráfica 3D de la anterior imagen. Representa el valor de cada frecuencia en función de la distancia en metros. Esta frecuencia se corresponde luego con una determinada temperatura o una determinada deformación.

## **6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS**

### **6.1 Conclusiones**

A través de la realización de este trabajo fin de grado se ha desarrollado la automatización de un sistema basado en la dispersión estimulada de Brillouin para la medida de la deformación y la temperatura de forma distribuida a lo largo de un canal de fibra óptica.

Esta automatización se ha realizado gracias a la herramienta de software matemático Matlab, se ha explicado detalladamente la realización de la interfaz así como su comunicación con la instrumentación necesaria para la realización de medidas con el montaje BOTDA. La interfaz, además de facilitar la inserción de datos, también representa gráficamente los resultados y guarda en el ordenador los datos obtenidos a través de las medidas para facilitar su uso en cualquier momento.

Además, a lo largo del proyecto se ha explicado extensamente el funcionamiento teórico de la dispersión de Brillouin estimulada y como gracias a sus características es posible obtener un sensor distribuido mediante fibra óptica para detectar los cambios de temperatura y deformación. También se ha descrito el montaje BOTDA que se encuentra en el laboratorio para la realización de pruebas en este campo y sobre el que se utilizará la automatización realizada.

Por último, se han realizado una serie de medidas en el laboratorio para comprobar que todo funciona correctamente. Se han realizado cuatro medidas diferentes, en las dos primeras utilizando la misma bobina de fibra por lo que tanto el tamaño como la frecuencia de Brillouin no varía pero lo que cambia en este caso es la anchura espectral. En ambas se muestra el espectro de ganancia, comprobando que con una anchura espectral menor es más ruidoso. En la siguiente simulación se fusionan dos bobinas de fibra de diferente tamaño y tipo, y se comprueban los cambios esperados en los resultados, obteniendo las frecuencias de Brillouin correspondientes. Para terminar, se ha provocado un cambio de temperatura en un tramo de la fibra y se ha verificado cómo es posible detectarlo, sabiendo su posición e incluso la variación de temperatura de manera cuantitativa de una forma distribuida y en tiempo real.

## 6.2 Líneas futuras

Mientras se realizaba el proyecto han aparecido diferentes mejoras que pueden ser añadidas en un futuro:

- Control del filtro de salida dependiendo de la temperatura

En la onda de prueba de un sistema BOTDA convencional la portadora laser se modula a la frecuencia de Brillouin, cerca de los 11GHz, por lo que se crean dos bandas laterales alrededor de la portadora. Éstas pueden trabajar en régimen de ganancia con el pulso de bombeo en el caso de que este ceda energía la banda lateral, o en régimen de vaciamiento en el caso contrario.

El filtro a la salida, (se trata de una red de difracción de Bragg) o debe ser muy estrecho, y debido a que depende de la temperatura, puede que filtre a una frecuencia diferente con cambios de la temperatura ambiente. Esto podría ser perjudicial hasta el caso de que incluso se podría filtrar la señal a detectar.

Por esta razón sería interesante añadir un circuito que establezca un control de temperatura sobre el FBG, podría tratarse de un circuito con un Peltier, que es un dispositivo que cuando se le aplica un voltaje crea una diferencia de temperatura, con el fin de mantener la temperatura controlada. Obviamente este dispositivo debería controlarse a través de la interfaz de control descrita en el proyecto, donde el parámetro a controlar sería la temperatura o la corriente.

- Control de dispositivos adicionales

En este tipo de medidas siempre se está intentando mejorar los resultados, por lo que el número o el tipo de dispositivos van cambiando. Actualmente se ha adquirido un nuevo amplificador EDFA y sería interesante añadirlo a la interfaz para su automatización.

- Valores de inicialización del programa

Como ya se ha explicado anteriormente, después de realizar las medidas el programa guarda los valores utilizados en un fichero .mat para poder acceder a los resultados en cualquier momento sin necesidad de volver a realizar el test experimental. La interfaz se inicializa con unos valores típicos incluidos en la programación, pero sería interesante dar la opción de que el programa se inicialice con los valores utilizados en la última medición, ya que dichos

valores están guardados en un archivo y se puede acceder a ellos de manera sencilla.

- Realización de conjuntos de medidas

Una característica de gran utilidad sería la posibilidad de realizar grupos de medidas en las cuales se variara algún parámetro determinado. Por ejemplo, programar 10 medidas seguidas en las que se varía el paso del barrido frecuencial entre dos valores determinados, 2 y 20 MHz, por poner un ejemplo. Además de esto, se añadiría la opción de controlar el tiempo entre medidas, es decir, poder realizar una medida cada un cierto número de minutos seleccionados en la interfaz.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. Luc Thévenaz, *Brillouin distributed time-domain sensing in optical fibers: state of the art and perspectives*, in *Frontiers of Optoelectronics in China*. 2010.
2. Aydin Yeniay, Jean-Marc Delavaux and Jean Toulouse, *Spontaneous and stimulated Brillouin scattering gain spectra in optical fibers*, in *Journal of lightwave technology*. 2002.
3. EP Ippen and RH Stolen, *Stimulated Brillouin scattering in optical fibers*, in *Applied Physics Letters*. 1972.
4. RE Newnham, V Sundar, R Yimnirun, J Su and QM Zhang, *Electrostriction: nonlinear electromechanical coupling in solid dielectrics*, in *The Journal of Physical Chemistry B*. 1997.
5. Tsuneo Horiguchi and Mitsuhiro Tateda, *BOTDA-Non destructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory*, in *Journal of lightwave technology*. 1989.
6. Luis Sanchez, José Antonio Galache, Veronica Gutierrez, Jose Manuel Hernandez, Jesús Bernat, Alex Gluhak and Tomás Garcia, *Smartsantander: The meeting point between future internet research and experimentation and the smart cities*, in *Future Network & Mobile Summit (FutureNetw)*, 2011. IEEE, 2011.
7. *Future Internet Assembly*. Available from: <http://www.future-internet.eu/home/future-internet-assembly/budapest-may-2011.html>.
8. Gerd Keiser, *Optical fiber communications*. McGraw-Hill New York, 1983.
9. Diego F Grosz, *Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica de Alta Capacidad*. Departamento de Física y Matemática, 2004.
10. *Fiber Optic Attenuation*. Available from: <http://www.salonelectronix.com/fiber-optic-attenuation.htm>.
11. Zujie Fang, Ken Chin, Ronghui Qu and Haiwen Cai, *Fundamentals of optical fiber sensors*. John Wiley & Sons, 2012.
12. Raman Kashyap, *Fiber bragg gratings*. Academic press, 1999.
13. Daniele Inaudi and Branko Glisic, *Distributed fiber optic strain and temperature sensing for structural health monitoring*, in *Proceedings of the IABMAS*. 2006.
14. Andrew T Young, *Rayleigh scattering*, in *Physics Today*. 1982.
15. Chandrasekhara Venkata Raman, *A new radiation*, in *Indian Journal of physics*. 1928.
16. *Raman fluorescencespec*. Available from: <http://www.slideshare.net/ArchaDave/raman-fluorescencespec>.
17. Toshio Kurashima, Tsuneo Horiguchi and Mitsuhiro Tateda, *Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers*, in *Optics Letters*. 1990.
18. Toshio Kurashima, Tsuneo Horiguchi, Hisashi Izumita, Shin-ichi Furukawa and Yahei Koyamada, *Brillouin optical-fiber time domain reflectometry*, in *IEICE transactions on communications*. 1993.

19. B Shi, HAIBO Sui, J Liu and D Zhang, *The BOTDR-based distributed monitoring system for slope engineering*, in *Proceedings of 10th IAEG International Congress, UK, No. p.* 2006.
20. Universidad de Zaragoza, *Influencia de la forma del pulso de bombeo en la resolución de sensores distribuidos basados en dispersión estimulada de Brillouin en fibra óptica.*
21. Tsuneo Horiguchi, Toshio Kurashima and Mitsuhiro Tateda, *A technique to measure distributed strain in optical fibers*, in *Photonics Technology Letters, IEEE.* 1990.
22. Marc Nikles, Luc Thevenaz and Philippe Robert, *Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers*, in *Lightwave Technology, Journal of.* 1997.
23. Anthony W Brown, Bruce G Colpitts and Kellie Brown, *Distributed sensor based on dark-pulse Brillouin scattering*, in *Photonics Technology Letters, IEEE.* 2005.
24. Seok-Beom Cho, Jung-Ju Lee and Il-Bum Kwon, *Strain event detection using a double-pulse technique of a Brillouin scattering-based distributed optical fiber sensor.* *Optics express*, 2004. 12(18): p. 4339-4346.
25. Luc Thevenaz and Stella Foaleng Mafang. *Distributed fiber sensing using Brillouin echoes-art. no. 70043N.* in *19Th International Conference On Optical Fibre Sensors, Pts 1 And 2.* 2008. Spie-Int Soc Optical Engineering, Po Box 10, Bellingham, Wa 98227-0010 Usa.
26. Jing Yang, Changyuan Yu, Zhihao Chen, Junhong Ng and Xiufeng Yang. *Suppression of polarization sensitivity in BOTDA fiber distributed sensing system.* in *19th International Conference on Optical Fibre Sensors.* 2008. International Society for Optics and Photonics.
27. Romeo Bernini, Aldo Minardo and Luigi Zeni, *Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering.* *Optics letters*, 2009. 34(17): p. 2613-2615.
28. Ji Ho Jeong, Kwanil Lee, Kwang Yong Song, Je-Myung Jeong and Sang Bae Lee, *Differential measurement scheme for Brillouin optical correlation domain analysis*, in *Optics express.* 2012.
29. Kwang Yong Song, Zuyuan He and Kazuo Hotate, *Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis*, in *Optics letters.* 2006.
30. Dieter Garus, Torsten Gogolla, Katerina Krebber and Frank Schliep, *Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis for distributed temperature and strain measurements*, in *Journal of lightwave technology.* 1997.
31. Anthony J Caristi, *IEEE-488, general purpose instrumentation bus manual.* Academic Press, Inc., 1990.
32. Desmond J Higham and Nicholas J Higham, *MATLAB guide.* Siam, 2005.