



***Mejoras en sensores distribuidos
basados en dispersión Brillouin
estimulada en fibra óptica***

Memoria trabajo fin de máster realizada por

Haritz Iribas Pardo

Directores

Dr. Mikel Sagues García

Dr. Alayn Loayssa Lara

Pamplona - 29 de Junio de 2015

RESUMEN

El presente trabajo fin de máster se ha llevado a cabo con el objetivo de desarrollar un sistema sensor de fibra óptica distribuido, capaz de monitorizar la deformación unitaria y variaciones de temperatura, basándose en el efecto de dispersión Brillouin estimulada en fibra óptica. Mejorando y solventando algunas de las limitaciones que manifiestan estos sensores hoy en día.

Dado el auge actual en el que se encuentran los sensores Brillouin ópticos basados en el análisis del dominio del tiempo, el trabajo se ha centrado en ese tipo de sensores. Para ello, se ha realizado una revisión bibliográfica del estado del arte, obteniendo una visión más detallada de este tipo de sensores. Tras realizar dicha revisión, se ha concluido que esta tecnología es muy interesante para la realización de sensores de monitorización de grandes estructuras, en las cuales sean de interés las medidas de deformación unitaria y temperatura.

En particular, los sensores Brillouin basados en el dominio del tiempo están en plena evolución, incluso ofrecen la posibilidad de realizar medidas a altas frecuencias de muestreo, que era la carencia de sensores anteriores. Sin embargo, cabe destacar que actualmente, las soluciones comerciales de este tipo de sensores son muy costosas y complejas, debido a los numerosos dispositivos que son necesarios para su correcto funcionamiento. Además, cuentan con algunas limitaciones como el efecto de la polarización del campo óptico en la medida, la resolución espacial alcanzada, la precisión de medida o el rango dinámico de la misma.

Una vez realizada la revisión del estado del arte, se ha procedido a investigar novedosas técnicas para paliar algunos de los defectos de estos sensores. Una de las mejoras propuestas, se basa en aplicar una novedosa técnica para obtener todas las señales ópticas necesarias para este tipo de sensor mediante una única fuente óptica. De este modo, se simplifica el esquema de estos sensores, reduciendo el número de componentes necesarios para su desarrollo, de manera que se obtiene una reducción significativa en el coste final del sensor.

Por otro lado, y con el objetivo de mejorar una de las principales limitaciones por las que se ven afectadas este tipo de sensor para medidas de larga distancia, se ha propuesto y se ha demostrado, por primera vez, un sistema de medida capaz de relajar los estrictos requerimientos de relación de extinción del pulso. Aplicando dicha técnica, se obtiene una mejora en la precisión de los sensores, sin suponer ello un incremento en el coste del sensor.

En todo momento, las derivaciones teóricas de los esquemas de mejora propuestos han sido contrastadas con demostraciones experimentales en el laboratorio. Además, cabe destacar el hecho de que los sistemas propuestos han obtenido excelentes resultados, mejorando los sistemas actuales.

ÍNDICE

0.	INTRODUCCIÓN AL TRABAJO FIN DE MÁSTER	9
1.	SENSOR BRILLOUIN DISTRIBUIDO: BOTDA.....	13
1.1.	Fenómeno de dispersión Brillouin estimulada en fibra óptica.	13
1.1.1.	Introducción.....	13
1.1.2.	Fundamentos SBS	15
1.1.3.	Dependencia de SBS con la temperatura y la deformación unitaria	17
1.2.	Análisis Brillouin óptico en el dominio del tiempo.....	19
1.2.1.	Introducción.....	19
1.2.2.	Principio general de los sistemas BOTDA	19
1.3.	Estado del arte de los sensores BOTDA.....	23
1.3.1.	Introducción a los sensores BOTDA.....	23
1.3.2.	Montajes experimentales mejorados	28
1.3.3.	Modificaciones de la técnica BOTDA para alta resolución espacial.	35
1.3.4.	Sensores BOTDA comerciales	38
1.3.5.	Conclusiones.....	39
2.	MÉTODO SIMPLIFICADO DE SENSOR DISTRIBUIDO BRILLOUIN BASADO EN EL FILTRADO ÓPTICO PASIVO.....	41
2.1.	Introducción	41
2.2.	Fundamento teórico	42
2.3.	Implementación experimental.....	45
2.3.1.	Implementación mediante el uso de un MZ-EOM	45
2.3.2.	Implementación mediante el uso de un EAM	46
2.4.	Resultados experimentales.....	47
2.4.1.	Resultado obtenidos en el montaje con un MZ-EOM.....	47

2.4.2. Resultado obtenidos en el montaje con un EAM	50
2.5. Conclusión	52
3. MEJORAS REALIZADAS EN CUANTO A LA RELACIÓN DE EXTINCIÓN DE LOS PULSOS EN SENSORES BOTDA DE LARGA DISTANCIA MEDIANTE DITHERING DE LA FUENTE ÓPTICA.....	54
3.1. Introducción	54
3.2. Fundamento teórico	55
3.3. Implementación experimental.....	59
3.4. Resultados experimentales.....	61
3.5. Conclusión	64
4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	66
4.1. Conclusiones y contribuciones	66
4.2. Líneas abiertas	68
BIBLIOGRAFÍA	70

0. INTRODUCCIÓN AL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Motivación del trabajo

Los sensores ópticos han sido una de las áreas de investigación más importantes durante las dos últimas décadas en el campo de la fotónica. Dentro de los sensores ópticos, cabe destacar la capacidad de monitorizar largas distancias que ofrecen los sensores distribuidos, gracias al empleo de la tecnología en fibra óptica. De los diferentes sensores existentes, los basados en el efecto no lineal de dispersión de Brillouin estimulada son de gran interés, dado que son capaces de medir temperatura y deformación unitaria simultáneamente [Agr01]. Dentro de este tipo de sensores se puede hacer una clasificación en función del dominio que se emplee para obtener la medida. Siendo los sensores Brillouin basados en el dominio del tiempo (BOTDA, Brillouin optical time domain analysis), los sensores más estudiados y evolucionados.

Los sensores BOTDA pueden ser utilizados para aplicaciones de monitorización de salud estructural, ya que son capaces de realizar medidas de gran precisión de deformación estructural y de variación de temperatura para grandes estructuras. Lo cual los hace particularmente atractivos para diversos sectores industriales, como pueden ser: monitorización de gaseoductos y oleoductos, análisis estructural de puentes y túneles, análisis de la situación estructural de las vías del tren, así como otras muchas aplicaciones para la monitorización de la salud estructural de grandes infraestructuras. Sin embargo, todavía existen diversas limitaciones tanto de coste económico, por el gran número de componentes ópticos que necesitan, como en su funcionamiento, debido a la complejidad del sistema resultante.

En este contexto, diversos grupos de investigación así como diferentes corporaciones, están realizando un importante esfuerzo investigador. Enfocado tanto a la mejora de este tipo de sensores de medida distribuida, indispensables en un gran número de aplicaciones, como a la simplificación de los mismos, lo cual conllevaría a una importante reducción de los costes.

Concretamente, este trabajo fin de máster se engloba en estas líneas de investigación para contribuir en la evolución de los sensores BOTDA.

Objetivos del trabajo

El objetivo fundamental de este trabajo fin de máster es el desarrollo de nuevas tecnologías de medida en sensores Brillouin distribuidos en el dominio del tiempo que solventen algunas limitaciones que se presentan en los sistemas actuales. Concretamente se trabajará en dos aspectos a mejorar, por un lado se buscará simplificar el sistema disminuyendo el número de elementos utilizados, de manera que se reduzca el coste total del sensor. Y por el otro se buscará mejorar las prestaciones en cuanto al estricto requerimiento de relación de extinción de la señal necesaria para medidas de larga distancia.

Para la realización de este trabajo fin de máster, se han seguido una serie de pautas y líneas de trabajo previas para facilitar el cumplimiento del objetivo fundamental del mismo así como de cada uno de los objetivos derivados de este:

- Revisión bibliográfica del estado del arte de los sensores BOTDA. A partir de la cual se determinará una vía de posibles soluciones y mejoras para los objetivos marcados.
- Investigación de técnicas para la obtención de las dos señales ópticas presentes en los sensores BOTDA mediante una única fuente óptica.
- Investigación de técnicas para la mejora en cuanto a relación de extinción de la señal del pulso óptico para medidas de larga distancia.
- Aplicar las mejoras investigadas a sistemas Brillouin y caracterizar el correcto funcionamiento del sensor. Verificando las mejoras aportadas mediante el análisis de los resultados obtenidos en la realización de medidas experimentales.

Estructura de la memoria

La memoria consta de 4 capítulos diferentes, en los se desarrollan los objetivos establecidos en el apartado anterior:

Capítulo 1

En el capítulo 1 se realizará una introducción al efecto de dispersión de Brillouin estimulado (SBS, stimulated Brillouin scattering), fenómeno en el que se basan los sensores Brillouin. A continuación se introducirán los sistemas Brillouin en el dominio del tiempo, donde se explicará la técnica empleada convencionalmente de manera que se adquieran los conceptos necesarios para la perfecta comprensión de los sistemas Brillouin basados en el dominio del tiempo. Finalmente se hará un estudio del estado del arte de los mismos, para obtener una visión general del estado de la investigación en la materia.

Capítulo 2

En el capítulo 2, se presentará el trabajo realizado para simplificar el sensor Brillouin, de manera que permita obtener todas las señales ópticas desde una única fuente óptica. En primer lugar se hará una breve introducción al problema en la que se añadirá un estado del arte concreto de la investigación a realizar. A continuación se presentará la técnica empleada para este estudio y finalmente se mostrarán tanto una demostración experimental del sistema como la presentación y análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 3

En el capítulo 3, se presentará el trabajo realizado para mejorar los requisitos en cuanto a la relación de extinción de la señal del pulso en los sistemas Brillouin para medidas de larga distancia. En primer lugar se hará una breve introducción al problema en la que se analizará el estado del arte de la investigación a realizar. A continuación se presentará la técnica empleada para este estudio y finalmente se mostrarán tanto una demostración experimental del sistema como la presentación y análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 4

Para concluir, se presentarán las conclusiones generales obtenidas una vez realizado el trabajo final de máster, y se expondrán las líneas de investigación a desarrollar en el futuro, gracias al conocimiento adquirido durante la realización de este trabajo final de máster.

1. SENSOR BRILLOUIN DISTRIBUIDO: BOTDA

El presente trabajo final de máster se centra en la investigación de sensores Brillouin en el dominio del tiempo. Dichos sensores están basados en la dispersión Brillouin estimulada, por lo que en primer lugar se explicará dicho fenómeno en fibra óptica. Una vez mostrado, se continuará con el principio de funcionamiento de estos sensores y se realizará un estudio del estado del arte de los mismos.

1.1. Fenómeno de dispersión Brillouin estimulada en fibra óptica.

1.1.1. Introducción

Los fenómenos de scattering espontáneo se producen cuando una onda electromagnética a frecuencias ópticas atraviesa un material. El resultado es una dispersión de la luz debido a variaciones del índice de refracción causadas por excitaciones elementales del medio [CS72]. Se distinguen tres fenómenos de scattering diferentes, que se denominan Rayleigh cuando la luz interacciona con inhomogeneidades, Brillouin cuando la interacción es con ondas acústicas en el material y Raman si esta es debida a vibraciones moleculares.

Estos tres fenómenos dispersan una pequeña fracción de la luz incidente, sin embargo, estos fenómenos que ocurren de manera espontánea, pueden sufrir estimulación en presencia de altas intensidades ópticas con fuentes de pequeña divergencia y alta coherencia, dando lugar a una amplificación exponencial de la luz dispersada [KM72].

La dispersión Brillouin es fácilmente estimulable ya que comienza a ser significativa a partir de bajas potencias, del orden de los mW, en fibras de unos pocos kilómetros de longitud. El efecto resultante del SBS es la generación de ganancia para una onda de Stokes que se propaga en sentido opuesto a la del bombeo, que a su vez se atenúa. Otro aspecto a destacar es lo selectivo de esta ganancia y atenuación dada la pequeña anchura de línea del espectro.

Los efectos ópticos no lineales han adquirido mayor importancia debido a la propia evolución de los sistemas de comunicación. Esto es debido al hecho de emplear láseres monomodo con menor anchura de línea, así como un aumento en la distancia y mayor potencia inyectada a la fibra, se favorece en gran medida la aparición del efecto SBS, que degrada las prestaciones de los sistemas introduciendo ruido y atenuación adicional. Sin embargo, a pesar de estos potenciales efectos nocivos comentados, los efectos no lineales en fibra óptica se pueden utilizar de manera provechosa en multitud de aplicaciones: como conversión en longitud de onda, conjugadores ópticos, láseres, amplificadores ópticos, moduladores electro-ópticos, sensores, etc.

Como se explicará posteriormente, existe una dependencia entre el efecto SBS con la temperatura y la deformación unitaria. Lo que hace que los sensores basados en el efecto SBS sean de gran interés para un gran número de aplicaciones destinadas a medir temperatura y deformación unitaria.

Entre los sensores que hacen uso de la dispersión Brillouin, se pueden definir cuatro familias de sensores en función del método que desempeñen para obtener la medida de temperatura y/o deformación unitaria a lo largo de la fibra óptica (fiber under test, FUT):

- BOFDA (Brillouin optical frequency domain analysis)
- BOCDA (Brillouin optical correlation domain analysis)
- BOTDA (Brillouin optical time domain analysis)
- BOFDR (Brillouin optical frequency domain reflectometer)

De entre ellos, el sensor BOTDA es el sensor distribuido más usado y evolucionado. Sensor en el que se centrará este trabajo fin de máster.

1.1.2. Fundamentos SBS

El fenómeno de dispersión Brillouin estimulada es la interacción no lineal entre una onda de bombeo, una onda de Stokes y una onda acústica. La onda de bombeo y la onda de Stokes se propagan en la fibra óptica en sentido opuesto, generando la primera una onda acústica a través del proceso de electro-estricción (variación de la densidad de un cuerpo cuando está sometido a un campo eléctrico). A su vez, esta onda acústica produce una perturbación periódica en el índice de refracción, debido a la dependencia de este con la densidad, que refleja la onda de bombeo por difracción Bragg. La luz reflejada sufre una disminución de frecuencia debido al desplazamiento Doppler asociado a la velocidad de la onda acústica en el medio. Produciendo una transferencia de potencia entre las ondas de bombeo y de Stokes que, simultáneamente, potencia la onda acústica, generándose una estimulación del proceso. El resultado de esta interacción se convierte en amplificación para la onda de Stokes y disminución de potencia para la onda de bombeo, a medida que se propagan por la fibra óptica.

Por otro lado, desde el punto de vista de la mecánica cuántica, el proceso de dispersión Brillouin puede explicarse como la aniquilación de un fotón del bombeo que crea simultáneamente un fotón de Stokes y un fonón acústico. Estas tres ondas deben cumplir la condición de conservación de la energía que relaciona sus frecuencias ópticas

$$\omega_A = \omega_P - \omega_S \quad (1.1)$$

así como la conservación del momento, que implica máxima transferencia de potencia cuando la desadaptación de los vectores de onda es cero

$$k_A = k_P - k_S \quad (1.2)$$

Los subíndices P, S y A se refieren, respectivamente, al bombeo, onda de Stokes y onda acústica. Estas relaciones tienen dos importantes consecuencias:

1. La onda de Stokes sólo experimenta ganancia Brillouin cuando la onda de bombeo y la de Stokes se propagan en sentidos opuestos.

2. El desplazamiento en frecuencia de la onda de Stokes viene dado por:

$$v_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2nv_A}{\lambda_p} \quad (1.3)$$

donde λ_p es la longitud de onda del bombeo, v_A es la velocidad de la onda acústica en la fibra óptica y n es el índice de refracción.

En fibras ópticas de sílice, el desplazamiento en frecuencia Brillouin (Brillouin frequency shift, BFS) es del orden de los $v_B = 11$ GHz a la longitud de onda $\lambda_p = 1550$ nm.

La onda de Stoke a partir de la cual se genera la interacción SBS puede ser una señal óptica externa que se inyecta la fibra, o ser generada internamente como resultado de la dispersión de Brillouin espontánea. Este efecto es consecuencia de la difracción de la onda de bombeo inducida por ondas acústicas excitadas térmicamente, y se produce a lo largo de toda la fibra [CS72].

El espectro de ganancia Brillouin (Brillouin gain spectrum, BGS) se caracteriza por tres parámetros: el desplazamiento Brillouin v_B , la anchura espectral Δv_B y el coeficiente de ganancia Brillouin g_B . La forma del espectro Brillouin (1.4) tiene una dependencia Lorentziana si la anchura de línea de bombeo es despreciable frente a la anchura de línea del SBS.

$$H(\Delta v) = g_B \frac{\left(\frac{\Delta v_B}{2}\right)^2}{\Delta v + \left(\frac{\Delta v_B}{2}\right)^2} \quad (1.4)$$

Siendo equivalente en pérdidas para la amplificación de la onda de bombeo. El valor de pico de la ganancia de Brillouin viene dado por:

$$g_B = \frac{2\pi n^7 p_{12}^2 \gamma}{c \lambda_p^2 \rho_0 v_A \Delta v_B} \quad (1.5)$$

donde p_{12} es el coeficiente elasto-óptico longitudinal, ρ_0 la densidad del material, c la velocidad de la luz en el vacío, λ_p la longitud de onda de bombeo y γ es un factor que toma valores de 0 a 1, dependiendo de la orientación relativa de la polarización del bombeo y la onda de Stokes. En el caso que el estado de polarización (state of polarization, SOP) de ambas ondas sea el mismo $\gamma = 1$, la g_B es máxima debido a máxima transferencia de potencia entre la onda de bombeo y Stokes. Sin embargo, si una de ellas es ortogonal a la otra, la transferencia de energía es nula resultando en un nulo en el espectro de ganancia Brillouin.

Por otro lado, si la anchura de línea del bombeo no es despreciable frente a la anchura de línea del SBS, el espectro de ganancia Brillouin efectivo, $H'(\Delta\nu)$, se puede encontrar mediante la convolución del espectro de ganancia Brillouin intrínseco de la fibra $H(\Delta\nu)$ y la potencia de bombeo $I_p(\Delta\nu)$:

$$H'(\Delta\nu) = H(\Delta\nu) \otimes I_p(\Delta\nu) \quad (1.6)$$

El símbolo \otimes representa la operación de convolución. La consecuencia es que el coeficiente de ganancia Brillouin de pico se reduce un factor dado por la relación entre las anchuras de línea de los dos espectros.

$$g'_B = g_B \frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_B + \Delta\nu_p} \quad (1.7)$$

donde $\Delta\nu_p$ es la anchura espectral del bombeo a la mitad del máximo (full width half maximum, FWHM).

1.1.3. Dependencia de SBS con la temperatura y la deformación unitaria

La naturaleza del SBS es muy apropiada para un sensor de temperatura y deformación unitaria. Esto se debe a la dependencia lineal de la temperatura T con el índice de refracción n y de este último con el desplazamiento en frecuencia Brillouin ν_B , (ver Ec. 1.3), obteniendo que $T \propto n \propto \nu_B$. Análogamente, existe una dependencia lineal entre la deformación unitaria ϵ y la velocidad acústica en la fibra v_A , esta última relacionada con

el desplazamiento en frecuencia Brillouin ν_B por la Ec. 1.3, obteniendo igualmente que $\epsilon \propto \nu_A \propto \nu_B$. Por tanto, se puede expresar como:

$$\nu_B(T, \epsilon) = \nu_B(T, 0)[1 + C_S\epsilon + C_T(T - T_0)] \quad (1.8)$$

siendo T_0 la temperatura de referencia, C_T y C_S las constantes que relacionan los cambios de temperatura y deformación unitaria respectivamente con el desplazamiento Brillouin. En el caso de una fibra monomodo estándar a 1550 nm, el valor de C_T y C_S es 1.2 MHz/°C y 0.05 MHz/ $\mu\epsilon$ respectivamente. A su vez, la anchura espectral de Brillouin y la ganancia también son dependientes de estos parámetros. La anchura espectral $\Delta\nu_B$, disminuye con la temperatura, y se debe a la menor absorción del fonón acústico con el aumento de la temperatura [NTR97]. La ganancia Brillouin también cambia, sin embargo el producto $g_B \cdot \Delta\nu_B$ se mantiene constante. El aumento de la deformación unitaria deriva en menor ganancia Brillouin, y se ha relacionado con los cambios que sufre la densidad del material, que como se ha visto en (1.5) es proporcional a la ganancia Brillouin [NTR97].

Los sensores Brillouin hacen uso de estas relaciones para medir la temperatura y la deformación unitaria en la fibra óptica. Concretamente, caracterizan el espectro Brillouin a lo largo de la fibra, por lo que el desplazamiento Brillouin ν_B , es el parámetro que se mide con mayor resolución, dado que corresponde con la frecuencia de máxima ganancia. Tanto la anchura espectral $\Delta\nu_B$, como la ganancia g_B , se miden con menos exactitud, por ser más sensibles al ruido. Aun así, se puede medir temperatura y deformación unitaria, aunque a veces haga falta medir la ganancia y el desplazamiento Brillouin para diferenciar entre $\Delta\nu_B$ y g_B en aplicaciones con esta necesidad [MKN01]. Pudiéndose realizar también mediante el empleo como elemento sensor una fibra óptica de gran área efectiva (large-effective-area fiber, LEAF), que tiene múltiples modos Brillouin [ACN04]. En esta fibra la dependencia del desplazamiento frecuencial de cada modo varía con la temperatura pero no lo hace con la deformación unitaria, por lo que viendo el desplazamiento de los dos modos de mayor potencia se pueden hacer medidas simultáneas. Por el contrario, si se pretende monitorizar sólo la temperatura o la deformación unitaria de una estructura, basta con incluir un fragmento

de fibra de referencia en el que se sepa la temperatura a la que se encuentra el resto de la fibra y así medir la deformación unitaria, o viceversa [Pos00].

1.2. Análisis Brillouin óptico en el dominio del tiempo

1.2.1. Introducción

Como se ha mencionado anteriormente, el sensor BOTDA es el sensor distribuido más usado y evolucionado de entre los diferentes sensores Brillouin. Esto es debido al hecho de que la resolución espacial que se consigue en la medida ha evolucionado hasta llegar al centímetro, y las distancias que son capaces de medir llegan a varias decenas de kilómetros con un solo sensor. Dentro de los sensores BOTDA se puede distinguir entre sensores BOTDA estáticos y dinámicos en función del tiempo que conlleve obtener la medida. Centrándonos en este trabajo fin de máster en los sensores BOTDA estáticos.

1.2.2. Principio general de los sistemas BOTDA

En los sistemas BOTDA, dos ondas se propagan en sentido opuesto en la fibra bajo test, estimulando el proceso de dispersión Brillouin, tal y como se observa en la siguiente figura:

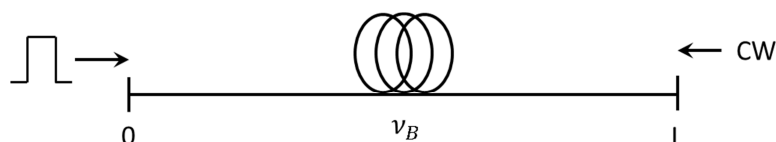


Figura 1.1. Principio de funcionamiento los sistemas BOTDA.

La onda continua (continuous wave, CW) se propaga con una frecuencia ν_s y los pulsos ópticos a una frecuencia ν_p tal que la diferencia frecuencial entre ambas ondas sea la correspondiente al desplazamiento en frecuencia Brillouin de la fibra,

$$\nu_B = \nu_p - \nu_s \quad (1.9)$$

Por ello, la CW será amplificada (la onda CW puede estar en vaciamiento dependiendo del sistema empleado) por SBS con las características del punto de la fibra donde interaccione con el pulso. La señal BOTDA resultante del aumento en potencia de la

onda continua, se recibe como función del tiempo, tal y como se muestra en la Figura 1.2. Esta función puede traducirse al dominio espacial con la siguiente fórmula:

$$z = \frac{ct}{2n} \quad (1.10)$$

donde z es la distancia donde interactúa el pulso con la CW, c es la velocidad de la luz, n el índice de refracción de la fibra y el factor 2 es consecuencia del tiempo que tarda el pulso en propagarse hasta el punto de interacción y el tiempo de propagación de la señal BOTDA resultante hasta el receptor.

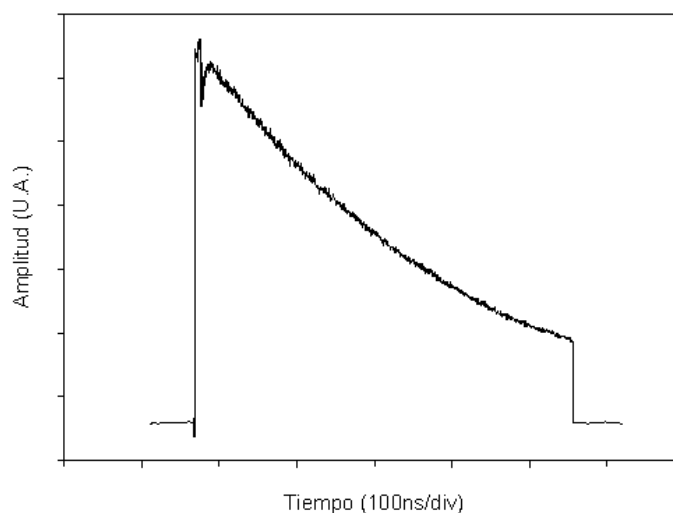


Figura 1.2. Señal BOTDA en ganancia.

La señal BOTDA representada en la Figura 1.2 muestra la interacción Brillouin correspondiente a la frecuencia diferencial dada entre la onda de bombeo (pulsos ópticos) y la Stokes (CW). Si esta diferencia frecuencial se varía, entonces se recibe la señal BOTDA correspondiente a otra frecuencia del espectro en ganancia Brillouin (véase Ec. 1.4). Consecuentemente, mediante variaciones de la frecuencia de una de las dos ondas se puede reconstruir el espectro Brillouin para cada punto de la fibra (véase Figura 1.3). El valor de las magnitudes temperatura y deformación unitaria se encuentra inspeccionando el valor de ganancia y el desplazamiento del máximo del espectro Brillouin.

Un posible esquema de sensor BOTDA se muestra en la Figura 1.4. En la rama superior se pulsa la señal óptica cuya frecuencia es controlada a través de un láser sintonizable que es el encargado de realizar el barrido en frecuencia. Este barrido en frecuencia tiene como objetivo variar la diferencia frecuencial entre la onda pulsada y la CW que se genera en la rama inferior. La onda continua se propagará a lo largo de la fibra interactuando con los pulsos que transfieren la potencia a la CW y generan la señal BOTDA para cada frecuencia sintonizada. Esta señal se detectará y observará en el osciloscopio. Cada una de las señales con distinta frecuencia se almacenará en un PC donde se reconstruirá el espectro Brillouin (véase Figura 1.3).

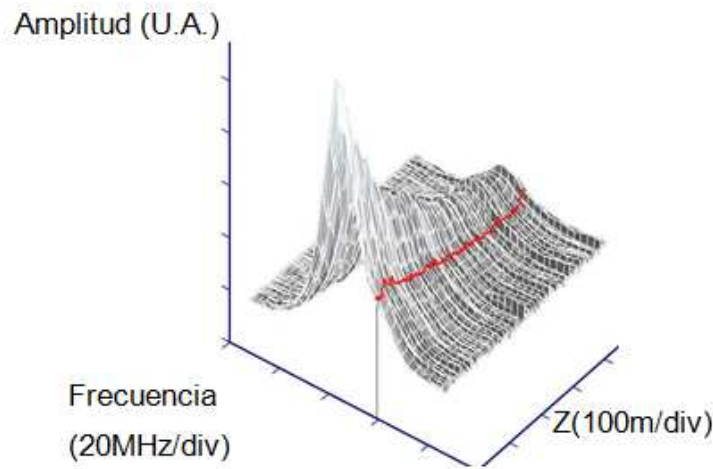


Figura 1.3. Reconstrucción en 3D del espectro Brillouin en la distancia, en rojo podemos observar una de las trazas BOTDA.

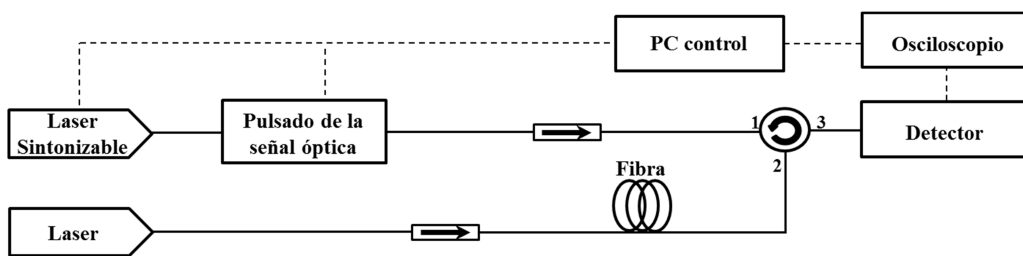


Figura 1.4. Montaje experimental simplificado del sistema BOTDA.

Si no se tiene en cuenta la atenuación característica de la fibra, la potencia de la señal BOTDA viene dada por:

$$P_B = (G - 1)P_S = \left(\exp \left[\frac{\gamma \cdot g_B \cdot P_P \cdot v_g \tau}{A_{efec} \cdot 2} \right] - 1 \right) P_S \quad (1.11)$$

siendo P_s , P_B y P_p las potencias de la onda continua, la señal BOTDA y el pulso respectivamente, γ es un factor entre 0 y 1 correspondiente a la polarización, y A es el área efectiva del núcleo de la fibra óptica, τ es la anchura del pulso y v_g la velocidad de grupo en la fibra.

La resolución espectral, viene dada por

$$\delta\nu_B = \frac{\Delta\nu_B}{\sqrt{2}(SNR)^{1/4}} \quad (1.12)$$

y la resolución espacial por :

$$dz = \frac{V_g \cdot \tau}{2} \quad (1.13)$$

siendo SNR la relación señal a ruido en detección.

Conforme el pulso amplifica la onda continua, se irá vaciando, pudiendo introducir errores en la medida (GJR+99). Sin embargo, existe otra posible configuración donde el pulso se amplifica por transferencia de energía de la CW que por el contrario se vacía, obteniendo un espectro de atenuación Brillouin. La diferencia entre ambas configuraciones se basa en la diferencia frecuencial óptica de la onda de Stokes y de bombeo (véase Figura 1.5):

- Si $\nu_B = \nu_p - \nu_s > 0$, entonces el sistema funciona en ganancia, la CW será amplificada mientras el pulso se vacía.
- Si $\nu_B = \nu_p - \nu_s < 0$, entonces el sistema funciona en vaciamiento, la CW se vaciará mientras que el pulso se amplifica.

Los sistemas BOTDA que usan esta técnica son de gran interés, dado que como el pulso no se vacía, de hecho se amplifica a lo largo de la fibra, se pueden monitorizar fibras más largas [Dem00].

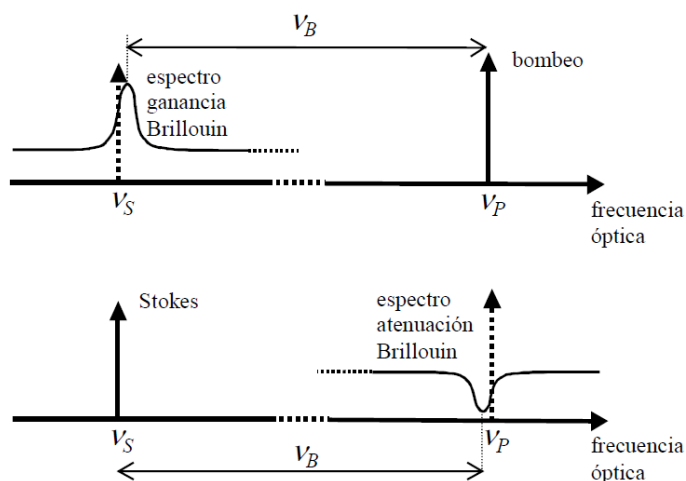


Figura 1.5: Principio de funcionamiento del barrido de SBS, de ganancia (superior) y de vaciamiento (inferior).

1.3. Estado del arte de los sensores BOTDA

En este apartado, se hará un análisis del estado del arte de los sensores BOTDA. Para ello, en primer lugar se hará una breve introducción a los inicios de los sensores BOTDA, a continuación se presentarán mejoras en las que se ha trabajado en este campo, se presentarán unos sistemas comerciales y finalmente se presentarán unas conclusiones.

1.3.1. Introducción a los sensores BOTDA

La técnica BOTDA se presentó por primera vez hacia 1980 como herramienta para medir de forma constructiva las características de atenuación en una fibra óptica [Hor89]. Este fue el primer paso de esta tecnología, la cual se comenzó a estudiar con más detenimiento, y pronto se presentaron los primeros sensores, los cuales únicamente utilizaban la dependencia Brillouin con la temperatura [Dem00]. A modo de ejemplo, se muestra un esquema de un dispositivo experimental básico de BOTDA en la Figura 1.6.

El sistema está compuesto, al igual que en la Figura 1.4., por dos láseres, uno de ellos sintonizable, que transmiten las señales de bombeo y Stokes. Mediante acopladores se consigue que una pequeña parte de la potencia se desvíe y con esto se controle y se mida la diferencia de frecuencia entre los láseres para que sea posible analizar el barrido de frecuencia del espectro Brillouin. Otro dispositivo importante es el modulador

electro-óptico, situado en la rama superior del montaje, el cual se encarga de pulsar la señal óptica para que después esta llegue a la fibra óptica. En la rama inferior, la onda continua se propaga directamente hasta la FUT, donde se produce la interacción SBS con el pulso creado en la rama superior y por lo tanto se crea la señal BOTDA que, mediante un circulador, llega hasta el receptor. Una vez observada y capturada la traza por el osciloscopio, se podrá reconstruir el espectro Brillouin y de esta manera obtener los valores distribuidos de temperatura y deformación unitaria.

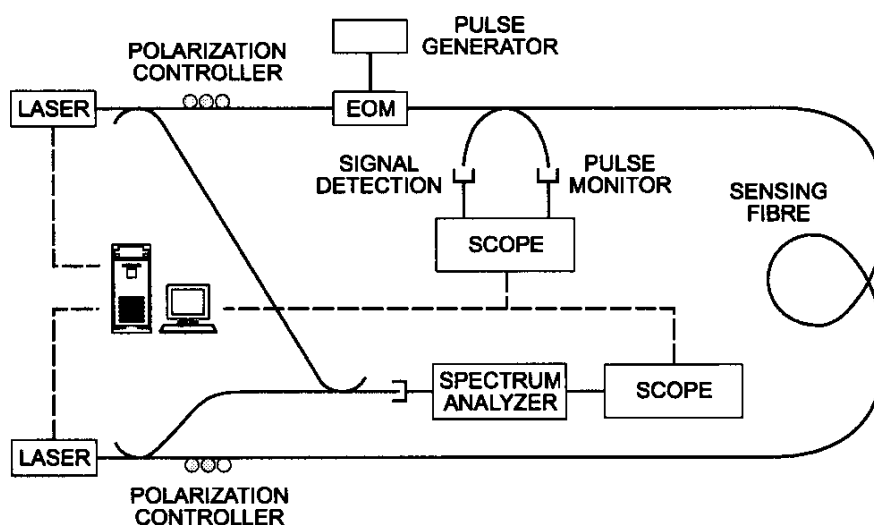


Figura 1.6: Esquema experimental de un sensor BOTDA básico [Dem00].

Aunque este es un sistema BOTDA básico, hay que tener en cuenta los problemas que puede tener y de esta manera ver su evolución y desarrollo hasta nuestros días. Los problemas más importantes van a ser el coste de los elementos del sistema, distorsiones en las medidas debidas al uso de moduladores electro-ópticos (EOM, electro-optic modulator) y la resolución espacial.

1. Costes

En la Figura 1.6 del sistema BOTDA básico, se requiere del uso de dos láseres para generar las dos señales ópticas necesarias, siendo uno de ellos sintonizable. Lo que conlleva un coste alto para este tipo de sistema, ya que además de estos láseres, se requiere que el receptor óptico del sistema tenga un gran ancho de banda. Por otro lado,

cabe destacar la complejidad que supone para el montaje el tener que monitorizar de manera continua la diferencia frecuencial entre la onda continua y el bombeo.

2. Pedestal del pulso

Un modulador electro-óptico, a la hora de generar los pulsos en banda base, introduce distorsiones en las medidas del espectro Brillouin, lo cual es un problema importante para el correcto funcionamiento del sistema. El principio de funcionamiento de los moduladores electro-ópticos Mach-Zehnder (MZ-EOM, Mach-Zehnder electro-optic modulator) se observa en la Figura 1.7:

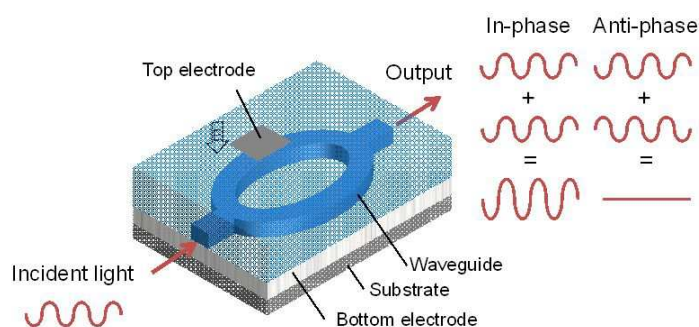


Figura 1.7: Modulador Mach-Zehnder [SNO13].

Si este modulador se polariza en mínima transmisión, se introducen pulsos eléctricos a la entrada de RF con amplitud V_{π} (tensión de media onda) y de duración τ arbitraria. Con esto se consigue que durante ese tiempo τ elegido el MZ-EOM transmita toda la potencia óptica que le llega salvo las propias pérdidas de inserción que tenga dicho elemento. El modulador permanecerá en mínima transmisión y transmitirá muy poca potencia en caso de que no haya pulso. Esta potencia es una onda continua a la que se le llama pedestal o leakage, y, aunque sea muy baja, supone un problema..

Si se introduce una potencia óptica cualquiera P_{in} a un modulador de este tipo, con relación de extinción L y con pérdidas de inserción iL , el pulso óptico a la salida sería el de la Figura 1.8.

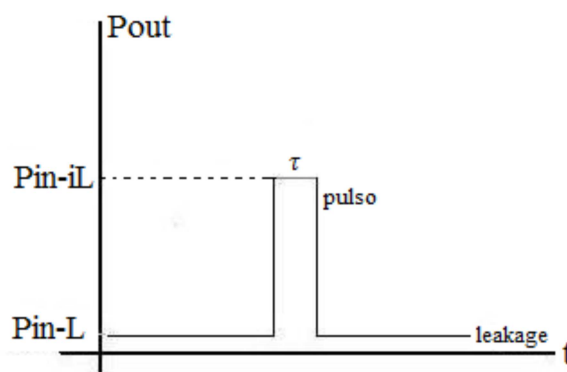


Figura 1.8: Pedestal en los moduladores electro-ópticos.

Por lo tanto, en este caso, ya no sólo hay interacción entre la onda de bombeo pulsada y la de Stokes sino que también aparece la interacción entre el pedestal y la de Stokes. El problema de esta última es que crecerá cuanto más grande sea la longitud de la fibra. Se puede observar en la Figura 1.9 la diferencia entre la interacción que se da cuando no hay pedestal y cuando sí aparece.

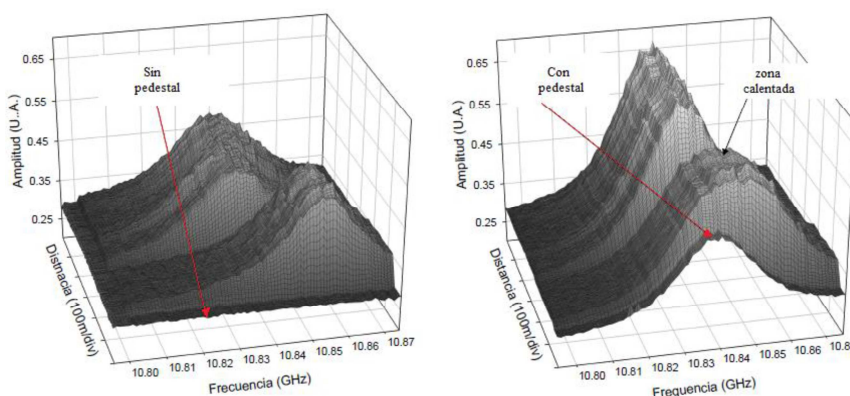


Figura 1.9: Diferencia entre la ausencia y presencia del pedestal en espectros Brillouin (con una parte calentada para ver los cambios).

La interacción entre el pedestal y CW y entre el pulso y CW dependen de los mismos parámetros a excepción de dos: distancia de la fibra y la duración del pulso, que se traduce en resolución espacial. A mayor distancia de fibra, mayor interacción pedestal-CW, por lo que, además de introducir distorsión en la medida cuando se detecta el desplazamiento en frecuencia Brillouin, limita la relación entre la longitud y la resolución espacial. Para una resolución espacial menor, la interacción entre el pulso y

la CW será menor pero la del pedestal y CW permanecerá constante. Este parámetro, la resolución espacial, se va a estudiar a continuación.

3. Resolución espacial

Si la anchura espectral del pulso que interacciona con la onda continua es mayor que la anchura espectral del espectro Brillouin, la medida de dicho espectro aparece con menos ganancia y más ensanchada [AFB+03]. Esto se produce como consecuencia de que el tiempo de vida del fonón acústico es inferior a la duración del propio pulso, lo que hace que la medida de temperatura o deformación unitaria se vea perjudicada.

En los sistemas BOTDA esto es un parámetro limitante, ya que si es necesaria una resolución menor que un metro.

4. Otros

Un problema puede ser que sea necesario tener acceso sólo a uno de los dos extremos de la fibra óptica, lo cual es bastante complejo en los sistemas BOTDA que se basan en el fenómeno SBS de dos señales que se propagan en sentido contrario y las señales son introducidas por los extremos opuestos.

Por otro lado, es muy importante tener un promediado bastante alto cuando se capturan las señales BOTDA. Esto da como resultado un aumento en el tiempo de adquisición en cada frecuencia del barrido, lo que se traducirá en aumento de tiempo de la medida total.

Para mejorar estos problemas, se trata de diseñar nuevos montajes experimentales, bien sean más baratos, más simples o evitando el problema del pedestal, o modificar la técnica BOTDA para realizar medidas de calidad con una resolución espacial muy alta.

Con todo esto se quiere llegar a competir comercialmente con sensores Raman o Bragg (que son más baratos) y hacer que los sensores BOTDA de temperatura y deformación unitaria se acerquen a estos tanto en precio como en prestaciones.

1.3.2. Montajes experimentales mejorados

A continuación se hará una presentación del estado del arte en el que se presentarán una serie de mejoras en las que se está investigando en el área de los sensores BOTDA.

1.3.2.1 Sensor con un solo láser y pulsado mediante un SOA

El primer montaje experimental utilizado para mejorar el BOTDA “básico” fue utilizar un único láser con moduladores electro-ópticos de un ancho de banda elevado. Con esta nueva configuración se tiene que la onda continua es una banda lateral de una modulación doble banda lateral con portadora suprimida (DSB-SC, double side-band suppressed carrier) lo cual se puede observar en la Figura 1.10. El sensor tiene un único láser que genera la onda de bombeo y la onda de Stokes, además de realizarse un barrido utilizando un sintetizador de microondas como la fuente de RF para el modulador electro-óptico. Por otra parte, se utiliza un amplificador óptico de semiconductor (SOA, semiconductor optical amplifier) en lugar de un modulador electro-óptico, lo que hace que se consigan pulsos con menor pedestal y como resultado un mejor comportamiento del sensor [DML+08]. Para explicar el principio de funcionamiento de este sensor, se presenta en la Figura 1.11 el montaje experimental.

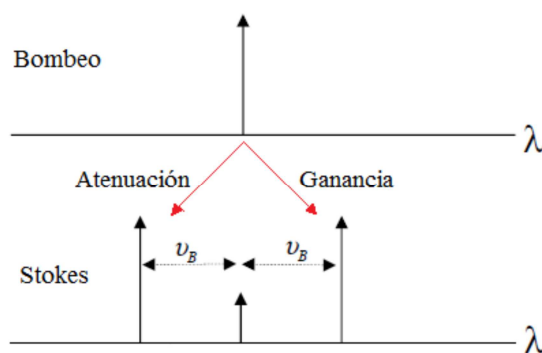


Figura 1.10: Efecto Brillouin a las bandas de una DSB-SC con frecuencia de modulación igual al desplazamiento Brillouin.

La señal del láser se divide mediante un acoplador. En la rama superior se genera la onda continua en una banda lateral de una modulación DSB-SC y se dirige al circulador. En la rama inferior se generan los pulsos ópticos mediante un SOA y van directamente a la fibra bajo test. Una vez que se da el fenómeno SBS, la señal llega al detector y se visualiza en un osciloscopio. Esto se podría mejorar mediante el uso de amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA, erbium doped fiber amplifier) a la

salida del SOA y antes de producirse la interacción Brillouin en la fibra. Además, convendría utilizar filtros para reducir el ruido adicional después de las ampliificaciones.

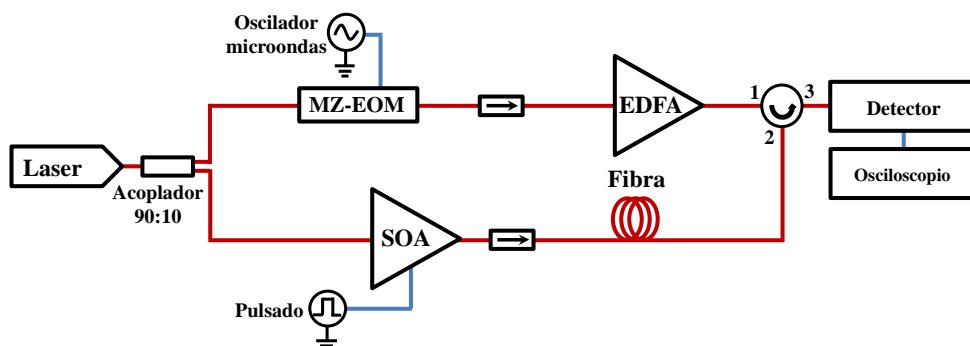


Figura 1.11: Posible montaje experimental con pulsado mediante SOA.

Ventajas e inconvenientes

El sistema al completo, si se introducen amplificadores, filtros o componentes adicionales que lo mejoren, tiene una complejidad muy alta y el ajuste de todos los elementos que lo componen es un trabajo bastante delicado. Por el contrario, este sistema se ahorra un coste considerable al no utilizar un láser sintonizable, además de mejorar el comportamiento del sensor debido a que el pedestal de los pulsos es menor utilizando el SOA que el MZ-EOM.

1.3.2.2 Sensor con generación de señales mediante enganche de inyección en láseres

Este tipo de sensor utiliza el fenómeno de enganche de inyección o injection locking, mediante el cual, un láser llamado esclavo (slave), se sincroniza a la misma longitud de onda que otro láser llamado maestro (master). En los sistemas BOTDA, es necesario que uno de los dos láseres se pueda modular a altas frecuencias, aunque esto se puede conseguir con láseres sencillos [TLA+04]. El montaje experimental se muestra en la Figura 1.12.

Parte de la señal del láser maestro llega hasta el láser esclavo para conseguir el “enganche” de este y el resto va hasta la fibra en la que se producirá la interacción. El esclavo será modulado a diferentes frecuencias mediante el generador de RF para

realizar el barrido del espectro y emitirá una señal ya pulsada. Al dirigirse a la fibra bajo test se amplifica mediante un EDFA para conseguir un nivel de potencia mayor. Una vez se produce la interacción SBS mediante el bombeo y la onda de Stokes, la señal BOTDA llega hasta el receptor y se visualiza en el osciloscopio.

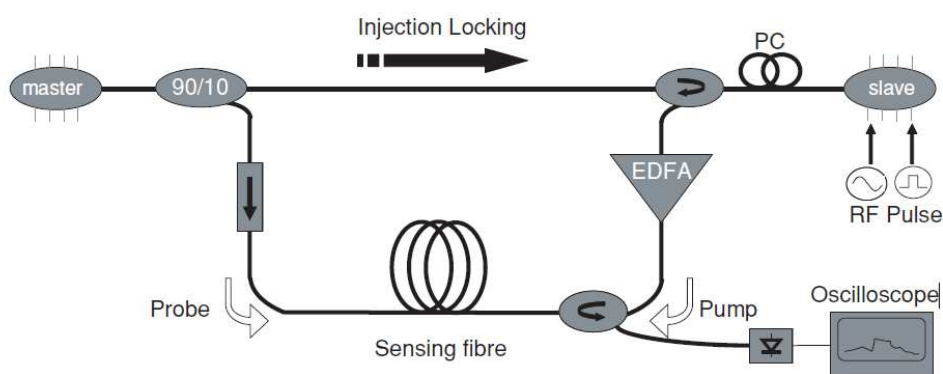


Figura 1.12: Sensor con enganche de inyección en láseres [TLA+04].

Ventajas e inconvenientes

Aunque se evita utilizar los moduladores electro-ópticos, es necesario un láser modulable a altas frecuencias y con gran ancho de banda. Esto provoca en gran medida que el pedestal del pulso óptico sea eliminado. Por otro lado, la onda continua es directamente la emitida por el láser maestro, lo cual hace que haya muy poco ruido en la señal BOTDA resultante y por lo tanto se ahorre el uso de filtros. El mayor problema de este sistema es que el método de enganche de inyección no es muy estable, con lo cual hace que los láseres se desenganchen fácilmente y no se pueda ajustar el sensor.

1.3.2.3 Sensor basado en enganche tipo offset de dos láseres DFB

Mediante la técnica de enganche tipo offset de dos DFBs se consiguen generar dos señales con una diferencia frecuencial muy parecida a νB , lo cual hace que sea atractiva para los sensores basados en SBS.

El enganche de inyección, como se ha comentado en el apartado anterior, era inestable, pero este método no tiene ese problema, debido a que se cambia la frecuencia de operación del láser modificando la corriente de alimentación de este. Además, se

pueden evitar los moduladores electro-ópticos ya que la diferencia frecuencial entre los láseres puede variar en un rango bastante amplio [LBR+08]. En la Figura 1.13 se observa el montaje de un sensor de este tipo.

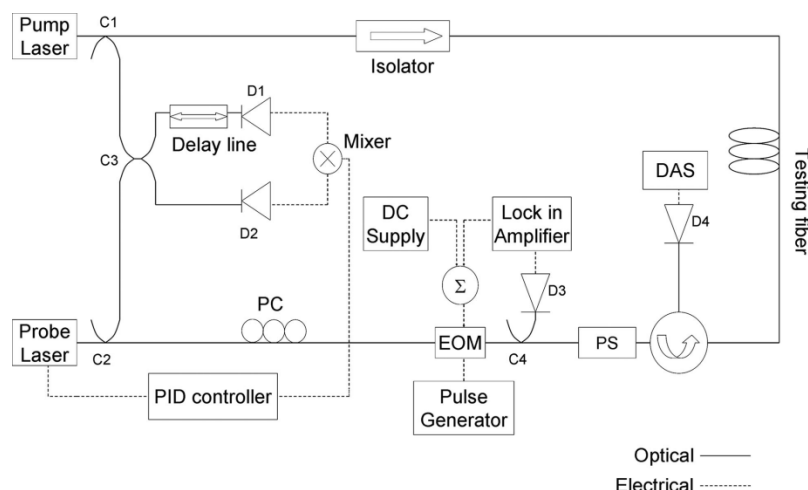


Figura 1.13: Sensor de enganche tipo offset [LBR+08].

La mayor diferencia entre este esquema y los anteriores es que el enganche tipo offset funciona en vaciamiento. Los dos láseres emiten las ondas de Stokes y de bombeo, esta última pulsada mediante un modulador electro-óptico. Una vez pulsada la onda se dirige a la fibra bajo test, donde se produce la interacción SBS con la onda continua. Así se consigue una vez más la señal BOTDA, la cual llega hasta un detector. El enganche tipo offset tiene la función de realizar el barrido de frecuencias entre las dos ondas.

Ventajas e inconvenientes

En este sistema se ahorra el sintetizador de RF a la hora de hacer el barrido de frecuencias, que es un elemento muy costoso. Además, el ruido en la señal BOTDA es bajo debido a que no hay modulaciones ópticas. Por otro lado, la utilización de un modulador electro-óptico introduce en el sistema el pedestal de los pulsos, lo que crea distorsión (ya se ha visto en apartados anteriores), y es necesario utilizar dos detectores de gran ancho de banda.

1.3.2.4 Sensor basado en el método de correlación para estimar el BFS

El principio de funcionamiento de este sensor consiste en utilizar la técnica de correlación cruzada para estimar la frecuencia central de los espectros con una distribución Lorentziana. Se basa en dos hechos [FCC+13]:

- La correlación cruzada entre dos distribuciones Lorentziana da un resultado con esa misma forma también.
- La correlación cruzada entre una curva Lorentziana ideal y otra ruidosa da como resultado una distribución cuya forma depende de la correlación de las curvas, no del ruido.

En la Figura 1.14. se muestra un ejemplo de montaje experimental utilizando esta técnica:

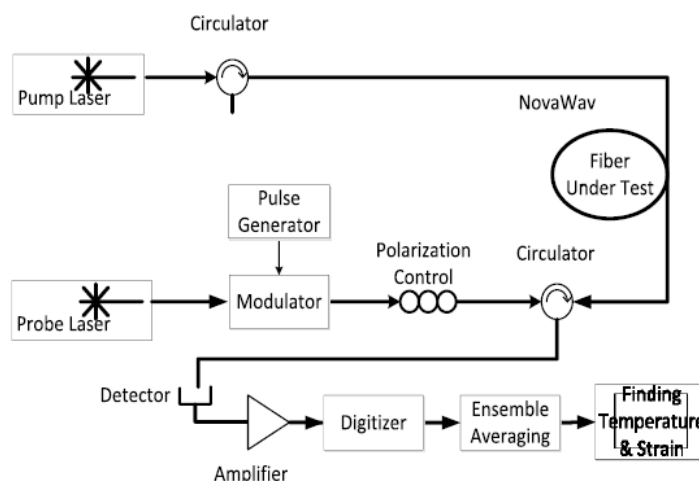


Figura 1.14: Sensor basado en método de correlación [FCC+13].

En dicho montaje se utiliza la técnica de los antipulsos (que en siguientes apartados se explicarán con más detalle). Cada uno de los dos láseres presentes emite las ondas de bombeo y de prueba, que llegan al FUT en contrapropagación. Una vez obtenida la señal BOTDA resultante, llega al detector mediante un circulator, donde se digitaliza, se promedia y por último se realizan las técnicas de correlación para obtener la temperatura y deformación unitaria.

Ventajas e inconvenientes

La mayor ventaja de este método es que se evita el problema de tener una señal ruidosa para realizar la medida de temperatura o strain, una de las mayores limitaciones en este tipo de sensores. Por otro lado, tiene el inconveniente de tener que utilizar dos láseres con el coste que esto conlleva y además un modulador electro-óptico mediante el que se introduce, al igual que en los casos anteriores, el pedestal del pulso.

1.3.2.5 Sensor para eliminar el impacto de la fluctuación de potencia

Los moduladores electro-ópticos, aparte de introducir el problema del pedestal de los pulsos, tienen un inconveniente debido a que, al realizar el barrido en frecuencia para obtener el espectro Brillouin, sufre fluctuaciones de potencia, lo cual puede hacer que la medida sea errónea. Por esto, como se observa en la Figura 1.15., este sensor se basa en introducir un modulador óptico-acústico (AOM, acousto-optic modulator) en lugar de un modulador electro-óptico (EOM, electro-optic modulator) [JCW+14].

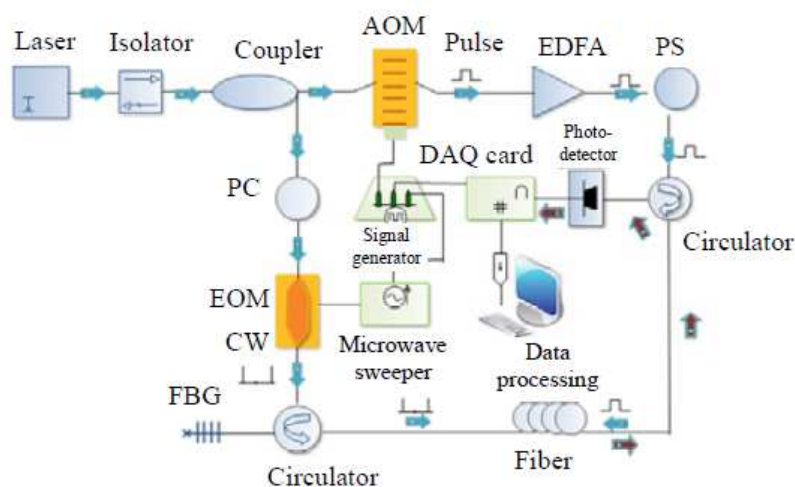


Figura 1.15: Montaje experimental para minimizar fluctuaciones de potencia [JCW+14].

De esta manera, la señal que proviene de un único láser se divide en dos ramas. La rama superior realiza la modulación óptico-acústica y una vez pulsada, los pulsos van hacia la fibra. Por la rama inferior irá la onda de prueba que se modulará en intensidad mediante un EOM y, una vez se ha dado la interacción Brillouin, la señal BOTDA se dirige al fotodetector.

Ventajas e inconvenientes

Como ventajas se utiliza un solo láser, por lo tanto se reducen los costes. Además, no existe el pedestal de los pulsos debido al AOM, que también hace que no haya fluctuaciones de potencia en los pulsos, y que por lo tanto la medida sea mejor. Por el contrario, los moduladores óptico-acústicos son bastante más caros que los EOM que se utilizan en otras configuraciones.

1.3.2.6 Sensor basado en la detección balanceada

Esta técnica consiste en utilizar un receptor con dos fotodiodos en los que, mediante un modulador en doble banda lateral, se creen una banda de Stokes y otra Anti-Stokes, de manera que la potencia será el doble y la relación señal a ruido sólo aumenta un factor $\sqrt{2}$ [DLM+14]. En la Figura 1.16. se observa el montaje experimental:

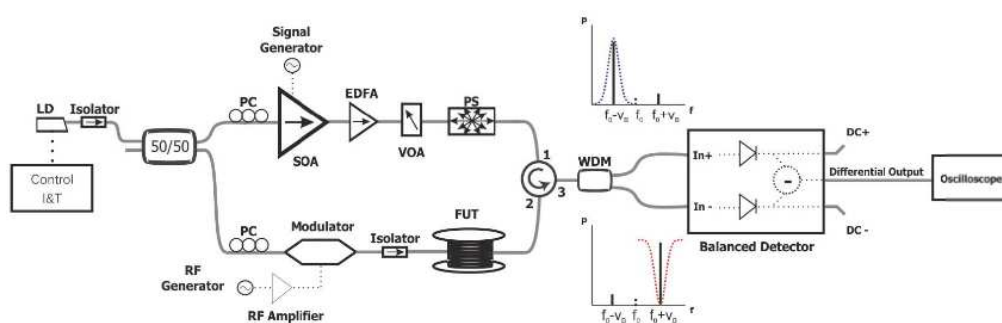


Figura 1.16: Sensor basado en detección balanceada [DLM+14].

Al obtener la señal BOTDA resultante después de la interacción entre la onda de Stokes (rama inferior) y la onda de bombeo (rama superior), esta pasa por un circulador y la conduce hasta un filtro WDM. Aquí es donde se obtienen la banda de Stokes y la banda de Anti-Stokes por separado. De esta manera, llegan al receptor como señales separadas, con lo cual se obtiene el doble de potencia de señal mientras que sólo un incremento en un factor $\sqrt{2}$ en el caso del ruido. En definitiva, una mayor relación señal a ruido.

Ventajas e inconvenientes

Como ventaja más destacada se tiene el incremento de la SNR mediante el cual se tendrán mejores medidas. Como desventaja, adquirir un detector balanceado supone mayor esfuerzo económico respecto a los detectores simples utilizados comúnmente, lo cual puede que no sea rentable.

1.3.3 Modificaciones de la técnica BOTDA para alta resolución espacial.

En el presente apartado, se mostrará el estado del arte de la investigación en cuanto a mejoras de la resolución espacial en la medida de los sensores BOTDA.

La primera opción para intentar hacer medidas con una resolución espacial de centímetros fue utilizar pulsos muy estrechos, menores de 10ns, con un pedestal constante aunque muy inferior al nivel de los pulsos. Esto hace que antes de la propia interacción entre el bombeo y la onda de Stokes, se dé un prebombeo debido al leakage. Así se consiguen los pulsos menores a 10ns. El problema de esto es que, como ya se ha explicado anteriormente, la interacción con el pedestal hace que las medidas del espectro Brillouin se distorsionen y se introduzcan errores en ellas [AFB+03].

1.3.3.1 Sensor de alta resolución mediante la técnica de doble pulsado

Esta técnica se basa en enviar dos pulsos separados pocos nanosegundos, en lugar de enviar uno sólo como se hacía habitualmente. Con esto se consiguen resoluciones espaciales por debajo de un metro. El primer pulso sirve de prebombeo creando una onda acústica, lo que genera un espectro Brillouin ancho. El segundo genera picos Brillouin (gracias al prebombeo del anterior) cuya separación en frecuencia depende del tiempo de separación entre ellos. Al generarse las ondas acústicas, aparecen interferencias constructivas y destructivas. Con las primeras, aparece un máximo en el espectro Brillouin, mientras que con las segundas no aparece espectro [KST+07]. Aunque el prebombeo del primer pulso hace que aparezcan distorsiones como las del pedestal, estas son de mucho menor magnitud y prácticamente despreciables. El problema de este método es que si no se elimina el pedestal óptico de los pulsos, se obtienen medidas erróneas.

1.3.3.2 Sensor de alta resolución mediante la técnica anti-pulsos

El principio de funcionamiento de esta técnica es utilizar anti-pulsos, que se podría decir que son pulsos invertidos, los cuales se observan en la Figura 1.17. Con esto se consigue que la interacción Brillouin se dé siempre salvo en el intervalo del pulso, con lo que de esta manera el tiempo de vida del fonón no afecta a la medida. La señal BOTDA observada sería la no interacción Brillouin. Con esta técnica se han conseguido resoluciones del orden de 20mm [BCB07].

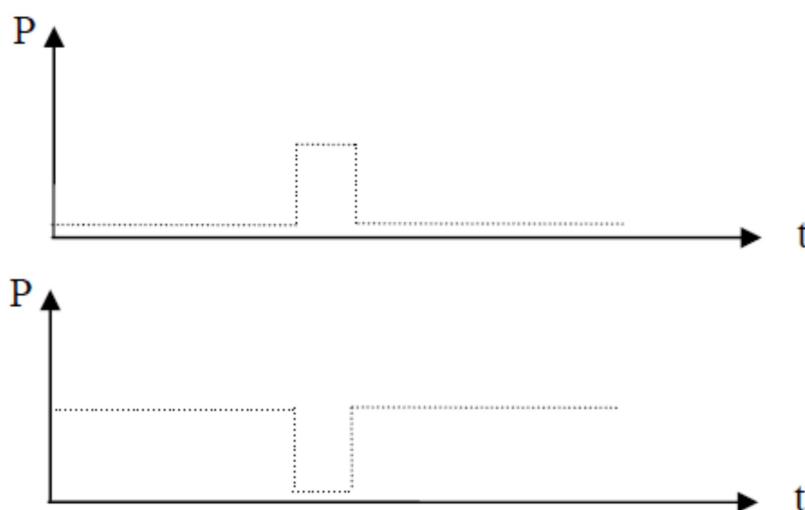


Figura 1.17: Pulsos normales arriba y anti-pulsos abajo [BCB07].

1.3.3.3 Sensor de alta resolución mediante la técnica de pulso se prebombeo

Para explicar el principio de funcionamiento de esta técnica, se muestra la Figura 1.18, la cual está patentada por OZ Optics [Ozo14] y se basa en la técnica de pulsos de prebombeo (PPP-BOTDA, Pulse pre-pump BOTDA) [KCN05].

Consiste en enviar pulsos de muy poca duración con un pedestal anterior a estos, de mayor duración y de menor amplitud. Así, el prebombeo PL origina una onda acústica antes que el verdadero pulso PD , obteniendo como gran avance que dichos pulsos de 1ns (o 10 cm) no alteren el perfil característico del espectro Brillouin. Aunque la resolución espacial es muy alta, el problema es el mismo que en el apartado 1.3.2.1., es decir, la presencia del pedestal del pulso óptico.

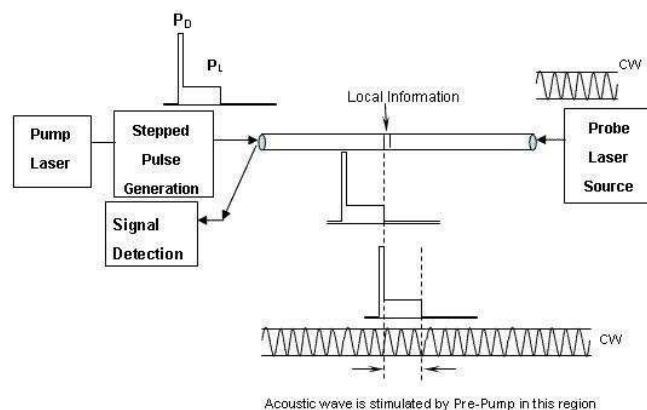


Figura 1.18: Técnica de pulso de prebombeo [KCN05].

1.3.3.4 Sensor de alta resolución mediante la técnica DPP con detección balanceada

La técnica de doble pulso diferencial con detección balanceada consiste en generar una señal de bombeo que consta de dos pulsos ópticos con la misma intensidad pero con diferente duración, inyectados en la fibra separados cierto tiempo para que no se solapen en ella [MCZ+14].

Una vez dada la interacción Brillouin en la fibra bajo test, la señal BOTDA resultante es dirigida desde el circulador hacia el receptor balanceado. Antes de llegar a este, y mediante un acoplador, el pulso no retardado llega hasta un tramo de fibra correspondiente al tiempo de retardo que sufre el otro pulso, de manera que los dos (cada uno por una rama del acoplador), llegan a dicho fotodetector a la vez, uno por la entrada positiva y otro por la negativa.

En la Figura 1.19. se puede observar esta técnica de manera más detallada.

Con esta técnica se han conseguido resoluciones altas del orden de 10 cm pero en distancias más cortas que con las anteriores técnicas. Por otro lado, el pedestal del pulso óptico sigue estando presente, lo cual sigue siendo un problema.

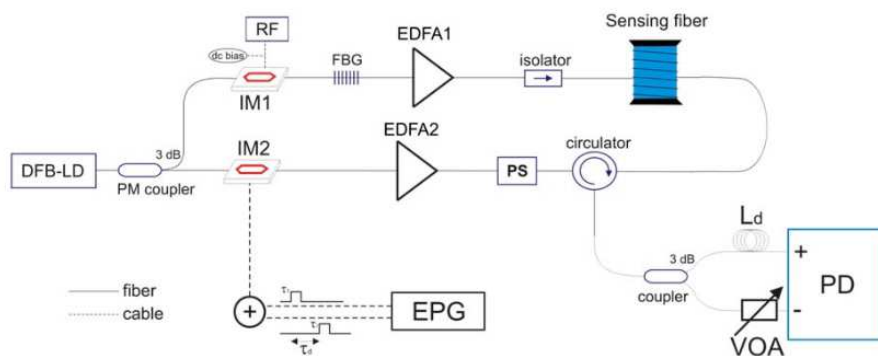


Figura 1.19: Técnica DPP mediante con detección balanceada [MCZ+14].

1.3.4 Sensores BOTDA comerciales

Aunque ya se ha comentado que la tecnología de los sensores basados en SBS está evolucionando continuamente, las propiedades que tiene para medir tanto temperatura como deformación mecánica en grandes estructuras hace que la técnica sea muy atractiva. Se debe tener en cuenta que, en oleoductos o gaseoductos, la monitorización de los parámetros mencionados pueden prevenir grandes pérdidas económicas además de catástrofes naturales. Ante esto, hay varias casas que los comercializan, como son Omnisens [Omn14], Neubrex [Neu14], OZ Optics [Ozo14] y Sensornet [Sen14].

En la tabla 1.1. se muestra una comparativa con las características más relevantes del sensor BOTDA de cada una de ellas.

Fabricante modelo	Distancia máxima	Resolución espacial	Precisión en deformación	Precisión en temperatura
Omnisense <i>Ditest</i>	50 km	0'1 m	0'1 $\mu\epsilon$	0'1 $^{\circ}\text{C}$
Neubrex <i>Neubrescope</i>	25 km	0'2 m	10 $\mu\epsilon$	0'5 $^{\circ}\text{C}$
OZ Optics <i>DSTS</i>	150 km	0'1 m	2 $\mu\epsilon$	0'005 $^{\circ}\text{C}$
Sensornet <i>DTSS</i>	24 km	1 m	20 $\mu\epsilon$	1 $^{\circ}\text{C}$

Tabla 1.1: Tabla comparativa entre BOTDA comerciales

1.3.5 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado el fenómeno SBS como una herramienta muy atractiva y útil para realizar sensores capaces de hacer medidas distribuidas de temperatura y deformación unitaria. Los sensores BOTDA son los más llamativos entre las familias existentes de sensores basados en Brillouin ya que son bastante simples y con un buen funcionamiento respecto a los demás. Aunque sean los más atractivos, presentan diferentes problemas y/o limitaciones, las cuales se están intentando solucionar. Por un lado está la resolución espacial de los sensores, donde se ha llegado hasta los centímetros actualmente, y por otro la mejora y simplificación de los sistemas experimentales. Este proyecto fin de máster se centrará en esto último.

2. MÉTODO SIMPLIFICADO DE SENSOR DISTRIBUIDO BRILLOUIN BASADO EN EL FILTRADO ÓPTICO PASIVO

2.1. Introducción

Como se ha comentado en el capítulo anterior, hay diferentes ámbitos de investigación para la mejora de los sensores BOTDA. Pudiendo englobar todos ellos en dos grandes líneas de investigación. Por un lado se encontraría toda la investigación enfocada a mejorar las prestaciones de los sensores, ya sea en cuanto a mejoras de resolución espacial, precisión o tiempo de realización de la medida. Y por otro lado estaría la línea de investigación enfocada a simplificar la técnica de sensado, mediante la cual se busca una reducción de los costes del sensor BOTDA.

Los sensores BOTDA son capaces de monitorizar la temperatura y la deformación estructural de grandes estructuras. Por lo que son de gran interés en ciertos sectores industriales, como pueden ser la monitorización de gaseoductos y oleoductos, la monitorización de la salud estructural de las vías del tren, y la monitorización de la salud estructural de otras grandes estructuras. Es por ello que diversos grupos de investigación así como diferentes corporaciones, estén investigando en mejorar las prestaciones de los sensores BOTDA.

Sin embargo, y debido al hecho de que para la creación de las diferentes ondas ópticas que toman parte en el sensado mediante esta técnica, la mayoría de sensores BOTDA utilizan elementos muy caros (como pueden ser, el uso de diferentes moduladores electro-ópticos, generadores de microondas, amplificadores ópticos de semiconductor, etc.), la utilidad de dichos sensores se ve reducida a ciertos sectores empresariales, en los cuales el coste del sensor no supone un hándicap. Es por ello, que tal y como se ha mencionado, exista una línea de investigación enfocada a la búsqueda de la simplificación de la técnica de sensado para de esta manera reducir los costes finales del sensor. Obteniendo un producto comercial más económico, que permita competir con otras tecnologías más baratas, como pueden ser los sensores Raman.

Son múltiples las aportaciones que se pueden encontrar con el fin de simplificar los sensores BOTDA, y de esta manera obtener una reducción en el coste del mismo. Algunas de las aportaciones más significativas serían las siguientes: obtención de la onda de Stokes mediante el pulso utilizando un láser de fibra óptica basado en Brillouin [LWP+98], utilización de esquemas de bloqueo de inyección que permitan crear la onda de bombeo pulsada así como la de Stokes mediante el uso de láseres DFB baratos [TLA+04], utilización de bloqueo de offset [LBR+08] o la generación mediante división temporal de las ondas de pulso y prueba mediante el uso de modulación directa del láser [SY10] [HS14] [ZOSL10].

En este capítulo se presentará el trabajo de investigación llevado a cabo para la simplificación del sensor BOTDA, mediante la simplificación del proceso de creación de las dos señales ópticas presentes en el proceso de sensado. De este modo, se obtiene un abaratamiento en los costes del sensor BOTDA.

2.2. Fundamento teórico

Los sensores BOTDA, tal y como se ha descrito en el capítulo anterior, necesitan de dos señales ópticas que se propaguen en dirección contraria a través de la fibra óptica: la onda continua de prueba (CW, continuous wave) y el bombeo pulsado. El presente trabajo tiene como objetivo reducir el proceso de creación de ambas señales, de manera que se generen a partir de una única fuente óptica. De este modo, se reduce el número de componentes empleados en el sensor, abaratando sus costes.

En la Figura 2.1 se representa el esquema teórico del sensor BOTDA propuesto en este trabajo. Como se puede apreciar, el primer paso será generar una señal óptica que esté compuesta por una onda continua y dos bandas laterales moduladas pulsadas, mediante una única fuente óptica. Así, mediante la señal modulada, se genera tanto la señal de prueba, como la onda de bombeo pulsada necesaria para realizar el sensado: la portadora óptica de la modulación hará la vez de la onda continua, mientras que una de las dos bandas moduladas pulsada hará la vez de la onda de bombeo. Para conseguir esto, será necesario aplicar un filtrado óptico-pasivo a la señal de origen, tal y como se explica a continuación.

La señal óptica modulada en doble banda lateral y pulsada en radiofrecuencia (RF), será encaminada por la rama superior de la configuración presentada mediante un circulador. En esta rama, tal y como se puede apreciar, la señal se encontrará con una red Bragg (FBG, fiber Bragg grating) que estará sintonizada en transmisión, de manera que permitirá pasar únicamente la banda lateral superior (en frecuencia, de manera que se estará trabajando en un sistema de ganancia) pulsada de la señal modulada. De manera que tanto la otra banda modulada como la portadora óptica serán reflejadas por la FBG, volviendo de esta manera al circulador, el cual encaminará la señal a la fibra óptica que se utilizará como test. Al mismo tiempo, mediante el uso de otro circulador, la banda lateral pulsada que se está transmitiendo por la rama superior de la configuración se encaminará al otro extremo de la fibra óptica. De esta manera, se contrapropagarán a lo largo de la fibra óptica las dos señales necesarias para generar la interacción Brillouin.

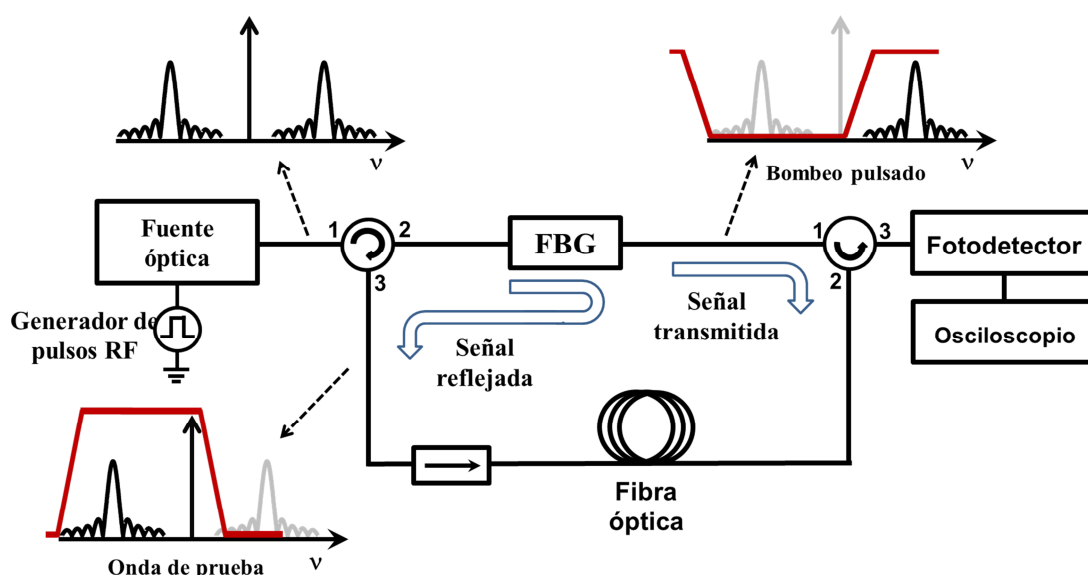


Figura 2.1 Representación esquemática del fundamento teórico de la técnica presentada.

La frecuencia de modulación se tendrá que elegir de manera que sea próxima a la del desplazamiento en frecuencia Brillouin (BFS, Brillouin frequency shift) de la fibra. Así, la onda de bombeo pulsada será capaz de generar amplificación Brillouin sobre la portadora óptica.

Una vez que la señal de prueba ha sido amplificada a lo largo de la fibra óptica por amplificación Brillouin generada por la onda de bombeo pulsada, la señal de prueba

será detectada mediante un fotodiodo. Pudiendo observarse y capturarse la señal eléctrica en un osciloscopio.

Para finalizar con el proceso, esta medida se repetirá variando la frecuencia de modulación, de manera que se pueda reconstruir el espectro de ganancia Brillouin (BGS, Brillouin gain spectrum).

En la práctica, la señal óptica compuesta por una onda continua y dos bandas moduladas pulsadas, podrá ser generada mediante diversos métodos. Por ejemplo, mediante la modulación directa de una fuente láser, empleando un generador de forma de onda pulsada, lo que daría lugar a una desintonización del láser cuando se aplica la señal eléctrica pulsada, de modo que se generaría un pulso óptico con un desplazamiento de frecuencia sobre la portadora. Controlando la amplitud de la modulación eléctrica se sintonizaría la diferencia de frecuencia óptica entre la onda de bombeo y la de prueba, de modo que se realizara el barrido del espectro de Brillouin. De esta manera, se evitaría el uso de un generador de señal de microondas, reduciendo el coste final del sistema.

Otra posible forma de generar la señal sería mediante el uso de un láser de realimentación distribuida con un modulador de electro-absorción (EAM, electro-absorption modulator) monolíticamente integrado. Gracias a su posibilidad de integración monolítica con dispositivos optoelectrónicos como DFBs y amplificadores ópticos semiconductores, los EAM se han convertido en un componente estándar para aplicaciones de telecomunicaciones. Como resultado, toda la modulación podría ser proporcionada por un solo dispositivo, cuyo precio en el mercado es comparable a la de una única fuente de láser.

Otra forma sería mediante el uso de moduladores externos de fase o amplitud convencionales, pero ello conllevaría un coste adicional para el sensor.

Finalmente, cabe destacar, que si bien la descripción de la técnica se ha realizado teniendo como base una modulación en doble banda lateral, también se podría realizar con una señal óptica con modulación de banda lateral única. Sin embargo, este último

formato de modulación por lo general requiere del uso de componentes más caros, lo que aumentaría el coste del sensor.

2.3. Implementación experimental

Se han realizado dos montajes experimentales diferentes para esta técnica de simplificación de los sensores Brillouin. La diferencia entre ambas reside en la forma de generar la señal óptica modulada. En el primer experimento, se realizó mediante un láser DFB y un modulador electro-óptico externo (MZ-EOM), mientras que en el segundo se utilizó un modulador de electro-absorción. A continuación, se explicará en detalle cada uno de los dos sistemas experimentales realizados.

2.3.1. Implementación mediante el uso de un MZ-EOM

Para demostrar y estudiar la capacidad de la técnica descrita en el apartado anterior, se montó el esquema experimental que se presenta en la Figura 2.2.

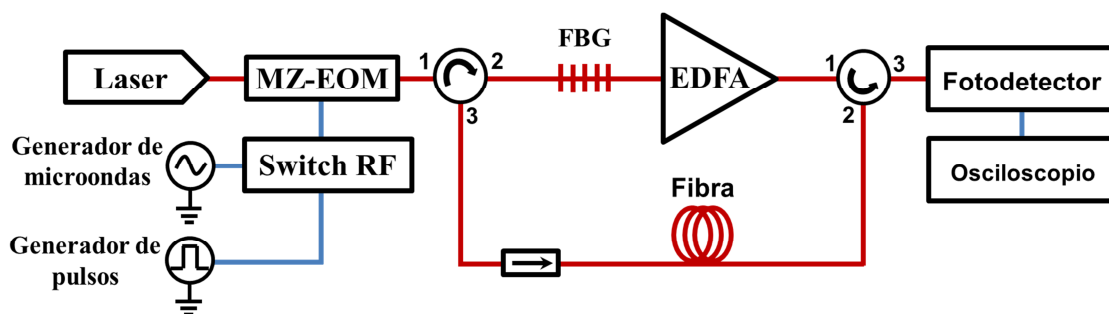


Figura 2.2: Configuración experimental para el sensor BOTDA económico basado en una modulación doble banda lateral generada con un MZ-EOM.

Como se puede observar, para realizar la modulación para la obtención de la señal pulsada en RF se utilizó un modulador externo. Concretamente, se utilizó un láser DFB centrado en 1559.6 nm, que sería modulado mediante un modulador electro-óptico de tipo Mach-Zehnder, el cual a su vez se pulsó mediante un generador de microondas. Para realizar esto último, se colocó un switch de microondas junto a un generador de pulsos a la salida del generador de microondas. Traslado de esta manera la forma de la señal de RF directamente a través del modulador al campo óptico. Cabe resaltar, que a diferencia de la técnica habitual de los sensores BOTDA, en este sistema el pulsado de la señal óptica se genera eléctricamente en vez de hacerlo directamente en el dominio

óptico. Además, a día de hoy, los switch de microondas son capaces de dar una respuesta rápida (inferiores a 1 ns) y de gran aislamiento. Obteniendo de esta manera unos pulsos ópticos rápidos reduciendo los costes, ya que en lugar de pulsar utilizando un SOA o un modulador electro-óptico, se hace mediante un switch de microondas, con un precio muy inferior a los anteriores [ZOSL10].

Una vez generada la señal modulada, se encaminará por la rama superior del esquema mediante un circulador, donde será filtrada por una FBG de banda estrecha. Con el fin de trabajar en un sensor BOTDA que funcione en ganancia, la FBG será sintonizada de manera que transmita la banda superior pulsada de la modulación, mientras que reflejará la otra banda y la portadora óptica, que en el sensor será la onda de prueba, introduciéndola a través del circulador en la fibra que se utilizará como test. Si se quisiera trabajar en un sistema en vaciamiento, bastaría con sintonizar la FBG de manera que transmita la banda lateral inferior. A continuación, en la rama superior, la onda pulsada será amplificada mediante un EDFA, de manera que se pueda tener el nivel suficiente de pulso como para excitar el efecto SBS en la fibra óptica. Este pulso amplificado, será introducido en un aleatorizador de polarización antes de introducirlo en la fibra óptica, para evitar las posibles alteraciones que pueden producirse debido a los cambios de polarización. Finalmente, la señal de prueba resultante tras haber sido amplificada mediante amplificación Brillouin debida a la onda de bombeo pulsada, será detectada mediante un fotodetector de 125 MHz.

2.3.2. Implementación mediante el uso de un EAM

Una vez realizado el esquema descrito en el apartado anterior, se estudió la capacidad de la técnica mediante el esquema experimental que se presenta en la Figura 2.3.

Como se puede observar, hay dos diferencias substanciales con respecto al montaje descrito en la Figura 2.2. Por un lado en cuanto a la forma de obtener la señal óptica modulada se refiere. Y por el otro, el hecho de usar dos carretes de fibra óptica en lugar de uno, siendo uno para test y el otro para generar un retardo, cuestión que se explicará en el apartado 2.3.3.

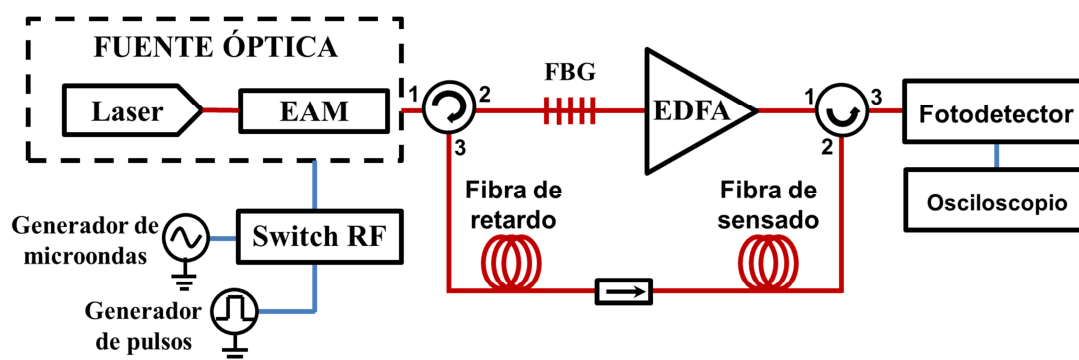


Figura 2.3: Configuración experimental para el sensor BOTDA económico basado en una modulación doble banda lateral generada con un EAM.

En cuanto a la generación de la señal óptica modulada en doble banda lateral pulsada, al no disponer en el laboratorio de un DBF con un EAM integrado se tuvo que realizar mediante un láser DFB a 1560,3 nm y un EAM externo. Si bien los resultados debieran ser los mismos. El hecho de utilizar un láser con modulador integrado supondría un mayor abaratamiento de los costes del sensor BOTDA, debido al hecho de que un láser DFB con un EAM integrado tiene un coste similar al de un láser DFB normal, con lo que se ahorraría el precio del modulador.

Como se puede observar, el resto del sistema es el descrito en el anterior apartado, por lo que no se volverá a detallar aquí.

2.4. Resultados experimentales

En el presente apartado se hará un análisis de los resultados experimentales obtenidos para cada uno de los dos montajes descritos anteriormente.

2.4.1. Resultado obtenidos en el montaje con un MZ-EOM

Para analizar el funcionamiento del sistema, se realizaron medidas de variación de temperatura en una fibra óptica monomodo estándar de 5 kilómetros. Se utilizaron unos pulsos de 11 ns de duración, lo que equivale a aproximadamente 1,1 metros de resolución espacial y se realizó un promediado en el osciloscopio de 1024 muestras. Los saltos para la modulación frecuencial se fijaron en 2 MHz. Y finalmente, para poder realizar las medidas de cambio de temperatura, se introdujeron los últimos 20 metros de la fibra óptica en una cámara climática.

Para poder medir la precisión de la medida de temperatura de la técnica experimental, se fue modificando la temperatura de la cámara climática en saltos de 10°C , comenzando desde los 30°C y hasta los 60°C . De manera que mientras el resto de la fibra se encontraba a temperatura ambiente, la fibra que se encontraba en la cámara iría cambiando de temperatura.

En la Figura 2.4 (a), se pueden observar los espectros obtenidos en un punto de la fibra que se encontraba dentro de la cámara climática, para cada una de las variaciones de temperatura realizadas (30°C , 40°C , 50°C y 60°C). Tal y como se puede observar, los espectros medidos tienen una variación frecuencial acorde con las variaciones de temperatura en la fibra conforme ésta se va calentando.

Por otro lado, y con el objetivo de obtener el BFS de los espectros medidos, se realizó un ajuste matemático mediante un perfil Lorentziano-Gaussiano. Cuyos resultados se pueden observar en la Figura 2.4 (b), donde se puede apreciar que la regresión lineal obtenida mediante el BFS tiene una clara relación lineal con la temperatura. Además, se puede observar que existe una gran precisión entre los cambios de temperatura realizados en la cámara climática y la variación frecuencial de los espectros medidos.

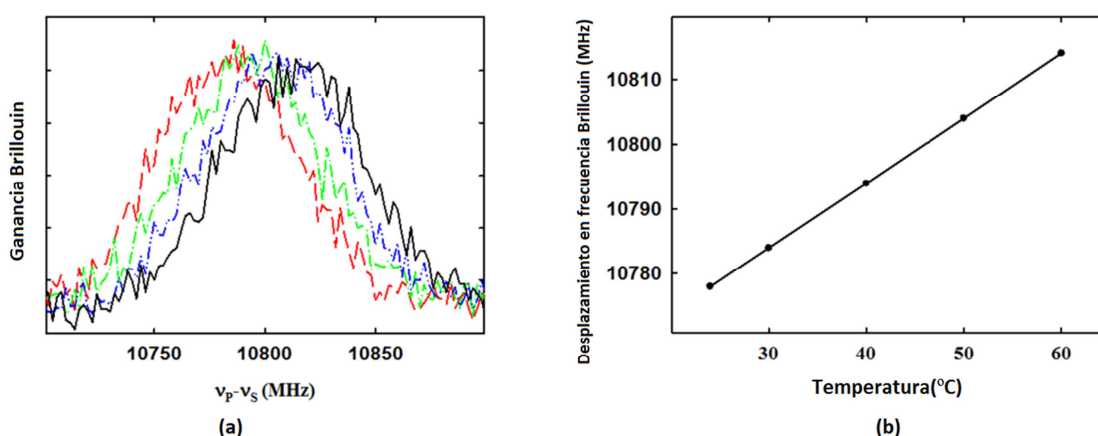


Figura 2.4: (a) Espectros obtenidos en un punto de la fibra óptica calentada, con saltos de 10°C . (b) Relación entre la frecuencia de los espectros medidos y la temperatura

Con el fin de analizar las prestaciones del sensor para realizar medidas distribuidas, se analizarán las variaciones de la amplitud de Brillouin que se producen al variar la temperatura en los últimos metros de la fibra óptica que se encuentra en la cámara

climática. Esto se puede observar en la Figura 2.5 (a). Donde se puede observar claramente los 20 metros de fibra óptica calentada así como el cambio repentino que se da entre la zona de fibra calentada y el resto de la fibra óptica.

Por otro lado, para medir la resolución espacial del sistema, se medirá la distancia en metros del tiempo de subida de la variación de amplitud entre dos puntos adyacentes en la fibra, siendo uno de la zona de la fibra que se encuentra a temperatura ambiente y el otro de la zona de la fibra que se encuentra en la cámara climática. El resultado de esta medida se puede observar en la Figura 2.5 (b), donde se confirma que el sistema tiene una resolución espacial de 1,125 metros.

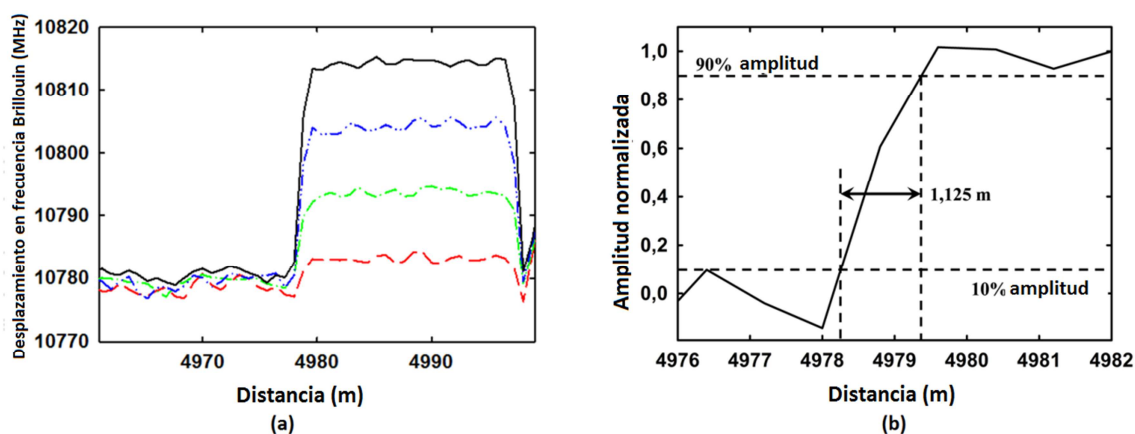


Figura 2.5: (a) BFS calculado en función de la distancia en los metros finales de la fibra, con saltos de 10°C. (b) Resolución espacial del sistema.

Por otro lado, cabe reseñar que la señal BOTDA capturada en el osciloscopio recibirá la interferencia de la banda lateral inferior pulsada, la cual se traslada conjuntamente con la onda continua de prueba. Concretamente, esta señal pulsada invalidará las medidas que se obtengan en la mitad de la fibra. En todo caso, esta limitación del sistema se puede solventar de diversas maneras.

La forma más sencilla sería, sabiendo de antemano que esto va a suceder, introducir en el punto de la fibra en la que se perderán las medidas que se colocará en la estructura que se va a monitorizar un trozo de fibra óptica adicional. Otra opción sería la de introducir en la rama inferior del esquema, antes del aislador, una fibra óptica de igual longitud a la del test, de manera que haga la vez de retardo para la onda continua, de

manera que el pulso llegue al fotodetector una vez que ya se ha obtenido toda la señal BOTDA. Otra posible opción para resolver esta limitación sería la de realizar una modulación de banda lateral única, que si bien aumentaría los costes tal y como se ha comentado en el apartado 2.2, resolvería el problema.

2.4.2. Resultado obtenidos en el montaje con un EAM

Para analizar el funcionamiento de este sistema, al igual que en el caso anterior, se realizaron medidas de variación de temperatura. Para ello se utilizó fibra óptica monomodo estándar de 20 kilómetros. Y para evitar el problema generado por la banda lateral inferior pulsada que se propaga conjuntamente a la señal de prueba descrito en el apartado anterior, se introdujo antes del aislador de la rama de abajo una fibra monomodo estándar de 20 kilómetros a modo de retardo.

En este caso se utilizaron unos pulsos de 10 ns de duración, equivalentes a aproximadamente 1 metro de resolución espacial y se realizó un promediado en el osciloscopio de 4096 muestras, lo cual hizo que las medidas fueran más lentas. Los saltos para la modulación frecuencial al igual que en el caso anterior se fijaron en 2 MHz. Y finalmente, para poder realizar las medidas de cambio de temperatura, se introdujeron los últimos 10 metros de la fibra óptica en una cámara climática.

Al igual que en el caso anterior, los cambios de la temperatura de la cámara climática se fijaron en saltos de 10°C, comenzando desde los 30°C y hasta los 60°C. Dejando el resto de la fibra a temperatura ambiente.

En la Figura 2.6., se puede observar el espectro obtenido en un punto de la fibra que se encontraba dentro de la cámara climática, así como el fit matemático realizado para ese espectro mediante un perfil Lorentziano-Gaussiano. Tal y como se puede observar, el espectro medido se corresponde en forma y frecuencia a la señal de BFS obtenida mediante el fit matemático.

Los resultados del BFS obtenido tras realizar el ajuste matemático mediante un perfil Lorentziano-Gaussiano se pueden observar en la Figura 2.7., donde se puede apreciar

que la regresión lineal obtenida mediante el BFS tiene una clara relación lineal con la temperatura. Existiendo además, una gran precisión entre los cambios de temperatura realizados en la cámara climática y la variación frecuencial de los espectros medidos.

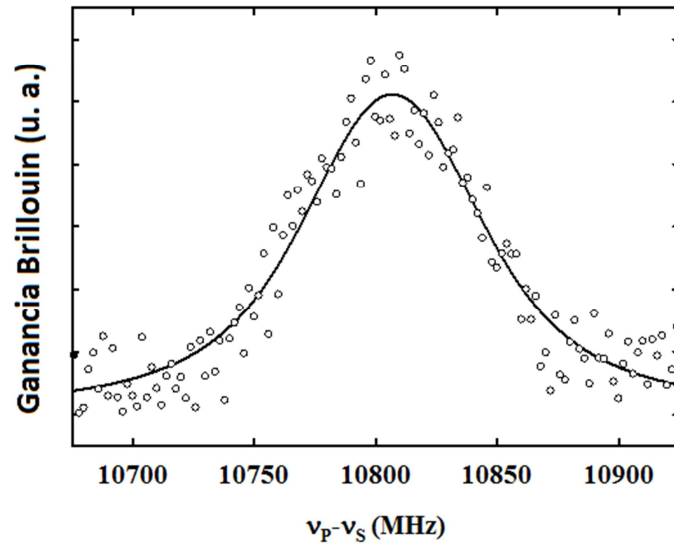


Figura 2.6.: Espectro de ganancia Brillouin (símbolos) medido en la sección calentada situada en el extremo de la fibra. El FIT matemática también se muestra en la figura (línea continua).

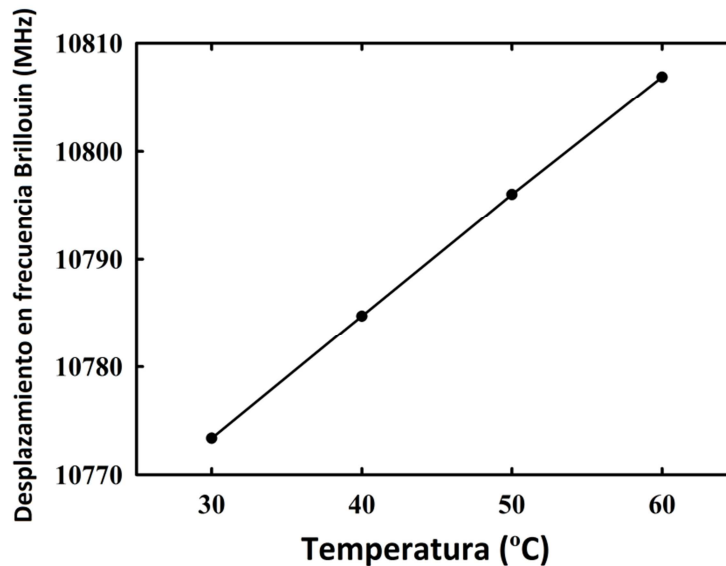


Figura 2.7.: Resolución espacial del sistema.

Por último, para analizar el rendimiento del sensor para medidas distribuidas, se observará la evolución del desplazamiento en frecuencia Brillouin medida en el extremo

de la fibra, al aplicar diferentes temperaturas a la sección de la fibra introducida en la cámara climática. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 2.8. En ella se pueden observar claramente los 10 metros correspondientes a la sección de la fibra climatizada así como la rápida transición entre la sección climatizada y el resto de la fibra. Finalmente, y con el objetivo de medir la resolución espacial, se midió el tiempo de subida entre dos secciones adyacentes de la fibra a diferentes temperaturas, confirmando una resolución espacial de 1 metro.

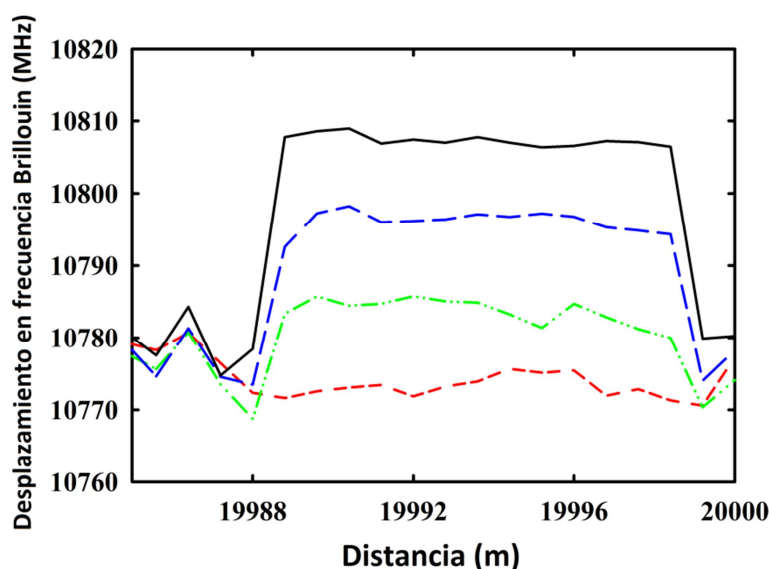


Figura 2.8.: BFS calculado en función de la distancia en las posiciones finales de la fibra, con saltos de temperatura de 10°C.

2.5. Conclusión

- Se ha propuesto y demostrado un novedoso sistema para la obtención de las dos señales ópticas necesarias para los sensores BOTDA, de manera que supone un abaratamiento substancial con respecto a los esquemas típicos empleados en los sensores BOTDA.
- Esta técnica, propuesta y demostrada por primera vez, ha sido considerada de interés científico y ha sido expuesta en dos congresos, uno nacional con el primer experimento expuesto y otro internacional con el segundo. *IkerGazte: Nazioarteko ikerkuntza euskaraz [ISM+15]* y *24rd International Conference on Optical Fibre Sensors [IUM+15]* respectivamente.

3. MEJORAS REALIZADAS EN CUANTO A LA RELACIÓN DE EXTINCIÓN DE LOS PULSOS EN SENSORES BOTDA DE LARGA DISTANCIA MEDIANTE DITHERING DE LA FUENTE ÓPTICA

3.1. Introducción

Como se ha comentado en el capítulo anterior, los diferentes ámbitos de investigación para la mejora de los sensores BOTDA podrían englobarse en dos grandes líneas de investigación. Por un lado se encontraría toda la investigación enfocada a simplificar la técnica de sensado, cuyo objetivo principal es buscar una reducción de los costes del sensor BOTDA. Y por otro lado estaría la línea de investigación enfocada a mejorar las prestaciones de los sensores, ya sea en cuanto a mejoras de precisión, resolución espacial o tiempo de realización de la medida.

Los sensores BOTDA son una herramienta muy interesante para la medida distribuida de la temperatura y la deformación estructural de grandes estructuras. Lo que los convierte en una herramienta de gran interés, con aplicaciones muy importantes en la ingeniería civil y geotécnica, en la monitorización de oleoductos o gasoductos o de evaluación de cables de alta tensión, por mencionar algunas. Esto hace que diversos grupos de investigación así como diferentes corporaciones, estén realizando un importante trabajo de investigación enfocado a mejorar las prestaciones de los sensores BOTDA.

Tal y como se puede observar, todas estas aplicaciones requieren de un gran rango de detección, del orden de decenas de kilómetros. Sin embargo, el rango de detección de los sensores BOTDA está limitado por diversos factores. En primer lugar, debido a la máxima potencia de onda de bombeo pulsada que se puede inyectar en la fibra antes de la aparición de efectos no lineales, tales como la inestabilidad de modulación (modulation instability) [ACN+04] o la automodulación de fase (SPM, self-phase modulation) [FRM+11]. Además, también está limitada por la potencia de la onda de prueba que se puede generar, debido al hecho de que para niveles altos de potencia, la

energía intercambiada entre la señal pulsada y la onda de prueba a través de la interacción Brillouin se vuelve significativa, de modo que la potencia del pulso de bombeo disminuye significativamente a medida que se propaga a lo largo de la fibra. Lo cual conlleva la aparición de efectos no locales, porque los espectros de Brillouin medido en posiciones distantes de la fibra dependen de la interacción en las posiciones anteriores de la fibra [TML13].

Otro factor importante que limita el rendimiento de los sensores BOTDA de largo alcance, tal y como se mencionó en el apartado 1.3.1, es el pedestal o leakage de los pulsos [TML13]. Es por ello que a la hora de generar la onda de bombeo pulsada, sea cual sea el dispositivo práctico con el que se realice, se está obligado a tener una relación de extinción (ER, extinction ratio) grande. Esto se debe al hecho de que, conjuntamente a la señal de pulso (la cual tiene un nivel de leakage), hay una onda continua que se contrapropaga a lo largo de la fibra, lo que conlleva una amplificación adicional de esta última. Dicha amplificación adicional necesita ser limitada, a fin de evitar efectos no locales adicionales y errores de medición [TML13] [ZOSL10], lo que implica un requerimiento muy alto en cuanto al nivel de ER de la onda de bombeo pulsada [TML13] utilizada en los sensores BOTDA de largo alcance.

En este capítulo se presentará el trabajo de investigación llevado a cabo para aliviar estas especificaciones estrictas en cuanto al nivel de ER, mediante la decorrelación entre el pedestal de la onda de bombeo y la señal de prueba. Esta se obtiene mediante la modulación en longitud de onda de la fuente óptica, logrando de este modo una mejora en las prestaciones del sensor BOTDA para larga distancia.

3.2. Fundamento teórico

El efecto de una baja relación de extinción de los pulsos de bombeo en los sensores BOTDA de larga distancia se pone de relieve en la Figura 3.1. En ella, se representan las diversas interacciones que tienen lugar en la fibra entre el pulso de bombeo con ER limitada y la onda de prueba. Tal y como se puede observar, la onda de prueba encuentra tres zonas de interacción con la onda de bombeo a medida que viaja a lo largo de la fibra.

La primera de ellas, se extiende desde la entrada de la señal de prueba en la fibra en la posición $z = 0$, hasta la ubicación del pulso en una z_0 particular. En esta zona, solamente se produce interacción entre el pedestal de la onda de bombeo pulsada y la onda de prueba, lo que conlleva que se produzca una amplificación de la señal de prueba por amplificación Brillouin.

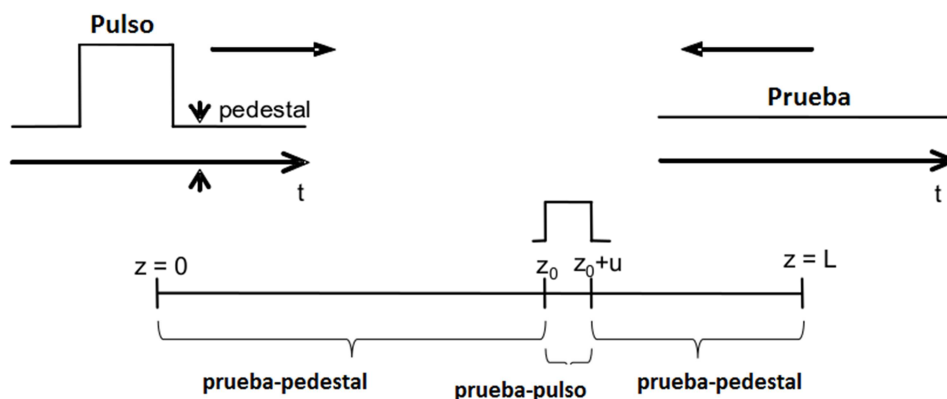


Figura 3.1: Representación esquemática de la interacción entre la onda de prueba y el pulso a lo largo de la fibra.

La siguiente zona, se corresponderá a la anchura del pulso u , y se extiende desde $z = z_0$ hasta $z = z_0 + u$. En ella, la señal de prueba se encuentra con la onda de bombeo pulsada, de manera que la señal de prueba será amplificada durante la anchura u del pulso (la mitad de la anchura espacial del pulso en la fibra, lo que equivale a la resolución espacial).

Finalmente, después de salir de la zona en la que se encuentra con el pulso, hay otra zona, desde $z = z_0 + u$ hasta $z = L$, donde la onda de prueba se amplificará de nuevo por interacción con el pedestal del pulso.

El efecto resultante de la presencia del pedestal del pulso, consiste en que la onda de prueba experimenta más ganancia debido a la presencia del pedestal, que debido al propio pulso. Ganancia que, además, no resulta útil para la detección. Por el contrario, conduce a efectos perjudiciales, debido a que el espectro de ganancia medido por la interacción del pulso y la onda de prueba para una ubicación particular $z = z_0$ en la fibra, es el espectro de ganancia Brillouin para esa ubicación sobre otro espectro que es debido a la interacción con el pedestal del pulso a lo largo de la fibra.

En principio, el espectro de ganancia Brillouin para $z = z_0$ se puede conseguir mediante la normalización de las mediciones mediante el espectro medido sin la presencia del pulso en la fibra. Sin embargo, se ha demostrado que la ganancia adicional en la onda de prueba, degrada la precisión de la medición del desplazamiento en frecuencia Brillouin [TML13] [ZOSL10], lo que se puede observar en la Figura 3.2. Además, la presencia de esta ganancia adicional, supone una limitación en cuanto a la amplitud de la onda de prueba que puede ser detectada y procesada en la detección, dando lugar a una reducción efectiva de la relación señal/ruido.

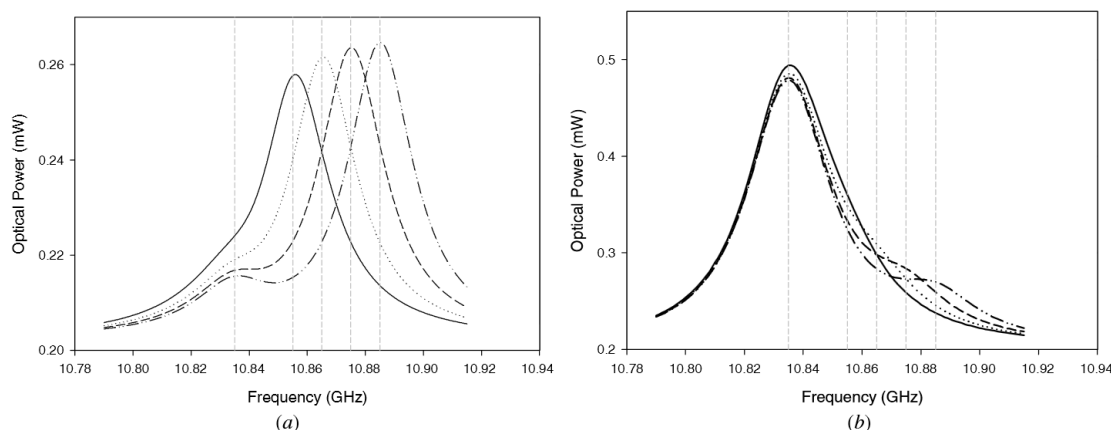


Figura 3.2: Espectros con diferente desplazamiento en frecuencia Brillouin en una fibra de 25 kilómetros para (a) $ER = 40$ dB y (b) $ER = 26$ dB [ZOSL10].

Diferentes trabajos de investigación, han definido los límites a estos efectos perjudiciales, considerando que, con el fin de tener un impacto despreciable, la ganancia adicional en la onda de prueba debida al pedestal debe ser inferior a la ganancia proporcionada por el propio pulso. De ellos se desprende, que la condición de ER límite para evitar los efectos perjudiciales del pedestal en la medida, viene definida por

$$ER > \frac{L_{eff}}{u} \quad (3.1)$$

donde, L_{eff} es la longitud de la fibra efectiva, que tiende asintóticamente a $L_{eff} \approx 22$ kilómetros para fibras de longitud larga, y u es la anchura del pulso, que determina la resolución espacial del sensor.

Por lo tanto, la ER requerida aumentará con la resolución espacial. Por ejemplo, para una resolución espacial de 1 metro, será necesaria una ER mayor que 43dB. Lo que

supone un requisito muy estricto para el modulador o conmutador óptico, que se utilice para la conformación de los pulsos. Por ejemplo, la ER típica de los moduladores electro-ópticos, es de alrededor de 20 a 30 dB, existiendo unos EOM especiales que alcanzan hasta 40 dB, pero que tienen mayores costes. Por otro lado, existen conmutadores ópticos rentables basados en amplificadores ópticos de semiconductor (SOA), con una ER muy grande. Sin embargo, los SOA están limitados en el tiempo de subida de los pulsos que son capaces de producir, siendo típicamente del orden de 1 ns. Lo que limita su capacidad de generar pulsos que sean inmunes a la degradación por SPM [FRM+11] así como para generar pulsos para aplicaciones de alta resolución espacial, utilizando, por ejemplo, el diferencial de pulso con la técnica PAIR [LBL+08].

Por lo tanto, se puede observar una clara necesidad de relajar los requerimientos en relación a la ER de los dispositivos utilizados para la generación de los pulsos de bombeo. Para lograr este objetivo, se propone generar las dos ondas presentes en el sensor BOTDA, la onda de bombeo y la de prueba, mediante dithering de la fuente óptica utilizada en el sensor. El principio de funcionamiento de la técnica propuesta en este trabajo se representa en la Figura 3.3.

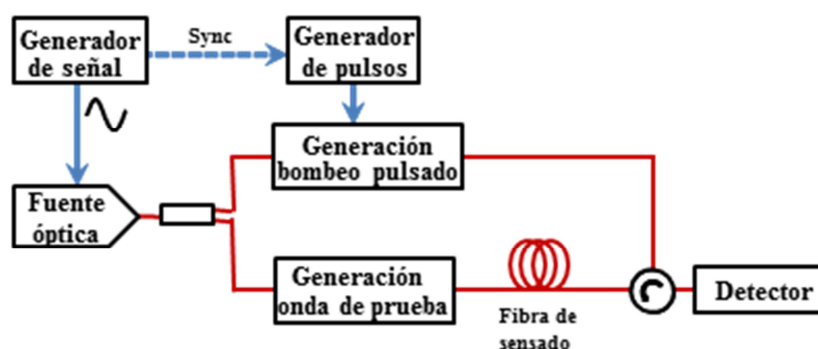


Figura 3.3: Principio de funcionamiento de la técnica de dithering de longitud de onda del láser.

Como se puede observar, se modula directamente la corriente de inyección de un láser, utilizando un generador de señal de onda sinusoidal, el cual a su vez se encuentra sincronizado al generador de pulsos de bombeo. Esto induce una modulación de la longitud de onda de la señal óptica de salida a través del chirp del láser. Mediante esta modulación de la fuente óptica, se ha demostrado que es posible emular un determinado perfil de desplazamiento en frecuencia Brillouin virtual (virtual BFS) a lo largo de la

fibra, que, como se muestra en los resultados experimentales, imita la forma de la modulación y aumenta la tolerancia del sensor ante efectos no locales y ante el ruido espontáneo por dispersión Brillouin [USL14]. Sin embargo, cuando se aplica a un sensor BOTDA con pulsos de baja relación de extinción, el efecto es reducir la ganancia Brillouin que el pedestal del pulso proporciona a la onda de prueba. Nótese, que el principio de funcionamiento de este mecanismo es similar a la interacción entre la onda de bombeo y la onda de prueba en los sensores Brillouin de análisis en el dominio de la correlación óptica [Hot00].

Como se puede observar, el pedestal del pulso y la onda de prueba tienen sus longitudes de onda moduladas con la misma forma sinusoidal. De este modo, al contrapropagarse las dos ondas en la fibra, su diferencia de longitud de onda se correlaciona solo en ciertos lugares de la fibra (picos de correlación). Esta correlación de picos está separada por una distancia que viene definida por

$$\frac{v_g}{2 * f_m} \quad (3.2)$$

donde v_g es la velocidad de grupo de la luz en la fibra y f_m es la frecuencia de modulación de longitud de onda.

Por lo tanto, en todos los demás lugares de la fibra, el pedestal y la onda de prueba no se encuentran correladas, lo que reduce la transferencia de energía entre ambas ondas a través de la ganancia Brillouin. Por lo tanto, la ganancia parásita dada a la onda de prueba causante de los efectos perjudiciales descritos anteriormente, se reduce considerablemente.

3.3. Implementación experimental

Para demostrar y estudiar la capacidad de la técnica descrita en el apartado anterior, se montó la configuración BOTDA que se puede observar en la Figura 3.4, siguiendo el esquema de la Figura 3.3.

Como fuente óptica se utilizó un láser DFB a 1550 nm, cuya corriente de inyección fue modulada por una senoide a 100 KHz, generada mediante un generador de señal. La señal óptica generada, se dividió mediante un acoplador 50:50 en dos ramas.

En la rama superior del montaje, se generó la onda de bombeo pulsada mediante un generador de impulsos eléctricos, que conducía a un modulador electro-óptico Mach-Zehnder, con una ER de 28 dB. La onda pulsada generada, se amplificó mediante un EDFA, de manera que se obtuviera un nivel suficiente de pulso como para excitar el efecto SBS en la fibra óptica. Además, se añadió a la salida del EDFA un conmutador de polarización, para eliminar los efectos de polarización en la interacción Brillouin a lo largo de la fibra, antes de encaminar la onda de bombeo a través de un circulador a la fibra bajo test.

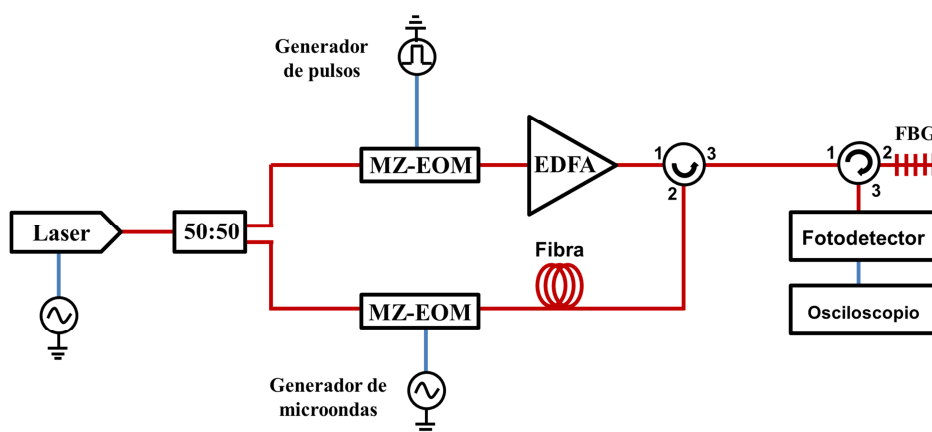


Figura 3.4: Configuración experimental para el sensor BOTDA basado en dithering de la fuente óptica.

En la rama inferior de la configuración, para generar la onda de prueba, se modulará la señal óptica utilizando otro MZ-EOM a frecuencias cercanas a la BFS en la fibra, utilizando un generador de microondas. Este modulador, se controlará mediante la señal de bias, para trabajar en mínima transmisión, a fin de generar una modulación de doble banda lateral con portadora suprimida. Cabe destacar, que esta configuración, es la configuración BOTDA convencional con dos ondas de prueba balanceadas, con la única incorporación al sistema de la modulación chirp de la fuente óptica.

Una vez que las dos ondas se encuentran en la fibra, la onda de prueba será amplificada por ganancia Brillouin. Esta onda de prueba resultante, será encaminada por un

circulador a una FBG que se encuentra en reflexión, sintonizada de manera que dejará pasar la banda lateral superior y reflejará la banda lateral inferior, para trabajar en un sensor de ganancia. La señal reflejada por la FBG, se detectará mediante un fotodetector de 125 MHz.

Por último, en esta prueba de concepto experimental, se utilizó como fibra de detección un carrete de fibra monomodo estándar (ITU G.652) de 20 kilómetros, con una distribución relativamente uniforme de BFS.

3.4. Resultados experimentales

Con el fin de analizar el funcionamiento del sistema, se realizaron dos medidas para obtener el BFS de la fibra, una con dithering del láser y otra sin dithering del láser. En ambos casos se utilizaron unos pulsos de 10 ns de duración, lo que equivale a 1 metro de resolución espacial, y se realizó un promediado en la tarjeta capturadora de 2048 muestras. Los saltos para la modulación frecuencial se fijaron en 3 MHz. En cuanto a la señal sinusoidal para modular el láser, se utilizó una señal de 500 mV_{pp} a 100 KHz de frecuencia.

Para poder analizar los efectos de mejora en cuanto a la ER debidos a la técnica de modulación del láser empleada, se realizará una comparación entre la señal de prueba sin ser amplificada por la señal de bombeo (para obtener esta señal se apagó el EDFA de la rama superior de la configuración), y las trazas BOTDA medidas con y sin dithering del láser. El resultado obtenido se puede observar en la Figura 3.5. En ella se pueden observar tres señales: la onda de prueba detectada sin la onda de bombeo en la fibra, la traza BOTDA convencional, y la traza BOTDA obtenida mediante dithering del láser.

Como se puede observar, la traza BOTDA convencional es plana antes de que el pulso entre en la fibra, a continuación se tiene la ganancia de la señal de prueba en cada posición debido a la interacción con el pulso, y por último, hay otra respuesta plana. En las áreas planas, antes y después de que el pulso se encuentre en la fibra, lo que se está midiendo es la ganancia de la onda de prueba debida a la interacción Brillouin con el pedestal de pulso. Como se aprecia, esta ganancia es mucho mayor que la ganancia

aportada debido a la interacción del pulso, lo cual, tal y como se ha explicado anteriormente, conduce a errores en las medidas.

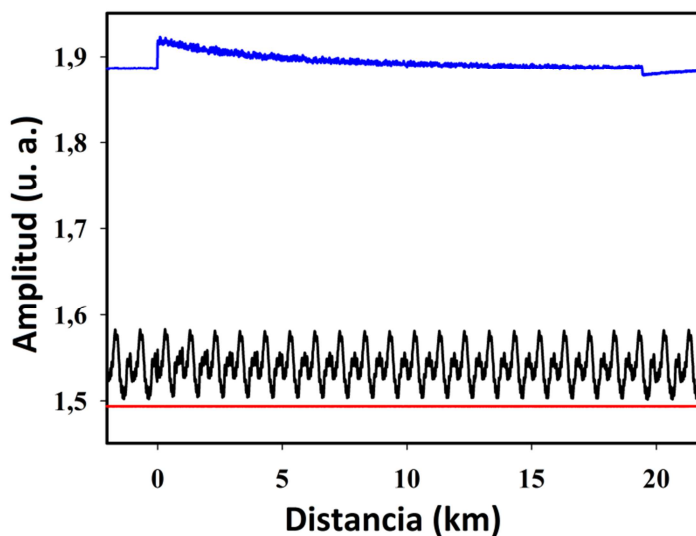


Figura 3.5: Señal BOTDA medida para la configuración convencional (azul discontinua), para la configuración con dithering de la fuente óptica (negra sólida) y, por último, la onda de prueba recibida sin onda de bombeo (roja punteada).

En cuanto a la traza BOTDA obtenida realizando una modulación de la fuente óptica, se puede apreciar como la ganancia en las áreas en las que el pulso no está en la fibra se reduce considerablemente. También se observa que la ganancia en estas áreas ya no es plana, sino que muestra un comportamiento oscilatorio. Esto es debido al hecho de que estamos viendo la ganancia experimentada por la onda de prueba, conforme se encuentra con los frentes de onda del pedestal del pulso con variaciones de la longitud de onda. Como consecuencia de ello, para obtener los espectros Brillouin, habrá que restar la ganancia debida al pedestal del pulso.

La relajación de los requisitos de ER debido a la aplicación de la técnica expuesta, se puede cuantificar mediante la reducción de la ganancia de la onda de prueba, g_{probe} , debido a la interacción Brillouin con el pedestal, que viene dada por

$$g_{probe} = \exp\left(\frac{g_b}{A_{eff}} * P_{ped} * L_{eff}\right) \quad (3.3)$$

donde g_b es el coeficiente de ganancia Brillouin, A_{eff} el área efectiva de la fibra y P_{ped} es la potencia del pedestal del pulso.

Utilizando la ecuación (3.3), se puede encontrar la mejora equivalente en ER, que está asociada a la reducción de la ganancia de la onda de prueba que se obtiene con la técnica de dithering de la fuente óptica. En este experimento particular, la ganancia de la onda de prueba se redujo en un factor equivalente a una mejora de 6 dB en cuanto a la ER del MZ-EOM.

En la Figura 3.6, se puede observar la distribución de los espectros Brillouin en la fibra para la señal BOTDA, con dithering de la fuente óptica. Como se puede apreciar, la modulación de la longitud de onda de la fuente óptica genera un perfil de BFS virtual que imita la forma de esta modulación, en este caso una sinusoidal.

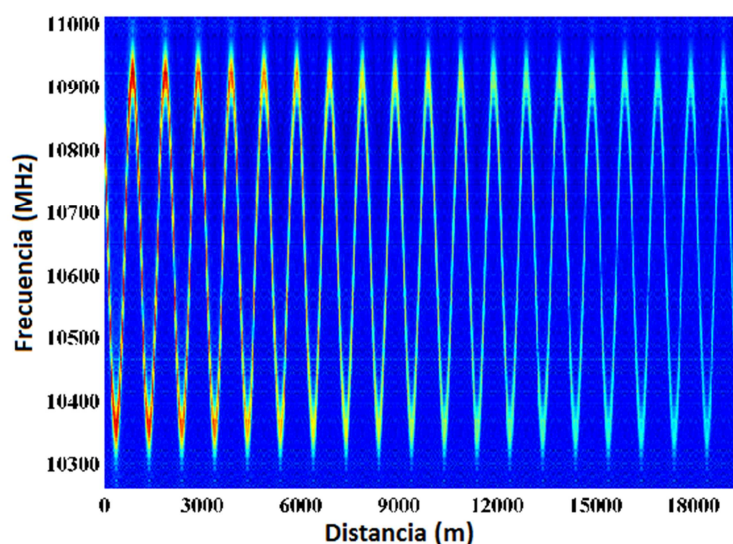


Figura 3.6: Distribución BFS medida a lo largo de la fibra con dithering del láser.

Finalmente, para poder observar de manera visual la mejora obtenida mediante el uso de la técnica descrita en este experimento, se muestra en la Figura 3.7 dos espectros medidos al final de la fibra, uno con dithering del láser y otro sin dithering. Como se puede apreciar, el espectro para el caso del BOTDA convencional se encuentra mucho más distorsionado, lo que se puede atribuir al aumento de los efectos no locales inducidos por la amplificación de la onda de prueba por el gran pedestal del pulso.

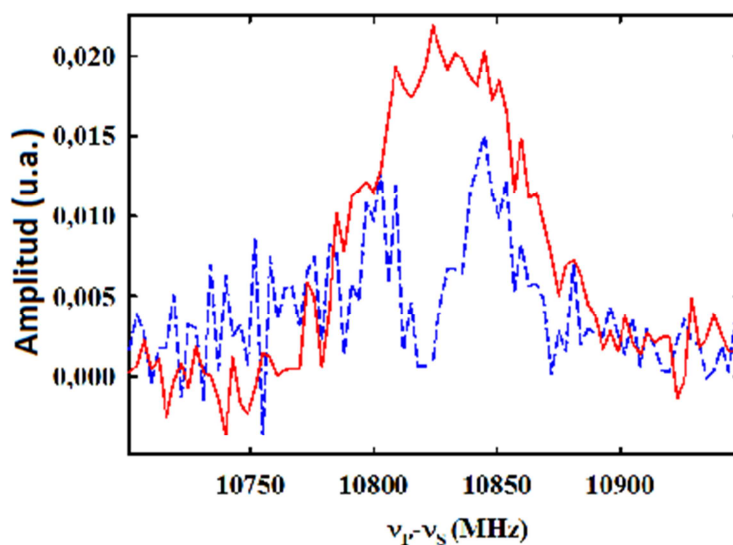


Figura 3.7: Espectro al final de la fibra con dithering de la fuente óptica (roja continua) y sin dithering (azul discontinua).

3.5. Conclusión

- Se ha propuesto y demostrado un novedoso sistema para la reducción de los requisitos de ER del pulso en sensores BOTDA de largo alcance.
- Los experimentos han demostrado un excelente rendimiento, atenuando los efectos no locales inducidos por la interacción de la onda de prueba con el pedestal del pulso sobre la fibra.
- Esta técnica, que ha sido propuesta y demostrada por primera vez, ha sido considerada de interés científico y será expuesta en el congreso internacional: *24rd International Conference on Optical Fibre Sensors* [IUS+15].

4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Para finalizar este trabajo fin de máster, se va a presentar a continuación las conclusiones y posibles líneas futuras tanto en el entorno del sistema BOTDA que se ha analizado globalmente, como en dispositivos concretos dentro de este.

4.1. Conclusiones y contribuciones

Los sensores ópticos Brillouin distribuidos, concretamente los sensores BOTDA, son una herramienta muy útil e interesante para la realización de medidas distribuidas de deformación unitaria y de temperatura, con la capacidad de llegar a largas distancias. Sin embargo, quedan mejoras que realizar, ya que son sensores de gran complejidad, y que requieren de mucho equipamiento, lo cual incrementa su coste. Por lo tanto, los esfuerzos investigadores se centran en aumentar las prestaciones del sensor, tales como precisión, resolución, rango dinámico de medida y velocidad, así como en su simplificación y reducción de costes. Este trabajo fin de máster se ha centrado en las dos líneas de investigación abiertas actualmente en los sensores BOTDA. Por un lado, se ha llevado a cabo una investigación enfocada a simplificar el sistema de los sensores BOTDA, de manera que suponga un abaratamiento de los costes. Y por el otro, se ha trabajado en la mejora de las prestaciones de los sensores BOTDA, concretamente, en mejorar la estricta condición de ER de la onda de bombeo pulsada, mediante la cual se ha mejorado en la precisión y distancia de la medida.

En cuanto a la línea enfocada a la disminución de los costes del sensor, se ha propuesto un nuevo sistema basado en la obtención de las dos señales ópticas presentes en los sensores BOTDA mediante una sola fuente óptica. Para lo cual, se ha propuesto un sistema basado en el filtrado óptico pasivo de la señal óptica modulada en doble banda lateral y pulsada en RF. Dentro de esta línea de investigación, se han implementado dos posibles soluciones experimentales diferentes, en función de la manera en la que se ha obtenido la señal óptica modulada en doble banda lateral. En ambos casos, se ha obtenido unos buenos resultados, demostrando la capacidad de la técnica expuesta. Esto supone una notable reducción de los costes de los sensores BOTDA, abriéndoles las

puertas de mercados potenciales en los que en la actualidad no tienen cabida, debido al alto coste de los sensores.

Cabe mencionar, que esta técnica de mejora ha sido considerada de interés científico, y ha dado lugar a dos artículos en congreso. Uno a nivel estatal y otro internacional, correspondientes al primer y segundo esquema de la técnica. Con el primero se ha expuesto en *IkerGazte: Nazioarteko ikerkuntza euskaraz [ISM+15]* y con el segundo se hará lo propio en el *24rd International Conference on Optical Fibre Sensors [IUM+15]*.

Por lo tanto, el desafío investigador realizado en este trabajo fin de máster ha sido altamente gratificante, al haber conseguido llamar la atención al máximo nivel investigador, con divulgación científica de los resultados. Lo cual ha supuesto un reto a nivel personal, por el alto nivel exigido.

En cuanto a la línea enfocada a la mejora de las prestaciones del sensor, se ha propuesto un novedoso sistema para la relajación de las exigencias en cuanto a ER de la señal del pulso, basado en la modulación a baja frecuencia de la fuente óptica con la que se obtienen las dos señales. En el experimento realizado, se ha obtenido unos buenos resultados, demostrando la capacidad de la técnica expuesta. Lo que supone una notable mejora en cuanto a precisión de los sensores BOTDA de larga distancia, sin aumentar el coste final del sensor.

Cabe mencionar, al igual que en el caso anterior, que este estudio ha sido considerado de interés científico, y ha dado lugar a un artículo de congreso. Concretamente un artículo en el *24rd International Conference on Optical Fibre Sensors [IUS+15]*. Por lo tanto, el desafío investigador realizado en este trabajo fin de máster ha sido altamente gratificante, al haber conseguido llamar la atención al máximo nivel investigador, mediante una divulgación científica de los resultados obtenidos en el experimento.

Por todo ello, se concluye que se han cumplido los objetivos del trabajo fin de máster, habiendo aportado técnicas pioneras en el campo de los sensores BOTDA.

4.2. Líneas abiertas

La continuación natural de este trabajo fin de máster, se centra en la investigación de nuevas técnicas que permitan mejorar las prestaciones de los sensores BOTDA, buscando una reducción de los costes del sensor, así como mejoras en las medidas. Para ello, las líneas de investigación pueden ser los límites encontrados durante la realización de este trabajo final de máster.

En primer lugar, en cuanto a la línea de investigación enfocada a reducir los costes del sensor se refiere, el primer paso será realizar medidas con la configuración descrita en el apartado 2.3.2 para mayores distancias y menor resolución espacial. De manera que permita encontrar los límites del esquema propuesto. Cabe destacar el hecho que este sensor de menor coste económico es completamente compatible con las implementaciones del sensor enfocado a obtención de medidas de alta resolución espacial.

Una vez fijados los límites del sistema, el siguiente trabajo de investigación estará enfocado a implementar nuevas técnicas experimentales para obtener las dos señales ópticas necesarias para el sensor mediante otro método. Para ello, el primer método a investigar será el de la obtención de las dos señales mediante modulación directa de un láser DFB.

En cuanto a la línea de investigación enfocada a mejorar las prestaciones del sensor, una vez que se han demostrado las mejoras que otorga en el sensor la técnica del dithering de la fuente óptica, será investigar nuevas aplicaciones y mejoras relacionadas con esta técnica.

Otra línea de investigación, será la de analizar los efectos nocivos de los efectos no locales en los sensores BOTDA, para una vez analizados, abrir nuevas líneas de investigación enfocadas a mejorar o paliar los problemas derivados de los efectos no locales.

BIBLIOGRAFÍA

- [ACN04] M. Alahbabi, Y. T. Cho, and T. P. Newson. Comparison of the methods for discriminating temperature and strain in spontaneous Brillouin based distributed sensors. *Optics Letters*, 29(1):26-28, 2004.
- [ACN+04] Alahbabi, M. N., Cho, Y. T., Newson, T. P., Wait, P. C., Hartog, A. H., “Influence of modulation instability on distributed optical fibre sensors based on spontaneous Brillouin scattering,” *JOSA B* 21(6), 1156-1160 (2004).
- [AFB+03] Afshar V, S., Ferrier, G. A., Bao, X., & Chen, L. Effect of the finite extinction ratio of an electro-optic modulator on the performance of distributed probe-pump Brillouin sensor systems. *Optics Letters*, 28(16), 1418-1420, 2003.
- [Agr01] Govind P. Agrawal. *Nonlinear fiber optics*. Academic Press, Inc., 2001.
- [BCB07] A. W. Brown, B. G. Colpitts, and K. Brown. Dark-pulse Brillouin optical time-domain sensor with 20-mm spatial resolution. *Journal of Lightwave Technology*, 25(1):381-386, 2007.
- [CS72] H. Z. Cummins and P. E. Schoen. *Laser Handbook*, volume 2 of Amsterdam: North-Holland. 1972.
- [Dem00] M. D. DeMerchant, A. W. Brown, X. Bao, and T. W. Bremner. Signal processing for a high-spatial-resolution distributed sensor. *Optical Engineering*, 39(6):1632-1635, 2000.
- [DLM+14] Dominguez-Lopez, A., Lopez-Gil, A., Martin-Lopez, S., & Gonzalez-Herraez, M. (2014). Signal-to-noise ratio improvement in BOTDA using balanced detection. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(4), 338-341.

- [DML+08] Diaz, S., Mafang, S. F., Lopez-Amo, M., & Thévenaz, L. A high-performance optical time-domain brillouin distributed fiber sensor. *IEEE Sensors Journal*, 8(7), 1268-1272, 2008.
- [FCC+13] Farahani, M. A., Castillo-Guerra, E., & Colpitts, B. G. A detailed evaluation of the correlation-based method used for estimation of the brillouin frequency shift in BOTDA sensors. *IEEE Sensors Journal*, 13(12), 4589-4598, 2013
- [FRM+11] Foaleng, S., Rodríguez-Barrios, F., Martín-López, S., González-Herráez, M., and Thévenaz, L., “Detrimental effect of self-phase modulation on the performance of Brillouin distributed fiber sensors,” *Opt. Letters* 36(2), 97–99 (2011).
- [GJR+99] E. Geinitz, S. Jetschke, U. Rpke, S. Schrter, R. Willsch, and H. Bartelt. The influence of pulse amplification on distributed fibre-optic brillouin sensing and a method to compensate for systematic errors. *Measurement Science and Technology*, 10(2):112-116, 1999.
- [ISM+15] Iribas H., Sagues M., Mariñelarena J. and Loayssa A. Egituren egoeraren monitorizaziorako zuntz optikoan oinarritutako sentore sinplifikatua. I. Ikergazte: Nazioarteko ikerketa euskaraz, 2015.
- [IUM+15] Iribas H., Urricelqui J., Mariñelarena J., Sagues M. and Loayssa A. Simplified Brillouin sensor for structural health monitoring applications based on passive optical filtering. 24rd International Conference on Optical Fibre Sensors, 2015.
- [IUS+15] Iribas H., Urricelqui J., Sagues M. and Loayssa A. Enhanced tolerance to pulse extinction ratio in Brillouin optical time domain analysis sensors by dithering of the optical source. 24rd International Conference on Optical Fibre Sensors, 2015.

- [Hor89] Horiguchi, T., & Tateda, M. BOTDA - nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory. *Journal of Lightwave Technology*, 7(8), 1170-1176, 1989.
- [Hot00] Hotate, K., "Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique-proposal, experiment and simulation," *IEICE Trans. Electron.* E83-C(3), 405–411 (2000).
- [HS14] Hong, J. and Song, K., "Simplified Brillouin optical time-domain analysis with extended measurement range by frequency dithering," *Proc. SPIE 9157, 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors* (2014).
- [JCW+14] Jiang, S., Chang, J., Zhang, S., Wang, Z., Luo, S., Sun, B., Jia, C. A method for eliminating the impact of microwave sweeper power fluctuation in BOTDA system. *Photonic Sensors*, 4(1), 86-91, 2014.
- [KCN05] Kishida, K., Che-Hien, L., & Nishiguchi, K. Pulse pre-pump method for cm-order spatial resolution of BOTDA. , 5855 PART II 559-562, 2005.
- [KM72] W. Kaiser and M. Maier. *Laser Handbook*, volume 2 of Amsterdam: North- Holland. 1972.
- [KST+07] Koyamada, Y., Sakairi, Y., Takeuchi, N., & Adachi, S. Novel type Brillouin optical time-domain reflectometry for measuring distributed strain and temperature with sub-meter spatial resolution in km-long fiber. 2455-2458, 2007.
- [LBR+08] Li, Y., Bao, X., Ravet, F. and Ponomarev, E. "Distributed Brillouin sensor system based on offset locking of two distributed feedback lasers," *Appl. Opt.* 47(2), 99–102 (2008).

- [LBL+08] Li, W., Bao, X., Li, Y., and Chen, L., “Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing,” *Opt. Express* 16, 21616–21625 (Dec 2008).
- [LWP+98] Lecoecuche, V., Webb, D. J., Pannell, C. N. and Jackson, D. A., “Brillouin based distributed fibre sensor incorporating a mode-locked Brillouin fibre ring laser,” *Opt. Commun.* 152(4-6), 263–8 (1998).
- [MCZ+14] Minardo, A., Coscetta, A., Zeni, L., & Bernini, R. (2014). High-spatial resolution DPP-BOTDA by real-time balanced detection. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(12), 1251-1254.
- [MKN01] S. M. Maughan, H. H. Kee, and T. P. Newson. Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous brillouin backscatter. *Measurement Science and Technology*, 12(7):834{842, 2001.
- [Neu14] www.neubrex.com/htm/products/pro-nbx6000.htm
- [NTR97] M. Nikls, L. Thvenaz, and P. A. Robert. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 15(10):1842-1851, 1997.
- [Omn14] www.omnisens.com/ditest/3522-ditest-dlight.php
- [Ozo14] www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0115.pdf
- [Pos00] R. Posey. Simultaneous measurements of temperature and strain using stimulated brillouin scattering in geo2-doped core and dispersion shifted fiber. *IEICE Transactions on Electronics*, E83-C(3):413-417, 2000.
- [Sen14] www.sensornet.co.uk/technology/distributed-temperature-sensing.html

- [SNO13] Shima, H. Naganuma, H. Okamura, S. Optical properties of multiferroic BiFeO₃ films. *Materials Science - Advanced Topics*, Prof. Yitzhak Mastai (Ed.), 2013.
- [SY10] Song, K. and Yang, S., “Simplified Brillouin optical time-domain sensor based on direct modulation of a laser diode,” *Opt. Express* 18(23), 24012-24018 (2010).
- [TFMFLF] Felipe López Fernandino. Trabajo fin de máster. Universidad Pública de Navarra 2014.
- [TFMJMG] Jairo Mateos Goñi. Trabajo fin de máster. Universidad Pública de Navarra 2014.
- [TFMJUP] Javier Urricelqui Polvorinos. Trabajo fin de máster. Universidad Pública de Navarra 2012.
- [TLA+04] Thévenaz, L., Le Floch, S., Alasia, D. and Troger, J., “Novel schemes for optical signal generation using laser injection locking with application to Brillouin sensing,” *Meas. Sci. Technol.* 15, 1519–24 (2004).
- [TML13] Thévenaz, L., Mafang, S., and Lin, J., “Effect of pulse depletion in a Brillouin optical time-domain analysis system,” *Opt. Express* 21(12), 14017–14035 (2013).
- [USL14] Urricelqui, J., Sagues, M., and Loayssa, A., “Synthesis of Brillouin frequency shift profiles to compensate non-local effects and Brillouin induced noise in BOTDA sensors,” *Opt. Express* 22(15), 18195–18202 (2014).
- [ZOSL10] A. Zornoza, D. Olier, M. Sagues, and A. Loayssa. Brillouin distributed sensor using RF shaping of pump pulses. *Measurement Science and Technology*, 21(9), 2010.