

Anexos

Anexo A

Técnicas Brillouin de sensado distribuido

A.1 Introducción

Como se ha comprobado a lo largo del presente documento, el *scattering* de Brillouin puede ser empleado como base para el desarrollo de sensores. En estos casos, la fibra óptica constituye el medio donde tiene lugar la interacción, actuando al mismo tiempo de transductor distribuido y canal óptico. La ventaja de estos sensores es que pueden medir el cambio de un parámetro específico a lo largo de la longitud completa de la fibra, por lo que, la resolución espacial y la sensibilidad son factores clave.

Desde el primer resultado obtenido empleando el efecto Brillouin en fibras ópticas como técnica de medida a finales de los 70s, la técnica ha evolucionado y cambiado dinámicamente, apareciendo nuevos conceptos y configuraciones con el fin de resolver y mejorar el sensado.

Los sensores basados en el *scattering* Brillouin pueden ser clasificados principalmente en dos grupos según la configuración y el método en el que se basen: sensores de Brillouin espontáneo (*Spontaneous Brillouin Sensors*) y sensores de Brillouin estimulado (*Stimulated Brillouin Sensors*). Siguiendo la clasificación anterior, y con el fin de tener una visión general, en las siguientes secciones del presente anexo se desarrollará una breve descripción las principales técnicas que han aparecido hasta la fecha.

A.2 Sensores de Brillouin espontaneo

Los sensores basados en el *scattering* Brillouin espontaneo emplean una única señal incidente en la fibra para producir el *scattering*, sin ningún tipo de estímulo adicional. Por tanto, principalmente dentro de esta clase de sensores pueden englobarse las técnicas basadas en la Reflectometría óptica de Brillouin en el dominio del tiempo (*BOTDR*) y correlado (*BOCDR*) y la relación Landau-Placzek (*LPR*).

A.2.1 Reflectometría óptica de Brillouin en el dominio del tiempo (*BOTDR*)

Los sensores basados en la técnica *BOTDR* emplean el *scattering* Brillouin espontáneo para obtener información de la temperatura y el *strain* de la fibra. El *BOTDR* es un método de detección coherente que emplea un pulso de luz como señal de bombeo, consiguiendo así una medida distribuida a lo largo de la fibra.

La señal pulsada de bombeo se introduce en un extremo de la fibra generando el *scattering* Brillouin espontáneo en su interior. La luz que se dispersa hacia atrás se mide en un receptor coherente mediante la mezcla de ésta con la procedente de un oscilador local [39]. Debido a la baja potencia de la señal dispersada hacia atrás, la atenuación en la fibra óptica puede introducir un efecto muy perjudicial en la calidad de la medida. Es por ello que, para mejorar la precisión del sistema, se emplea un detector óptico coherente.

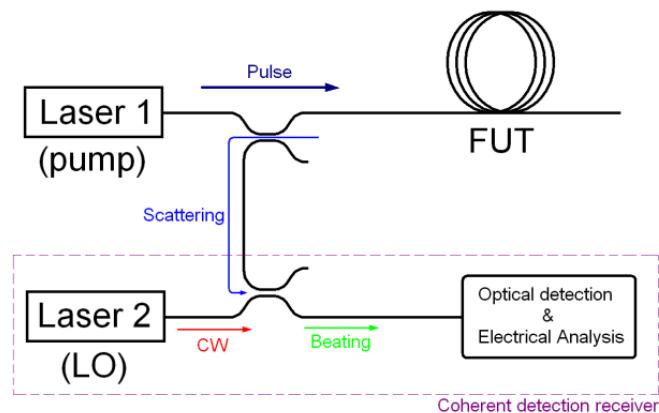


Figura A.1. Configuración típica de un sistema *BOTDR*

La Figura A.1 muestra la configuración típica de un sistema *BOTDR*, donde *FUT* representa la fibra bajo análisis, *LO* se trata del oscilador local y *CW* es una señal óptica continua.

Esta técnica permite un rango de medida superior a los 10 kilómetros sin regeneración de señal [40] y cientos de kilómetros con regeneración de señal en línea [41, 42], aunque su rango dinámico se ve reducido con la longitud de la fibra óptica. Otra desventaja de este método es la limitación en la resolución espacial, que no puede ser inferior a 1 metro. Además, el desplazamiento en frecuencia depende simultáneamente de la temperatura y el *strain*, y es necesario introducir un filtrado eléctrico para eliminar la componente del *scattering* Rayleigh.

A.2.2 Relación Landau-Placzek (LPR)

Los sensores basados en la relación Landau-Placzek son una combinación de *BOTDR* con detección directa y *OTDR*, proporcionando una forma de obtener de forma separada la temperatura o *strain* de una fibra. *LPR* se fundamenta en la relación entre la intensidad dispersada por el *scattering Rayleigh* y el *scattering Brillouin*, ya que esta relación solamente depende de la temperatura de la fibra.

Como ya se ha comentado anteriormente, el desplazamiento en la frecuencia Brillouin se relaciona simultáneamente con cambios de temperatura y elongación mecánica longitudinal de la fibra. Sin embargo, la señal reflejada por el *scattering Rayleigh* es insensible a la temperatura, proporcionando además un método de medida de la atenuación de la fibra debido a otras causas como pueden ser perdidas por empalmes o micro curvaturas. Debido a la relativa pequeña diferencia frecuencial entre la señal dispersada por el *scattering Brillouin* y la reflejada por Rayleigh, la atenuación de la fibra para ambas señales puede considerarse idéntica. Por lo tanto, la relación entre las intensidades resultantes del *scattering Rayleigh* y Brillouin proporciona una medida del perfil de temperatura distribuido de una fibra óptica sin tener en cuenta la elongación [43]. Una vez conocida la distribución de la temperatura a lo largo de la fibra es fácil determinar la distribución del *strain* analizando el desplazamiento en la frecuencia Brillouin.

La primera parte del sensor consiste en un sistema *BOTDR* con detección directa, proporcionando información de intensidad y no de fase. La intensidad medida no proporciona una correspondencia directa con la temperatura debido a las atenuaciones que aparecen en la fibra, y que tienen una influencia en la intensidad. Por tanto, se emplea un sistema *OTDR* estándar para determinar el perfil de pérdidas distribuido de la fibra. Posteriormente se resta la intensidad medida con el sistema *BOTDR*, quedando limpia de la atenuación de la fibra y cualquier otra pérdida puntual.

La implementación del sistema *LPR* no es trivial, ya que requiere de un gran procesado y control. Reflectometría óptica de Brillouin en el dominio correlado (*BOCDR*)

La reflectometría óptica de Brillouin en el dominio correlado es una de las técnicas de sensado distribuido de Brillouin que ha sido propuesta más recientemente [44]. En un sistema *BOCDR*, el desplazamiento de la frecuencia Brillouin se obtiene controlando la interferencia entre la onda de sonda continua y la de bombeo.

Esta técnica permite tener un rango espacial por debajo de un metro a lo largo de una fibra óptica de un kilómetro [45]. Además, gracias a que el método *BOCDR* no se basa en un pulso óptico sino una onda continua, no son necesarios largos tiempos de integración, resultando más rápido que un sistema *BOTDR*.

En la Figura A.2 se presenta una descripción esquemática de un sistema *BOCDR*. La onda procedente del láser (*DFB-LD*) se divide en una onda de bombeo y una onda de referencia. La onda de bombeo se introduce en la fibra (*FUT*) y la señal de *Stokes* producida como consecuencia del *scattering Brillouin* espontáneo se introduce directamente en un receptor heterodíodo compuesto por dos fotodiodos balanceados (*PDs*). La onda de referencia se emplea

como oscilador local (*LO*). La señal eléctrica producto del batido entre las dos ondas se monitoriza a través de un analizador de espectros ópticos (*ESA*). Debido a que la diferencia frecuencia entre la señal de *Stokes* y la de referencia es del orden de 11 GHz, esta configuración suele llamarse también esquema auto-heterodino.

El esquema *BOCDR* presenta un compromiso entre el rango de medida y la resolución espacial. Debido a la limitación en el *scattering* de Rayleigh, el número de puntos de sensado efectivos se ha fijado en aproximadamente 580 [45]. Esto significa que, por ejemplo, cuando la resolución espacial es de 40 cm o 13 mm, el rango de medida es 224 m [46] o 7.6 m [45], respectivamente. Así que, para lograr un rango de medida del orden de kilómetros, la resolución espacial debe ser de aproximadamente 2 m o superior, que es incluso peor que el proporcionado por el esquema *BOTDR*.

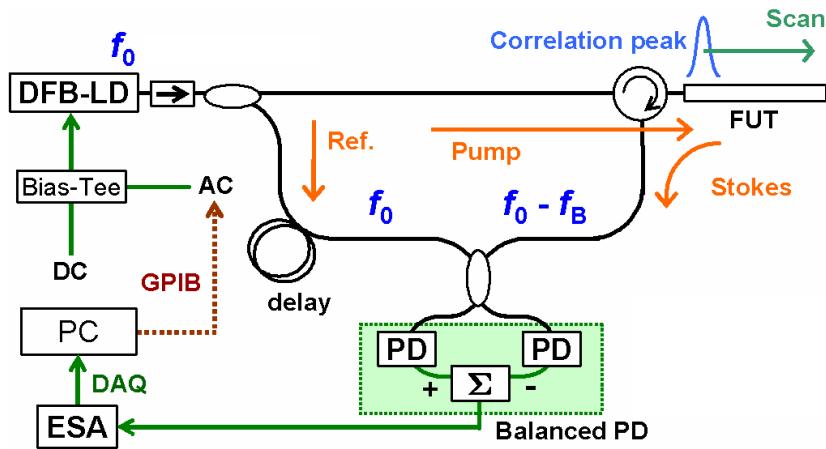


Figura A.2. Descripción esquemática de un BOCDR [45]

A.3 Sensores de Brillouin estimulado

Por otro lado, los sensores basados en el *scattering* Brillouin estimulado emplean un estímulo adicional para la generación del fonón dado por un haz incidente, consiguiendo realizar o amplificar el *scattering* Brillouin. Se identifica comúnmente debido a que se introduce una onda óptica por ambos extremos de la fibra óptica, mientras que en la configuración espontánea únicamente se inyecta en uno de ellos.

A.3.1 Análisis óptico de Brillouin en el dominio del tiempo (*BOTDA*)

En un sistema *BOTDA*, al estar basado en el *scattering* Brillouin estimulado, intervienen dos señales para llevar a cabo la medida, la onda de bombeo y la sonda. La onda de bombeo, generalmente pulsada, es la responsable de excitar la onda acústica y producir la onda contra propagante de *Stokes*, mientras que la sonda continua se introduce en el extremo opuesto de la fibra. Cuando la diferencia frecuencial entre la onda de bombeo y la sonda coincide con la frecuencia Brillouin ν_B de la fibra, la sonda se amplifica como consecuencia del *scattering* Brillouin estimulado, pudiéndose medir en función del tiempo [47].

Midiendo la intensidad de la sonda que se recibe por el extremo del bombeo puede calcularse su ganancia o bien, midiendo el desvanecimiento de la intensidad del bombeo por el extremo opuesto, las pérdidas causadas por el *scattering* Brillouin. El objetivo de este método es determinar el espectro de ganancia Brillouin barriendo la longitud de onda de la sonda con respecto a de la bombeo. Si la diferencia frecuencial entre la onda de bombeo y la sonda varía en torno a ν_B , el espectro de ganancia Brillouin queda dado por [48],

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

siendo g_{B0} el coeficiente de ganancia Brillouin y $\Delta\nu_B$ la anchura espectral Brillouin. Sin embargo, debido a que cambios de temperatura o *strain* producen variaciones de ν_B , la frecuencia en la que se presenta el máximo será proporcional a la temperatura o *strain* en la región de *scattering*.

Para determinar de forma distribuida el desplazamiento Brillouin a lo largo de la fibra, bien la onda de bombeo o la sonda debe ser pulsada. De este modo, al propagarse el pulso a través de la fibra, la interacción Brillouin solo se produce en la posición del pulso, proporcionando así la medida distribuida. Por tanto, la resolución de este método queda limitada por la anchura del pulso, sin embargo, si el pulso es menor que el tiempo de amortiguamiento acústico la eficiencia de la interacción Brillouin cae drásticamente. El método *BOTDA* requiere de una instrumentación rápida, capaz de almacenar la ganancia Brillouin mientras el pulso se propaga a través de la fibra.

En la Figura A.3 se muestra el esquema propuesto por Horiguchi y sus colaboradores [13] para la implementación del sistema *BOTDA*. Este esquema emplea dos fuentes laser continuas e independientes, una de ellas para el bombeo y la otra para la sonda.

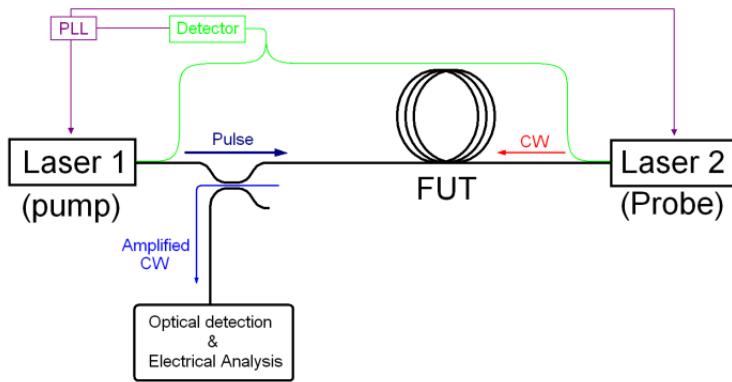


Figura A.3. *Setup* experimental *BOTDA* propuesto por Horiguchi y sus colaboradores [13]

El bombeo es pulsado, por ejemplo con un modulador electro óptico controlado por un generador de pulsos, mientras que la frecuencia de separación entre los dos láseres puede controlarse mediante un detector heterodino y un oscilador de enganche de fase (*PLL*).

Un segundo método, propuesto por Nikles y sus colaboradores [49] y representado en la Figura A.4, emplea la misma fuente laser para generar las ondas de bombeo y sonda, mientras

que utiliza un modulador óptico para generar la sonda y sintonizar sus bandas laterales alrededor de la frecuencia de la onda de bombeo.

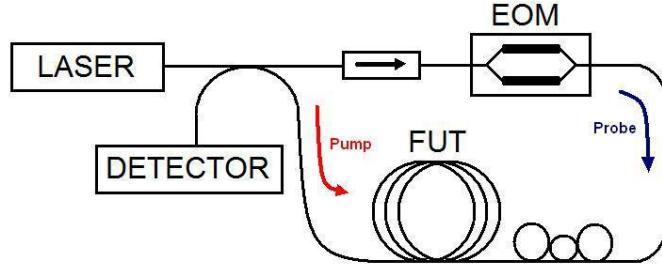


Figura A.4. Setup experimental *BOTDA* propuesto por Niekles y colaboradores [49]

Cuando la frecuencia de modulación es igual a la frecuencia de Brillouin de la fibra, la banda lateral inferior interacciona con la onda de bombeo mediante el *scattering* Brillouin estimulado. De este modo se amplifica la banda lateral inferior en el interior de la fibra y puede ser obtenido el espectro de ganancia Brillouin realizando un barrido de la frecuencia del modulador.

El rango dinámico de un sistema *BOTDA* puede calcularse considerando el intercambio de energía producido entre la onda de bombeo pulsada, la sonda, la atenuación producida por la fibra óptica y los dispositivos direccionales ópticos, es decir, circulador o acoplador direccional, [13],

$$DR = \frac{1}{2} \left\{ P_p + P_{CW} + G_B - L_c - P_d + \frac{SNIR}{2} - \frac{SNR_r}{2} \right\} \quad (A.2)$$

donde P_p representa la potencia de pico de la señal pulsada (dBm), P_{CW} la potencia (dBm) de la onda continua (CW), L_c la pérdida del dispositivo direccional óptico (dB), P_d la mínima potencia del pulso detectable en el receptor (dBm), $SNIR$ la mejora media en la relación señal a ruido (dB), SNR_r la relación señal a ruido necesaria para la medida de la temperatura o *strain* y G_B la ganancia de Brillouin (dB) que está dada por,

$$G_B = 10 \log \left(\frac{\eta g_{B0} \nu W}{2\pi w} \right) - 30 \text{dB} \quad (A.3)$$

donde η es el factor de polarización, de valor la unidad cuando se conserva la polarización y $\frac{1}{2}$ cuando se mezcla la polarización; g_{B0} el coeficiente de ganancia de Brillouin, w el radio del campo modal de la fibra, ν la velocidad de la luz en la fibra ($\nu = c/n$) y W la anchura del pulso.

En la técnica propuesta por Niekles, asumiendo despreciable la pérdida de potencia en la interacción del bombeo con la sonda, el análisis de la medida de la ganancia se simplifica por la aproximación de bombeo constante. Por otra parte, si inicialmente las dos bandas laterales poseen casi la misma magnitud, y considerando el coeficiente de pérdidas de la fibra α en una longitud de fibra L , el coeficiente de ganancia de Brillouin puede obtenerse mediante,

$$I_{out} = 2e^{-\alpha L} I_s(L) \cosh[g_B(\nu) I_p(0) L_{eff}] \quad (A.4)$$

donde I_{out} es la intensidad de la luz dispersada hacia atrás, $I_s(L)$ la intensidad inicial de la sonda, $I_p(0)$ la intensidad de la onda de bombeo y L_{eff} la longitud efectiva.

Una variación a los esquemas anteriores sería la técnica empleada cuando sólo es accesible un extremo de la fibra. El pulso de bombeo y la sonda se utilizan para el barrido de la región de interacción a lo largo de la fibra [40], produciéndose los pulsos de sonda contra propagantes por reflexión de Fresnel desde el extremo opuesto de la fibra. En general, alguna de las ventajas de este método es que requiere de una sola fuente y proporciona una alta resolución del espectro de ganancia y alta precisión de la medida distribuida. Por el contrario, requiere de un modulador con un gran ancho de banda, una elevada potencia en el bombeo y una gran pérdida de inserción (~ 4.7 dB) en el modulador electro-óptico (*EOM*), así como un filtro óptico muy estrecho que atenúa la señal de bombeo, que de lo contrario alcanzaría el detector óptico.

En la primera prueba de un sistema *BOTDA* para la medida distribuida de la temperatura se demostró una resolución de temperatura de 1 K, con una resolución espacial de 10 metros sobre un longitud de más de 22Km, midiendo las pérdidas de Brillouin en lugar de la ganancia [50, 51]. Posteriormente, se logró obtener una resolución espacial de hasta 1 metro sobre 11Km con una duración del pulso de 10ns [52]. Desde entonces, se han realizado diversos ajustes del *setup* y variaciones en el esquema *BOTDA*. Entre una de estas variaciones se encuentra la conocida como técnica “dark-pulse” [53], en la que se propone la inserción de un amplificador óptico semiconductor (*SOA*) para generar el pulso de bombeo debido a su alta relación de extinción (~ 40 dB); añadir un pulso de pre-excitación [54] para la generación del fonón o el método de eco propuesto por Thevenaz y sus colaboradores [55] donde el rango espacial podría reducirse por debajo del metro de resolución. Otra variación de la técnica *BOTDA* es la supresión de las fluctuaciones inducidas de polarización dividiendo y recombinando la onda de bombeo para obtener un grado de polarización de cero (*DOP*) [56].

A pesar de estas ventajas la técnica *BOTDA* queda lejos de ser perfecta, ya que, no es capaz, por ejemplo, de localizar roturas a lo largo de la fibra, necesita una gran coherencia entre la sonda y el bombeo, induce un agotamiento de la señal si la sonda excede de un valor umbral, no puede diferenciar entre una medida dada únicamente por temperatura o *strain*, o requiere de un alto promediado en la detección para incrementar la calidad de la medida.

A.3.2 Análisis óptico de Brillouin en el dominio correlado (*BOCDA*)

La técnica *BOCDA*, propuesta por Hotate y sus colaboradores [57] para mejorar el límite de resolución espacial de los sensores distribuidos que emplean técnicas basadas en pulsos, controla el *scattering* Brillouin mediante la síntesis de la función coherente óptica (*SOCF*). Esta técnica implica la modulación de fase de la onda de bombeo continua y de la sonda, produciéndose únicamente la interacción de Brillouin en aquellas posiciones donde la fase de estas dos señales está altamente correlada.

Como la diferencia de fase entre el bombeo y la sonda varía, la posición a lo largo de la fibra donde ocurre la interacción de Brillouin cambia, proporcionando así una forma de barrer la longitud completa de la fibra. Por tanto, el espectro de ganancia Brillouin se puede

determinar en estas posiciones de alta correlación entre la fase del bombeo y las ondas de sonda. La Figura A.5 muestra el *setup* experimental empleado por Hotate y sus colaboradores [58].

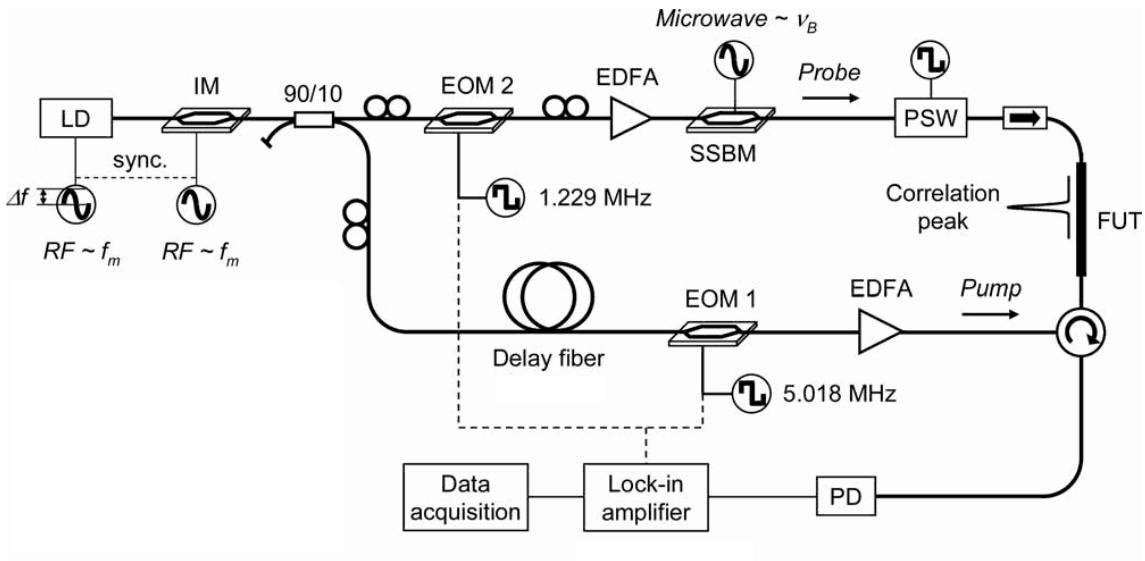


Figura A.5. *Setup* experimental de la técnica BOCDA

En técnicas *BOTDA* convencionales, si la anchura espectral de los pulsos excede la anchura de ganancia Brillouin el espectro de ganancia se ensancha y deteriora la medida. Sin embargo, en *BOCDA* si la anchura espectral del bombeo y la sonda se incrementa, la resolución de la técnica de correlación también lo hace.

Su principal ventaja radica en que, al emplear señales continuas, puede proporcionar una resolución mucho mayor comparada con la de los sensores *BOTDA*, donde la resolución espacial queda dada aproximadamente por la mitad de la anchura del pulso de la sonda. Se han logrado resoluciones espaciales de hasta 1.6mm, así como mejoras en la tasa de muestreo de 1 kHz y un rango de medida de 1 km [59]. Sin embargo, una desventaja común en el sistema *BOCDA* es su limitación en el rango de medida, debido a la naturaleza periódica de la posición de medida, y que la longitud del transductor es corta comparado con otras técnicas; adicionalmente el transductor es mucho más complejo y el post-procesado es más intenso, lo cual significa un mayor tiempo de medida.

A.3.3 Análisis óptico de Brillouin en el dominio frecuencial (*BOFDA*)

La técnica *BOFDA* se basa en la medida de la función de transferencia banda base compleja que relaciona las amplitudes de la onda de bombeo contra propagante y la sonda a lo largo de la fibra. El esquema básico de la configuración *BOFDA* se representa en la Figura A.6, propuesta originalmente por Garus y sus colaboradores [60].

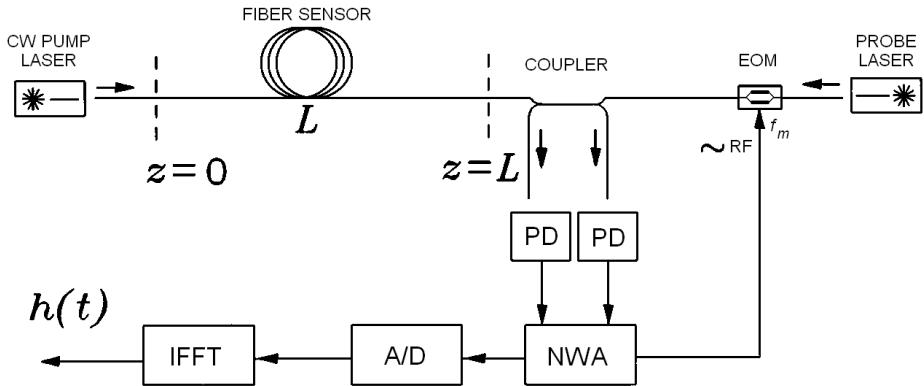


Figura A.6. Esquema básico de la configuración del sistema *BOFDA*

La onda de sonda continua se modula en intensidad con una señal sinusoidal en un rango de frecuencias, mientras que en la onda de bombeo se induce una modulación en intensidad. Esta señal inducida tiene una componente de alterna (componente AC) debido a la interacción con la sonda contra propagante. Midiendo los cambios en la componente AC de la onda de bombeo se determina el perfil de la frecuencia de Brillouin determinado por la función de transferencia banda base compleja. Una vez determinada la función de transferencia banda base compleja, se calcula la respuesta al impulso aplicando la transformada de Fourier inversa (*IFFT*). De este modo puede determinarse el perfil de temperatura y el *strain* a lo largo de la fibra [61, 62]. La desventaja de *BOFDA* es el gran tiempo que emplea para la realización de la medida, en el que la temperatura y *strain* en la fibra debe ser constante; esto implica un menor tiempo de respuesta frente a cambios abruptos de esas variables.

A.4 Comentarios generales

En general, tanto los sensores Brillouin espontáneos como estimulados experimentan una reducción de su rango dinámico al incrementarse la longitud de la fibra, así como una limitación de la resolución espacial que no puede ser inferior al metro. En este tipo de sensores existe la necesidad de introducir filtrado eléctrico para eliminar la componente del *scattering Rayleigh*, además de que el desplazamiento frecuencial depende simultáneamente de la temperatura y del *strain* longitudinal, excepto en el caso de la técnica de relación Landau-Placzek. Los métodos basados en bombeo requieren un promediado elevado con el fin de aumentar la calidad de las medidas. Además, la calidad de la señal depende en gran medida del método por el que se aplica la onda de bombeo pulsada. En los sistemas donde la luz es pulsada por un modulador de intensidad, parámetros como la relación de extinción, el factor de *chirp* y la forma de la distribución de potencia óptica deben tenerse en cuenta al tratarse de factores que reducen la calidad de la señal.

Los sensores Brillouin espontáneos son fuertemente dependientes de la longitud de la fibra, las pérdidas de transmisión y la potencia del bombeo. Particularmente, en el caso del *BOCDR* su desventaja es el número de puntos efectivos de sensado, significando que la resolución espacial impone una restricción en el rango de medida. Por lo tanto, para lograr un rango de medida del orden del kilómetro, la resolución espacial deber ser de aproximadamente 2 metros o mayor, siendo incluso peor que la del *BOTDR*.

Anexo A. Técnicas Brillouin de sensado distribuido

Los sensores basados en el *scattering* estimulado no pueden detectar roturas ni pueden trabajar si hay fracturas a lo largo de la fibra óptica. Otra característica remarcable es la reducción en la señal inducida si la sonda excede un cierto valor en la relación con la intensidad de bombeo; por otro lado, el sistema necesita una gran coherencia entre la señal de sonda y bombeo. Una desventaja común de los sistemas *BOCDA* es su limitado rango de medida debido a la naturaleza periódica de la posición de sensado y que la longitud del sensor es menor que la de otros sensores Brillouin. A pesar de que *BOFDA* puede evitar algunos problemas relativos al análisis en el dominio del tiempo y su relativo gran tiempo de medida, está limitado cuando los sensores tienen que detectar rápidamente cambios de *strain*.