ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

Implementación del algoritmo RX para la detección de eventos dinámicos en sistemas sensores distribuidos basados en la dispersión estimulada de Brillouin en fibra óptica

(Implementation of the RX algorithm for the detection of dynamic events in distributed sensor systems based on the stimulated Brillouin scattering in optical fibers)

Para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: Álvaro Gómez San Emeterio

Mayo - 2015



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: Álvaro Gómez San Emeterio Director del PFC: Jesús Mirapeix Serrano / Rubén Ruiz Lombera

- **Título:** "Implementación del algoritmo RX para la detección de eventos dinámicos en sistemas sensores distribuidos basados en la dispersión estimulada de Brillouin en fibra óptica"
- Title: "Implementation of the RX algorithm for the detection of dynamic events in distributed sensor systems based on the stimulated Brillouin scattering in optical fibers"

Presentado a examen el día: 29 de Mayo de 2015

para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Antonio Quintela Incera Secretario (Apellidos, Nombre): Jesús Mirapeix Serrano Vocal (Apellidos, Nombre): M. Ángeles Quintela Incera

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC (sólo si es distinto del Secretario)

V° B° del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera Nº (a asignar por Secretaría)

Este trabajo ha sido co-financiado por el proyecto TEC2013-47264-C2-1-R.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, porque sé que sin su apoyo y cariño no habría llegado hasta aquí.

A mi familia, por tener la suerte de formar parte de ella. Y en especial a mi abuela Toñina y a mi tío Magín, por hacerme las mejores tortillas del mundo.

A mis amigos y amigas, por saber que siempre han estado, están y estarán ahí para todo lo que necesite.

A Lucía, por estar conmigo en los buenos y en los malos momentos.

A Rubén, por haberme ayudado siempre desde que nos conocemos.

A Chus, porque a pesar de no haber tenido la suerte de ser alumno suyo, he podido aprender mucho bajo su dirección.

Y al grupo de Ingeniería Fotónica por haberme acogido como a uno más.

ÍNDICE GENERAL

1 -	INTRODUCCIÓN	1
	1.1. Contexto	1
	1.1. Objetivos	2
2 -	ESTADO DEL ARTE	4
	2.1. INTRODUCCIÓN	4
	2.2. Fenómenos de scattering	6
	2.2.1. Dispersión elástica	6
	2.2.1.a. Dispersión Rayleigh	7
	2.2.1.b. Dispersión Mie	7
	2.2.2. Dispersión inelástica	8
	2.2.2.a. Dispersión Brillouin	8
	2.2.2.b. Dispersión Raman	9
:	2.3. Dispersión Brillouin	
	2.3.1. Dispersión Brillouin estimulada	11
:	2.4. Sensores distribuidos de fibra óptica basados en dispersión Brillouin.	13
	2.4.1. Introducción	13
	2.4.2. Sensado de temperatura	
	2.4.3. Sensado de deformación	
	2.4.4. Sensores Brillouin espontáneos	
	2.4.4.a. Reflectometría óptica de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDR)	19
	2.4.4.b. Relación Landau-Placzek (LPR)	20
	2.4.4.c. Reflectometría óptica de Brillouin en el dominio correlado (BOCDR)	20
	2.4.5. Sensores Brillouin estimulados	21
	2.4.5.a. Análisis óptico de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDA)	22
	2.4.5.b. Análisis óptico de Brillouin en el dominio de la frecuencia (BOFDA)	25
	2.4.5.c. Análisis óptico de Brillouin en el dominio correlado (BOCDA)	
	2.4.6. Técnicas BOTDA para medidas dinámicas	28
	2.4.6.1. Técnica <i>Slope-assisted</i>	
	2.4.6.1. Otras técnicas	
3 -	CONTRIBUCIONES	
	3.1. Introducción	
	3.1.1. Ensayos no destructivos (END)	
	3.1.2. Método de los elementos finitos (FEM)	
	3.1.3. Análisis modal utilizando FEM	
	3.2. Análisis modal basado en Brillouin como ensayo no destructivo	
3	3.3. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO RX PARA LA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS	
	3.3.1. Algoritmo de Reed y Xiaoli Yu (RX)	
	3.3.2. Adaptación del filtro RX para medidas dinámicas	
4 -	RESULTADOS EXPERIMENTALES	41
4	4.1. INTRODUCCIÓN	41
4	4.2. Simulaciones COMSOL	
4	4.3. Implementación de filtros	43

Implementación del algoritmo RX para la detección de eventos dinámicos en sistemas sensores distribuidos basados en la dispersión estimulada de Brillouin en fibra óptica

2015

4.3.1. Filtro RX 1	43
4.3.2. Filtro RX 2	44
4.4. Resultados	45
4.4.1. Análisis modal basado en Brillouin	45
4.4.1.a. Defecto 1 a 3,2 Hz y 3000 adquisiciones	
4.4.1.b. Defecto 2 a 3,2 Hz y 3000 adquisiciones	
4.4.1.c. Defecto 1 a 7,6 Hz y 6000 adquisiciones	50
4.4.2. Análisis modal basado en FEM	53
4.4.2.a. Defecto 1 a 3,58169 Hz	54
4.4.2.b. Defecto 2 a 5,829217 Hz	58
4.4.2.c. Defecto 3 a 8,03412 Hz	61
4.4.2.d. Defecto 1 a 9,635849 Hz	65
5 - CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	70
5.1. Conclusiones	70
5.2. Líneas futuras	70
6 - BIBLIOGRAFÍA	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Reflexión total interna [1]	4
Figura 2.2 Ventanas de atenuación en una fibra estándar [2]	5
Figura 2.3 Espectro de dispersión [3]	6
Figura 2.4 Dispersión Rayleigh y Raman [10]	10
Figura 2.5 Momento de la onda incidente, del fotón de Stokes y de la onda acústica [14]	12
Figura 2.6 Esquema de un sistema óptico/fotónico de sensado [16]	14
Figura 2.7 Clasificación de sensores en extrínsecos e intrínsecos [17]	15
Figura 2.8 Sensor puntual	15
Figura 2.9 Sensor distribuido	16
Figura 2.10 Esquema BOTDR [20].	19
Figura 2.11 Esquema BOCDR [20]	21
Figura 2.12 Esquema BOTDA Huriguchi et al. [20]	23
Figura 2.13 Esquema BOTDA Nikles et al. [20]	24
Figura 2.14 Esquema BOFDA [20]	26
Figura 2.15 Esquema BOCDA [20]	27
Figura 2.16 Principio de operación de Slope-assisted [29]	29
Figura 2.17 Esquema experimental propuesto por R. Bernini et al. [29]	29
Figura 3.1 END Ultrasonidos industriales [33]	32
Figura 3.2 END Termografía industrial [33]	32
Figura 3.3 Proceso de discretización en MEF [34]	33
Figura 3.4 Analisis modal FEM [34]	35
Figura 3.5 Configuración BOTDA experimental [35]	36
Figura 3.6 Distribución de la fibra bajo test en la placa [35]	37
Figura 3.7 Análisis BOTDA VS Análisis FEM	38
Figura 4.1 Estructura metálica COMSOL.	42
Figura 4.2 Malla COMSOL con 6000 puntos de medida	42
Figura 4.3 Deformación de la chapa en COMSOL.	43
Figura 4.4 Filtro RX 1	44
Figura 4.5 Filtro RX 2.	45
Figura 4.6 Perfil dinámico 3,3 Hz sin defecto	46
Figura 4.7 Perfil dinámico defecto 1 a 3,2 Hz	47
Figura 4.8 Defecto 1 a 3,2 Hz.	47
Figura 4.9 Defecto 1 a 3,2 Hz.	48
Figura 4.10 Perfil dinámico defecto 2 a 3,2 Hz	49
Figura 4.11 Filtro 1: Defecto 2 a 3,2 Hz.	49
Figura 4.12 Filtro 2: Defecto 2 a 3,2 Hz.	50
Figura 4.13 Perfil dinámico a 7,6 Hz sin defecto	51
Figura 4.14 Perfil dinámico defecto 1 a 7,6 Hz	51
Figura 4.15 Filtro 1: Defecto 1 a 7,6 Hz.	52
Figura 4.16 Filtro 2: Defecto 2 a 7,6 Hz.	53

Implementación del algoritmo RX para la detección de eventos dinámicos en sistemas sensores distribuidos basados en la dispersión estimulada de Brillouin en fibra óptica

Figura 4.17 Comparación perfiles real VS simulado	. 54
Figura 4.18 Perfil dinámico 3D sin defecto	. 55
Figura 4.19 Perfil dinámico 3D defecto 1 a 3,58169 Hz.	. 56
Figura 4.20 Perfil dinámico defecto 1 a 3,58169 Hz COMSOL.	. 56
Figura 4.21 Filtro 1: Defecto 1 a 3,58169 Hz COMSOL	. 57
Figura 4.22 Filtro 2: Defecto 1 a 3,58169 Hz COMSOL	. 57
Figura 4.23 Anomalías obtenidas por el filtro 2 defecto 1 3,58169 Hz COMSOL	. 58
Figura 4.24 Perfil dinámico 3D defecto 2 a 5,829217 Hz.	. 59
Figura 4.25 Perfil dinámico defecto 2 a 5,829217 Hz COMSOL	. 59
Figura 4.26 Filtro 1: Defecto 2 a 5,829217 Hz COMSOL	. 60
Figura 4.27 Filtro 2: Defecto 2 a 5,829217 Hz COMSOL	. 60
Figura 4.28 Anomalías obtenidas por el filtro 2 defecto 2 5,829217 Hz COMSOL	. 61
Figura 4.29 Perfil dinámico 3D sin defecto a 7,381626 Hz	. 62
Figura 4.30 Perfil dinámico sin defecto a 7,381626 Hz COMSOL	. 62
Figura 4.31 Perfil dinámico 3D defecto 3 a 8,03412 Hz.	. 63
Figura 4.32 Perfil dinámico defecto 3 a 8,03412 Hz COMSOL.	. 63
Figura 4.33 Filtro 1: Defecto 3 a 8,03412 Hz COMSOL	. 64
Figura 4.34 Filtro 2: Defecto 3 a 8,03412 Hz COMSOL	. 64
Figura 4.35 Anomalías obtenidas por el filtro 2 defecto 3 8,03412 Hz COMSOL	. 65
Figura 4.36 Perfil dinámico 3D defecto 1 a 9,635849 Hz.	. 66
Figura 4.37 Perfil dinámico defecto 1 a 9,635849 Hz	. 66
Figura 4.38 Filtro 1: Defecto 1 a 9,635849 Hz COMSOL	. 67
Figura 4.39 Filtro 2: Defecto 1 a 9,635849 Hz COMSOL	. 68
Figura 4.40 Anomalías obtenidas por el filtro 2 defecto 1 9,635849 Hz COMSOL	. 68

1 - INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

En los últimos años, los estudios sobre monitorización de la integridad de estructuras (SHM o *Structural Health Monitoring*) han sufrido un notable crecimiento. La causa de este crecimiento es, entre otras muchas, la exigencia de la sociedad en cuanto a la seguridad de los servicios suministrados. Un puente, un túnel o un gran edificio son el ejemplo de grandes estructuras que deben permanecer "sanas" en todo momento. Por ello, es necesario utilizar técnicas de supervisión que permitan conocer en tiempo real el estado de las mismas. Actualmente existen varias técnicas de supervisión para analizar la estructura desde el exterior, pero por el contrario, no existen apenas técnicas que permitan analizar las deformaciones y tensiones internas que afectan a las estructuras.

Por todo lo anterior se investiga a día de hoy activamente en técnicas de análisis que permitan la monitorización de infraestructuras en tiempo real y que permitan medir de forma distribuida la temperatura y la deformación que sufre una infraestructura. Este análisis debe cubrir además desde unos pocos metros hasta varios kilómetros, debido a la variedad de estructuras susceptibles de implementar dicha técnica. Con el fin de cumplir todos estos requisitos, un candidato óptimo son los sistemas sensores distribuidos en fibra óptica, como por ejemplo los basados en la dispersión de *Brillouin*.

Estos sensores son capaces de medir la temperatura, la deformación o la vibración de cualquier punto a lo largo de una fibra óptica gracias al fenómeno de dispersión de la luz. Una de las principales ventajas que se obtienen con este tipo de sensores es la capacidad de tener un único sensor distribuido equivalente a cientos o miles de sensores puntuales. Por otro lado, los retos a los que se enfrenta esta técnica consisten en obtener resoluciones espaciales y longitudes de medida capaces de dar cobertura a diferentes ámbitos de aplicación, como puede ser la monitorización de un puente o de un gran oleoducto, por ejemplo. Los estudios de los últimos años demuestran cómo estos sensores presentan un rendimiento satisfactorio a la hora de medir la temperatura y la deformación sobre grandes estructuras que requieren una resolución espacial alta.

Dentro de estos sensores distribuidos destacan los basados en el efecto no lineal de *Brillouin*. Los sensores distribuidos basados en el efecto Brillouin se pueden clasificar a su vez en dos grupos, los sensores basados en la dispersión espontánea y los basados en la dispersión estimulada.

[1]

La dispersión espontánea de Brillouin en una fibra óptica se genera por la interacción de fotones y fonones acústicos, dando lugar a un fotón que, en el caso de la propagación en fibra óptica, será retrodispersado (dispersado en dirección contraria a la dirección de la luz incidente). Los sensores basados en la técnica BOTDR (*Brillouin Optical Time Domain Reflectometry*) emplean la dispersión Brillouin espontánea para obtener información de la temperatura y de la deformación de la fibra.

La otra categoría en la que se pueden dividir los sensores basados en la dispersión de Brillouin es la de los montajes basados en la dispersión estimulada. Estas configuraciones se pueden diferenciar rápidamente de la anterior, ya que en estos sensores se añade un estímulo adicional, consiguiendo de esta forma amplificar la dispersión de Brillouin. Existen diferentes técnicas basadas en la dispersión estimulada como pueden ser el análisis óptico de Brillouin en el dominio correlado (BOCDA) o el análisis óptico de Brillouin en el dominio de la frecuencia (BOFDA), pero la técnica más utilizada es el análisis óptico de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDA).

Todas estas técnicas basadas en el efecto no lineal de Brillouin normalmente sirven para hacer medidas estáticas, ya que los tiempos de medida son largos, sin embargo, existen diferentes estrategias que persiguen el poder hacer medidas dinámicas. El objetivo de estas medidas no es otro que el ser capaces de medir por ejemplo vibración, es decir, emplear tiempos de medida por debajo del segundo.

Para poder medir todas estas variaciones de temperatura o de deformación existen diferentes algoritmos de detección de anomalías que permiten detectar pequeños cambios o variaciones en una señal, como el método UTD (*Uniform Targets Detector*). Pero uno de los más utilizados por la comunidad científica es el algoritmo RX, que fue desarrollado por Reed y Yu en 1990. Este algoritmo originariamente ha sido desarrollado para imágenes multiespectrales, pero con el tiempo también ha sido ampliamente utilizado en teoría de señal y en procesamiento de imágenes.

Precisamente, el uso de estos métodos de detección de anomalías en sensores distribuidos hacen posible el objetivo final de la monitorización de estructuras, la capacidad para realizar medidas de eventos dinámicos.

1.1. Objetivos

El objetivo de este proyecto fin de carrera es la implementación del algoritmo RX para la detección de eventos dinámicos en sistemas sensores distribuidos basados en la dispersión estimulada de Brillouin en fibra óptica, utilizando la configuración conocida como análisis óptico de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDA, *Brillouin Optical Time Domain Analysis*), con el que poder realizar medidas de los diferentes eventos de temperatura y o deformación.

[2]

Para ello se implementará el filtro RX utilizando la herramienta *software Matlab*. Este filtro se adaptará al análisis modal basado en Brillouin de una estructura metálica, es decir, a las medidas obtenidas mediante la configuración BOTDA sobre una placa metálica inducida a varios defectos y sometida a diferentes frecuencias de resonancia. Además, se probará también a aplicar el filtro RX sobre el análisis modal basado en el método de los elementos finitos (FEM) simulando, mediante el *software COMSOL Multiphysics 4.3*, las mismas condiciones que las medidas reales.

2 - ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

En los últimos años la fibra óptica ha sido una pieza clave en el ámbito de las comunicaciones debido a su eficacia transportando información de un punto a otro, lo que, unido a su inmunidad electromagnética, ha hecho que cada día sea más utilizada como medio por el cual la luz, y con ella la información, se propague a lo largo de grandes distancias.

La fibra óptica se encuentra compuesta de una región denominada núcleo cuya estructura y dimensiones depende del tipo de fibra óptica (FO) y está fabricado típicamente en SiO₂+GeO₂, del revestimiento de 125 µm fabricado en dióxido de silicio SiO₂ y del recubrimiento primario de acrilato y 245 µm de diámetro [1]. En el interior de una fibra óptica, la luz se va reflejando contra las "paredes" del núcleo en ángulos muy abiertos, guiando las señales luminosas sin apenas pérdidas en largas distancias. Este fenómeno se debe a las leyes de la óptica geométrica, en concreto al principio de reflexión interna total (derivado de la Ley de Snell) que se produce cuando un rayo de luz atraviesa un medio de índice de refracción n_2 menor que el índice de refracción n_1 en el que éste se encuentra, refractándose de tal modo que no es capaz de atravesar la superficie o interfaz entre ambos medios reflejándose completamente.



Figura 2.1 Reflexión total interna [1].

Las fibras ópticas se suelen clasificar en función del número de modos de propagación de la luz, esto es, en fibras monomodo o multimodo. En una fibra monomodo sólo se propaga un modo de luz, siendo el diámetro del núcleo de 10 µm aproximadamente, esta fibra permite alcanzar grandes distancias (cientos de Km) y transmitir elevadas tasas de información (decenas de Gbit/s). Mientras que la fibra multimodo permite que varios haces de luz circulen por más de un camino o modo. Por el contrario poseen un diámetro del núcleo más grande, pero se usan comúnmente para distancias cortas del orden de 2 Km.

(4)

Por lo tanto, la fibra óptica es caracterizada por diferentes parámetros, entre los que destacan la atenuación y la dispersión. La atenuación es la disminución de la potencia que sufre la luz propagada a lo largo de la fibra. La potencia *P* resultante a lo largo de un tramo de fibra *I* con una atenuación α en la que se inyecta una señal luminosa de potencia *P*₀ viene dada por la siguiente fórmula:

$$P = P_0 e^{-\alpha l}$$
(2.1)

Como se puede apreciar, la atenuación que sufre una señal en la fibra óptica es exponencialmente proporcional al coeficiente de atenuación (α) propio de la fibra y a la longitud que recorre.

La atenuación es un parámetro que depende de las características particulares que presente la fibra óptica. Para intentar minimizar el efecto de este parámetro, existe un estándar de trabajo en diferentes longitudes de onda llamadas ventanas de mínima atenuación. Se consideran 1ª, 2ª y 3ª ventana a las longitudes de onda de 850 nm, 1310 nm y 1550 nm, siendo esta última la más optima y utilizada con una atenuación de aproximadamente 0.2 dB/Km [2].



Figura 2.2 Ventanas de atenuación en una fibra estándar [2].

Numerosos factores influyen en la atenuación de señales en fibra óptica como la absorción del material, las curvaturas de la fibra o los procesos de dispersión. La absorción del material ocurre de forma intrínseca causada por la interacción de los diferentes componentes del vidrio o de forma extrínseca debido a las impurezas del material. Cuando la intensidad de la señal luminosa sobrepasa un determinado umbral se producen efectos no lineales como la dispersión *Brillouin* o la dispersión *Raman*.

2.2. Fenómenos de scattering

La dispersión o *scattering* es uno de los fenómenos más importantes y característicos de la fibra óptica y consiste en un cambio de dirección de la luz debido a que los fotones colisionan con átomos o moléculas presentes en el medio de propagación. La dispersión se puede dividir en dispersión elástica o lineal y dispersión inelástica o no lineal. La diferencia entre ambos tipos radica en el intercambio de energía entre el campo electromagnético y el medio dieléctrico por el que se propaga la señal. Cuando el proceso es elástico los fotones dispersados no cambian de frecuencia, mientras que en los procesos inelásticos si se produce un intercambio de energía, es decir, los fotones dispersados cambian de frecuencia.

2.2.1. Dispersión elástica

La dispersión elástica transfiere parte de la potencia contenida en un modo de propagación a otro modo de forma lineal (proporcional a la potencia del modo). Este proceso produce una atenuación ya que parte de la potencia transferida puede pasar a un modo no permitido que será radiado al exterior. Cuando la dispersión elástica tiene lugar, los fotones dispersados no cambian de frecuencia debido a las inhomogeneidades del núcleo de la fibra. Dependiendo del tamaño de dichas inhomogeneidades en relación con la longitud de onda, la dispersión elástica es de *Rayleigh* o de *Mie* [3]. Si la onda electromagnética interacciona con las partículas microscópicas mucho más pequeñas que la longitud de onda ($<\frac{1}{10}\lambda$) se produce la dispersión Mie. Cuando los fotones que son dispersados dentro del núcleo de una fibra cumplen las condiciones de propagación, quedan confinados y se propagan de nuevo a través de ella.



Figura 2.3 Espectro de dispersión [3].

6

2.2.1.a. Dispersión Rayleigh

La dispersión Rayleigh fue descubierta por Lord JWS Rayleigh en 1899 [4]. Es causado por las inhomogeneidades de pequeña escala, es decir, más pequeñas que el tamaño de la longitud de onda transmitida. Estas inhomogeneidades se manifiestan como fluctuaciones del índice de refracción y surgen debido a variaciones de composición en la fibra que se producen cuando ésta se enfría en su fabricación. Estas variaciones se pueden minimizar a través de mejores en las técnicas de fabricación de las fibras, pero las fluctuaciones de índice no pueden ser evitadas. La dispersión debido a estas inhomogeneidades, que ocurre en todas direcciones, produce una atenuación proporcional a λ^{-4} . Las pérdidas debido a esta dispersión se aproximan en la fórmula [3]:

$$\gamma_{\rm R} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 \beta_c K T_F, \qquad (2.2)$$

que depende del índice de refracción *n*, la longitud de onda λ , el coeficiente fotoelástico *p*, la compresibilidad isotérmica del material *Bc* la constante de Boltzmann *K* y la temperatura ficticia a la cual las fluctuaciones de densidad están congeladas en el vidrio debido a que se solidifican. Podemos apreciar que la atenuación disminuye con la longitud de onda, con lo que es preferible ir a longitudes de onda mayores (infrarrojo medio o lejano) y a índices de refracción menores (la elección del material también cuenta).

Este fenómeno es el fundamento de un instrumento ampliamente utilizado para analizar el estado de una fibra óptica como el OTDR (*Optical time domain reflectometer*) [5], que analiza la dispersión que se propaga en sentido contrario a la señal óptica emitida en función del tiempo para poder determinar el punto exacto de un posible defecto. Este método fue creado por Barnosky en 1976 y consiste introducir un pulso de luz en la FO y observar las condiciones de retorno de la energía.

2.2.1.b. Dispersión Mie

La dispersión lineal también puede ser causada por inhomogeneidades de un tamaño similar a la longitud de onda transmitida. Son debidas a la estructura no exactamente cilíndrica de la fibra que es causada por imperfecciones de la fibra. Estas pueden ser la variación de la diferencia del índice de refracción a lo largo de la fibra, fluctuaciones en el diámetro, tensiones o burbujas [6]. Cuando la inhomogeneidad es mayor que $\frac{\lambda}{10}$, la intensidad dispersada depende mucho del ángulo. Esta dispersión puede paliarse reduciendo las imperfecciones debidas al proceso de fabricación,

controlando el proceso de la extrusión y recubrimiento o incrementando la diferencia de índices de refracción.

2.2.2. Dispersión inelástica

Las fibras ópticas no siempre se comportan como canales de transmisión lineales en los cuales el incremento en la potencia de entrada implica un incremento proporcional de la potencia de salida. Existen varios efectos no lineales como la dispersión, que provocan unos incrementos muy altos en la atenuación para elevadas potencias ópticas. Esta dispersión no lineal produce una transferencia de energía entre la onda y el medio material con lo que, por conservación de la energía, se generan ondas de frecuencia inferior (Stokes) y superior (Anti-Stokes) [4].

Esta dispersión depende fuertemente de la densidad de potencia óptica y sólo es significativa sobre determinados umbrales de potencia. Los dos tipos de dispersión inelástica más importantes son la dispersión Brillouin y la dispersión Raman, y se basan los dos en el mismo principio de funcionamiento. En ambos casos se produce un cambio en la frecuencia de la luz dispersada debido a una variación mecánica del medio. La dispersión Raman se caracteriza por una mayor transferencia de energía al medio que la dispersión Brillouin, provocando que el cambio en la longitud de onda de la señal retrodispersada sea también mayor. La dispersión Brillouin produce un cambio de unos 80 pm en la longitud de onda, mientras que la de Raman produce un cambio de 100 nm aproximadamente. Otra de las grandes diferencias entre ambas dispersiones radica en el tipo de fonón producido por la excitación del material, siendo un fonón acústico en el caso de Brillouin y un fonón óptico en el caso de Raman.

A pesar de que estos fenómenos pueden producir problemas en el ámbito de las comunicaciones, son de gran utilidad para otros fines como son los sistemas sensores distribuidos basados en la dispersión Brillouin y en la dispersión Raman, capaces de detectar variaciones de temperatura o de elongación, por ejemplo, en estructuras como puentes o edificios.

2.2.2.a. Dispersión Brillouin

El físico francés León Nicolás Brillouin (1889-1969) presentó en 1922 un estudio de la propagación de ondas de luz monocromáticas y su interacción con ondas acústicas, es decir la dispersión de la luz con un cambio de frecuencia, que se conoce como dispersión Brillouin [7]. La dispersión Brillouin es uno de los efectos ópticos no lineales más destacados. Como se ha indicado interiormente, la dispersión Brillouin se produce cuando la luz interacciona con fonones acústicos, es decir, ondas acústicas que se propagan por la fibra

Esta dispersión se puede dar en procesos espontáneos o en procesos estimulados. En los procesos espontáneos, un fotón procedente de un haz de luz incidente se transforma en un fotón y un fonón dispersado, produciéndose una onda de Stokes, es decir, una onda de baja frecuencia. Este fenómeno que se produce en el interior de una fibra óptica es bastante indeseado en el ámbito de las comunicaciones debido a que a pesar de que la intensidad de esta onda sea muy baja, se puede propagar mediante varios kilómetros sin apenas atenuarse. La expresión que define la magnitud del salto en frecuencia Brillouin viene dada por [8]:

$$\nu_B = \beta V_A = 2V_A \beta_p |sen\left(\frac{\theta}{2}\right) = 2\omega_p \left(\frac{V_A n}{c}\right) sen\left(\frac{\theta}{2}\right), \tag{2.3}$$

donde V_A es la velocidad de propagación, θ es el vector de onda del fonón, θ_P es el vector de onda de la radiación de "bombeo" y θ es el ángulo de la dispersión de la onda de Stokes. Debido a la geometría de la fibra, la dispersión siempre es hacia adelante θ =0° o hacia atrás θ =180°. Como el seno prácticamente anula la onda propagada hacia adelante, haciéndola despreciable, la mayor parte de la onda de Stokes es contrapropagada a la luz incidente o de bombeo. En este caso (θ =180°) la expresión se reduce a:

$$\Omega = 2\omega_p(\frac{V_A n}{c}). \tag{2.4}$$

A pesar de que la intensidad de la luz retrodispersada de forma espontánea es baja, este proceso se convierte en estimulado en el momento en el que la potencia óptica inyectada en la fibra supera un determinado umbral debido a una eficiente conversión entre la señal de entrada y la onda retrodispersada, consiguiendo una dispersión notablemente superior [9].

2.2.2.b. Dispersión Raman

La dispersión Raman espontánea fue descubierta en 1926 por el físico hindú Dr. CV. Raman [10]. En este tipo de dispersión la energía total del sistema se conserva intercambiando la energía entre los fotones inyectados en la fibra, los fotones dispersados y los fonones, que en este caso son fonones ópticos asociado a vibraciones moleculares. Estos fonones tienen una energía igual a la diferencia de energía entre los modos de vibración del medio, por lo tanto, el cambio de energía en la luz dispersada con respecto a la luz incidente se corresponde con esta diferencia. La dispersión Raman es similar a la Brillouin excepto porque la modulación que genera las bandas laterales se produce a mayor frecuencia (las bandas están más alejadas de la frecuencia fundamental), además la dispersión puede ocurrir tanto en la dirección de la propagación como en la contraria y suele tener una potencia umbral de unos tres órdenes de magnitud mayor que la de Brillouin.



Figura 2.4 Dispersión Rayleigh y Raman [10].

Como la dispersión Raman espontánea es muy débil, es más utilizada la dispersión Brillouin estimulada (SRS, *Stimulated Raman Scattering*). Esta variante de Raman fue descubierta en un experimento entorno a 1962 [11]. Un láser de Rubí en régimen Q-switch bombeaba una celda de nitrobenceno y se pudo observar como para una señal intensa de bombeo, el efecto no lineal del SRS producía un rápido crecimiento en la señal Stokes dentro del medio debido a que gran parte de la energía del bombeo se transfería.

El uso de la dispersión Raman en las fibras ópticas es de gran interés en la espectroscopia y sobretodo en el uso de sensores distribuidos. En esta dispersión la componente Anti-Stokes es muy dependiente de la temperatura, por lo tanto, esta dependencia se utiliza como la medida distribuida de temperatura a lo largo de una fibra.

2.3. Dispersión Brillouin

La dispersión Brillouin se produce debido a vibraciones moleculares que crean una onda acústica (fonón acústico), de bastante menor magnitud que la luz dispersada. La dispersión Brillouin espontánea se puede producir en la dirección de propagación a la onda de bombeo, añadiéndose así a la señal de luz original. Sin embargo, cuando la onda dispersada estimula un cambio en el índice de refracción de la fibra óptica, produce a su vez un incremento de la intensidad de la onda dispersada, siendo el fenómeno denominado dispersión Brillouin estimulada (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*).

La dispersión Brillouin estimulada (SBS) es un proceso no lineal que ocurre en las fibras ópticas cuando los niveles de potencia del haz de luz incidente supera un valor umbral denominado SBS *threshold*. Este fenómeno fue descubierto por Chiao et al [12]. Este proceso es la interacción no lineal entre el campo eléctrico del bombeo y la onda Stokes a través de una onda acústica. En este proceso se genera una onda

Stokes desplazada inferiormente en frecuencia respecto a la onda de luz original, dependiente del tipo de material en el que se produzca la dispersión.

En la fibras ópticas, el desplazamiento en frecuencia de la onda Stokes generada en la dispersión Brillouin es de unos 10GHz y contrapropagante a la onda de entrada. Además, la onda Stokes se lleva la mayoría de la energía de entrada. Este efecto no lineal se trata de evitar en el ámbito de los sistemas de comunicaciones, dado que produce una gran pérdida de energía de la onda de propagación. Por el contrario, esta desventaja puede ser muy útil para otras finalidades. Actualmente, este fenómeno se utiliza en láseres y amplificadores de efecto Brillouin, además de utilizarse como fundamento para la realización de sensores distribuidos de temperatura y/o deformación.

2.3.1. Dispersión Brillouin estimulada

Suponiendo que la intensidad del haz de luz no altera las propiedades ópticas del medio, la dispersión Brillouin espontánea se produce únicamente debido a fluctuaciones térmicas. Por el contrario, si la intensidad de la luz es suficientemente alta en la fibra, se puede producir el fenómeno de electrostricción [13], el cuál es el causante del proceso de dispersión Brillouin estimulado.

El fenómeno físico de electrostricción produce una alteración local en la polarización del medio debido a los intensos campos eléctricos asociados a la onda incidente. Esta alteración en la polarización induce una tensión mecánica que hace variar la densidad del material, estimulando la creación de una onda acústica o fonón acústico. Esta onda acústica se encarga de modular el índice de refracción del medio, produciendo un efecto tipo a una red de difracción de Bragg [14] y que se propaga con la onda de bombeo que la genera, generando una cierta dispersión en esta. Debido al efecto Doppler [14] asociado al movimiento de la red de difracción a la velocidad acústica propia del medio *V*_A, la luz dispersada se propaga a una frecuencia menor, es decir, una onda Stokes. Si se supera el umbral de potencia necesario para producir la dispersión Brillouin estimulada, la onda Stokes se propaga en sentido contrapropagante a la onda de bombeo que la genera, portando casi toda la potencia de dicha onda.

Este fenómeno es muy perjudicial para sistemas de comunicaciones mediante fibra óptica debido a que la dispersión Brillouin estimulada produce una banda de amplificación a otra frecuencia, limitando la potencia del canal en la dirección propagante.

Si enfocamos este fenómeno desde el punto de vista de la mecánica cuántica, se puede expresar como la aniquilación de un fotón de cierta energía debido a la interacción con la molécula de sílice de la fibra óptica, generando a su vez otro fotón

de menor energía y un fonón acústico. Según el principio de conservación de la energía:

$$\omega_s = \omega_p - \Omega \tag{2.5}$$

$$\beta_s = \beta_p - \beta, \tag{2.6}$$

siendo ω_p la frecuencia y β_p el momento del fotón incidente, ω_s y β_s los correspondientes al fotón de Stokes, y Ω y β la frecuencia y el momento de la onda acústica.



Figura 2.5 Momento de la onda incidente, del fotón de Stokes y de la onda acústica [14].

Como se puede observar, la eficiencia del proceso presenta una gran dependencia angular debido a la forma de dispersión de los fonones acústicos. Esta dispersión se aproxima a una línea recta como $\Omega \approx V_A \beta$. Siendo V_A la velocidad acústica del medio. Como β depende del ángulo Θ entre la onda Stokes y la de bombeo, obtenemos el siguiente desplazamiento frecuencial de Brillouin:

$$\Omega \approx 2V_A \frac{\omega_p n}{c} sen(\frac{\theta}{2}), \qquad (2.7)$$

de donde $\beta_P \approx \beta_S = \omega_p \frac{n}{c}$ debido que $\omega \ll \omega_{p,s}$. Como la dispersión depende del ángulo de dispersión, si Θ =0, la dispersión es nula, sin embargo, si Θ = π la dispersión es máxima. Por lo tanto, la dispersión Brillouin estimulada tiene sentido contrapropagante y con la siguiente frecuencia Brillouin:

$$v_B = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{2nV_A}{\lambda_p},\tag{2.8}$$

siendo $\beta_P = 2\pi \frac{n}{\lambda_p}$ y n el índice del núcleo a la longitud λ_p de trabajo.

Suponiendo valores típicos como V_A =5,96 Km/s y *n*=1,45, el desplazamiento en frecuencia Brillouin es de $\lambda_p = 1550 nm$.

El fenómeno de electrostricción, como se indicaba anteriormente, se produce por la tendencia de los materiales dieléctricos a comprimirse debido al efecto de un campo eléctrico de gran intensidad. Esta compresión produce la presión

electrostrictiva, es decir, una presión interna que viene definida por la siguiente fórmula:

$$p_{st} = -\frac{1}{2}C_e < |E|^2 >$$
(2.9)

siendo C_e la constante electrostrictiva del material y E el campo eléctrico. Estas variaciones de presión que aparecen en la fibra provocan una variación del medio que, a su vez, produce una variación de la constante dieléctrica.

$$\Delta \varepsilon = \frac{c_e}{\rho_0} \Delta \rho \tag{2.10}$$

Finalmente, esas variaciones de densidad en el medio Δ_{ρ} provocan la aparición de una onda acústica. Es decir, el proceso físico de la electrostricción es el responsable de provocar la dispersión Brillouin estimulada.

2.4. Sensores distribuidos de fibra óptica basados en dispersión Brillouin.

2.4.1. Introducción

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas [15]. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc. Una magnitud eléctrica puede ser una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como en un fototransistor), etc.

Un sensor también puede decirse que es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra. Los sensores generalmente están integrados dentro de sistemas de medida que se componen del elemento sensor que genera o modifica una señal, un canal de comunicación que transporta dicha señal y un sistema comúnmente "electrónico" que la transforma y procesa para obtener una información sobre la magnitud que se desea medir.

En particular, un sensor óptico se basa en el aprovechamiento de la interacción entre la luz y la materia para determinar las propiedades de ésta. Una variante de los dispositivos sensores, comprende la utilización de la fibra óptica como elemento de transmisión de la luz.



Figura 2.6 Esquema de un sistema óptico/fotónico de sensado [16].

Los sensores ópticos/fotónicos estándar basan su funcionamiento en un interrogador que genera una onda de luz guiada por un sistema óptico, como es la fibra óptica, hasta el material objeto de medición. En función de la magnitud que se quiera medir, los parámetros fundamentales de la luz, como intensidad o longitud de onda, se modifican. A continuación el sistema óptico transporta esa señal luminosa hasta un sistema de detección capaz de "transformar" esa señal en información adecuada a las necesidades del momento [16].

Los sensores ópticos, presentan importantes ventajas cuando lo que se desea es determinar propiedades físicas o químicas:

- Es un método no destructivo y no invasivo.
- Ofrece posibilidades de integración en sistemas más complejos.
- Bajo coste y tecnología bien establecida.
- Posibilidades de control a distancia de lugares poco accesibles físicamente.
- Capacidad de conformar redes espaciales de sensores para el control de parámetros en grandes superficies.
- Inmunidad a la interferencia electromagnética

Dentro de la categoría de sensores ópticos o fotónicos, aparecen los sensores basados en fibra, que han sufrido un gran auge en la últimas décadas. Esto y las ventajas que aporta sobre otros materiales ha permitido aplicar la fibra óptica al diseño de sensores, desconocidos prácticamente hasta comienzos de 1977. Un sensor de fibra óptica es un dispositivo basado en la detección de modificaciones que sufre la luz guiada por fibra óptica debido a influencias externas. Estas influencias externas pueden ser físicas, químicas, biomédicas, medioambientales, etc. La luz guiada por la fibra óptica puede sufrir modificaciones de fase, amplitud, longitud de onda y polarización. Los sistemas de medida que utilizan sensores de fibra óptica tradicionalmente están compuestos por una fuente de luz, el sensor de fibra óptica y un fotodetector.

Los sensores de fibra óptica se pueden clasificar siguiendo diferentes criterios, sin embargo, uno de los más utilizados es la clasificación entre [14]:

 Sensores extrínsecos: La fibra óptica es capaz de guiar la luz hasta un elemento sensor externo donde bajo la acción de la magnitud a medir, será modificada y luego nuevamente guiada por la fibra hasta el fotodetector. Ejemplo de este tipo de sensores son los basados en transmisión, reflexión y fluorescencia.

14

 Sensores intrínsecos: La magnitud a medir afecta a las características ópticas de la fibra, bien directamente, bien por algún recubrimiento dispuesto expresamente. Ejemplo de este tipo de sensor es el modulado por intensidad por microcurvaturas.



Figura 2.7 Clasificación de sensores en extrínsecos e intrínsecos [17].

Otro criterio muy utilizado para la clasificación de estos sensores se basa en la extensión física en la que se toman las medidas Este criterio divide los sensores en:

• Puntuales: el sensado está localizado en algún punto específico de la fibra. En este tipo de sensores destacan los basados en técnicas interferométricas.



Figura 2.8 Sensor puntual

 Distribuidos: el sensado se produce a lo largo de la longitud de la fibra, es decir, es posible tener medidas de miles de puntos, dependiendo de la tecnología y de la resolución que se utilice. Con este tipo de sensores también es posible determinar en qué posición está ocurriendo la variación debido a que ésta se transmite a lo largo de la fibra. Por este motivo, esta técnica es ampliamente utilizada en la monitorización de grandes estructuras como carreteras, puentes o edificios.



Figura 2.9 Sensor distribuido

Los sensores de fibra óptica poseen diferentes ventajas respecto a otros sensores y son a la vez el motivo por el cual se han desarrollado tan rápidamente. Las más importantes son:

- Reducido tamaño, lo cual los hace adecuados para medidas en emplazamientos reducidos (biomedicina) o en lugar de difícil acceso
- Inmunidad a interferencias electromagnéticas debido a que se trata de un medio dieléctrico y la señal guiada es óptica, convirtiendo este tipo de sensores en idóneos para trabajar bajo la influencia de campos electromagnéticos elevados.
- Posibilidad de multiplexación de un conjunto de sensores ópticos enviando la información obtenida por una sola fibra óptica. Permite monitorización remota en lugares poco accesibles físicamente.
- Reducidas pérdidas. Se puede transportar información a largas distancias sin necesidad de repetidores. Ideal para sistemas sensores de decenas de kilómetros.
- Gran eficiencia bajo condiciones atmosféricas difíciles como elevadas temperaturas, alta humedad o grandes deformaciones. Posibilidad de trabajar ante condiciones adversas.
- Gran sensibilidad respecto a otras técnicas de medida.

Aunque no todo son ventajas, ya que los sensores basados en fibra óptica tienen la desventaja principal de su (en ocasiones) elevado precio, difícil manipulación o la necesidad de realizar una conversión electro-óptica.

En 1989 surgió la idea de utilizar la dispersión Brillouin como sensor de temperatura [5] y rápidamente diferentes investigadores continuaron con los estudios hasta conseguir medir de manera distribuida la temperatura mediante el análisis óptico de Brillouin en el dominio del tiempo.

En los últimos años la investigación sobre los sensores basados en la dispersión Brillouin se ha visto incrementada sustancialmente, en concreto, para el sensado de temperatura y/o deformación, debido a que las variaciones de estas magnitudes producen un desplazamiento en la frecuencia Brillouin de una fibra óptica. Hoy en día existen numerosas técnicas capaces de medir estas dos magnitudes. A continuación se explica cómo se pueden medir estas dos magnitudes.

2.4.2. Sensado de temperatura

Las magnitudes físicas de medida como la temperatura o las fuerzas de compresión y de tracción pueden influir en la fibra óptica y modificar localmente las propiedades de ésta. Como resultado de la alteración de la luz en las fibras ópticas producida por la dispersión, se puede determinar el lugar de una influencia física externa.

Como anteriormente se ha indicado, la dispersión Brillouin es ampliamente utilizada para medir variaciones de temperatura al depender ésta del índice de refracción de la fibra óptica. Como consecuencia, la frecuencia de los fonones acústicos también es dependiente de la temperatura, produciendo que la frecuencia de la onda Stokes sea, a su vez, dependiente de esta magnitud. En una fibra óptica estándar la frecuencia Brillouin crece linealmente con la temperatura, siendo 1,36 MHz/°C el valor típico de sensibilidad.

El efecto de la temperatura en un rango de 30°C a 100°C en el desplazamiento de la frecuencia Brillouin se calcula mediante la siguientes expresión [9, 18]:

$$v_B(T) = v_B(T_r)[1 + C_T(T - T_r)], \qquad (2.11)$$

siendo T la temperatura medida en un punto de la fibra y C_T el coeficiente de temperatura (valor típico de 9,4x10⁻⁵ K^{-1}) que se define como:

$$C_T = \frac{1}{\nu B(T_T)} \frac{\partial \nu_B(T)}{\partial T} \approx \frac{1}{\nu B(T_T)} \frac{\Delta \nu_B(T)}{\Delta T} = \frac{1}{\nu B(T_T)} \frac{\nu_B(T_2) - \nu_B(T_1)}{T_2 - T_1}$$
(2.12)

Las posibles aplicaciones de los sensores de temperatura son, por ejemplo, las relevantes para la seguridad como la detección de incendios en túneles de carretera, de ferrocarriles o de servicio. Además de la detección de incendios, estos sistemas se pueden aplicar en otros ámbitos industriales como:

- Control térmico de cables de energía.
- Detección de fugas en diques y presas.
- Control de la temperatura de procesos químicos industriales.
- Detección de fugas en oleoductos y gasoductos.

2.4.3. Sensado de deformación

Un efecto similar ocurre con la deformación. El desplazamiento de la frecuencia Brillouin depende de la velocidad acústica del medio y, a su vez, esta depende directamente de cualquier variación en la densidad del material. Esto hace que cualquier deformación en la fibra óptica, tanto en compresión como en extensión, sea detectada por los sensores basados en dispersión Brillouin. Sin embargo, estos sensores no son tan sensibles con presiones laterales en la fibra. Presiones de hasta 2.2kg/m² no se traducen en un cambio de frecuencia Brillouin apreciable.

Las variaciones en la deformación de la fibra producen un desplazamiento lineal de la frecuencia Brillouin, con una sensibilidad típica en función del porcentaje de deformación de 594.1 MHz/% tal y como se muestra en la siguiente expresión [9, 19]:

$$v_B(\epsilon) = v_B(0)[1 + C_S \epsilon]$$
(2.13)

siendo ϵ la elongación longitudinal de la fibra y C_s (valor típico de 4.6 $\mu\epsilon^{-1}$)el coeficiente de deformación. El coeficiente de deformación es función de la variación de la velocidad acústica y del índice de refracción con respecto a la deformación aplicada siguiendo esta expresión:

$$C_{S} = \frac{1}{\nu B(0)} \frac{\partial v_{B}}{\partial \epsilon} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \epsilon} + \frac{1}{v_{a}} \frac{\partial v_{a}}{\partial \epsilon}$$
(2.14)

2.4.4. Sensores Brillouin espontáneos

Como se ha indicado anteriormente, la dispersión Brillouin puede ser empleada como base para sensores donde la fibra óptica actúa 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.

Los sensores basados en la dispersión Brillouin pueden ser clasificados principalmente en dos grupos según la configuración y el método en el que se basen: sensores de Brillouin espontaneo (*Spontaneous Brillouin Sensors*) y sensores de Brillouin estimulado (*Stimulated Brillouin Sensors*).

Los sensores basados en la dispersión Brillouin espontánea emplean una única señal incidente en la fibra para producir la dispersión de la luz incidente, sin ningún tipo de estímulo adicional [14]. 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).

2.4.4.a. Reflectometría óptica de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDR)

Los sensores basados en la técnica BOTDR (*Brillouin Optical Time Domain Reflectometry*) emplean la dispersión Brillouin espontánea para analizar las variaciones de temperatura y/o deformación en la fibra óptica. El BOTDR es un método de detección coherente que emplea un pulso de luz como señal de bombeo para poder tomar medidas distribuidas a lo largo de la fibra óptica.

La señal pulsada de bombeo se introduce por un extremo de la fibra provocando en su interior la dispersión Brillouin espontánea. Como la potencia de la señal retrodispersada es muy baja, la calidad de la medida se ve afectada negativamente por la atenuación. Para evitar esto, se utiliza un detector óptico coherente, de modo que la luz dispersada se mezcla con la de un oscilador local tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:



Figura 2.10 Esquema BOTDR [20].

Este esquema representa la configuración típica de un sistema BOTDR, siendo FUT (*Fiber Under Test*) la fibra que se analiza, LO el oscilador local y CW una señal óptica continua.

Esta técnica posee varias características y a continuación se enumeran varias de ellas:

- Rango de medida superior a 10 kilómetros sin regeneración de señal y superior a cientos de kilómetros con regeneración de señal en línea [14].
- Disminución del rango dinámico con el incremento de la fibra óptica.
- Limitación en la resolución espacial, siendo la máxima un metro.

• Necesidad de introducir un filtrado óptico para eliminar la componente de la dispersión Rayleigh.

2.4.4.b. Relación Landau-Placzek (LPR)

Los sensores basados en la relación Landau-Placzek (LPR, Landau-Placzeck ratio) se fundamentan en la relación entre la dispersión Rayleigh y la dispersión Brillouin, debido a que esta relación solamente depende de la temperatura de la fibra óptica. Por lo tanto, estos sensores son una combinación entre BOTDR con detección directa y OTDR. De esta forma es posible establecer de forma independiente la temperatura o la deformación de la fibra.

Como se ha indicado 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 la dispersión Rayleigh proporciona la medida de la atenuación de la fibra, que puede ser causada por empalmes o curvaturas, independientemente de la temperatura a la que se encuentre. Como la diferencia frecuencial entre la señal dispersada Brillouin y la reflejada por la dispersión Rayleigh es relativamente pequeña, se puede estimar que la atenuación de la fibra para ambas señales es idéntica. Por lo tanto, la relación entre las intensidades resultantes de la dispersión Rayleigh y Brillouin proporciona una medida del perfil de temperatura distribuido de una fibra óptica sin tener en cuenta la deformación [21]. Por otro lado, conociendo la variación de temperatura, para poder determinar la deformación de la fibra tan solo hay que analizar el desplazamiento en la frecuencia Brillouin.

Este tipo de implementaciones requieren un gran procesado y control de la medida. Este sistema se divide claramente en dos partes. En la primera, el sistema BOTDR con detección directa proporciona la intensidad medida debido a atenuaciones en la fibra, por lo que no interesa que influya en nuestra medida de temperatura. Para ello, en la segunda parte se utiliza un sistema OTDR estándar que determina un perfil de pérdidas distribuidas en la fibra. De esta forma, se puede eliminar la intensidad medida por el sistema BOTDR, descartando la atenuación en la fibra debida a situaciones no relacionadas con las medidas de temperatura.

2.4.4.c. Reflectometría óptica de Brillouin en el dominio correlado (BOCDR)

Los sensores basado en la reflectometría óptica de Brillouin en el dominio correlado (BOCDR, *Brillouin optical correlation-domain reflectometry*) basan su funcionamiento en el desplazamiento de la frecuencia Brillouin que se obtiene

controlando la interferencia entre la onda de sonda continua y la de bombeo. Esta técnica es una de las más recientes [22].

En un sistema BOCDR la onda procedente del láser (DFB-LD) se divide en una onda de referencia y en una de bombeo. La onda de bombeo se introduce en la fibra (FUT) y la señal de Stokes producida por la dispersión Brillouin espontánea se introduce directamente en un receptor heterodino 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 recibe también el nombre de esquema auto-heterodino [22].



Figura 2.11 Esquema BOCDR [20]

Los sensores basados en esta técnica poseen las siguientes características:

- Capacidad de rango espacial máximo por debajo del metro a lo largo de una fibra óptica de un kilómetro.
- Compromiso entre el rango de medida y la resolución espacial fijado en aproximadamente 580 [22], debido a la limitación de la dispersión Rayleigh.
- Tiempos de integración no muy largos debido a que este sistema no se basa en un pulso óptico sino en una onda continua, resultando más rápido que un sistema BOTDR.

2.4.5. Sensores Brillouin estimulados

El otro tipo de sensor es el basado en la dispersión Brillouin estimulada. Estos sensores emplean un estímulo adicional para la generación del fonón acústico dado por un haz incidente, consiguiendo realzar o amplificar la dispersión Brillouin. Se

21

diferencian de los sensores Brillouin espontáneos en que estos únicamente inyectan el haz de luz por un extremo de la fibra, quedando el otro extremo al aire. Sin embargo, en los sensores Brillouin estimulados, aparte de introducir un haz de luz por un extremo, se inyecta un estímulo adicional por el lado opuesto para ampliar la dispersión.

Principalmente, dentro de esta clase de sensores pueden englobarse las técnicas basadas en el análisis óptico de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDA), en el análisis óptico de Brillouin en el dominio de la frecuencia (BOFDA) y en el análisis óptico de Brillouin en el dominio correlado (BOCDA) [14].

2.4.5.a. Análisis óptico de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDA)

Una de las técnicas más utilizadas en el montaje de sensores distribuidos basados en dispersión Brillouin es la técnica de análisis óptico de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDA, *Brillouin optical time-domain analysis*). En un sistema BOTDA intervienen dos señales, la onda de bombeo, (generalmente pulsada) que es la encargada de excitar la onda acústica y producir la onda contrapropagante de Stokes, y la sonda continua, inyectada por el otro extremo de la fibra [14]. Mediante esta técnica se puede medir la amplificación de la sonda en función del tiempo cuando la diferencia frecuencial entre la onda de bombeo y la onda de prueba coincide con la frecuencia Brillouin v_B de la fibra.

Horiguchi et al. lograron configurar el primer sensor basado en la técnica BOTDA en 1989 [23], inyectando en una fibra un bombeo pulsado y una señal continua contrapropagante. Mientras se realiza un barrido en frecuencia en un rango alrededor de la frecuencia de Brillouin, se mide la intensidad de la señal que se recibe en el extremo de la fibra por la que se inyecta la señal de bombeo. De esta forma se puede calcular la ganancia de la señal de prueba inyectada para amplificar la dispersión Brillouin. Cuando la frecuencia de la diferencia entre las frecuencias del bombeo y la sonda es exactamente la misma que la frecuencia Brillouin de la fibra óptica utilizada, la ganancia que se mide es máxima.

Para determinar la ganancia de la sonda, se mide el incremento de la intensidad por el extremo de la fibra por donde se inyecta la señal de bombeo o también se puede medir el decremento de la intensidad (producido por la dispersión Brillouin) de esa misma onda por el extremo opuesto. Estas medidas se llevan a cabo con el objetivo de determinar el espectro de ganancia Brillouin de la fibra realizando un barrido de frecuencia entorno a la frecuencia Brillouin de dicha fibra. Cuando la diferencia frecuencial entre la onda de bombeo y la sonda varía en torno a la frecuencia v_B, el espectro de ganancia Brillouin que definido por la siguiente fórmula:

$$g_B(\nu) = \frac{g_{B0}}{1 + \frac{4(\nu - \nu_B)^2}{\Delta \nu_B^2}},$$
(2.15)

siendo g_{BO} el coeficiente de ganancia Brillouin y Δv_B la anchura espectral Brillouin. La frecuencia en la que la gananacia Brillouin es máxima, es proporcional a la temperatura o deformación de la fibra.

Como se indica al inicio de este apartado, la onda de bombeo debe de ser pulsada para poder determinar de manera distribuida el desplazamiento Brillouin a lo largo de la fibra. Cuando la onda de bombeo pulsada se propaga por la fibra, se produce la interacción Brillouin únicamente en la posición del pulso. La eficiencia de la interacción Brillouin también depende del tamaño del pulso, debido a que si el tamaño de este es menor que el tiempo de amortiguamiento acústico, la eficiencia disminuye considerablemente. Por lo tanto, para implementar la técnica BOTDA es necesario utilizar una instrumentación rápida y capaz de almacenar la ganancia Brillouin mientras se propaga la onda de bombeo a través de la fibra.

En la implementación del sistema BOTDA propuesta por Horiguchi et al. [19] se emplean dos fuentes láser continuas e independientes como señal de bombeo y sonda. La señal de bombeo es pulsada, con un modulador electro óptico controlado por un generador de pulsos por ejemplo, y la frecuencia de separación entre ambos láseres se puede controlar mediante un detector heterodino y un oscilador de enganche de fase (PLL). En la siguiente figura se puede ver un esquema de esta implementación:



Figura 2.12 Esquema BOTDA Huriguchi et al. [20]

Otro método, en este caso diseñado por Nikles et al. [24], emplea una misma fuente láser para generar el bombeo y la sonda. Utiliza un modulador óptico para generar la sonda y sintonizar sus bandas laterales alrededor de la frecuencia de la onda de bombeo. Cuando la frecuencia de modulación es igual a la frecuencia Brillouin de la fibra, la banda lateral inferior interacciona con la onda de bombeo debido a la

dispersión Brillouin estimulada, amplificándose la banda lateral inferior en el interior de la fibra y obteniéndose el espectro de ganancia Brillouin realizando un barrido en frecuencia del modulador. Esta configuración se puede apreciar en la siguiente figura:



Figura 2.13 Esquema BOTDA Nikles et al. [20]

El rango dinámico (DR) de un sistema BOTDA se puede calcular mediante el intercambio de energía producido entre la onda de bombeo, la sonda, la atenuación de la fibra óptica y de los dispositivos ópticos como el circulador y el acoplador direccional, tal y como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$DR = \frac{1}{2} \Big\{ P_p + P_{CW} + G_B - L_c - P_d + \frac{SNIR}{2} - \frac{SNR_r}{2} \Big\},$$
 (2.16)

siendo P_p 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 deformación y finalmente G_B la ganancia Brillouin (dB) definida como:

$$G_B = 10\log\left(\frac{\eta g_{B0} v W}{2\pi w}\right) - 30 \ dB,$$
 (2.17)

siendo η el factor de polarización, de valor la unidad cuando se conserva la polarización y ½ cuando se mezcla la polarización; g_{B0} el coeficiente de ganancia Brillouin, w el radio del campo modal de la fibra, v la velocidad de la luz en la fibra y W la anchura del pulso.

En la técnica propuesta por Nikles, si se supone la pérdida de potencia despreciable 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 *L* de fibra, el coeficiente de ganancia Brillouin viene dado por la siguiente ecuación:

$$I_{out} = 2e^{-\alpha L} I_s(L) \cosh \left[g_B(v) L_p(0) L_{eff} \right]$$
(2.18)

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

Otros métodos se basan en la imposibilidad de acceder a un extremo de la fibra, con lo que la señal de bombeo y la sonda se utilizan para el barrido de la región de interacción a lo largo de la fibra. De esta forma, se producen pulsos de sonda contrapropagantes por reflexión de Fresnel desde el extremo opuesto de la fibra. Mediante esta configuración solo es necesario disponer de una sola fuente, además, proporciona una alta resolución del espectro de ganancia y una alta precisión de la medida distribuida. Por contra, requiere disponer 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 atenúe la señal de bombeo, que de lo contrario alcanzaría el detector óptico.

El sistema BOTDA ha sido desarrollado mediante diferentes variantes y con el tiempo ha ido mejorando notablemente. En una primera prueba, se demostró una resolución de temperatura de 1 K, con una resolución espacial de 10 metros sobre una longitud de más de 22Km, midiendo las pérdidas de Brillouin en lugar de la ganancia. Con el siguiente gran avance se logró obtener una resolución espacial de hasta 1 metro sobre 11Km con una duración del pulso de 10ns. A partir de aquí, se han realizado diversos ajustes en la configuración en el esquema BOTDA. Una de ellas es la técnica conocida como "*dark-pulse*" [25], mediante la cual 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). Otra de estas diferentes técnicas es el método de eco propuesto por Thevenaz y sus colaboradores [26], donde el rango espacial podía 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).

Esta técnica posee también numerosas desventajas entre las que se encuentran la imposibilidad de localizar roturas a lo largo de la fibra, la necesidad de una gran coherencia entre el bombeo y la sonda o la inducción de un agotamiento de la señal si la sonda excede un valor umbral. Además, no puede diferenciar entre una medida dada únicamente por temperatura o deformación, requiriendo de un alto promediado en la detección para incrementar la calidad (relación señal a ruido *SNR*) de esta medida.

2.4.5.b. Análisis óptico de Brillouin en el dominio de la frecuencia (BOFDA)

La técnica del análisis óptico de Brillouin en el dominio de la frecuencia (BOFDA, Brillouin Optical Frequency Domain Analysis) fue desarrollada en 1997 por Garus [27] y se basa en la medida de la función de transferencia en banda base compleja que relaciona las amplitudes de la onda de bombeo contrapropagante y la sonda a lo largo de la fibra.

Por un lado, la onda de bombeo introduce una modulación en intensidad y por el otro lado de la fibra sensada (*Fiber sensor*) se inyecta una onda de sonda continua con una señal sinusoidal en un rango de frecuencias. La onda de bombeo modulada interacciona con la sonda contrapropagante produciendo una componente de alterna (componente AC) en la primera. De esta forma, se puede medir los cambios en la componente AC de la onda de bombeo y determinar así el perfil de la frecuencia Brillouin determinado por la función de transferencia banda base compleja. Después de determinar la función de transferencia banda base compleja, se puede determinar el perfil de temperatura y el de elongación a lo largo de la fibra calculando la respuesta al impulso aplicando la transformada de Fourier inversa (IFFT, *inverse fast Fourier transform*). Una configuración estándar de esta técnica se puede apreciar en la siguiente figura:



Figura 2.14 Esquema BOFDA [20]

Principales características de BOFDA:

- Gran consumo de tiempo en la realización de medidas, en el que la temperatura y la deformación debe de ser constante.
- Tiempo de respuesta pequeño frente a cambios abruptos de temperatura o deformación.
- Resolución máxima espacial por debajo de un metro.

2.4.5.c. Análisis óptico de Brillouin en el dominio correlado (BOCDA)

Los sensores basados en el análisis óptico de Brillouin en el dominio correlado (BOCDA, Brillouin Optical Correlation-Domain Analysis) se basan en el control de la

26

dispersión mediante la síntesis de la función coherente óptica (SOCF, Synthesis of Optical Coherence Function). Esta técnica fue propuesta por Hotate et al. [28] para conseguir mejorar el límite de la resolución espacial de los sensores distribuidos basados en pulsos.

Como su nombre indica, en esta técnica se produce únicamente la interacción de la dispersión Brillouin en las posiciones donde la fase de la onda de bombeo continua y la de la sonda está altamente correladas, es decir, es necesario controlar la modulación en fase de ambas ondas para llevar a cabo esta técnica.

La posición a lo largo de la fibra donde ocurre la interacción de Brillouin cambia debido a la diferencia de fase entre la onda de bombeo y la onda de la sonda, 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.

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. En cambio, en BOCDA, si la anchura espectral del bombeo y la sonda se incrementan, la resolución de esta técnica también aumenta.

En la siguiente figura se muestra la configuración empleada por Hotate y sus colaboradores:



Figura 2.15 Esquema BOCDA [20]

Las principales características de esta configuración son las siguientes:

- La resolución de la medida aumenta con el incremento la anchura espectral del bombeo y de la sonda.
- Gran resolución debido a la utilización de señales continuas.

- Máxima resolución espacial conseguida de 1.6 mm, con una tasa de muestreo de 1KHz y un rango de medida de 1 Km.
- Limitación en el rango de medida debido a la naturaleza periódica de la posición de medida y a que la longitud del transductor es corta.
- Gran tiempo de medida debido al uso de un transductor muy complejo y un post-procesado intenso.

2.4.6. Técnicas BOTDA para medidas dinámicas

Típicamente, la técnica BOTDA requiere un tiempo de adquisición del orden de varios minutos, debido principalmente a la necesidad de realizar un barrido en frecuencia en un intervalo adecuado para obtener el espectro de ganancia Brillouin. Como consecuencia, las técnicas BOTDA tradicionales están limitadas para medidas estáticas.

Últimamente, la posibilidad de extender el uso de los sensores distribuidos en fibra óptica para medidas dinámicas ha despertado el interés en numerosos campos como la medida de vibraciones en estructuras civiles o aeronáuticas. Recientemente se han propuesto diferentes adaptaciones del esquema BOTDA clásico. Estas adaptaciones se han realizado con el objetivo de reducir el tiempo de adquisición sustancialmente hasta conseguir llevar a cabo medidas dinámicas. De entre todas estas adaptaciones se ha implementado la técnica *Slope-assisted* para llevar a cabo diferentes medidas en el laboratorio.

2.4.6.1. Técnica Slope-assisted

Se han realizado diferentes estudios sobre sensores basados en la dispersión Brillouin espontánea que requieren una respuesta del sensor del orden de segundos o menos para monitorizar una estructura en tiempo real. Romeo Bernini, Aldo Minardo y Luigi Zeni presentaron una nueva técnica conocida como Slope-assisted [29] capaz de realizar medidas de deformación de forma dinámica. Este método explota la interacción de la dispersión Brillouin estimulada entre dos señales ópticas (una señal pulsada y otra continua) y permite guardar un alto número de frecuencias en el momento del sensado. Por otra parte, esta técnica permite realizar medidas cuantitativas, es decir, el valor exacto de la deformación en el lugar de detección se pueden recuperar como una función del tiempo, siempre y cuando la deformación se encuentre dentro de ciertos límites. Por último, la posición de la ubicación de detección se puede mover de forma dinámica a lo largo de la fibra óptica, a fin de monitorizar diferentes regiones de fibra con la misma configuración.

Para ello, esta técnica requiere un proceso de escaneado previo de la frecuencia Brillouin para determinar la distribución del desplazamiento en frecuencia

Brillouin de la fibra óptica. Después de este paso, la técnica se aplica mediante el uso de un pulso óptico y una señal continua contrapropagantes con una diferencia en frecuencia óptica fija. En concreto, este último parámetro se ajusta a una distancia espectral de la frecuencia óptica Brillouin de la fibra aproximadamente igual a la mitad de la anchura de la ganancia Brillouin (BGS). De esta manera, cualquier modulación inducida por la vibración del desplazamiento en frecuencia Brillouin se mide como una variación de intensidad de la intensidad del pico de pulso Stokes que proviene de la fibra medida.



Figura 2.16 Principio de operación de Slope-assisted [29].

Originalmente, esta técnica fue desarrollada mediante el empleo de dos señales pulsadas en vez de una pulsada y otra continua. Con el empleo de estas dos señales pulsadas se limitaba la monitorización a la resolución de la anchura espacial del pulso. Esta configuración experimental se puede observar en la siguiente figura [29]:



Figura 2.17 Esquema experimental propuesto por R. Bernini et al. [29].

Finalmente, se puede concluir que esta técnica permite una alta velocidad de muestreo y permite abordar de forma dinámica y aleatoria la posición en la que se mide la vibración.

29
2.4.6.1. Otras técnicas

A parte de la técnica conocida como *Slope-assisted*, existen diferentes adaptaciones del BOTDA.

Por un lado Javier Urricelqui et al. [30] implementaron una nueva técnica basada en el desplazamiento en fase Brillouin y demodulación RF. Esta técnica proporciona la ventaja de medidas que son, en gran medida, inmunes a las variaciones de atenuación de la fibra o a los cambios de la potencia de la señal pulsada. Además, la detección óptica utilizada conduce a una mejora del tiempo de medición y a la ampliación del rango de medida. Para la demostración de esta técnica se utilizó un rango de medida de 1.66 KHz con 1 metro de resolución espacial en una fibra de 160 metros.

Otra nueva técnica fue desarrollada por Yair Peled et al. [31] basada en una implementación rápida del BOTDA para sensores dinámicos. Este método emplea un generador de señal digital que permite la conmutación rápida en el escaneado de 100 frecuencias, que demuestran una medida verdaderamente distribuida y dinámica de una fibra de 100 metros de longitud con una velocidad de muestreo de 10 KHz, limitado únicamente por la longitud de la fibra y el barrido en frecuencia.

Por último, Carlos A. Galindez et al. [32] desarrollaron una técnica para detectar variaciones de temperatura o deformación en tiempo real basada en métodos de detección de anomalías como el algoritmo RX. La detección de eventos dinámicos se demostró mediante un procesado de los valores de ganancia Brillouin obtenidos mediante la configuración BOTDA. Los resultados obtenidos sugieren que se pueden obtener mejoras en la relación señal-ruido, rango dinámico y resolución espacial. Para un pulso de bombeo de 5 ns se mejora la resolución espacial, (desde los 0.541 m obtenidos directamente mediante la medición de ganancia, a los 0.418 m que obtuvieron con esta técnica) ya que el análisis se concentra en la variación de la ganancia Brillouin y no sólo en el cálculo del promedio de la señal a lo largo del tiempo.

3 - CONTRIBUCIONES

3.1. Introducción

Como se indica anteriormente, el objetivo de este proyecto fin de carrera es la implementación del algoritmo RX para la detección de anomalías (defectos) en sistemas sensores distribuidos basados en la dispersión estimulada de Brillouin en fibra óptica, utilizando la configuración conocida como análisis óptico de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDA). Con este sistema se pretende realizar medidas de los diferentes eventos dinámicos de temperatura y/o deformación.

Para ello, se propone un análisis modal vía Brillouin como posible técnica no destructiva. Esta propuesta se basa en la implementación del filtro RX, adaptándolo a los resultados dinámicos medidos sobre una chapa metálica inducida a diferentes deformaciones mediante dos técnicas; la configuración BOTDA y la técnica de análisis de elementos finitos.

A continuación se explica en qué contexto se propone esta implementación y la relación entre esta nueva técnica y otras técnicas de análisis modal.

3.1.1. Ensayos no destructivos (END)

Desde hace años, en numerosos sectores de la industria es necesario el empleo de ensayos de materiales para determinar las propiedades mecánicas de un material. Estos ensayos pueden ser de dos tipos; ensayos destructivos o ensayos no destructivos. Estos últimos, también conocidos como END o en inglés NDT (*nondestructive testing*) [33], son los más demandados en todos los sectores de la industria debido a que es una práctica que no altera de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material, lo que conlleva a un gran ahorro en el coste de producción.

Los ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas... y cualquier tipo de prueba que no implique un cambio en las propiedades del material a examinar. Estos ensayos suelen ser más baratos para el propietario de la pieza a examinar, ya que no implican la destrucción de la misma. Los ensayos no destructivos se pueden clasificar en tres grandes grupos:

• Defectología: Permite la detección de discontinuidades, deformaciones, fugas o cambios de temperatura entre otros muchos.

- Caracterización: Evaluación de las características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas de los materiales; propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas); transferencias de calor y trazado de isotermas.
- Metrología: Control de espesores; medidas de espesores por un solo lado; medidas de espesores de recubrimiento; niveles de llenado.

Existen numerosas técnicas basadas en este tipo de ensayos como la técnica de inspección por ultrasonidos que proporciona información acerca de las características internas de los materiales inspeccionados. Está técnica permite la detección de discontinuidades internas y subsuperficiales, así como bajo ciertas condiciones la detección de discontinuidades superficiales.



Figura 3.1 END Ultrasonidos industriales [33]

Otra conocida técnica basada en END es la termografía infrarroja, con la que se puede llegar a determinar la temperatura presente en la superficie de un cuerpo, mediante la observación de la energía irradiada, y que se encuentra afectada por la emisividad de la superficie del objeto, humedad atmosférica, temperatura ambiente, etc.



Figura 3.2 END Termografía industrial [33]

El análisis modal en la mecánica estructural es un END cuyo objetivo es determinar las frecuencias naturales y los modos de vibración de un objeto o una estructura durante una vibración libre. Es muy común utilizar el método de los elementos finitos (MEF o en inglés *FEM, finite element method*) para desarrollar el análisis debido a que el objeto que se analiza puede tener formas arbitrarias y los resultados de los cálculos son aceptables. Esto da lugar la técnica de análisis modal utilizando FEM.

3.1.2. Método de los elementos finitos (FEM)

El método de los elementos finitos es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física [34]. El MEF está pensado para ser utilizado en ordenadores, dado que permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano. El MEF se emplea en el diseño y mejora de diferentes aplicaciones industriales.

El método de los elementos finitos permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo), sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí denominados elementos finitos. A su vez, el conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodo. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito, con lo que un conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla.



Figura 3.3 Proceso de discretización en MEF [34]

Obviando todo el desarrollo matemático del método y realizando un estudio de cómo funciona en la práctica, se puede decir que la solución obtenida por MEF es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada debido a ese último paso.

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se dividen en:

- Preproceso: consiste en la definición de geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones existen operaciones cosméticas de regularización de la malla y precondicionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.
- Cálculo: permite generar un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas del resultado del preproceso, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no lineal o un problema dependiente del tiempo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.
- Postproceso: el cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la malla que define la discretización, en el postproceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

Este método es muy utilizado en análisis de ingeniería y se puede dividir en tres grandes tipos: análisis estático, análisis vibracional y análisis de fatiga.

El análisis estático es empleado cuando la estructura está sometida a acciones estáticas, es decir, no dependientes del tiempo.

El análisis vibracional, por su parte, es utilizado para analizar la estructura sometido a vibraciones aleatorias, choques e impactos. Cada uno de estas acciones puede actuar en la frecuencia natural de la estructura y causar resonancia con el consecuente fallo.

Y por último, análisis de fatiga que ayuda a los diseñadores a predecir la vida del material o de la estructura. Este análisis puede mostrar las áreas donde es más

probable que se presente una grieta. El análisis por fatiga puede también predecir la tolerancia al fallo del material.

3.1.3. Análisis modal utilizando FEM

El análisis modal basado en FEM es una de las muchas aplicaciones del método de los elementos finitos. Se trata de un análisis vibracional cuyo objetivo es determinar las frecuencias naturales y los modos de vibrar del material o estructura analizada. Por tanto, mediante este método se realiza una interpretación física de los vectores propios que representan las frecuencias y modos de vibrar de la estructura. Esta interpretación física es posible gracias a la resolución mediante FEM de las ecuaciones surgidas del análisis modal realizado.



Figura 3.4 Analisis modal FEM [34]

El análisis modal FEM es teórico y se puede contrastar mediante un ensayo experimental, determinando las frecuencias naturales y los modos de vibrar de una estructura bajo test. Este procedimiento se denomina análisis modal experimental. Mediante los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, se puede ajustar el modelo de elementos finito implementado para comprobar si las hipótesis establecidas fueron correctas.

3.2. Análisis modal basado en Brillouin como ensayo no destructivo

Como se indica anteriormente, los END son unas técnicas muy demandadas para el estudio de estructuras. En concreto, el análisis modal experimental es el método más común para determinar las frecuencias naturales o la amortiguación modal mediante las respuestas obtenidas tras inducir a la estructura diferentes excitaciones. El análisis modal basado en la vibración tiene la limitación de la frecuencia de resonancia que no permite detectar con precisión la ubicación del defecto en la estructura, sin embargo, la deformación es más sensible a este tipo de análisis.

Mediante la dispersión Brillouin es posible realizar medidas de elongación de forma dinámica con una sola fibra como sensor distribuido. En febrero de 2014 Aldo Minardo, Rubén Ruiz, Jesús Mirapeix y sus colaboradores realizaron un análisis modal experimental sobre un panel de aluminio con un sensor distribuido basado en un análisis óptico de Brillouin en el dominio del tiempo con la técnica *Slope-assisted* (SA-BOTDA) [35]. Para ello, este método se basa en la medida de la interacción entre la onda de prueba y un pulso de bombeo contrapropagante, estando estas dos ondas desplazadas en frecuencia un valor determinado y fijo, que debe coincidir aproximadamente con la altura mitad del espectro de ganancia de Brillouin. Con este análisis experimental se demostró que con esta técnica se puede detectar los defectos que presenta una estructura mecánica.

Para las medidas dinámicas de deformación se propuso una configuración BOTDA con un láser DFB-LD con un punto de operación de 1.55 μ m de longitud de onda como generador del pulso y de la onda de prueba. La duración del pulso de bombeo fue de 2 ns generando una resolución espacial de 20 cm. En la siguiente figura se muestra la configuración SA-BOTDA utilizada [35]:



Figura 3.5 Configuración BOTDA experimental [35]

El modulador de intensidad electro-óptico *IM1* y el sintetizador *RF* se emplea para generar dos bandas laterales alrededor de la frecuencia del láser. El *FBG* (*Fiber Bragg Grating*) selecciona la banda lateral inferior, es decir, la componente Stokes como onda de prueba. El modulador *IM2* y el generador de pulsos eléctricos forman el pulso de bombeo. Los amplificadores de fibra dopada con Erbio *EDFA1* y *EDFA2* se utilizan para amplificar la onda de prueba y el bombeo antes de entrar a la fibra bajo test. El aleatorizador de polarización se utiliza para variar de manera aleatoria la polarización de una de las dos señales contrapropagantes, en este caso el pulso. Esto

es necesario ya que la ganancia de Brillouin es muy dependiente del estado de polarización de la luz, y al aleatorizar y promediar la traza obtenida se reduce considerablemente el ruido de polarización. La onda Stokes a la salida de la fibra bajo test se fotodetecta mediante un fotodiodo InGaAs (*PD*) de 1GHz de ancho de banda y la señal se eléctrica es muestreada a 2 GS s⁻¹ por una tarjeta de adquisición (*DAQ*). Con esto se consigue realizar medidas con un muestreo de 1 punto cada 5 cm de fibra óptica.

Para realizar este experimento se eligió una placa cuadrada de aluminio de 1220 mm de largo, 1220 mm de ancho y 2 mm de espesor. La placa se situó en posición vertical mediante 4 sujeciones en las esquinas a 2 cm de los lados. Como fibra bajo test se empleo una fibra monomodo dispuesta a lo largo del eje X formando 24 líneas espaciadas 5 cm sobre el eje y, tal y como se muestra en la siguiente figura:



Figura 3.6 Distribución de la fibra bajo test en la placa [35]

La placa se excitó mecánicamente mediante un motor con una fuerza continua máxima de 28 N y una fuerza constante de 8 N/A, posicionada en el medio de la placa. Se realizaron pruebas para determinar la frecuencia de resonancia entre 1 y 10 Hz.

De manera dinámica se consiguió tomar 24 medidas por segundo, una vez determinada la frecuencia de resonancia se realizaron pruebas añadiendo pequeños cuadrados de aluminio en la placa en diferentes posiciones, demostrando que mediante el empleo de una configuración BOTDA es posible realizar un análisis modal.

En este proyecto se propone realizar un análisis modal equivalente al empleado mediante la configuración BOTDA por Aldo Minardo et al. [35], utilizando el análisis de

elementos finitos. En concreto se propone utilizar el *software COMSOL Multiphysics 4.3*, un programa de análisis y resolución mediante elementos finitos muy utilizado en física e ingeniería. El análisis mediante BOTDA es similar al realizado por este programa, ya que utilizando BOTDA la resolución espacial viene determinada por la anchura temporal del pulso de bombeo y en la herramienta COMSOL se puede determinar la resolución que se elija, además se puede determinar también el mismo muestreo, en este caso de 5 cm, tal y como se realizó con el BOTDA. En la siguiente figura se puede observar una comparación de la placa utilizada mediante el análisis BOTDA y el análisis FEM:



Figura 3.7 Análisis BOTDA VS Análisis FEM

Por lo tanto, se propone implementar mediante la herramienta COMSOL los mismos defectos (pequeños trozos metálicos) en la placa y añadir otros defectos mediante pequeños trozos metálicos en otras zonas de la placa. Además, se propone realizar medidas en otras frecuencias de resonancia y comprobar cómo reacciona la estructura a medir.

Una vez realizadas estas medidas se propone implementar el filtro RX, adaptado a los dos tipos de medida, el análisis modal BOTDA y el análisis modal FEM, con objeto de poder realizar una detección automática de los defectos y su localización.

3.3. Implementación del algoritmo RX para la detección de anomalías

3.3.1. Algoritmo de Reed y Xiaoli Yu (RX)

El algoritmo conocido como algoritmo RX debe su nombre a sus autores, Reed y Xiaoli Yu. En 1990 Reed y Xiaoli [36] desarrollaron un algoritmo de detección de

anomalías espectrales originalmente desarrollado para el ámbito de la imagen hiperespectral [37] formulado bajo dos hipótesis.

En la primera hipótesis se modeliza el fondo de la imagen como una distribución Gaussiana de media cero (μ =0) y una matriz covarianza desconocida, es decir, N(0, Σ). La segunda hipótesis modeliza la detección como una combinación lineal de un objetivo y un ruido de fondo. El fondo es representado mediante un vector espectral por una distribución Gaussiana de media igual al objetivo (μ =s) y un ruido añadido igual a la matriz covarianza del fondo en hipótesis (N(s, Σ)). El proceso de detección viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$H_0: x = r \tag{3.1}$$

$$H_1: x = \alpha s + r \tag{3.2}$$

Estando el proceso de detección basado en la diferencia entre la signatura espectral de un píxel de entrada y los píxeles de su alrededor. Esta diferencia es muy similar a la distancia de Mahalanobis [38] definida por la siguiente ecuación:

$$\delta_{RX}(x) = (x - \mu)^T K^{-1} (x - \mu)$$
(3.3)

Donde x es el vector espectral del pixel, μ el vector de la media espectral del área que se determine y K la matriz covarianza.

La distancia de Mahalanobis sirve para determinar la distancia de cada píxel respecto del centro del área donde se distribuyen el resto de píxeles. El algoritmo RX se puede implementar considerando una pequeña ventana alrededor del píxel que está siendo examinado, no de la imagen completa, dando lugar a la variante local.

El algoritmo RX, matemáticamente, es el procedimiento inverso del algoritmo PCA (*Principal components analisys*). El algoritmo PCA se propuso en 1981 [39] y se basa en la búsqueda de *N* componentes principales dentro de un conjunto de datos original, permitiendo reducir la dimensionalidad de éstos (compresión) perdiendo la mínima información posible; mientras que en el algoritmo RX un pequeño valor será creado a partir de un valor grande de $\delta_{RX}(x)$. Por lo que el algoritmo RX funciona como detector de píxeles cuya respuesta supone valores atípicos.

3.3.2. Adaptación del filtro RX para medidas dinámicas

Como se indica anteriormente, el objetivo final del proyecto es implementar el filtro RX a las medidas obtenidas por Aldo Minardo et al. mediante la configuración SA-BOTDA y a las medidas obtenidas mediante la herramienta COMSOL. Para ello, y una vez que se ha demostrado que los resultados obtenidos de ambos métodos son muy similares, se debe de adaptar el filtro RX para la detección de anomalías.

El sistema sensor descrito anteriormente, mediante la configuración SA-BOTDA, muestra la respuesta dinámica que experimenta la chapa al ser sometida a una vibración a su frecuencia de resonancia, es decir, se obtienen valores en unidades arbitrarias que representan la deformación de la chapa en cada punto. Si este resultado es sometido a un filtro RX, se obtiene un sistema sensor para detección de anomalías.

Para aplicar el filtro RX se han implementado dos variantes de la ecuación que define la distancia de Mahalanobis.

Por un lado, se utiliza un filtro con una sola entrada de datos aplicando la siguiente ecuación basada en la distancia de Mahalanobis:

$$\delta_{RX}(x[p]) = (x[p] - \mu)K^{-1}(x[p] - \mu)^T$$
(3.4)

Siendo x[p] la deformación en unidades arbitrarias en función de la posición de la fibra, μ la media de deformación en toda la fibra y K la matriz covarianza. Como se demostrará en el siguiente capítulo, asociado a los resultados experimentales, al aplicar este filtro no se consigue obtener unos resultados óptimos debido a que resulta muy dificultoso detectar anomalías con gran precisión.

Una vez demostrado que aplicando el filtro con una sola entrada de datos no se obtiene el resultado esperado, se decide implementar un segundo filtro. En este caso el filtro tiene dos entradas de datos. Por un lado, los datos de referencia, que son los datos obtenidos de una chapa sin defectos, es decir, sin pequeños trozos metálicos añadidos a la chapa. Y por otro lado, los datos sobre los que se va a aplicar realmente el sistema sensor, obtenidos de la medida con defectos. Para ello se ha aplicado la siguiente ecuación basada en la distancia de Mahalanobis:

$$\delta_{RX}(x_{medida}[p]) = (x_{medida}[p] - x_{referencia}[p])K^{-1}(x_{medida}[p] - x_{referencia}[p])^{T}$$
(3.5)

Siendo $x_{medida}[p]$ la deformación en unidades arbitrarias de la medida a detectar y $x_{referencia}[p]$ la medida realizada sin defectos. Esta variación de la distancia de Mahalanobis se ha implementado teniendo en cuenta que el algoritmo RX se puede implementar considerando una pequeña ventana alrededor del píxel que está siendo examinado o en su defecto, considerando el valor que tendría el pixel en otras condiciones, dando lugar a la variante local. Además como el valor de la covarianza de las medidas realizadas es del orden de 10⁻⁵ se puede suponer que $K_{medida} \approx K_{\sin defecto}$.

4 - RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Introducción

En este capítulo se va a explicar las diferentes pruebas experimentales que se han implementado, así como los resultados obtenidos en las mismas. Se va a dividir en dos grandes grupos de pruebas, por un lado las resultantes de implementar el denominado *filtro 1* y por otro en las que se ha utilizado el *filtro 2*.

A continuación se van a explicar los dos filtros diseñados, así como las simulaciones realizadas para obtener los datos de partida mediante la aplicación COMSOL Multiphysics 4.3. Como se podrá comprobar, se han realizados distintas pruebas con frecuencias de resonancia y con diversos defectos con el objetivo de realizar un sistema de detección capaz de determinar las anomalías existentes en las chapas metálicas.

4.2. Simulaciones COMSOL

Como complemento a las medidas obtenidas por Aldo Minardo et al. mediante la configuración SA-BOTDA, se propone un análisis basado en el método de elementos finitos (FEM). En concreto se propone utilizar el software COMSOL Multiphysics 4.3, un programa de análisis y resolución mediante elementos finitos muy utilizado en física e ingeniería. Mediante esta herramienta se simularán las mismas condiciones empleadas en el laboratorio con la configuración SA-BOTDA.

En primer lugar se ha definido las estructura metálica que va a ser analizada, en este caso una chapa de aluminio de medidas 122 x 122 cm (largo x ancho). Para la simulación de la estructura se ha despreciado la anchura de la placa. Además, se le ha añadido cuatro cuadrados de aluminio en las esquinas de 2 cm de lado, simulando las sujeciones de la chapa en el laboratorio. La siguiente figura representa la estructura metálica que se ha definido.



Figura 4.1 Estructura metálica COMSOL.

Una vez determinado el material y las dimensiones, se implementa la construcción de la malla que forma la estructura. Como se indica anteriormente, en el laboratorio se utilizó una configuración SA-BOTDA con 600 puntos de medida distribuidos (25 x 24), pero en estas simulaciones se van a definir 3000 puntos de medida (120x25) con la finalidad de otorgar más precisión a la medida que se obtenga.



Figura 4.2 Malla COMSOL con 6000 puntos de medida.

A continuación, se realiza un estudio de las tensiones de deformación de la estructura sometida a 6 posibles frecuencias de resonancia. En la siguiente figura se muestra el comportamiento modal de la chapa sometida a una frecuencia de 3,82962 Hz:



El eje que se aprecia a la derecha de la imagen muestra la deformación sufrida por la estructura en unidades arbitrarias. Esta figura está formada mediante los 3000 puntos de medida que se establecieron en la etapa de mallado. Este proceso se ha realizado en tantas ocasiones como pruebas se han realizado, añadiendo a la estructura diferentes trozos metálicos con los que simular defectos, y poder así detectar los mismos mediante el algoritmo RX implementado. Los datos obtenidos mediante esta herramienta *software* se han exportado a Matlab para poder aplicar los filtros implementados mediante esta herramienta.

4.3. Implementación de filtros

4.3.1. Filtro RX 1

Como se indica anteriormente, se ha implementado un filtro con una sola entrada de datos, la respuesta modal (RM) en capa punto (p) experimentada por la chapa, basado en la siguiente ecuación:

$$\delta_{RX}(x[p]) = (x[p] - \mu)K^{-1}(x[p] - \mu)^T$$
(4.1)

Para ello se ha implementado el siguiente flujograma mediante el software Matlab 7.12.0:



Figura 4.4 Filtro RX 1.

Como se aprecia en la figura anterior, se ha normalizado ($\vec{u} = \frac{\vec{v}}{/v/}$) el vector que representa la respuesta modal obtenido del SA-BOTDA para una mejor respuesta del filtro.

4.3.2. Filtro RX 2

En el segundo filtro implementado al aplicar la ecuación de Mahalanobis, se ha tenido en cuenta una referencia obtenida de la respuesta modal de la chapa sin defecto. Por lo tanto, en este filtro se introducen dos entradas de datos, por un lado la referencia o respuesta modal sin defectos, y por otro la medida o respuesta modal que se quiere analizar en busca de anomalías. Para ello se ha implementado un filtro basado en la siguiente ecuación:

$$\delta_{RX}(x_{medida}[p]) = (x_{medida}[p] - x_{referencia}[p])K^{-1}(x_{medida}[p] - x_{referencia}[p])^{T}$$
(4.2)

Como en el filtro 1, se ha diseñado el siguiente flujograma mediante el software Matlab 7.12.0:



Figura 4.5 Filtro RX 2.

La principal diferencia radica en comparar la respuesta en cada punto con la respuesta "ideal" (sin defectos), en lugar de hacer esa comparación con la media de la respuesta en todos los puntos de la placa, tal y como ocurría en el filtro 1.

4.4. Resultados

A continuación se van a exponer los resultados obtenidos con las diferentes pruebas realizadas. Como paso previo, se van a definir cuáles han sido los defectos inducidos en la placa metálica, diferenciando cada uno de ellos en función de las coordenadas en la placa del centro del pequeño cuadrado metálico de 20 cm de lado utilizado. En la siguiente tabla se muestra la posición de los defectos en la placa, utilizando como referencia la esquina inferior izquierda de la placa:

Defecto	Medidas reales		Medidas COMSOL	
	Posición X (mm)	Posición Y (mm)	Posición X (mm)	Posición Y (mm)
1 - Centro	600	600	610	610
2 - Centro alto	600	1200	610	1210
3 - Centro izquierda	20	600	10	610

Como se puede comprobar, se han simulado defectos en el centro, parte superior y parte izquierda de la placa. A continuación se muestran los resultados de las pruebas aplicando los dos filtros para las medidas reales realizadas por Aldo Minardo et al. y para las simulaciones mediante COMSOL.

4.4.1. Análisis modal basado en Brillouin

Para tomar las medidas reales del laboratorio, el equipo formado por Aldo Minardo y sus colaboradores estableció que la frecuencia de Slope assisted era de 10.9

GHz. Se han realizado pruebas para los defectos 1 y 2 con una frecuencia de resonancia de 3.2 Hz aproximadamente, así como para el defecto 1 con frecuencia de resonancia 7.5 Hz aprox.

4.4.1.a. Defecto 1 a 3,2 Hz y 3000 adquisiciones

En primer lugar se han implementado los filtros 1 y 2 para las medidas obtenidas con la frecuencia de resonancia de la placa a 3,2Hz y utilizando 3000 adquisiciones, es decir, se ha definido un perfil dinámico de la placa mediante el promediado de 3000 medidas del SA-BOTDA con una frecuencia de 10,9 GHz.

Como paso previo, se ha determinado el perfil dinámico de la placa en estas condiciones y sin defecto alguno añadido con el siguiente resultado:



Figura 4.6 Perfil dinámico 3,3 Hz sin defecto.

Como se ha indicado anteriormente y según la configuración utilizada mediante el análisis SA-BOTDA, la deformación en unidades arbitrarias que se muestra en la figura anterior se obtiene en función de los 600 puntos (25 x 24) de medida de la fibra óptica colocada encima de la placa. Se puede apreciar que en esta gráfica se ven más de 600 puntos, esto es debido a que la fibra utilizada como sensor sobresale de la placa para conectarse con el resto de la configuración SA-BOTDA. Esta fibra "sobrante" se corresponde con el inicio y el final de la medida, cuyo valor de deformación ronda el 0 u.a. Cabe destacar también que cada pico que se aprecia en la gráfica se corresponde con un tramo de fibra dispuesta en horizontal sobre la placa, sumando un total de 25 picos (uno por cada tramo).

Una vez determinado el perfil dinámico de la placa sin defectos y bajo estas condiciones, se ha determinado el perfil dinámico de la placa con el defecto 1.



Figura 4.7 Perfil dinámico defecto 1 a 3,2 Hz.

En esta figura no es posible apreciar el defecto añadido a simple vista. Para ello se han implementado los filtros 1 y 2, con el fin de poder determinar de manera sencilla si ha ocurrido alguna anomalía en la estructura. A continuación se muestra el resultado de aplicar el filtro 1 a este perfil dinámico.



Figura 4.8 Defecto 1 a 3,2 Hz.

Como se puede apreciar, mediante este filtro no se puede determinar el defecto que se ha producido. Sin embargo, se puede apreciar como sobre el punto de medida 670 aparece un pico que se corresponde con una sujeción situada en una esquina superior de la placa. Por este motivo se decidió implementar un segundo filtro, para poder alcanzar el objetivo de este proyecto. En la siguiente figura se muestra la salida del filtro 2 con las mismas medidas.





Para un sensor Brillouin la resolución espacial habitual es de 1 metro, sin embargo, estas medidas reales fueron tomadas con mucho menos resolución espacial (20 cm), lo que provoca que se pierda mucha relación señal a ruido. Esta relación hace que la salida del filtro 2 presente una detección ruidosa, es decir, se puede apreciar cambios en los puntos correspondientes al centro de la placa, pero estos son poco precisos.

4.4.1.b. Defecto 2 a 3,2 Hz y 3000 adquisiciones

En este caso se han implementado los filtros 1 y 2 para el defecto 2, situado en el centro alto de la placa, en las mismas condiciones que en el anterior, es decir, a una frecuencia de resonancia de 3,2 Hz con el promediado de 3000 medidas del SA-BOTDA.

En las siguientes figuras se muestra el perfil dinámico de la placa con el defecto 2 inducida a su frecuencia de resonancia y la salida del filtro 1 aplicado a este perfil.



Figura 4.10 Perfil dinámico defecto 2 a 3,2 Hz.



Figura 4.11 Filtro 1: Defecto 2 a 3,2 Hz.

Como ocurría con el defecto 1, mediante el filtro 1 no es posible detectar ninguna anomalía. En la siguiente figura se muestra la salida del filtro 2 y la comparación entre los perfiles dinámicos de la referencia y del defecto 2.



Figura 4.12 Filtro 2: Defecto 2 a 3,2 Hz.

En este caso resulta aún más difícil que en el caso anterior poder determinar con exactitud el defecto de la placa. Para ello se debería mostrar en los primeros puntos una gran variación respecto al resto de puntos, debido a que el defecto se colocó en la parte superior de la placa, que corresponde con el comienzo de la fibra, es decir, los primeros puntos de medida.

4.4.1.c. Defecto 1 a 7,6 Hz y 6000 adquisiciones

El último caso de las medidas reales sobre el que se ha aplicado los filtros corresponde con el defecto 1 (centro), pero en este caso con otras condiciones de medida. Aldo Minardo y sus colaboradores sometieron la placa con el defecto 1 a una frecuencia de resonancia de 7,6 Hz, además obtuvieron los datos mediante el promediado de 6000 medidas con la configuración SA-BOTDA, o lo que es lo mismo, 6000 adquisiciones dinámicas. Como se mostrará en las siguientes figuras, el comportamiento dinámico de la placa sometida a una frecuencia de resonancia de 7,6 Hz varía de forma notable respecto a la frecuencia de 3,2 Hz.

En la siguiente figura se muestra el perfil dinámico de la placa a 7,6 Hz y sin defecto alguno.



Figura 4.13 Perfil dinámico a 7,6 Hz sin defecto.

Como se puede apreciar, la deformación de la placa es notablemente diferente cuando esta es excitada a 7,6 Hz de frecuencia. Al estar sometido a mayor frecuencia, es decir, a un movimiento más rápido, los picos de deformación son más bruscos.



Figura 4.14 Perfil dinámico defecto 1 a 7,6 Hz.

En la figura anterior se muestra el perfil dinámico de la estructura con el defecto 1, observándose también picos más bruscos. En la siguiente figura se muestra la salida del filtro 1 aplicada a este perfil dinámico y al igual que en los anteriores casos, resulta imposible poder detectar variación alguna.



Figura 4.15 Filtro 1: Defecto 1 a 7,6 Hz.

A continuación se ha aplicado el filtro 2 a estas medidas y, al igual que en el caso anterior, se ha obtenido una salida muy ruidosa.



Figura 4.16 Filtro 2: Defecto 2 a 7,6 Hz.

Como se puede apreciar en todos los casos mostrados en este capítulo, las medidas reales obtenidas en el laboratorio muestran mucho ruido. Además mediante la configuración SA-BOTDA se estableció una resolución espacial de 20 cm y un total de 600 puntos sensores a lo largo de la fibra incluida en toda la estructura. En estas condiciones resulta muy difícil poder obtener resultados con una calidad suficiente como para poder detectar anomalías en las estructuras bajo test. Es por ello que se ha decidido simular mediante la herramienta software COMSOL Multiphysics 4.3 un análisis modal basado en FEM, que, como se ha explicado anteriormente, simula de manera eficiente un análisis modal basado en Brillouin.

4.4.2. Análisis modal basado en FEM

Como aplicando los filtros 1 y 2 a las medidas reales resulta muy complejo localizar el defecto, se ha tratado de verificar la validez del algoritmo con las medidas simuladas mediante la herramienta COMSOL. A continuación se muestra las diferentes pruebas realizadas mediante el software COMSOL Multiphysics 4.3.

Como se ha indicado anteriormente, se han definido 3000 puntos de medida con la finalidad de otorgar más precisión a la medida. En este aparatado se han realizado pruebas con los tres defectos y utilizando diferentes frecuencias de resonancia.

2015

4.4.2.a. Defecto 1 a 3,58169 Hz

Al igual que en el apartado de medidas reales, en primer lugar se ha determinado el perfil dinámico de la placa "ideal", es decir, sin ningún tipo de defecto añadido. En esta ocasión la frecuencia de resonancia de la placa (calculada por COMSOL) es de 3,82962 Hz. A continuación se muestra una comparativa entre el perfil dinámico obtenido de las medidas reales y de las medidas simuladas:



Figura 4.17 Comparación perfiles real VS simulado.

Como se puede apreciar, en la medida simulada el perfil es mucho más nítido y con una gran resolución debido a los puntos de medida utilizados y la ausencia de ruido. Mediante esta herramienta también es posible obtener con Matlab un perfil dinámico en 3D. En la siguiente figura se muestra dicho perfil con la deformación en función de las coordenadas de la estructura medida.

En este caso la deformación en unidades arbitrarias que se muestra en la figura anterior se obtiene en función de los 3000 puntos de medida distribuidos a lo largo de

la estructura creada. En este caso y a diferencia de las medidas reales, los puntos están distribuidos comenzando por la coordenada 0,0 (x,y) y continuando hacia la derecha y hacia arriba.



Figura 4.18 Perfil dinámico 3D sin defecto

Como se aprecia en la figura anterior, en las esquinas aparecen deformaciones más acentuadas debido a las fijaciones de la placa metálica. Para que se pueda entender de manera más visual cómo es el defecto añadido, a continuación se muestra el perfil dinámico 3D de la placa con el defecto 1:



Figura 4.19 Perfil dinámico 3D defecto 1 a 3,58169 Hz.

Se puede apreciar como el cuadrado metálico añadido sobre la placa provoca que en esa sección el movimiento, y por lo tanto la deformación, provocado por la vibración a la frecuencia de resonancia, sea diferente. A continuación se muestra el perfil dinámico con el defecto 1 sobre el que se han aplicado los dos filtros.



Figura 4.20 Perfil dinámico defecto 1 a 3,58169 Hz COMSOL.

Con el fin de detectar las anomalías de la estructura medida se ha implementado los filtros 1 y 2, obteniéndose las siguientes dos figuras:



Figura 4.21 Filtro 1: Defecto 1 a 3,58169 Hz COMSOL.





Mediante el filtro 1 se puede detectar ligeramente la variación derivada del defecto 1 en el centro de la placa, sin embargo al inicio y al final se puede apreciar como existe una gran deformación. Esta deformación es debido a las sujeciones de las

esquinas de la placa. Sin embargo, es mediante el filtro 2 donde se aprecia de manera más nítida la variación de deformación de la placa en el centro debido al defecto 1.

En la figura que se muestra la salida del filtro 2, se observa como la deformación aumenta de manera notable en determinados puntos. Estos puntos se corresponden con el centro de la placa que es el lugar donde se encuentra la anomalía. Para poder determinar en qué región de la estructura se encuentra el defecto, se ha implementado una solución mediante la herramienta Matlab. Su implementación consiste en mostrar en una figura los 3000 puntos de medida establecidos en la estructura, de tal manera que si la deformación en cada punto obtenida a la salida del filtro 2 supera un cierto umbral (umbral = 1 u.a.), este punto adquiere un color distinto del blanco.



Figura 4.23 Anomalías obtenidas por el filtro 2 defecto 1 3,58169 Hz COMSOL.

La resolución de esta figura viene determinada por la cantidad de puntos de medida establecidos, en este caso 3000 puntos (120x25) distribuidos mediante 120 en el eje X y 25 en el eje Y. La diferencia de colores indica el cambio de línea de puntos del eje Y. Como se aprecia en la figura, los puntos centrales de la estructura son los afectados por el defecto 1.

4.4.2.b. Defecto 2 a 5,829217 Hz

También se han implementado los filtros 1 y 2 para el defecto 2, situado en el centro en la parte superior de la placa, en las mismas condiciones que en el caso anterior, es decir, a una frecuencia de resonancia de 5,829217 Hz y con 3000 puntos de medida. En las siguientes figuras se muestra el perfil dinámico en 3D y 2D de la placa con el defecto 2.



Figura 4.24 Perfil dinámico 3D defecto 2 a 5,829217 Hz.





En el perfil dinámico 3D se puede observar claramente en donde se encuentra situado el cuadrado metálico añadido, considerado el defecto 2. A estas medidas se les ha aplicado los filtros 1 y 2 para poder detectar de manera eficiente cualquier leve anomalía.









En la primera figura se puede apreciar como el filtro 1 es capaz de detectar ligeramente las anomalías ocurridas en los últimos puntos de medida, que

corresponden con la parte superior de la placa. Como se han indicado anteriormente, con este filtro no se obtiene una solución eficaz al problema propuesto inicialmente.

Sin embargo, mediante el filtro 2 si se puede determinar de forma eficaz donde se encuentra la anomalía. En este caso se puede apreciar unos picos muy pronunciados correspondientes a los puntos exactos donde se encuentra el defecto 2. Al igual que en el caso anterior, se ha implementado una solución mediante Matlab para poder determinar, con los resultados arrojados por el filtro 2, en qué puntos se encuentra la anomalía.



Figura 4.28 Anomalías obtenidas por el filtro 2 defecto 2 5,829217 Hz COMSOL.

Se puede llegar a la conclusión de que en este caso, el cuadrado metálico añadido en la parte superior afecta con mayor fuerza al borde superior de la estructura.

4.4.2.c. Defecto 3 a 8,03412 Hz

Así mismo se ha realizado un análisis modal de la estructura sometida a una frecuencia de resonancia mayor que en los apartados anteriores. Primero se ha sometido a la estructura sin defecto a una frecuencia de resonancia de 7,381626 Hz con el siguiente resultado.



Figura 4.29 Perfil dinámico 3D sin defecto a 7,381626 Hz



Figura 4.30 Perfil dinámico sin defecto a 7,381626 Hz COMSOL.

Como se puede apreciar en estas dos figuras, al aumentar la frecuencia de resonancia, el movimiento de la estructura es diferente, provocando que las deformaciones de la misma no se parezcan a las de anteriores pruebas. Por ejemplo, se puede apreciar como los dos extremos inferiores (correspondientes a los primeros puntos de medida) tienen una deformación negativa o hacia abajo. Por el contrario, los extremos superiores (correspondientes a los últimos puntos de medida) tienen una

62

deformación positiva, observándose en ambas figuras como los picos de deformación aumentan.

A continuación se ha añadido el defecto 3 utilizando una frecuencia de resonancia similar, obteniendo los siguientes resultados.



Figura 4.31 Perfil dinámico 3D defecto 3 a 8,03412 Hz.



Figura 4.32 Perfil dinámico defecto 3 a 8,03412 Hz COMSOL.

El perfil dinámico del defecto 3 se ha obtenido a una frecuencia de resonancia de 8,03412 Hz y a continuación ha sido sometido a los filtros 1 y 2.









En estas condiciones de frecuencia de resonancia y defecto simulado se puede observar como con ambos filtros se detecta, además del fallo en el centro-izquierda, las 4 sujeciones de las esquinas. Además se puede llegar a la conclusión de que a esta

64

frecuencia un fallo colocado en esa posición provoca que se modifique ligeramente el perfil dinámico de las zonas más próximas.



Figura 4.35 Anomalías obtenidas por el filtro 2 defecto 3 8,03412 Hz COMSOL.

Mediante el *software* de identificación de la posición de las anomalías se puede constatar que el defecto se encontraba situado en el centro izquierdo de la placa. Además, tal y como se indica anteriormente, se puede apreciar cómo para esta frecuencia de resonancia, las sujeciones de las esquinas modifican el comportamiento modal de la estructura.

4.4.2.d. Defecto 1 a 9,635849 Hz

Por último se ha repetido una medida con el defecto 1, en el centro de la placa, pero esta vez a una frecuencia de resonancia de 9,635849 Hz. Al aumentar la frecuencia de resonancia se modifica la velocidad de vibración de la misma, lo que provoca una variación de la respuesta modal.


Perfil dinamico 3D defecto 1 COMSOL





Figura 4.37 Perfil dinámico defecto 1 a 9,635849 Hz.

Como se puede apreciar en las dos figuras anteriores, el aumento de frecuencia provoca que la estructura vibre a una mayor velocidad, estos cambios se traducen en picos más bruscos en el perfil dinámico. En la figura 3D se puede apreciar como la deformación es mucho mayor alrededor del defecto 1. Se ha sometido este perfil dinámico a los filtros 1 y 2, al igual que en otros casos, y se han obtenido los siguientes resultados.

66

Filtro 1: Defecto 1 COMSOL Deformación (u.a.) Puntos

Figura 4.38 Filtro 1: Defecto 1 a 9,635849 Hz COMSOL.

En la figura se puede comprobar cómo la salida del filtro 1 de este caso es la más eficaz de todas las pruebas realizadas. La grafica muestra sin apenas ruido, ya que los picos de los primeros y últimos puntos se deben a las fijaciones de las esquinas, los puntos donde se detectan anomalías. Esta prueba valida el algoritmo RX mediante la fórmula de Mahalanobis $\delta_{RX}(x[p]) = (x[p] - \mu)K^{-1}(x[p] - \mu)^T$ propuesta en este proyecto fin de carrera, la cuál es la base sobre la que se ha implementado el filtro 1.



Figura 4.39 Filtro 2: Defecto 1 a 9,635849 Hz COMSOL.

Al igual que el filtro 1, la salida del filtro 2 presenta una señal de gran calidad, pudiendo detecta la anomalía presente en el centro de la estructura, así como las sujeciones de las esquinas.



Figura 4.40 Anomalías obtenidas por el filtro 2 defecto 1 9,635849 Hz COMSOL.

2015

Mediante el cálculo de las anomalías según los puntos de medida se puede comprobar cómo el defecto colocado en el centro afecta a un gran número de puntos a su alrededor. Como se ha indicando anteriormente esto es debido a la velocidad de vibración a la que ha sido sometida la estructura. Una vez analizadas las diferentes pruebas propuestas, se puede establecer que el grado de variación del perfil dinámico de la estructura debido a los defectos inducidos, tiene una gran dependencia de la frecuencia de resonancia, y por lo tanto, del movimiento que describa la estructura y de la posición del defecto.

5 - CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1. Conclusiones

Mediante este proyecto fin de carrera se ha comprobado la capacidad del algoritmo RX de detectar anomalías de eventos dinámicos en sistemas sensores distribuidos basados en la dispersión estimulada de Brillouin en fibra óptica, más concretamente utilizando la configuración BOTDA.

Con la implementación de dos filtros basados en el algoritmo RX, mediante el *software Matlab*, se han realizado una serie de pruebas de detección de anomalías sobre los resultados obtenidos del análisis modal basado en Brillouin (pruebas experimentales) y del análisis modal basado en FEM (simulaciones). Ambos análisis han sido obtenidos al someter una placa metálica, con defectos añadidos, a diferentes frecuencias de resonancia. Por un lado, se ha demostrado que los filtros implementados para las medidas reales, obtenidas mediante la configuración SA-BOTDA, no eran capaces de detectar anomalías con una precisión mínima, debido a que se utilizó una resolución espacial muy pequeña, lo que provocó que se obtuviera una pobre relación señal a ruido.

Por otro lado, se han implementado los filtros 1 y 2 para la detección de anomalías sobre los resultados del análisis modal simulado mediante la herramienta COMSOL bajo las mismas condiciones, es decir, una placa metálica sometida a frecuencia de resonancia en la que se han simulado defectos. Con el filtro 1 se ha demostrado la detección de los defectos aparecidos, pero sin la eficacia esperada. Por ello, se implementó un segundo filtro basado en un análisis previo de la placa sin defectos, considerado como referencia. Con este filtro se consiguió demostrar la eficacia del algoritmo RX en la detección de anomalías de eventos dinámicos, concretamente en eventos de deformación.

5.2. Líneas futuras

Mediante la realización de este proyecto fin de carrera han aparecido diferentes líneas de trabajo que pueden ser desarrolladas en el futuro. Entre ellas destacan las siguientes:

- Realizar medidas experimentales de eventos dinámicos mediante la configuración SA-BOTDA con una resolución más adecuada y mejorando la relación señal a ruido, para poder aplicar los filtros implementados en este proyecto fin de carrera.
- Aplicar diferentes procesados como los modelos de inteligencia artificial, por ejemplo, las memorias jerárquicas temporales (*HTMs, Hierarchical Temporal Memories*) a la detección de defectos por medio del análisis modal

- Utilizar diferentes configuraciones basadas en la dispersión estimulada de Brillouin como la configuración BOFDA, con las que mejorar la resolución espacial.
- Aumentar la capacidad de adquisición de datos mediante otros métodos para conseguir monitorizar eventos dinámicos más rápidos.

2015

6 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. E. Saleh, M. C. Teich, and B. E. Saleh, "Fundamentals of photonics," *Wiley New York*, vol. 22, 1991.
- [2] G. Keiser, *Optical fiber communications*: McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics, 1983.
- [3] J. M. Senior and M. Y. Jamro, *Optical fiber communications: principles and practice*: Pearson Education, 2009.
- [4] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*: Academic press, 2007.
- [5] T. Horiguchi and M. Tateda, "Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave," *Optics Letters,* vol. 14, pp. 408-410, 1989.
- [6] M. I. Mishchenko, L. D. Travis, and A. A. Lacis, *Scattering, absorption, and emission of light by small particles*: Cambridge university press, 2002.
- [7] L. Brillouin, "Diffusion de la lumière et des rayons X par un corps transparent homogène. Influence de l'agitation thermique," *Ann. Phys.(Paris),* vol. 17, pp. 88-122, 1922.
- [8] R. W. Boyd, *Nonlinear optics*: Academic press, 2003.
- [9] T. Horiguchi, K. Shimizu, T. Kurashima, M. Tateda, and Y. Koyamada, "Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering: Optical fiber sensors," *Journal of lightwave technology*, vol. 13, pp. 1296-1302, 1995.
- [10] C. V. Raman, "A new radiation," *Indian Journal of physics,* vol. 2, pp. 387-398, 1928.
- [11] E. Woodbury and W. Ng, "Ruby laser operation in near IR," vol. 50, ed, 1962, pp. 2367-&.
- [12] R. Chiao, C. Townes, and B. Stoicheff, "Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves," *Physical Review Letters*, vol. 12, p. 592, 1964.
- [13] R. Newnham, V. Sundar, R. Yimnirun, J. Su, and Q. Zhang, "Electrostriction: nonlinear electromechanical coupling in solid dielectrics," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 101, pp. 10141-10150, 1997.
- [14] R. Ruiz Lombera, "Medida de eventos dinámicos mediante sensores distribuidos basados en dispersión estimulada de Brillouin en fibra óptica," 2013.
- [15] R. P. Areny, *Sensores y acondicionadores de señal*: Marcombo, 2004.
- [16] C. P. Conde, *Sensores ópticos* vol. 30: Universitat de València, 1996.
- [17] S. López Lambás, "Sensores de fibra óptica basados en resonancias electromagnéticas," 2011.
- [18] T. Kurashima, T. Horiguchi, and M. Tateda, "Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers," *Optics Letters*, vol. 15, pp. 1038-1040, 1990.
- [19] T. Horiguchi, T. Kurashima, and M. Tateda, "A technique to measure distributed strain in optical fibers," *IEEE photonics technology letters,* vol. 2, pp. 352-354, 1990.
- [20] Á. Ullán Nieto, "Contribuciones basadas en la dispersión estimulada de Brillouin en fibras ópticas para sensores distribuidos y láseres," 2013.
- [21] P. Wait and T. Newson, "Landau Placzek ratio applied to distributed fibre sensing," *Optics Communications,* vol. 122, pp. 141-146, 1996.
- [22] Y. Mizuno, Z. He, and K. Hotate, "Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on temporal gating scheme," *Optics express*, vol. 17, pp. 9040-9046, 2009.
- [23] M. Tateda, T. Horiguchi, T. Kurashima, and K. Ishihara, "First measurement of strain distribution along field-installed optical fibers using Brillouin spectroscopy," *Lightwave Technology, Journal of,* vol. 8, pp. 1269-1272, 1990.

2015

- [24] M. Nikles, L. Thevenaz, and P. A. Robert, "Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 15, pp. 1842-1851, 1997.
- [25] A. W. Brown, B. G. Colpitts, and K. Brown, "Distributed sensor based on dark-pulse Brillouin scattering," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 17, pp. 1501-1503, 2005.
- [26] L. Thévenaz and S. F. Mafang, "Distributed fiber sensing using Brillouin echoes," in *19th International Conference on Optical Fibre Sensors*, 2008, pp. 70043N-70043N-4.
- [27] D. Garus, T. Gogolla, K. Krebber, and F. Schliep, "Distributed sensing technique based on Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis," *Optics letters*, vol. 21, pp. 1402-1404, 1996.
- [28] K. Hotate and T. Hasegawa, "Measurement of Brillouin Gain Spectrum Distribution along an Optical Fiber Using a Correlation-Based Technique--Proposal, Experiment and Simulation," *IEICE transactions on electronics,* vol. 83, pp. 405-412, 2000.
- [29] R. Bernini, A. Minardo, and L. Zeni, "Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering," *Optics letters*, vol. 34, pp. 2613-2615, 2009.
- [30] J. Urricelqui, A. Zornoza, M. Sagues, and A. Loayssa, "Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation," *Optics express,* vol. 20, pp. 26942-26949, 2012.
- [31] Y. Peled, A. Motil, and M. Tur, "Fast Brillouin optical time domain analysis for dynamic sensing," *Optics express*, vol. 20, pp. 8584-8591, 2012.
- [32] C. A. Galindez, F. J. Madruga, and J. M. Lopez-Higuera, "Efficient dynamic events discrimination technique for fiber distributed Brillouin sensors," *Optics express*, vol. 19, pp. 18917-18926, 2011.
- [33] R. Halmshaw, R. Honeycombe, and P. Hancock, *Non-destructive testing*: E. Arnold, 1991.
- [34] G. Dhatt, E. Lefrançois, and G. Touzot, *Finite element method*: John Wiley & Sons, 2012.
- [35] A. Minardo, A. Coscetta, R. Ruiz Lombera, J. Mirapeix, J. Lopez Higuera, and L. Zeni, "Structural damage identification in an aluminum composite plate by Brillouin sensing," 2015.
- [36] I. S. Reed and X. Yu, "Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution," *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on,* vol. 38, pp. 1760-1770, 1990.
- [37] C.-I. Chang, *Hyperspectral imaging: techniques for spectral detection and classification* vol. 1: Springer Science & Business Media, 2003.
- [38] R. De Maesschalck, D. Jouan-Rimbaud, and D. L. Massart, "The mahalanobis distance," *Chemometrics and intelligent laboratory systems,* vol. 50, pp. 1-18, 2000.
- [39] J. E. Jackson, "Principal components and factor analysis: part II-additional topics related to principal components," *Journal of Quality Technology*, vol. 13, pp. 46-58, 1981.