

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



## *Trabajo Fin de Grado*

# DISCRIMINACIÓN AUTOMÁTICA ENTRE STRAIN Y TEMPERATURA EN SISTEMAS BOTDA MEDIANTE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

(Strain and temperature automatic discrimination  
in BOTDA systems via AI)

Para acceder al Título de

*Graduado en  
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación*

Autor: Alberto Fuentes Cayón

Julio - 2017



E.T.S DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

## GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACION

### CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

**Realizado por:** Alberto Fuentes Cayón

**Director del TFG:** Jesús María Mirapeix Serrano/Rubén Ruiz Lombera

**Título:** “Discriminación automática entre strain y temperatura en sistemas BOTDA mediante técnicas de Inteligencia Artificial”

**Title:** “Strain and temperature automatic discrimination in BOTDA systems via AI”

**Presentado a examen el día:** 27 de Julio de 2017

para acceder al Título de

## GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

### Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Granda Miguel, M<sup>a</sup>. Mercedes

Secretario (Apellidos, Nombre): Mirapeix Serrano, Jesús María

Vocal (Apellidos, Nombre): Quintela Incera, María Ángeles

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

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

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

VºBº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº  
(a asignar por Secretaría)

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

## *Resumen*

Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación

por *Alberto Fuentes Cayón*

**L**os sensores de fibra óptica poseen un rol cada vez más decisivo en el campo de la monitorización, con un mayor ámbito de aplicación que los sensores tradicionales basados en fenómenos eléctricos debido a su mejor adaptación a entornos complejos donde el proceso de medida resulta de gran complejidad.

Como caso particular, los sensores BOTDA (*Brillouin Optical Time-Domain Analysis*) basan su funcionamiento en el fenómeno del *scattering* estimulado de *Brillouin*, provocado de forma intencionada dentro de una fibra óptica, la cual actúa como elemento sensor, por la interacción entre dos señales ópticas. Una de ellas, denominada prueba, recoge la información temporal-posicional de parámetros como *strain* o temperatura a través de lo que se conoce como desplazamiento en frecuencia de *Brillouin*. Este parámetro es sensible a cambios en ambas magnitudes de una forma proporcional, lo que dificulta enormemente el proceso de discriminación cuando variaciones en ambas se producen de forma simultánea en el espacio y tiempo. La otra señal, pulsada, sirve como bombeo para estimular el *scattering* de *Brillouin*, dando lugar a un intercambio de energía a través del cual es posible realizar el proceso de monitorización.

Precisamente, el objetivo principal de este trabajo consiste en la discriminación entre medidas de *strain* y temperatura en sistemas BOTDA convencionales cuando ambas tienen lugar de forma simultánea, para lo cual se emplearán redes neuronales artificiales.

De esta forma, la solución que en este trabajo se plantea para este problema está basada puramente en el post-procesado de los datos adquiridos y almacenados tras el proceso de monitorización.

**Palabras clave** — Sensor óptico, Fibra óptica, Monitorización distribuida, *Scattering* de *Brillouin*, BOTDA, Discriminación *strain* y temperatura, Red Neuronal, Matlab.

UNIVERSITY OF CANTABRIA

## *Abstract*

Degree in Telecommunication Technologies Engineering

by *Alberto Fuentes Cayón*

**F**iber optic sensors play an increasingly decisive role in the sensing field, with a greater extent than traditional sensors based on electrical phenomena due to their much better adjustment to complex environments where the measurement process turns out to be really tough.

As a particular case of fiber optic sensors, BOTDA (Brillouin Optical Time-Domain Analysis) systems are based on a phenomenon known as stimulated Brillouin scattering, intentionally excited within a fiber optic, the sensor element, due to the interaction between two counter-propagating signals named as probe and pump. After such interaction, the resulting signal contains the positional and temporal information of both strain and temperature due to a variable called Brillouin frequency shift, which is proportionally dependent on both parameters, what enormously complicates the discrimination process when variations on both parameters take place simultaneously at the same location.

Therefore, the main goal of this project is to discriminate between strain and temperature in conventional BOTDA systems when both take place at the same time and location. For this purpose, Artificial Neural Networks will be used in order to try to find a solution to such problem.

This way, the solution proposed in this project is purely based on the acquired and post-processed data.

*Key words* — Optic sensor, Fiber optic, Distributed sensing, Brillouin scattering, BOTDA, Strain and temperature discrimination, Artificial Neural Network, Matlab.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

## *Estructura del Trabajo*

Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación

por *Alberto Fuentes Cayón*

**E**ste trabajo puede dividirse, desde un punto de vista de contenido, en dos partes: desarrollo teórico y desarrollo práctico. La primera, a su vez, consta de otras dos partes con temáticas bien diferenciadas: estudio de los fundamentos del fenómeno de *scattering* de Brillouin y explicación detallada de las técnicas de procesamiento de los datos obtenidos a partir de la explotación práctica de dicho fenómeno. Por otro lado, la parte práctica recoge una descripción detallada de la configuración experimental empleada en el desarrollo y consecución de las medidas, junto con un análisis detallado de los resultados obtenidos. Asimismo, este trabajo lo inician y finalizan los capítulos correspondientes a la introducción y conclusiones, respectivamente.

De esta forma, a continuación se describe de forma superficial el contenido de cada uno de los capítulos que conforman el trabajo, pertenezcan estos a la parte teórica o práctica:

► **Capítulo 1**

El primer capítulo se corresponde con la parte introductoria del trabajo. En el mismo, se llevará a cabo una contextualización del problema principal en torno al cual gira el mismo: discriminación automática entre *strain* y temperatura en sistemas BOTDA. Asimismo, se describen los objetivos a través de una descripción superficial del problema que motiva el trabajo.

► **Capítulo 2**

El segundo capítulo está destinado a la descripción detallada del fenómeno de *scattering* de Brillouin. En este, se analizarán los fundamentos de los sensores distribuidos de fibra óptica, en los cuales se enmarcan aquellos basados en dicho fenómeno; así como los tipos de sensores de fibra atendiendo al fenómeno de *scattering* que aprovechan para la monitorización. El capítulo se completa con la descripción detallada de los sensores BOTDA, realizando un estudio los principios en los que se basa, su funcionamiento y algunas de sus limitaciones más relevantes.

► **Capítulo 3**

El tercer capítulo aborda el tema de la inteligencia artificial, con especial atención a las redes neuronales y orientado a su aplicación a los sensores BOTDA. En este, se profundizará en las herramientas de procesamiento de datos que serán utilizadas en la consecución de los resultados finales, todas ellas incorporadas en el *software* matemático MATLAB.

▷ **Capítulo 4**

Este cuarto capítulo inicia la parte del trabajo destinada al desarrollo experimental. En este, se describe el proceso de adquisición de datos seguido a partir de una configuración BOTDA implementada, tanto en el caso de las medidas de *strain* como en el de las de temperatura (tanto de forma individual como conjunta).

▷ **Capítulo 5**

Este capítulo cierra la parte experimental del trabajo. En él se recogen y analizan los resultados que han sido obtenidos tras el proceso de medida descrito en el capítulo anterior. Así, este capítulo queda dividido en tres partes. La primera trata el análisis de los resultados obtenidos a partir de las medidas experimentales. La segunda recoge el procesado de estas medidas que ha sido llevado a cabo. Y, finalmente, la tercera parte contiene los resultados de clasificación obtenidos.

▷ **Capítulo 6**

Con este capítulo de conclusiones y líneas futuras se da por finalizado el trabajo. En él se enumeran y detallan las conclusiones extraídas a partir del estudio combinado del procesado de datos y la configuración BOTDA; y, adicionalmente, se presentan algunas líneas de mejora futuras susceptibles de mejorar el rendimiento del sistema.

# *Agradecimientos*

**E**n primer lugar, agradecer a mis directores de trabajo Jesús y Rubén, por toda la ayuda y confianza depositada en mi desde el principio, sin la cual no habría sido posible llevar a cabo este trabajo. Aunque haya sido un camino tedioso hasta conseguir los resultados que esperábamos, al final lo hemos conseguido. Con pruebas de lo más originales para tratar de conseguir lo que buscábamos, me he divertido mucho y, lo más importante, he aprendido mucho de vosotros.

Además, agradecer a todo el Grupo de Ingeniería Fotónica por el gran ambiente de trabajo y humano, así como por haberme proporcionado la ayuda necesaria siempre que la he necesitado, especialmente a mi compañero y amigo Pablo, con el que tantas tardes de trabajo y diversión he pasado a lo largo del curso. Trabajar rodeado de gente así es un gusto y un placer.

Finalmente, pero no menos importante, agradecer a mi familia y amigos todo el apoyo, no solo a lo largo de este periodo, si no en el día a día; especialmente a mi padre, madre y hermano, siempre al pie del cañón, y como no, a ti, Sonia, por tu constante apoyo.

MUCHAS GRACIAS

# Índice general

<b>Índice general</b>	<b>I</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>III</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>V</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>VI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	3
<b>2. Estado del arte de los sensores de Fibra Óptica</b>	<b>4</b>
2.1. La fibra como elemento sensor . . . . .	5
2.2. Sensores puntuales, cuasi distribuidos y distribuidos . . . . .	7
2.2.1. Sensores puntuales . . . . .	7
2.2.2. Sensores cuasi distribuidos . . . . .	8
2.2.3. Sensores distribuidos . . . . .	8
2.3. Sensores distribuidos de Fibra Óptica . . . . .	9
2.4. <i>Brillouin</i> : espontáneo vs estimulado . . . . .	12
2.4.1. <i>Scattering</i> espontáneo de <i>Brillouin</i> . . . . .	13
2.4.2. <i>Scattering</i> estimulado de <i>Brillouin</i> . . . . .	14
2.5. BOTDA en detalle . . . . .	15
2.6. Limitaciones de la configuración BOTDA . . . . .	18
<b>3. Estado del arte de la Inteligencia Artificial</b>	<b>20</b>
3.1. Descripción del problema y posibles soluciones . . . . .	21
3.2. Técnicas de procesado de datos . . . . .	24

3.2.1. Preprocesado de los datos . . . . .	25
3.2.2. Redes neuronales . . . . .	26
<b>4. Configuración experimental</b>	<b>30</b>
4.1. Configuración BOTDA . . . . .	30
4.2. Obtención de medidas para configuración óptima . . . . .	34
4.2.1. Obtención de medidas de temperatura . . . . .	35
4.2.2. Obtención de medidas de <i>strain</i> . . . . .	37
4.3. Obtención de medidas de temperatura y <i>strain</i> . . . . .	43
<b>5. Resultados experimentales</b>	<b>46</b>
5.1. Resultados configuración experimental . . . . .	46
5.1.1. Resultados de temperatura . . . . .	46
5.1.2. Resultados de <i>strain</i> . . . . .	53
5.1.3. Resultados de temperatura y <i>strain</i> . . . . .	59
5.2. Procesado de datos . . . . .	61
5.2.1. Técnicas de preprocesado de datos . . . . .	62
5.2.2. Entrenamiento de la red neuronal . . . . .	63
5.3. Resultados finales de clasificación . . . . .	64
<b>6. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>66</b>
6.1. Evaluación del trabajo . . . . .	66
6.2. Líneas de mejora . . . . .	67
<b>Anexo I</b>	<b>68</b>
<b>Anexo II</b>	<b>69</b>

# Índice de figuras

1.1. Representación conceptual de la monitorización de salud estructural (SHM) . . . . .	2
1.2. Dependencia lineal BFS con strain y temperatura . . . . .	3
2.1. Concepto sensor óptico . . . . .	5
2.2. Clasificación de los sensores de fibra óptica . . . . .	6
2.3. Componentes espectrales del scattering de Raman, Brillouin y Rayleigh . . . . .	11
2.4. Explicación <i>scattering</i> de <i>Brillouin</i> . . . . .	13
2.5. Principio de operación BOTDA: la señal pulsada y la prueba se propagan en sentidos opuestos a lo largo de la fibra óptica, con una diferencia de frecuencia en torno a la BFS de la fibra . . . . .	16
2.6. Respuesta típica de <i>Brillouin</i> normalizada . . . . .	17
3.1. Clasificación de las técnicas de aprendizaje automático y algunos algoritmos . . . . .	22
3.2. Dependencia del ancho de línea del BGS con temperatura y strain . . . . .	23
3.3. Dependencia de la intensidad con temperatura y strain . . . . .	24
3.4. Proceso de discriminación entre <i>strain</i> y temperatura . . . . .	25
3.5. Red Neuronal genérica . . . . .	27
3.6. Función de activación logaritmo sigmoide ( <i>logsig</i> ) . . . . .	28
4.1. Esquemático sistema BOTDA experimental: Optical Coupler (OC), Semiconductor Optical Amplifier (SOA), Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA), Polarization Scrambler (PS), Mach-Zender Electro-Optical Modulator (MZ-EOM), Generador RF (RF), Fiber Under Test (FUT), Fiber Bragg Grating (FBG), Photodiode (PD), Digital Acquisition Card (DAC) . . . . .	31
4.2. Representación ideal en frecuencia de bombeo y prueba . . . . .	31
4.3. Proceso de intercambio de energía entre las componentes de la prueba y el bombeo . . . . .	32
4.4. Apariencia interfaz gráfica Matlab . . . . .	34
4.5. Cámara climática y control inalámbrico . . . . .	35
4.6. Esquema BOTDA con la fibra sometida a cambios de temperatura . . . . .	36

4.7. Configuración experimental y representación esquemática . . . . .	38
4.8. Desplazador . . . . .	38
4.9. BFS obtenido para distintas anchuras de pulso . . . . .	39
4.10. Configuración experimental y representación esquemática . . . . .	40
4.11. Vistas de la pieza 3D empleada . . . . .	41
4.12. BFS en función de la distancia para diferentes medidas . . . . .	42
4.13. Configuración experimental y representación esquemática definitivas . . . . .	42
4.14. Configuración experimental y representación esquemática temperatura y <i>strain</i> . . . . .	44
4.15. Motor y control de temperatura . . . . .	44
5.1. Medida distribuida a temperatura 80 °C con pulso de 50 ns . . . . .	47
5.2. Vista X-Y de la traza . . . . .	47
5.3. Espectro de ganancia de <i>Brillouin</i> para distintas temperaturas . . . . .	48
5.4. BFS en función de la temperatura para un pulso de 50 ns . . . . .	48
5.5. Dependencia del ancho de línea del BGS con temperatura . . . . .	49
5.6. Dependencia del pico de intensidad del BGS con temperatura . . . . .	50
5.7. BFS en función de distancia y temperatura para distintas anchuras de pulso . . . . .	51
5.8. Perfil de <i>strain</i> distribuido . . . . .	53
5.9. Espectro de ganancia de <i>Brillouin</i> para distintos valores de <i>strain</i> . . . . .	54
5.10. BFS en función del <i>strain</i> para una anchura de pulso de 20 ns . . . . .	54
5.11. Dependencia del ancho de línea del BGS con el <i>strain</i> . . . . .	55
5.12. Dependencia del pico de intensidad del BGS con el <i>strain</i> . . . . .	55
5.13. BFS en función de distancia y <i>strain</i> para distintas anchuras de pulso . . . . .	57
5.14. BFS en función de distancia para distintos valores de <i>strain</i> y temperatura . . . . .	60
5.15. Operativa de clasificación a partir de las medidas experimentales . . . . .	62
5.16. Esquema conceptual red neuronal . . . . .	64
5.17. Entropía cruzada para entrenamiento, validación y test . . . . .	65

# Índice de tablas

2.1. Comparativa de sensores según el tipo de scattering . . . . .	12
4.1. Parámetros de medida temperatura . . . . .	37
4.2. Desviación estándar ( $\sigma$ ) del BFS para distintos valores de <i>strain</i> y anchuras de pulso [MHz] . . . . .	40
4.3. Desviación estándar ( $\sigma$ ) del BFS para distintos valores de <i>strain</i> [MHz] . . . . .	41
4.4. Paso y rango de medidas temperatura y strain . . . . .	45
5.1. Pendiente relación temperatura-ancho BGS . . . . .	50
5.2. Desviación estándar ( $\sigma$ ) del BFS para distintas temperaturas y anchuras de pulso [MHz ó °C] . . . . .	52
5.3. Error anchura BGS aproximación valor medio . . . . .	56
5.4. Desviación estándar ( $\sigma$ ) del BFS para distintas tensiones y anchuras de pulso [MHz] . . . . .	56
5.5. Error entre medidas consecutivas de <i>strain</i> en las mismas condiciones [MHz] . . . . .	58
5.6. Desviación estándar ( $\sigma$ ) del BFS para distintos valores de <i>strain</i> y temperatura [MHz] . . . . .	61
5.7. Resultados de clasificación red neuronal tras aplicar PCAs . . . . .	65
A1. Varianza ( $\sigma^2$ ) del ruido para BGS normalizado en intensidad [u.a] . . . . .	69

# Acrónimos

ANN	Artificial Neural Network
BFS	Brillouin Frequency Shift
BGS	Brillouin Gain Spectrum
BOCDA	Brillouin Optical Correlation-Domain Analysis
BOFDA	Brillouin Optical Frequency-Domain Analysis
BOTDA	Brillouin Optical Time-Domain Analysis
DAC	Data Acquisition Card
DBL	Doble Banda Lateral
DL	Deep Learning
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
EOM	Electro-Optical Modulator
FBG	Fiber Bragg Grating
FDM	Frequency-Division Multiplexing
FUT	Fiber Under Test
FWHM	Full Width at Half Maximum
IA	Inteligencia Artificial
GUI	Graphical User Interface
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
OC	Optical Coupler
OFS	Optical Fiber Sensor
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometry
PCA	Principal Components Analysis
PD	Photodiode
PS	Polarization Scrambler
RE	Ratio de extinción
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SDM	Spatial-Division Multiplexing
SHM	Structural Health Monitoring
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SOP	State Of Polarization
SpBS	Spontaneous Brillouin Scattering
TDM	Time-Division Multiplexing
WDM	Wavelength-Division Multiplexing

# CAPÍTULO 1

## Introducción

**E**ste primer capítulo sirve como introducción del trabajo. En él, se tratará de contextualizar el tema principal sobre el cual se desarrollará el mismo: discriminación automática entre *strain* y temperatura en sistemas *Brillouin Optical Time-Domain Analysis* (BOTDA) mediante el uso de técnicas de Inteligencia Artificial (IA). Además, a esta parte le acompañará una sección dedicada a los objetivos, en la cual se enumerarán y detallarán los principales objetivos de este trabajo.

### 1.1. Contexto

La invención del LÁSER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) a finales de los años 50 abrió una puerta a un nuevo tipo de sistemas de comunicaciones: los sistemas ópticos; que pronto contaron con la fibra óptica como medio de transmisión más adecuado. Las previsiones acerca de que estos sistemas desbancarían a aquellos existentes hasta el momento (basados fundamentalmente en pares de cobre o cables coaxiales), debido a sus notablemente superiores prestaciones, no tardaron en confirmarse, pese a las altas pérdidas que presentaba la fibra en sus inicios.

Tras varios años de investigación y progreso, las consecuentes generaciones de sistemas de comunicación óptica consiguieron coordinar a la perfección los diferentes componentes del sistema hasta alcanzar las más que destacables prestaciones de hoy en día.

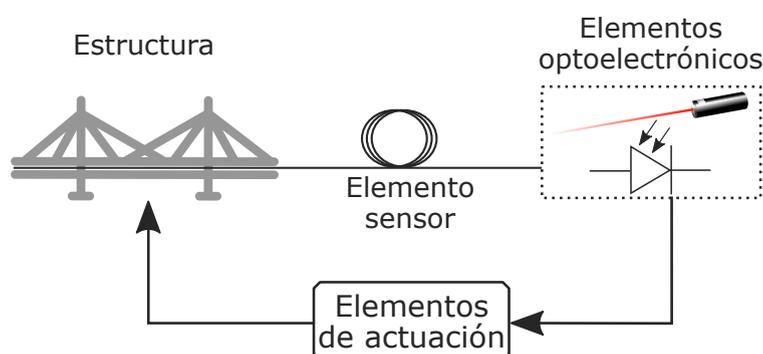
Sin embargo, a lo largo de las últimas décadas, la fibra óptica no ha sido utilizada únicamente como medio de transmisión en los sistemas de comunicación ópticos, sino que también ha jugado un papel muy importante en el campo de los sensores, siendo objeto de estudio para aplicaciones en numerosos campos (medicina, ingeniería civil [1], industria, aeronáutica [2], energía, etc.).

Muy diversos son los parámetros que este tipo de sensores basados en fibra óptica son capaces de medir, entre los que destacan: temperatura, *strain*<sup>1</sup>, concentración de gas o aceleración, entre otros. En comparación con el resto de sensores, entre los que se incluyen los sensores eléctricos, los ópticos ofrecen un conjunto de ventajas que los hacen más atractivos y competitivos en la aplicación a diversos problemas.

---

<sup>1</sup>En este trabajo *strain* toma su acepción mecánica, y se refiere a la elongación o contracción sufrida por la fibra óptica debida a la aplicación de una fuerza externa.

Asimismo, cabe destacar que son dos, fundamentalmente, las categorías en las que estos sensores suelen clasificarse: sensores puntuales, como los sensores *fiber Bragg grating* (FBG); y sensores distribuidos, como los sensores BOTDA (como el que será empleado en este trabajo<sup>1</sup>). Estos últimos, los sensores distribuidos, aprovechan toda la fibra como sensor gracias a fenómenos como el *scattering* de *Rayleigh* (lineal y elástico) o de *Raman* y *Brillouin* (no lineales e inelásticos), lo que los convierte en perfectos candidatos para la monitorización de grandes y complejas estructuras, tales como puentes [3], oleoductos, líneas de tensión, etc. Dicha monitorización se ubica dentro de la disciplina conocida como *Structural Health Monitoring* (SHM), objeto de gran interés en la actualidad por su capacidad de prevención de desastres y gran ahorro de costes por detección prematura de daños [4]. De una forma gráfica, la *Figura 1.1* muestra de forma esquemática el concepto de un sistema SHM genérico.



**Figura 1.1.** Representación conceptual de la monitorización de salud estructural (SHM)

En términos generales, la fibra óptica es utilizada tanto como elemento sensor, como elemento de transmisión de la información obtenida del proceso de monitorización. Dicha fibra es instalada sobre la superficie o en el interior de la estructura a monitorizar y un conjunto de elementos optoelectrónicos son capaces de generar y detectar las señales ópticas necesarias para llevar a cabo dicha monitorización. Adicionalmente, estas señales ópticas detectadas, las cuales presentan un comportamiento dependiente de fenómenos externos (*strain*, temperatura, etc.), son procesadas con el fin de llevar a cabo un posterior proceso de toma de decisiones, necesario para garantizar la correcta *salud* de la estructura.

Con todo ello, este trabajo se centra en sensores distribuidos basados en *scattering* estimulado de *Brillouin* (SBS), concretamente, en su configuración conocida como BOTDA<sup>2</sup>. Mediante estos, es posible realizar medidas de temperatura y *strain* sobre distancias mayores de 100<sup>3</sup> km con resoluciones inferiores al metro.

De esta forma, en la siguiente sección así como a lo largo del trabajo se tratará de abordar la razón de la necesidad de discriminar entre ambos parámetros, en sistemas BOTDA, cuando estos afectan a la fibra sensor de forma simultánea en el espacio y el tiempo.

<sup>1</sup>También puede hablarse de sensores integrales y cuasi-distribuidos, dependiendo de sus características, aunque se pueden entender como casos particulares de los dos supuestos mencionados.

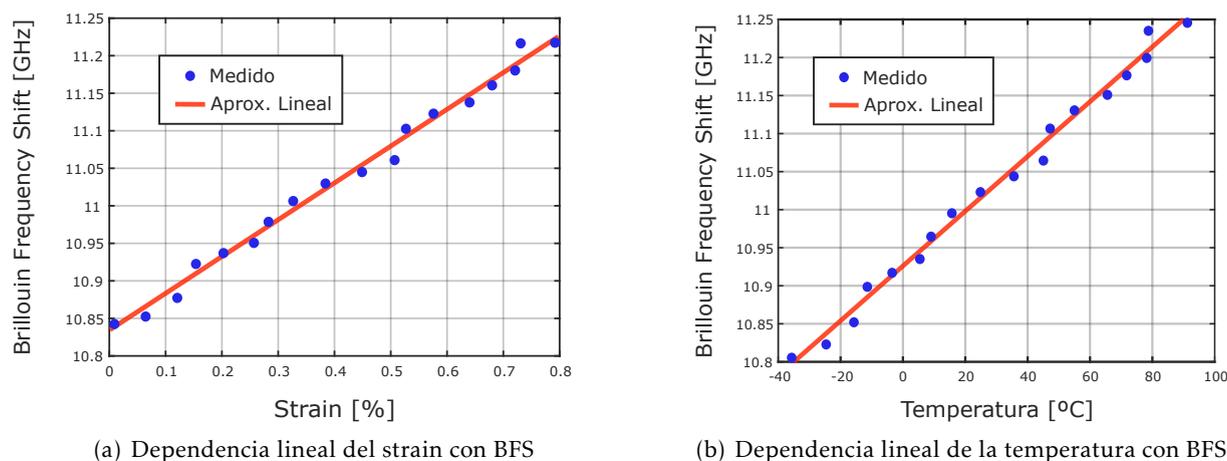
<sup>2</sup>A pesar de que existen numerosas implementaciones BOTDA, en este trabajo siempre se referirá a la configuración convencional (ver *Figura 4.1*).

<sup>3</sup>La distancia puede ser mayor cuando se emplean sistemas asistidos, pero éstos quedan fuera del alcance de este trabajo.

## 1.2. Objetivos

El objetivo fundamental de este trabajo, como así lo indica su título, consiste en la discriminación automática de medidas de *strain* y temperatura en sensores BOTDA mediante el empleo de técnicas de Inteligencia Artificial. Pero, ¿por qué es esto necesario?

El *Brillouin Frequency Shift (BFS)* o desplazamiento de frecuencia de *Brillouin* es el parámetro utilizado para estimar valores de *strain* o temperatura en configuraciones BOTDA, siendo este sensible proporcionalmente a variaciones de ambos. Por este motivo, no es posible, *a priori*, diferenciar qué parámetro es el que provoca las variaciones BFS a través de una simple medida cuando ambos varían en el mismo instante de tiempo y misma posición dentro de la fibra. La *Figura 1.2* muestra dicha relación de dependencia, lineal en ambos casos [5].



**Figura 1.2.** Dependencia lineal BFS con strain y temperatura

A partir de esta figura, resulta sencillo comprender que esta discriminación no puede realizarse a partir de un único sistema BOTDA empleando el desplazamiento en frecuencia de *Brillouin* o BFS como parámetro distintivo, puesto que tanto *strain* como temperatura presentan una dependencia lineal con el mismo. Por ello, es necesario encontrar un parámetro adicional que permita llevar a cabo dicha discriminación. Existen numerosas soluciones a este problema. Una de ellas es, por ejemplo, disponer de dos sistemas sensores de fibra óptica, uno de ellos sometido a *strain* y temperatura y el otro a temperatura únicamente (aislando mecánicamente el *strain*), con lo que podría determinarse qué parámetro es el que afectó al BFS mediante correlación. Otra solución, basada en el mismo principio, consiste en combinar un sistema sensor basado en *Raman* (solamente sensible a variaciones de temperatura) con uno basado en *Brillouin*, y operar de la misma forma; o incluso la combinación de *Rayleigh* y *Brillouin*.

Sin embargo, aunque simples, estas opciones no resultan del todo económicas (es necesario disponer de dos sistemas de monitorización independientes). Por este motivo, en este trabajo se presenta una solución a este problema de discriminación basada en el empleo de técnicas *software* de Inteligencia Artificial, que únicamente añaden al sistema ya original el coste asociado al almacenamiento y procesamiento de los datos extraídos del mismo. Aunque se detallará posteriormente en el *Capítulo 3*, esa ecuación adicional necesaria para poder distinguir entre ambos se encuentra en la dependencia de *strain* y temperatura con la anchura del espectro de ganancia de *Brillouin*.

# CAPÍTULO 2

## Estado del arte de los sensores de Fibra Óptica

A lo largo de las últimas décadas, numerosos avances en el desarrollo de las fibras ópticas empleadas en los sistemas de comunicación ópticos desembocan en la visión de una nueva aplicación para estas fibras: elementos de monitorización.

Durante los años 60, comenzaron los trabajos de investigación en torno a los sensores de fibra óptica u *Optical Fiber Sensors* (OFS). Sin embargo, no es hasta recién entrados los años 70 cuando tienen lugar los primeros experimentos de fibra óptica con propósitos de *sensado*<sup>1</sup>, coincidiendo con el desarrollo de las fibras ópticas de bajas pérdidas. Desde entonces y hasta el momento, la investigación en este campo ha sido dirigida hacia la exploración de esta tecnología como elemento sensor y de medida.

El gran volumen de fibra requerida en los sistemas de comunicación de todo el mundo, que provocan una caída sustancial de los costes asociados al material y a la fabricación de estos sensores, junto con una continua evolución en la mejora del rendimiento de la fibra óptica, allanan el camino a estos sensores en su consagración como elementos de monitorización multidisciplinar [6], empleados en estructuras como oleoductos y tuberías, vías de tren, alas de aviones o palas de aerogeneradores.

Precisamente esta adaptación de los sensores basados en fibra a las diferentes disciplinas (industria, medicina, aeronáutica, etc.), donde los sensores convencionales no son capaces de funcionar o lo hacen con un peor rendimiento, es lo que consigue centrar la atención de numerosos investigadores en la consecución de sistemas de monitorización cuyo alcance y resolución sea máximo, realizando continuas mejoras tanto desde el punto de vista óptico (nuevas configuraciones, elementos adicionales, mejora de los elementos ya existentes, etc.), como desde el punto de vista de procesado de los datos obtenidos del proceso de monitorización (gestión de gran cantidad de datos).

Como ya se ha comentado en la parte introductoria, los sensores distribuidos basados en el fenómeno de *scattering* estimulado de *Brillouin*, concretamente en su configuración BOTDA, serán

---

<sup>1</sup>*Sensado* es un término no aceptado por la RAE, pero comúnmente utilizado por la comunidad científica española como traducción del término inglés *sensing*.

el epicentro de este trabajo. Por ello, puede ser interesante conocer, a grandes rasgos, cuál ha sido su evolución y cuál es su posición dentro del campo de los sensores que utilizan la fibra óptica como elemento sensor. De este modo, en este capítulo se abordarán temas como el uso de la fibra óptica como elemento sensor o los distintos tipos de sensores de fibra óptica (distribuidos, cuasi distribuidos y puntuales). Asimismo, se realizará un estudio más profundo de los sensores distribuidos, centrando la atención en los basados en el *scattering* de Brillouin y, más concretamente, en los sistemas BOTDA.

## 2.1. La fibra como elemento sensor

Desde un punto de vista genérico, los sensores de fibra óptica, como ya se ha mencionado en la parte introductoria, proveen una alternativa a los sensores tradicionales que emplean otras tecnologías, como por ejemplo los sensores eléctricos.

El funcionamiento de estos sensores de fibra está basado en la interacción de parámetros físicos, biológicos o químicos con las señales ópticas que viajan a través de la fibra. Estos parámetros externos afectan de una forma u otra a dichas señales y a partir de estas es posible extraer información del parámetro en cuestión. La siguiente figura presenta de forma gráfica el concepto básico de este tipo de sensores:

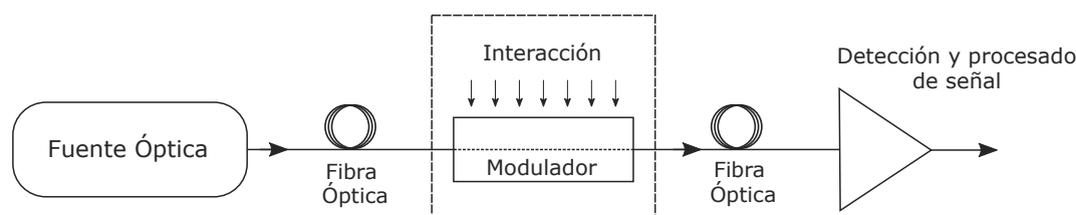


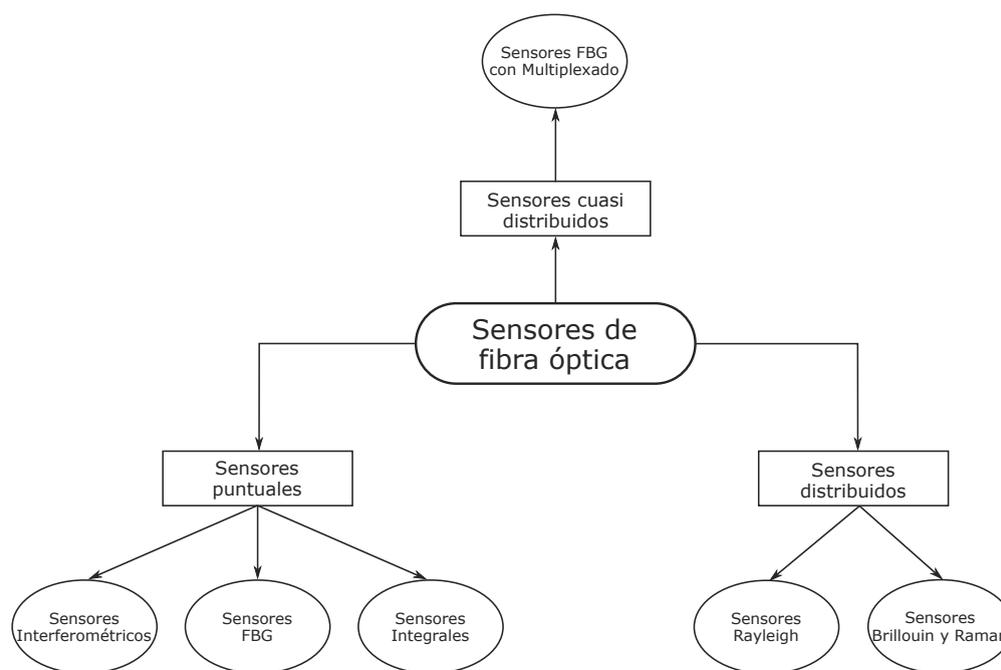
Figura 2.1. Concepto sensor óptico

El funcionamiento básico de estos sensores está basado en la interacción entre la señal óptica generada por la fuente y un cierto parámetro externo que actúa modulando la señal a lo largo de su trayecto por la fibra óptica. Una vez la señal alcanza el final de dicho trayecto, esta es detectada y procesada con el fin de obtener información acerca del parámetro en cuestión. Este funcionamiento de los sensores de fibra es genérico y, por tanto, como se comprobará en las sucesivas secciones, el caso particular de los sensores BOTDA se ajusta a este.

Dichos sensores, los BOTDA, forman parte de un conjunto mayor: los sensores de fibra, es decir, aquellos que utilizan la propia fibra óptica como elemento sensor; y que, a su vez, pueden incluirse dentro de los sensores fotónicos. En la *Figura 2.2* se muestra una clasificación generalmente empleada<sup>1</sup> para este tipo de sensores, así como algunos ejemplos de cada uno de ellos, clasificándolos en tres clases principales: sensores puntuales, sensores cuasi distribuidos y sensores distribuidos.

En ciertas ocasiones, los sensores puntuales y cuasi distribuidos se agrupan dentro de la misma categoría, puesto que estos últimos son formados a partir de una disposición consecutiva de los primeros, constituyendo sensores que se encuentran a medio camino entre los puntuales y distribuidos. En la *Sección 2.2* se explicará con mayor nivel de detalle cada una de estas clases de sensor.

<sup>1</sup>Existen otros tipos de clasificaciones, como las basadas en el principio de funcionamiento o aquellas que atienden a los parámetros que son capaces de medir.



**Figura 2.2.** Clasificación de los sensores de fibra óptica

Además, para que estos sensores sean capaces de monitorizar una estructura, es necesario que se incrusten en el elemento en cuestión, o bien se coloquen sobre la superficie del mismo. La forma en que la fibra es incluida en la estructura es determinante, puesto que una colocación errónea podría introducir errores en las conclusiones extraídas a partir de los datos obtenidos. Esto es, si se considera, por ejemplo, una estructura de hormigón reforzado, sobre la cual se coloca una fibra adherida a las barras de acero; si por algún motivo la fibra no está adecuadamente adherida a la estructura, no estará sometida al mismo *strain* que esta última, con lo que los resultados obtenidos podrían no ajustarse adecuadamente a la realidad.

Hasta este punto, ya es conocido que los sensores de fibra óptica proporcionan una alternativa a sensores más convencionales, como es el caso de los eléctricos. A modo de comparativa, a continuación se enumeran las principales ventajas [6, 7], así como inconvenientes, que presentan este tipo de sensores respecto a otros. Por tanto, algunas de estas ventajas son:

- ✓ *Sensado* y transmisión de información utilizando el mismo medio
- ✓ Monitorización en tiempo real de infraestructuras de gran extensión
- ✓ Ofrecen un enlace de bajas pérdidas que puede ser aprovechado para alcanzar grandes distancias
- ✓ Por ser material dieléctrico, ni son afectados por interferencias electromagnéticas, ni las generan
- ✓ Tamaño y peso reducidos
- ✓ Alta sensibilidad y gran ancho de banda
- ✓ Gran robustez y resistencia → Adecuado en entornos exigentes
- ✓ Fácil integración en una amplia variedad de estructuras

✓ Rango operacional muy amplio:

Strain	Aceleración	Temperatura
Presión	Campos magnéticos	pH y viscosidad
Fuerza	Campos eléctricos	ADN, virus o bacterias
Rotación	Vibraciones	humedad

✓ Capacidad de multiplexación de una forma eficiente dentro de la fibra (tecnologías de multiplexación por división de longitud de onda como transmisores ópticos de gran ancho de banda con receptores selectivos, o láseres sintonizables que se ajustan precisamente a longitudes de onda determinadas ...)

Mientras que, por otro lado, algunos de los inconvenientes más significativos asociados a esta tecnología son:

- × Coste elevado (en algunos casos)
- × Dificultad para mantener la estabilidad a largo plazo cuando se emplean determinadas tecnologías
- × Generalmente, alta complejidad de los componentes que conforman el sistema, salvo en tecnologías como *Speckle*

A continuación, en la *Sección 2.2* se llevará a cabo una descripción detallada de los tres tipos de sensores mencionados en el esquema de la *Figura 2.2*. Asimismo, los sensores distribuidos basados en los fenómenos de *scattering* de *Rayleigh*, *Raman* y *Brillouin* serán objeto de estudio de la *Sección 2.3*, mientras que el contenido desde la *Sección 2.4* hasta finalizar el capítulo está destinado exclusivamente a *Brillouin*.

## 2.2. Sensores puntuales, cuasi distribuidos y distribuidos

En la sección anterior se hizo referencia a la clasificación de los sensores de fibra óptica comúnmente realizada: sensores puntuales, sensores cuasi distribuidos y sensores distribuidos. En este apartado, se abordará de forma individual cada uno de ellos, con especial atención a los sensores distribuidos, de particular interés en este trabajo, que serán abordados con mayor profundidad en la *Sección 2.3*.

### 2.2.1. Sensores puntuales

Los sensores puntuales son capaces de medir cambios en puntos específicos de una cierta estructura. Esto implica que el diseño de un sistema sensor que incluya a estos como elementos sensores deberá ser planificado cuidadosamente, atendiendo al número de sensores y posición adecuados, puesto que su alcance es mínimo y un mal diseño puede desembocar en la instalación de sensores cuyas medidas puedan llegar a ser completamente inútiles.

Dentro de este tipo de sensores, los interferométricos son ampliamente empleados debido a su gran sensibilidad. Su funcionamiento está basado en la detección del cambio de fase inducido

en la luz en su propagación a lo largo de la fibra. Normalmente, la luz de entrada es dividida igualmente en dos caminos: uno de ellos sirve como referencia, mientras que el otro es afectado por el parámetro de interés. La conversión de este cambio de fase a temperatura, *strain*, o presión es relativamente directa [6]. Los cuatro tipos principales de sensores interferométricos son: *Mach-Zehnder*, *Michelson*, *Fabry-Perot* y *Sagnac*.

Además, otro tipo de sensores puntuales comúnmente empleados, desde su aparición en el año 1989, son los *fiber Bragg grating* (FBG). En este caso, cambios de temperatura o aparición de *strain* pueden dar lugar a variaciones en el período del *grating*, afectando a la señal óptica procedente de dicho *grating*, que sufre un proceso de difracción. La monitorización de dicha señal provee información acerca de los fenómenos que le han afectado, conocida de forma previa la relación entre estos y el desplazamiento en longitud de onda experimentado por la señal óptica, lo que proporcionará valores finales de *strain*, temperatura, o cualquiera que sea el parámetro objeto de estudio.

La ventaja principal de este tipo de sensores, con respecto al resto de sensores basados en fibra reside en que estos utilizan la longitud de onda como parámetro que recoge la información sobre la temperatura o el *strain* sufrido por la fibra, puesto que dicha longitud de onda no está sujeta a las fluctuaciones asociadas a la propagación de la señal óptica. En la actualidad, la mayoría de la investigación en torno a este tipo de sensores está centrada en el uso de los mismos como sensores cuasi distribuidos de *strain* y temperatura [8]. En su uso como sensores puntuales, son capaces de medir presión [9], niveles de emisión acústica [10–12], así como monitorizar el proceso de cura de materiales compuestos [13, 14].

Finalmente, señalar que los sensores puntuales son usualmente utilizados en aplicaciones que requieren medidas locales de parámetros como vibración o *strain*, pudiendo ser también utilizados en los casos que se requiera una monitorización de la salud de una determinada estructura (SHM), para lo cual se suele disponer de varios de estos sensores, convirtiéndose en sistemas cuasi distribuidos.

### 2.2.2. Sensores cuasi distribuidos

Un caso muy común de sensor cuasi distribuido lo constituyen los sensores que combinan FBG con la multiplexación [15]. Un gran número de sensores FBG puede conseguirse mediante el empleo de una o la combinación de algunas de las siguientes técnicas:

- (1) Time–Division Multiplexing (TDM)
- (2) Spatial–Division Multiplexing (SDM)
- (3) Frequency–Division Multiplexing (FDM)
- (4) Wavelength–Division Multiplexing (WDM)

En este caso, las técnicas WDM y TDM son las más empleadas; pues las dos restantes no suelen utilizarse.

### 2.2.3. Sensores distribuidos

Los sensores distribuidos son especialmente adecuados cuando se trata de monitorizar grandes y complejas estructuras, tales como edificios, puentes, tuberías, etc., con el propósito de detectar

posibles defectos en un estado inicial en el que la salud de la estructura no se ve comprometida, de forma que, una intervención inmediata evite riesgos mayores y suponga un gran ahorro económico. Que los sensores distribuidos sean adecuados en estos casos se debe a que la fibra óptica actúa en su totalidad como un sensor, siendo capaz de detectar cambios en cualquier posición (dependiendo de la resolución espacial fijada).

Dos son, fundamentalmente, los métodos distribuidos de sensado que existen: basados en el *scattering* de *Rayleigh* (como los OTDR) y sensores basados en *scattering* de *Brillouin* y *Raman*. Esta distinción se realiza atendiendo a las propiedades que caracterizan a estos tipos de *scattering*, detalladas en la siguiente sección: la *Sección 2.3*.

## 2.3. Sensores distribuidos de Fibra Óptica

Los sensores distribuidos de fibra óptica juegan un papel muy importante en numerosas aplicaciones relacionadas con la monitorización. Utilizando la fibra como medio sensor, son capaces de proveer información sobre el parámetro de interés en cada punto de la fibra en función de la resolución espacial definida. Su funcionamiento está basado en el fenómeno de *scattering* o dispersión<sup>1</sup>, provocado por fluctuaciones de las propiedades ópticas del medio (fibra óptica), que, a su vez, pueden estar asociados a cambios locales o temporales del índice de refracción. Dependiendo del proceso de *scattering* sufrido por la señal óptica que se propaga por la fibra en cuestión, el sensor será capaz de realizar medidas de diferentes parámetros (*strain*, temperatura, etc.).

Pese a que este trabajo está orientado a sensores que aprovechan el fenómeno de *scattering* de *Brillouin* para obtener valores de los parámetros de monitorización, es interesante conocer cuáles son los diferentes tipos de *scattering* que sufre la luz y que también son utilizados con propósitos de monitorización, hasta alcanzar la *Sección 2.4*, en la cual se abordará el *scattering* de *Brillouin*.

Sin embargo, previa explicación de estos fenómenos, puede ser de gran utilidad conocer la clasificación de los tipos de *scattering* que sufre la luz atendiendo a su comportamiento en términos de interacción de la energía con el medio:

- ▶ **Scattering elástico:** los fotones dispersados mantienen la misma energía y, consecuentemente, mantienen la misma frecuencia que la luz incidente.
- ▶ **Scattering inelástico:** como resultado de una transferencia de energía entre los fotones y el medio, la energía de éstos respecto a los incidentes varía y, consecuentemente, su frecuencia también lo hace. Dos son los casos que pueden tener lugar cuando se produce *scattering* inelástico:
  - El **medio absorbe** la **energía** → la **frecuencia** de los fotones dispersados **disminuye** respecto a la de la luz incidente (componente *Stokes*).
  - El **medio cede** la **energía** → la **frecuencia** de los fotones dispersados **aumenta** respecto a la de la luz incidente (componente anti-*Stokes*).

Por otra parte, otro tipo de clasificación que se puede realizar es atendiendo a la razón de proporcionalidad entre la variación de potencia debida al *scattering* y la potencia que se propaga.

---

<sup>1</sup>En el contexto de este trabajo se emplea el término dispersión como traducción al castellano del término *scattering*.

De esta forma, se tendrá:

- **Scattering lineal:** la relación entre la potencia esparcida y la potencia propagada es lineal.
- **Scattering no lineal:** dicha relación no es lineal.

Una vez conocidas las distintas clasificaciones que surgen con respecto al fenómeno de *scattering*, a continuación, se presentan los tres tipos de *scattering*, desde un punto de vista conceptual, considerados en este apartado:

- (1) **Scattering de Rayleigh:** es resultado de fluctuaciones de densidad del medio constantes. La principal causa de este fenómeno son inhomogeneidades de naturaleza aleatoria de tamaño mucho menor que la longitud de onda de la luz que se propaga. Estas irregularidades causan variaciones del índice de refracción, que se traducen en una consecuente dispersión de la luz al atravesarlas. Este fenómeno provoca una dispersión de la luz en todas las direcciones, aunque únicamente la componente propagada hacia atrás tiene utilidad para propósitos de *sensado*. La luz que sufre el *scattering* no sufre un desplazamiento de frecuencia, siendo este, por tanto, un fenómeno **elástico**. Además, por ser proporcional la potencia dispersada a la de la luz propagándose en el medio, el *scattering* de *Rayleigh* es considerado **lineal**.

Los sensores basados en este fenómeno son capaces de realizar medidas tanto de *strain* como de temperatura mediante la información extraída de las variaciones locales en el patrón de la señal de *Rayleigh* dispersada, dependientes de ambos parámetros. Estos sensores proporcionan una alta resolución en la medida de dichos parámetros, así como una alta resolución espacial para distancias en torno a los 70 metros [16].

- (2) **Scattering de Raman:** es resultado de la interacción entre la onda de luz y la vibración periódica molecular del medio. Los fotones incidentes intercambian energía con los fonones ópticos, los cuales, a modo de dato, poseen considerablemente más energía que los involucrados en el *scattering* de *Brillouin*. Como consecuencia, el *scattering* de *Raman* es del tipo **inelástico** y **no lineal**, produciéndose desplazamientos de frecuencia de alrededor de tres órdenes de magnitud mayor que en el caso de *Brillouin* (fonón óptico de frecuencia de  $\approx 10$  THz).

Los sistemas basados en este tipo de *scattering* aprovechan la diferencia de intensidad relativa entre las dos componentes (*Stokes* y anti-*Stokes*, ver *Figura 2.3*), fruto de la dispersión que sufre la señal óptica en función de la temperatura, con lo que resulta posible obtener el perfil de temperatura a lo largo de la fibra [17]. La resolución de temperatura de estos sensores suele rondar  $0.1$  °C, y su resolución espacial se sitúa en torno a 1 metro en un rango de hasta 8 km [18].

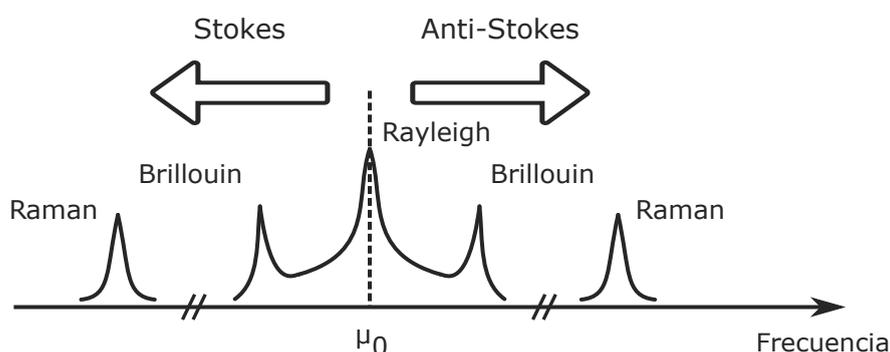
- (3) **Scattering de Brillouin:** es resultado de la propagación de las fluctuaciones de la densidad del medio, provocadas por la propagación de ondas de presión. Estas ondas de presión provocan variaciones del índice de refracción a medida que se propagan a lo largo de la fibra. Se trata de un fenómeno **inelástico** y **no lineal**, en el cual la luz es dispersada por fonones acústicos (frecuencia de  $\approx 10$  GHz) con un desplazamiento de frecuencia determinado, entre otros, por la velocidad acústica en el medio.

Los sensores basados en este fenómeno permiten realizar medidas tanto de *strain* como de temperatura mediante un escaneo de frecuencias, tras el cual se obtiene la curva de ganancia de *Brillouin*. A partir de esta curva es posible estimar la desviación en frecuencia que

ha sufrido la señal óptica, dependiente de ambos parámetros (Ver *Figura 1.2*). La resolución espacial que es posible alcanzar con estos sensores es de, aproximadamente, 1m para distancias en torno a los 100 km.

Para los tres tipos de *scattering* recientemente descritos, dependiendo del sentido de propagación de las ondas que interaccionan cuando se produce el *scattering*, la frecuencia de la luz dispersada disminuye (componente *Stokes*) cuando ambas se propagan en sentidos opuestos; o aumenta (componente *Anti-Stokes*) cuando el sentido de propagación coincide.

La siguiente figura muestra las componentes espectrales resultado de los diferentes fenómenos de dispersión descritos previamente, experimentados por una onda monocromática de frecuencia  $\nu_0$  que se propaga a través de una fibra óptica:



**Figura 2.3.** Componentes espectrales del scattering de Raman, Brillouin y Rayleigh

A partir de esta, es posible apreciar algunos de los conceptos literalmente descritos, como son:

- ▶ Los fotones que sufren *scattering* de **Rayleigh** no sufren **desplazamiento de frecuencia** respecto a  $\nu_0$ , mientras que los que sufren *scattering* de **Brillouin** o **Raman**, sí. Es decir, en el **primer caso** se trata de un fenómeno **elástico**, mientras que en los dos posteriores es **inelástico**.
- ▶ El **desplazamiento de frecuencia** sufrido por los fotones dispersados por **Raman** es muy **superior** a aquel que sufren los dispersados por **Brillouin** (del orden de 3 veces superior).
- ▶ Las componentes **anti-Stokes** se corresponden con **desplazamientos de frecuencia positivos** (aumento) respecto a  $\nu_0$ , mientras que las componentes **Stokes** se corresponden con **desplazamientos negativos** (disminución).

Finalmente, a modo de resumen, la *Tabla 2.1* recoge las características principales de los sensores basados en cada uno de los tres fenómenos descritos previamente.

Hasta este punto, han sido definidos los sensores basados en fibra óptica, así como sus tipos: puntuales, cuasi distribuidos y distribuidos; con especial atención a los distribuidos, de los cuales se ha realizado una nueva clasificación atendiendo al fenómeno de *scattering* que experimentan: *Rayleigh*, *Raman* y *Brillouin*. La siguiente sección, *Sección 2.4*, está dedicada exclusivamente a este último. En la misma, se explicarán más en detalle conceptos físicos relativos al *scattering* de *Brillouin*. Asimismo, se llevará a cabo una distinción entre conceptos tan relevantes como *scattering* espontáneo y estimulado.

	Scattering de Rayleigh	Scattering de Raman	Scattering de Brillouin
Parámetro de medida	Temperatura, strain	Temperatura	Temperatura/strain
Elástico \ Inelástico	Elástico	Inelástico	Inelástico
Lineal \ No Lineal	Lineal	No lineal	No lineal
Desplazamiento de Frecuencia	No existe	≈ THz	≈ GHz
Rendimiento	Resolución Strain → 1 με, resolución espacial → 10 mm [19]	Resolución temperatura → ≈ 0.1°C, resolución espacial de 1m en un rango de hasta 8 km [18]	Resolución strain → 2 με (estimulado) y resolución espacial → 0.5-5 m (estimulado) hasta 100 km
Notas	Alta resolución en temperatura y buena resolución espacial, pero limitado en longitud: es necesario compensación de temperatura	Muy apropiado para medida de temperatura	Señal más fuerte que en los anteriores

Tabla 2.1. Comparativa de sensores según el tipo de scattering

## 2.4. Brillouin: espontáneo vs estimulado

De los tres fenómenos de *scattering* explicados en la sección anterior: *Rayleigh*, *Raman* y *Brillouin*; este último será objeto de estudio en esta sección. Esta, a su vez, será subdividida en dos secciones, correspondientes a *scattering* espontáneo de *Brillouin* (SpBS, *Spontaneous Brillouin Scattering*) y *scattering* estimulado de *Brillouin* (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*).

Como ya ha sido detallado en la sección anterior, el fenómeno de *scattering* de *Brillouin* cumple con las propiedades de no elasticidad y no linealidad, y es producido por la interacción entre las ondas de luz y las ondas de presión que se propagan a través de la fibra, las cuales originan fluctuaciones de la densidad del medio, variando de forma periódica el índice de refracción del mismo. Para los propósitos de monitorización de este trabajo, dichas ondas acústicas son generadas a través del fenómeno de electrostricción<sup>1</sup> tras la interacción de una onda pulsada y otra continua, como se verá posteriormente.

La luz dispersada debido a las ondas de presión sufre un desplazamiento de frecuencia que es dependiente del ángulo de esparcimiento o *scattering angle*<sup>2</sup>. Se sabe que, en el caso de *Brillouin*, la luz dispersada únicamente se propaga en el sentido contrario a aquel de la incidente, con un desplazamiento máximo en frecuencia que sigue la siguiente expresión:

$$v_B = \frac{2 \cdot n \cdot v_A}{\lambda_p}, \quad (2.1)$$

donde  $n$  es el índice de refracción del núcleo,  $v_A$  es la velocidad del sonido en el medio y  $\lambda_p$  es la longitud de onda de la luz incidente, que será denominada onda de bombeo (*pump*); a diferencia de la dispersada en sentido opuesto, denominada onda de prueba. Estos dos términos serán ampliamente tratados en la *Sección 2.5* cuando se detalle la configuración BOTDA.

La onda acústica que se propaga a través de medio provoca un desplazamiento de la frecuencia

<sup>1</sup>El fenómeno de electrostricción consiste en una tendencia presente en los materiales dieléctricos por la cual estos se comprimen en presencia de un campo eléctrico.

<sup>2</sup>Se define el ángulo de esparcimiento o *scattering angle* como el ángulo que forma la dirección de la luz esparcida con la dirección de la luz incidente.

de los fotones esparcidos debido al efecto *Doppler*. El propio *Leon Brillouin*<sup>1</sup> explicó en [20] el *scattering* que lleva su nombre a través de dicho efecto, para lo que empleó, entre otras, una figura tal como la que se muestra en la *Figura 2.4*. La explicación proporcionada por el propio *Brillouin* fue la siguiente: la onda acústica (onda elástica) interacciona con la radiación óptica incidente, por lo que se produce un incremento o disminución en la frecuencia de la onda reflejada vía Efecto *Doppler*.

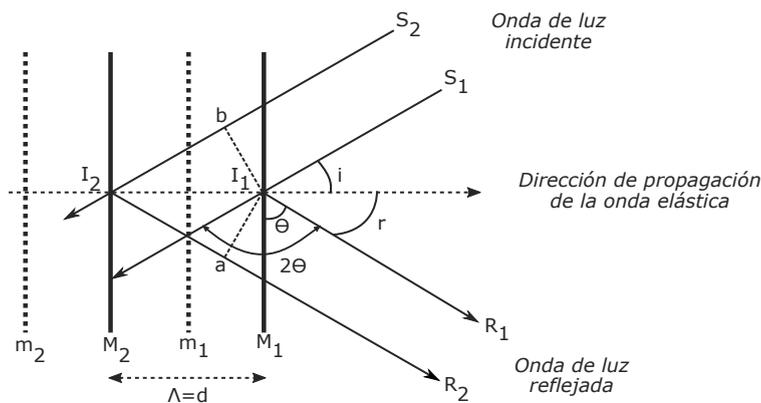


Figura 2.4. Explicación *scattering* de Brillouin.

Debido a dicho efecto, la frecuencia de la luz dispersada disminuye respecto al BFS cuando la onda acústica y la luminosa se propagan en sentidos contrarios (caso *Stokes*), o aumenta en el caso contrario (caso *anti-Stokes*).

Otra característica asociada al proceso de *scattering* de Brillouin es que este cumple con la conservación de momento y energía de las ondas que participan (onda acústica y onda óptica). Las ecuaciones mostradas a continuación así lo reflejan:

► Caso *Stokes*:

$$v_{acustica} = v_{incidente} - v_{Stokes} \tag{2.2}$$

$$k_{acustica} = k_{incidente} - k_{Stokes} \tag{2.3}$$

► Caso *anti-Stokes*:

$$v_{anti-Stokes} = v_{incidente} + v_{acustica} \tag{2.4}$$

$$k_{anti-Stokes} = k_{incidente} + k_{acustica} \tag{2.5}$$

A continuación, en los siguientes subapartados, se centrará la atención en las dos variantes que presenta el *scattering* de Brillouin: espontáneo y estimulado, según sea el valor de la potencia de la señal óptica incidente.

### 2.4.1. Scattering espontáneo de Brillouin

El *scattering* espontáneo de Brillouin (SpBS) tiene lugar cuando la luz incidente es dispersada por ondas acústicas que han sido generadas térmicamente. Estos fonones acústicos cambian la

<sup>1</sup>Leon Brillouin (1889 – 1969) fue un físico francés con relevantes aportes en la mecánica cuántica y la teoría de información.

permitividad dieléctrica de la fibra y ,consecuentemente, el índice de refracción que *ve* la luz incidente a lo largo de su propagación a través de dicha fibra.

Puesto que los fonones acústicos son creados a partir de la agitación térmica, su existencia es ineludible siempre que la temperatura a la que esté expuesta la fibra por la que circula la señal óptica sea superior al cero absoluto. La interacción de la onda de luz incidente con estos fonones provocará que esta se disperse, generando una componente que se propaga en sentido opuesto y con un determinado desplazamiento de frecuencia (BFS) dependiente de la longitud de onda de trabajo y el tipo de fibra seleccionado.

La potencia de las ondas dispersadas de forma espontánea es, normalmente, inferior a aquellos casos en los que el *scattering* es producido de forma estimulada (Sección 2.4.2), por lo que ésta suele ser habitualmente amplificada si, por cualquier motivo (monitorización, por ejemplo), van a ser objeto de estudio.

Una gran ventaja del fenómeno espontáneo respecto al distribuido es, que, en el primero, únicamente es necesario el acceso a un extremo de la fibra que actúa como elemento sensor; mientras que, como se verá posteriormente, en el caso espontáneo, será necesario disponer de acceso a ambos extremos, lo que se traduce en una característica más restrictiva. Sin embargo, el mero hecho de disponer de una potencia mayor de la señal óptica cuando se trata de *scattering* estimulado hace que este sea el fenómeno empleado para propósitos de monitorización.

### 2.4.2. *Scattering* estimulado de Brillouin

En este caso, las ondas acústicas que producen la dispersión de la luz son generadas por la interacción en un segmento de fibra entre una onda de bombeo o *pump* y una onda de prueba o *probe* (cuya diferencia de frecuencia es, aproximadamente, el BFS propio de la fibra) gracias, principalmente, al fenómeno de electrostricción. Esta onda acústica modula el índice de refracción de la fibra a medida que se propaga por ella, generando una red de difracción virtual que se desplaza a lo largo de dicha fibra, dispersando la señal óptica.

El término *estimulado* hace referencia al hecho de que, a diferencia del caso anterior, se estimula la aparición de una onda acústica mediante la interacción de una señal de bombeo y una señal de prueba. La amplitud de esta onda acústica generada se superpone a la correspondiente a la generada de forma térmica, puesto que esta siempre existirá a menos que la temperatura sea de 0°K, es decir, el cero absoluto.

Además, el *scattering* estimulado de Brillouin puede ser aprovechado mediante diferentes técnicas, como son Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA), Brillouin Optical Frequency Domain Analysis (BOFDA) o Brillouin Optical Correlation Domain Analysis (BOCDA). A continuación, se procede a detallar estas dos últimas [7], pues la técnica BOTDA será tratada con mayor nivel de detalle en la siguiente sección.

- **BOFDA:** los sensores BOFDA fueron presentados por primera vez en el año 1996, cuatro años antes que los sensores BOCDA. Esta técnica está basada en la estimación de la función de transferencia compleja de la fibra a partir de la relación entre las amplitudes de las ondas de bombeo y prueba. Para ello ambas señales se propagan en sentidos opuestos con una diferencia de frecuencia en torno al BFS característico de la fibra. La interacción resultante de ambas ondas es detectada mediante dos fotodiodos separados, que alimentan un analizador de red. Mediante un barrido de frecuencia, el analizador de red provee la función de transferencia de la fibra, a la cual se le aplica la transformada inversa de Fourier o *Inverse*

*Fourier Transform* para obtener la respuesta de *Brillouin* en el dominio del tiempo para cada sección de la fibra. Con esta técnica es posible realizar medidas con alta resolución espacial, la cual depende del rango en el barrido de frecuencia.

- ▶ **BOCDA**: este tipo de sensores son propuestos por primera vez en el año 2000 como una solución muy atractiva a problemas en los que se requiere una gran resolución (en torno a 40 cm) a lo largo de distancias intermedias (pocas decenas de metros). Desde ese momento, esta técnica ha sido mejorada hasta llegar a conseguir resoluciones de unos pocos milímetros en la detección de variaciones de *strain* y temperatura. La técnica BOCDA está basada en la propagación en sentido opuesto de dos ondas: una cuasi continua y otra pulsada, ambas moduladas en frecuencia por una función sinusoidal. Cuando ambas ondas se propagan a lo largo de la fibra, la diferencia de frecuencia entre ambas se mantiene constante en unos determinados puntos, denominados nodos, mientras que en otras posiciones varía.

Considerando que ambas ondas son desplazadas en frecuencia por el BFS característico de la fibra, el SBS ocurre exclusivamente en los nodos, que serán denominados picos de correlación. En el resto de la fibra, la diferencia de frecuencia varía mucho más rápido que el tiempo requerido para la excitación de la onda acústica, de forma que la transferencia de potencia debida al *scattering* de *Brillouin* es despreciable. Por tanto, únicamente en los puntos correspondientes a los picos de correlación, la onda acústica es formada apropiadamente, transfiriendo energía entre las ondas pulsada y continua. El escaneo del espectro de *Brillouin* es llevado a cabo mediante un barrido a lo largo de la diferencia de frecuencia de ambas señales.

A diferencia de la técnica BOCDA, en el caso de BOFDA la resolución espacial está limitada por tiempo de vida del fonón acústico y, por tanto, por el ancho de línea del BGS. Además, si se requieren grandes distancias con alta resolución, el número de frecuencias necesarias para obtener la función de transferencia es grande, lo que incrementa el tiempo de medida. En conclusión, el rendimiento global de estos sensores es inferior al conseguido con otros basados en el fenómeno de *scattering* de *Brillouin*.

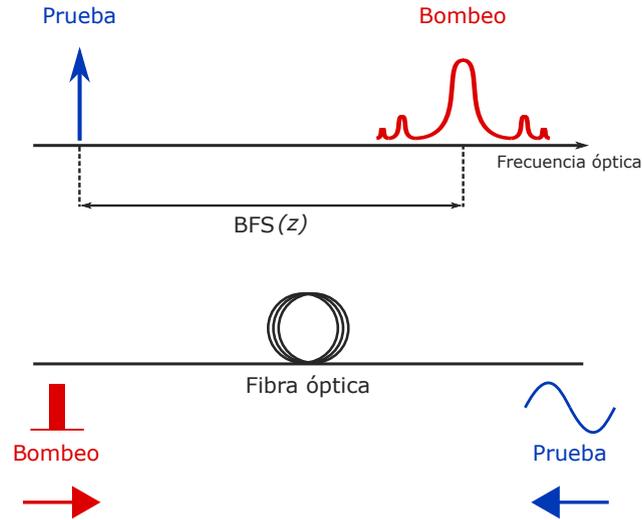
## 2.5. BOTDA en detalle

En el año 1990 se demostró por primera vez que los sensores BOTDA eran capaces de monitorizar tanto *strain* [21] como temperatura [22]. Desde entonces, esta técnica ha sido la más utilizada dentro del conjunto de sensores distribuidos basados en el *scattering* de *Brillouin*, con aplicaciones en numerosos campos. En la *Figura 2.5* se muestran los principios de operación de esta técnica [23].

El principio de operación de esta técnica está basado en la interacción entre dos señales que se propagan en sentidos opuestos: una señal pulsada que actúa como bombeo y una señal continua o prueba<sup>1</sup>, cuya diferencia de frecuencia se sitúa en torno al BFS característico de la fibra. De esta forma, la energía cedida por el bombeo fruto del proceso de *scattering* consigue que los fotones se añadan constructivamente a la señal de prueba, para lo cual señal esparcida y señal continua deben tener la misma frecuencia. Durante la propagación de la señal pulsada, una onda acústica se genera localmente, cuyas características dependen de la sección de fibra en la cual ambas señales se encuentran. Esta onda acústica es la encargada de acoplar energía entre ambas

---

<sup>1</sup>A partir de este punto se emplearán indistintamente los términos pulso/bombeo y señal continua/prueba, pues son sinónimos.



**Figura 2.5.** Principio de operación BOTDA: la señal pulsada y la prueba se propagan en sentidos opuestos a lo largo de la fibra óptica, con una diferencia de frecuencia en torno a la BFS de la fibra

señales. Dependiendo de la frecuencia relativa entre las señales de bombeo y prueba, esta última sufre amplificación o depleción en cada localización de la fibra. La información con dependencia temporal recuperada a partir de la detección de la señal de prueba sirve como referencia para medir la ganancia/pérdida de *Brillouin* para una frecuencia dada. Esta evolución temporal de la prueba puede ser directamente traducida a información dependiente con la posición a través de la siguiente relación:

$$z = \frac{c}{2n} t , \quad (2.6)$$

donde  $t$  es el tiempo que transcurre entre que la señal de bombeo entra en la fibra y el punto  $z$  esta señal se encuentra con la prueba.

La idea básica de utilizar este fenómeno está basada en la relación de dependencia lineal, demostrada experimentalmente, que existe entre las variaciones de BFS y los parámetros de *strain* y temperatura en un rango amplio de frecuencias, tal y como muestra la siguiente ecuación [24]:

$$v_B(T, \delta\epsilon) - v_{B0} = A \cdot \delta\epsilon + B \cdot (T - T_0) , \quad (2.7)$$

donde  $v_{B0}$  es el BFS de la fibra empleada medido a temperatura ambiente ( $T_0 = 25^\circ \text{C}$ ), y A y B son parámetros constantes.

Esta relación de linealidad convierte al BFS en el parámetro más adecuado en la estimación de *strain* y temperatura. Sin embargo, al mismo tiempo, complica el proceso de distinción cuando ambos fenómenos tienen lugar de forma simultánea, puesto que determinar en qué cantidad contribuyó cada uno es una tarea complicada. Como ya se ha mencionado, el objetivo principal de este trabajo será poder distinguir entre ambos casos cuando se den de forma simultánea en el interior de la fibra.

Asimismo, puede demostrarse que la luz que sufre este fenómeno presenta un determinado espectro de ganancia, debido fundamentalmente a la gran atenuación sufrida por la onda acústica en su propagación durante el proceso de *scattering*, denominado *Brillouin Gain Spectrum* (BGS), el

cual sigue una curva que, idealmente *Lorentziana*, se puede modelar de la siguiente forma [25]:

$$g_B(\nu) = g_0 \cdot \frac{(\Delta\nu_{\frac{B}{2}})^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_{\frac{B}{2}})^2}, \quad (2.8)$$

donde  $\Delta\nu_B$  es la anchura a altura mitad o *Full Width Half Maximum* (FWHM), la cual toma, en condiciones normales, un valor de unos 30 MHz; y  $g_0$  es el coeficiente de ganancia de *Brillouin*: el pico de BGS se produce cuando existe un desplazamiento en frecuencia igual a  $\nu_B$ :

$$g_0 = g_B(\nu_B) = \frac{2 \cdot \pi \cdot n^7 \cdot p_{12}^2}{c \cdot \lambda_p^2 \cdot \rho_0 \cdot V_a \cdot \Delta\nu_B}, \quad (2.9)$$

donde  $p_{12}^2$  es el coeficiente longitudinal elasto-óptico,  $p_0$  es la densidad,  $\lambda_p$  es la longitud de onda del pulso y  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío.

En la siguiente gráfica se puede observar el aspecto típico de un espectro de ganancia de *Brillouin* [7]:

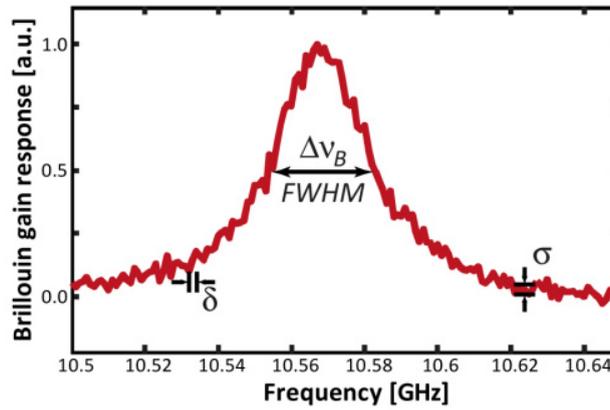


Figura 2.6. Respuesta típica de *Brillouin* normalizada

El principal objetivo de este tipo de sensores es recuperar este espectro de ganancia a lo largo de la fibra, con la máxima precisión posible, dado que a partir del mismo se puede estimar el BFS mediante diversos procedimientos: ajuste cuadrático, ajuste *Lorentziano*, o, incluso, alguna técnica de inteligencia artificial [26]. La estimación de dicho valor es determinante para la consecuente extracción de los valores de interés: *strain* y temperatura, según la relación descrita en la *Ecuación* 2.7.

Adicionalmente, algunos artículos científicos como [27] han establecido la dependencia entre la desviación de frecuencia respecto al BFS ( $\sigma_{BFS}$ ) con un conjunto de parámetros, para ajustes parabólicos, concluyendo que la precisión del sensor depende básicamente de la relación señal-a-ruido del mismo, el ancho de línea de *Brillouin* y los datos utilizados en el ajuste parabólico, tal y como muestra la siguiente ecuación:

$$\sigma_{BFS}(z) = \sqrt{\frac{1}{SNR(z)} \frac{3\delta\Delta\nu_B}{8\sqrt{2}(1-\zeta)^{\frac{3}{2}}}}, \quad (2.10)$$

donde  $\delta$  es el paso de frecuencia,  $\zeta$  es el cociente entre el valor de pico y aquel escogido para el ajuste.

De la *Ecuación 2.10* pueden extraerse los parámetros de los que depende esta desviación de frecuencia. Así, cuanto más alta sea la SNR, menor error en la estimación de frecuencia se tendrá, lo cual se traduce directamente en una predicción más ajustada de los valores de *strain* y temperatura. Algunas medidas que se pueden tomar para la disminución de esta desviación se enumeran a continuación:

- ▶ **Incrementar la potencia de la prueba** → limitado por la aparición de efectos no lineales y por la intensa amplificación del *scattering* estimulado de *Brillouin*.
- ▶ **Incrementar la potencia del pulso** → limitado por la depleción introducida por inestabilidad de modulación o el *scattering* de *Raman*.
- ▶ **Incrementar el número de puntos** escaneados dentro del ancho de banda de *Brillouin* → limitado por el tiempo de medida.

Estas limitaciones y algunas más ligadas a la configuración BOTDA serán descritas en el siguiente subapartado.

## 2.6. Limitaciones de la configuración BOTDA

En [23] y [7] se describen algunos de los aspectos que limitan en mayor medida el rendimiento de los sistemas BOTDA. A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de ellos, con soluciones planteadas en algunos casos:

### (1) Coherencia del LASER

Para una interacción eficiente, el ancho de línea del láser debe ser mucho menor que 30 MHz, el valor en condiciones normales de la anchura del BGS.

### (2) Desvanecimiento por polarización

La interacción que ocurre durante el proceso de *scattering* depende del grado de paralelismo entre los estados de polarización o *State of Polarization* (SOP) del bombeo y la prueba, grado que no es mantenido por las fibras monomodo estándar, usualmente empleadas. Este cambio del estado de polarización provoca que las ganancias a lo largo de la fibra no sean uniformes, con lo que casi siempre existen segmentos de fibra con ganancia de *Brillouin* mínima y, consecuentemente, SNR pobre. Este efecto de desvanecimiento puede evitarse con el empleo de un aleatorizador de polarización que uniformice las ganancias a lo largo de la fibra óptica.

### (3) Depleción del pulso y efectos no locales relacionados

La depleción del pulso tiene lugar cuando se produce un intercambio de energía brusco entre la señal de prueba y la pulsada, de forma que la primera agota la mayor parte de la energía del pulso. Este fenómeno desemboca en una SNR excesivamente pobre, que puede dar lugar a errores en la determinación del BFS a partir de la ganancia en el espectro de *Brillouin* detectado.

### (4) Ratio de extinción (RE) del pulso

Para un correcto funcionamiento del sistema BOTDA se requiere que la interacción entre el pulso y la prueba tenga lugar estrictamente durante la duración del pulso. Esto implica un

ratio de extinción infinito para la señal pulsada, una condición ideal que no puede alcanzarse en la práctica. Por tanto, la relación de extinción es otro aspecto limitante más a tener en cuenta. Dado que los moduladores comerciales suelen tener RE limitadas a unos 30dB, se suelen emplear SOAs (*Semiconductor Optical Amplifier*) con REs de hasta 50dB.

#### (5) Resolución espacial y ancho de pulso

La resolución espacial define el número de puntos de medida y es dependiente del valor de anchura de pulso empleado. Así, cuanto mayor es la anchura de pulso, menor resolución espacial se tendrá (menor número de puntos), a expensas de disponer de una relación SNR mayor. Por otro lado, valores de anchura de pulso menores implicarán una mayor resolución (mayor número de puntos) pero con una relación SNR peor. Algunas técnicas empleadas para tratar de sacar la relación óptima entre resolución, ancho de pulso y relación SNR se enumeran a continuación [7]:

- Differential Pulse-width Pair BOTDA (DPP-BOTDA)
- Pump pre-pulse BOTDA (PPP-BOTDA)
- Gain-Profile Tracing BOTDA (GPT-BOTDA)

#### (6) Rango de medida

Las configuraciones BOTDA típicas proveen distancias de medida de decenas de kilómetros. El problema que surge a medida que es aumentado el rango de medida, es que las potencias en el extremo de la fibra resultan cada vez menores, lo que se traduce en peores relaciones SNR, y consecuentemente peor rendimiento.

Algunas de las técnicas que han sido empleadas en favor del aumento del rango son, entre otras, las que se enumeran a continuación [7].

- Amplificación discreta
- Codificación de pulso
- Sistemas asistidos por *Raman*

#### (7) Limitación de potencia de bombeo y prueba

- La **potencia** de la señal de **bombeo** está limitada por la inestabilidad de modulación (*Modulation Instability - MI*), un efecto que provoca la depleción del pulso a lo largo de su propagación por la fibra reduciendo el rango de medida del sensor.
- La **potencia** de la señal de **prueba** está limitada por los denominados efectos no locales (*Non-Local Effects - NLE*). Este efecto introduce un error en la estimación de la temperatura o el *strain* determinado por el sensor.

#### (8) Atenuación de pulso y prueba

Cuanto mayor sea la atenuación sufrida por el pulso y la prueba, menor amplitud de señal se tendrá en detección, con lo que menor será la relación SNR. Además, el efecto de la atenuación resulta ser doble, pues ambas señales se propagan en sentidos opuestos a lo largo de la fibra.

# CAPÍTULO 3

## Estado del arte de la Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial o *Artificial Intelligence* es un campo de la ciencia computacional que, a pesar de haber tomado mucho protagonismo en los últimos tiempos, ya es objeto de estudio desde hace muchos años; si bien, esta no era entendida de la misma forma. La misma mitología griega ya contiene historias sobre un gigante diseñado para tratar de imitar el comportamiento del ser humano.

A partir de los primeros ordenadores, entendidos como máquinas lógicas, se trató de imitar las capacidades del cerebro humano, tanto de reproducción, como de aritmética y memoria. Sin embargo, a medida que la tecnología fue evolucionando, y, más importante aún, nuestro entendimiento de cómo realmente funciona el cerebro avanzó, el concepto de Inteligencia Artificial cambió radicalmente. A partir de entonces, la IA ha pasado a centrarse en replicar los procesos de toma de decisiones de los seres humanos, y, de una forma más general, llevar a cabo cualquier tarea de una forma *más humana*.

La capacidad de cómputo existente en la actualidad permite llevar a cabo tareas largas y complicadas que el cerebro humano nunca sería capaz de resolver. Por otro lado, nuestro cerebro es una herramienta muy precisa en cuanto al reconocimiento de patrones se refiere, ya sea en imágenes o sonidos. Tal es así, que el objetivo principal de la IA es, a partir de la gran capacidad de cómputo que brindan los computadores actuales, tratar de replicar de la manera más fiel el comportamiento del cerebro humano en lo que se refiere a su forma de resolver ciertos problemas, empleando como herramienta fundamental el aprendizaje.

Así, dentro de la inteligencia artificial se encuentra una rama denominada aprendizaje automático o *Machine Learning*, cuyo objetivo es desarrollar técnicas que permitan a las máquinas aprender. A su vez, el aprendizaje automático consta de las siguientes dos vertientes, claramente diferenciadas:

- **Aprendizaje supervisado:** trata de inferir una **función** que **relacione** los datos etiquetados de **entrada** con las **salidas**. Es decir, se conoce la salida producida para cada entrada del conjunto y se trata de encontrar la relación entre ambas.

- ▶ **Aprendizaje no supervisado:** trata de inferir una **función** que **encuentre** una cierta estructura o **patrón** dentro de los datos de **entrada no etiquetados**. Esto es, no se conoce cuál es la salida que produce una determinada entrada y eso precisamente es lo que trata de resolverse.

Asimismo, se distinguen las siguientes categorías de algoritmos: clasificación, regresión o *clustering*, detalladas a continuación:

- ▶ **Clasificación:** trata de identificar a **qué conjunto pertenece una nueva observación** una vez ha sido realizado el proceso de entrenamiento mediante el algoritmo correspondiente. Un ejemplo podría ser la asignación de un correo electrónico a *spam* o no *spam*; o, asignar maligno o benigno a una observación de un tumor.
- ▶ **Regresión:** trata de realizar una **estimación continua dado un conjunto discreto de datos** sobre la cual se basarán las posteriores predicciones para nuevas observaciones. Un ejemplo de este caso lo constituye la estimación del precio de una vivienda, dado un conjunto discreto de viviendas de las cuales se conoce su valor.
- ▶ **Clustering:** trata de **agrupar datos de un mismo conjunto que poseen la misma estructura o patrón**. Mientras que los dos anteriores pertenecen a la rama de aprendizaje supervisado, este pertenece al aprendizaje no supervisado; pues los datos que utiliza como entrada no llevan asociada la etiqueta o salida. Un ejemplo de este caso podría ser el descubrimiento de estructuras genéticas en el ámbito de la medicina.

La herramienta de *software* matemático MATLAB, ampliamente empleada a lo largo de este trabajo, ofrece una gran variedad de algoritmos para cada una de estas categorías. La *Figura 3.1* enumera de forma esquemática algunos de ellos. Tal y como puede apreciarse en la figura, dentro de los algoritmos ligados al aprendizaje supervisado, MATLAB también incluye algoritmos asociados a problemas de regresión, pero éstos no son de interés en el contexto de este trabajo, por tratarse, en este caso, de un problema de clasificación.

Además de las técnicas enumeradas en la figura, pertenecientes a la disciplina de aprendizaje automático, también existen técnicas de aprendizaje profundo o *Deep Learning* (DL), las cuales utilizan un concepto diferente para la resolución de los problemas, basado en el procesado de imágenes. El aprendizaje profundo es una técnica muy utilizada en la actualidad, empleada en multitud de tareas como el reconocimiento de imágenes o voz.

De esta forma, en los siguientes apartados se realizará una descripción detallada del problema, y se procederá a describir detalladamente el procesado de datos que será llevado a cabo en este trabajo.

### 3.1. Descripción del problema y posibles soluciones

Como ya se indicó en la *Sección 2.5*, a partir del empleo de la técnica BOTDA se obtiene el espectro de ganancia de *Brillouin* o BGS mediante el escaneo de frecuencias a lo largo del ancho de banda de ganancia. Sin embargo, es el valor del BFS aquel necesario para obtener el valor de los parámetros de temperatura y *strain* (a recordar: existe una dependencia lineal entre el BFS y estos parámetros - *Ecuación 2.7*). La obtención precisa de dicho valor, a partir del BGS, no es una tarea trivial, y existen diversos mecanismos que estiman con mayor o menor precisión este valor [26]. Sin embargo, este problema de estimación del desplazamiento en frecuencia de *Brillouin* no es el

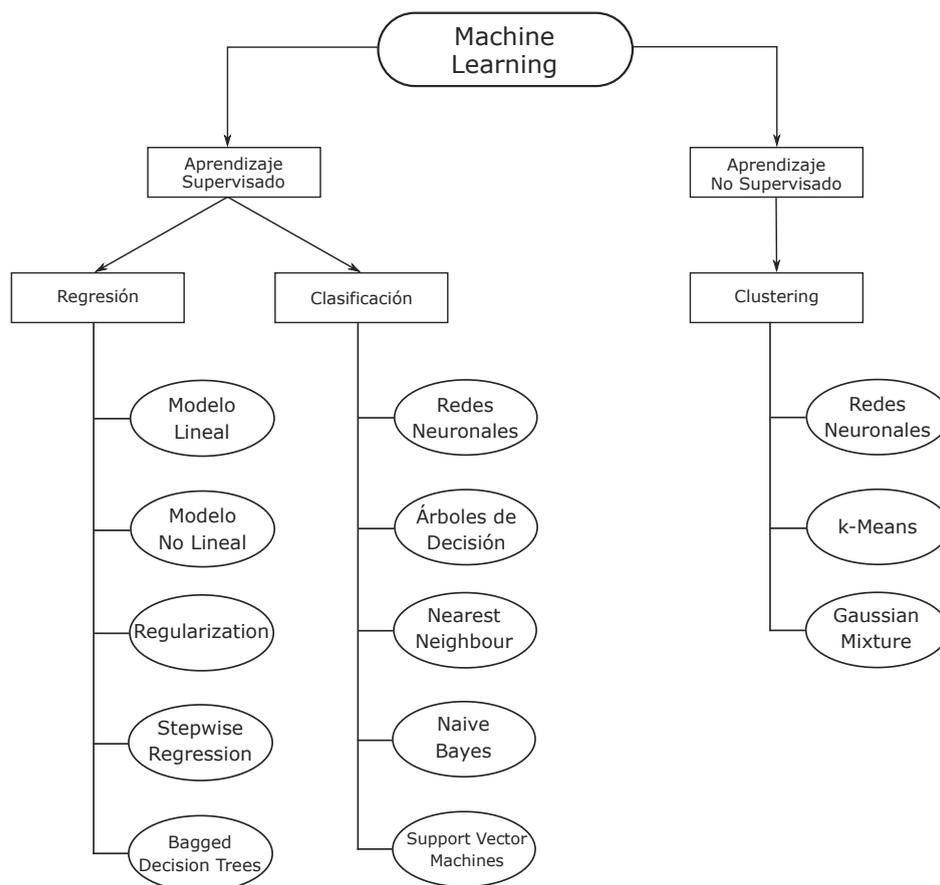


Figura 3.1. Clasificación de las técnicas de aprendizaje automático y algunos algoritmos

que ocupa la atención principal de este trabajo, si bien este también será abordado en la parte experimental.

De forma general, tanto *strain* como temperatura tienen un impacto diferente sobre el medio dieléctrico y, por tanto, también sobre el comportamiento del proceso de *scattering*. Sin embargo, cuando ambos fenómenos se producen al mismo tiempo y en la misma posición, el resultado global es un desplazamiento de frecuencia que podría haber sido fruto de múltiples combinaciones de temperatura y *strain*.

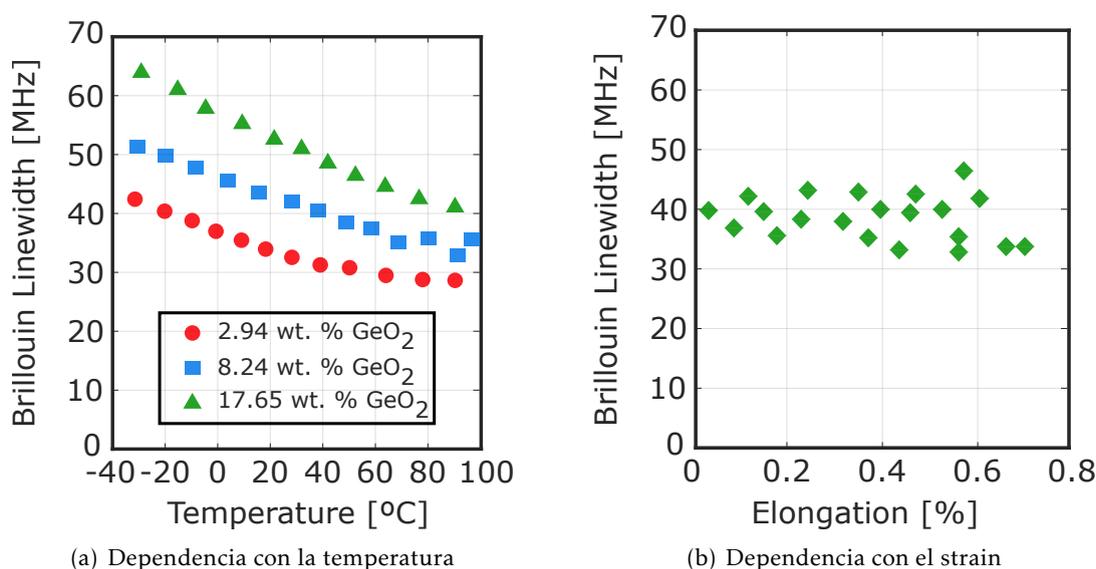
Existen soluciones de naturaleza muy diversa para resolver este problema. La más simple podría consistir en utilizar dos sistemas de monitorización independientes basados en el método BOTDA, donde en el primero la fibra es amarrada a la estructura, mientras que en el segundo la fibra simplemente es posada sobre la estructura; de esta forma, el primer sistema es capaz de medir tanto *strain* como temperatura, mientras que el segundo únicamente temperatura. Así, correlando las medidas obtenidas mediante ambos sistemas es posible discriminar el efecto producido por cada uno de los parámetros.

Otro método muy similar consiste en realizar medidas de forma independiente a partir de los fenómenos de *scattering* de Brillouin y Rayleigh [28]. A través de ambas configuraciones se consiguen dos medidas independientes de temperatura y *strain* que permiten resolver un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas. Además, otro posible método consiste en emplear de nuevo dos sistemas independientes. Esta vez, uno de ellos estará basado en el fenómeno de *scattering* de Raman, con el cual es posible obtener valores de temperatura; mientras que el restante estará

basado en el *scattering* de *Brillouin*, obteniendo valores de *strain* y temperatura simultáneamente.

Sin embargo, en este trabajo se emplearán técnicas de inteligencia artificial que permitirán realizar dicha discriminación con único sistema BOTDA convencional. Para lograrlo, se dispone, a modo de segunda ecuación que permita resolver el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas (temperatura y *strain*), de una hipótesis de partida, demostrada por *Nikles et al.* en [25]. En este artículo científico, es demostrado experimentalmente que los espectros de *Brillouin* asociados a cambios en la temperatura y el *strain* presentan un comportamiento diferente. Por un lado, la anchura de dichos espectros de ganancia, obtenidas como el valor del ancho frecuencial a altura mitad (FWHM), disminuye o permanece constante conforme se produce un aumento de temperatura o *strain*, respectivamente. Por otro lado, la ganancia en intensidad presenta un comportamiento creciente con el aumento de la temperatura, y decreciente con el aumento de *strain*.

De forma gráfica, en la *Figura 3.2(a)* se muestra esta tendencia del ancho de línea del espectro de ganancia en el caso de variaciones experimentadas en temperatura, mientras que la *Figura 3.2(b)* muestra este efecto cuando la variación se produce en el valor de *strain* [25].



**Figura 3.2.** Dependencia del ancho de línea del BGS con temperatura y strain

Así, en la *Figura 3.3* también se muestran los resultados ligados a la intensidad, también recogidos en [25]; tanto en el caso de temperatura (*Figura 3.3(a)*), como en el de *strain* (*Figura 3.3(b)*).

Esta particularidad claramente distintiva representada de forma gráfica en la *Figura 3.2* será la que, junto con la relación de linealidad existente con el BFS (*Figura 1.2*), sirvan como ecuaciones independientes que permitan discriminar entre ambos parámetros. Respecto a la dependencia con la intensidad reflejada en la *Figura 3.3*, esta no será de utilidad práctica como se demuestra en el *Capítulo 5*.

Además, al disponer de un sistema BOTDA convencional a partir del cual puede obtenerse el espectro de ganancia de *Brillouin* correspondiente a medidas discretas, y determinarse; solamente será posible discriminar clasificando las medidas en un conjunto discreto de clases de salida. Esto es, se definirán como salidas un conjunto discreto de espectros, y las medidas que sirvan como entrada pertenecerán a una de estas clases definidas. Por esta razón, de los tres tipos de problemas descritos en la sección anterior (clasificación, regresión y *clustering*), este problema pertenece a la primera de todas, es decir, clasificación. La *Figura 3.4* trata de aclarar este procedimiento.

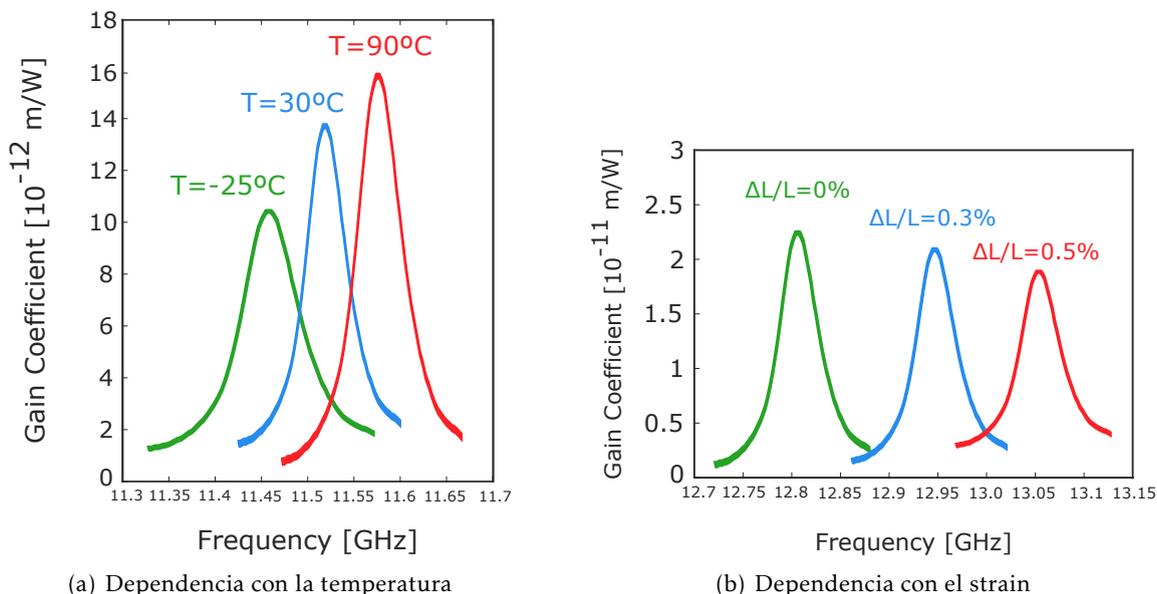


Figura 3.3. Dependencia de la intensidad con temperatura y strain

Finalmente, como adelanto al capítulo relativo a la parte experimental, es relevante señalar que este trabajo se ubica a continuación del ya realizado en [29]. En este, se llevó a cabo un procesamiento de datos obtenidos a partir de una configuración BOTDA prácticamente idéntica a la mostrada en la Figura 4.1, con el mismo objetivo final de conseguir una discriminación precisa entre los parámetros de *strain* y temperatura a través de la implementación de una red neuronal artificial (ANN, *Artificial Neural Network*). Concretamente, la red neuronal escogida fue del tipo *feedforward*, empleando como algoritmo de entrenamiento el *Levenberg–Marquardt*, un algoritmo de propagación hacia atrás o *backpropagation* usualmente utilizado en la NNToolbox.

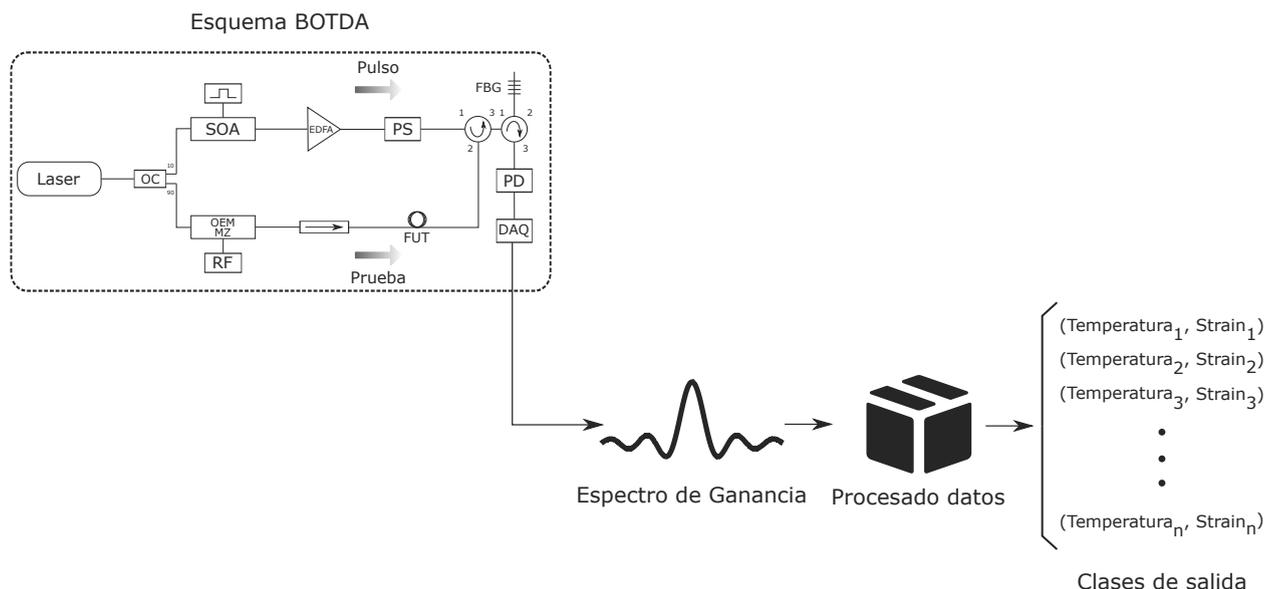
A partir de dicha *toolbox* de MATLAB, se llevó a cabo un estudio de rendimiento de las diferentes alternativas; esto es, un mayor porcentaje de clasificación se traduce en un mejor rendimiento, para el cual se utilizaron tres configuraciones diferentes de ANNs con un número diferente de neuronas, capas ocultas y porcentajes de entrenamiento. Para ello, se tomaron tres subconjuntos del conjunto de datos obtenidos: subconjunto de entrenamiento, validación y *test*. Los mejores porcentajes de clasificación fueron obtenidos para redes con una capa oculta formada por 11 neuronas, con porcentajes de cada subconjunto de 70, 10 y 20%, para entrenamiento, validación y *test*, respectivamente.

Por tanto, este trabajo se sitúa en la línea sucesoria de [29], con el objetivo de conseguir porcentajes de clasificación más altos mediante dos mecanismos bien diferenciados: (1) re-obtención de datos a nivel de implementación física y (2) empleo de diferentes estrategia en el procesamiento de datos.

A continuación, se procede a describir el procesamiento de datos empleado en la parte experimental, desde un punto de vista teórico.

### 3.2. Técnicas de procesamiento de datos

Tras varios años de investigación y desarrollo en el campo de la inteligencia artificial, y concretamente en la disciplina de aprendizaje automático, numerosas herramientas han sido desarro-



**Figura 3.4.** Proceso de discriminación entre *strain* y temperatura

lladas para facilitar la tarea de resolver problemas en este ámbito, proporcionando soluciones a partir del uso de estas como una especie de caja negra que permite su reutilización en la resolución problemas de muy diversa naturaleza. De esta forma, el objetivo de este trabajo no consiste en el desarrollo e implementación desde cero de una de estas herramientas. Por ello, para resolver este problema específico de clasificación se utilizarán las herramientas proporcionadas por el *software* comercial MATLAB.

La forma en la que este problema va a ser abordado, es la que usualmente suele utilizarse cuando se pretende resolver problemas de esta naturaleza y se describe a continuación:

- (1) **Recopilar datos** → obtención de las medidas de temperatura y *strain* a partir de la implementación BOTDA.
- (2) **Preprocesado de datos** → adaptación de los datos con objeto de simplificar el entrenamiento de la red neuronal y/o conseguir unos mejores resultados.
- (3) **Red neuronal** → creación y configuración, entrenamiento, validación y uso de la red. En este caso, este paso se llevará a cabo mediante el empleo de la herramienta *Pattern Recognition App* de MATLAB.

Así, en los siguientes subapartados se detallarán todos estos puntos, a excepción del primero; pues el proceso de recolección de datos se abordará en el *Capítulo 4*.

### 3.2.1. Preprocesado de los datos

Antes de tratar de encontrar cualquier modelo predictivo que sirva para resolver el problema de clasificación planteado en este trabajo, es necesario realizar un procesamiento inicial, o incluso transformación de los datos obtenidos, con objeto de simplificar el posterior proceso de entrenamiento de la red neuronal y tratar de obtener mejores resultados de clasificación.

Un procedimiento muy típico que suele realizarse previa aplicación de cualquier técnica de aprendizaje es tratar de simplificar el número de variables o predictores que intervienen, seleccionando únicamente aquellos que mayor contribución tienen en la predicción. Esta técnica, conocida como *Feature Selection* es comúnmente empleada por los siguientes cuatro motivos:

- (1) Simplificación del modelo
- (2) Menor tamaño del conjunto de entrenamiento → Menor tiempo de procesado.
- (3) Evitar la maldición de la dimensión<sup>1</sup>, también conocido como efecto *Hughes* o *curse dimensionality*
- (4) Mejorar la generalización reduciendo el sobreajuste u *overfitting*<sup>2</sup>

En este trabajo, el método empleado para llevar a cabo la reducción de las dimensiones del conjunto de datos es el Análisis de Componentes Principales o *Principal Components Analysis*<sup>3</sup> (PCA, por sus siglas en inglés). De forma breve, esta técnica consiste en realizar una transformación ortogonal de un conjunto de observaciones asociadas a variables, para tratar de convertir aquellas que presenten cierta correlación en conjuntos de valores no correlados, denominados componentes principales. El número de componentes principales será como mucho igual al de variables, siendo menor en la mayoría de los casos. Con ello, se consigue eliminar la redundancia que pueda existir en el *dataset* original. Por tanto, mediante esta técnica se realiza, por un lado una transformación de los datos, y por el otro una reducción de los mismos.

### 3.2.2. Redes neuronales

Las Redes Neuronales Artificiales o *Artificial Neural Networks* constituyen una aproximación computacional que trata de resolver un rango muy amplio de problemas. Estas redes están formadas por colecciones de unidades neuronales que tratan de modelar la forma en que el cerebro humano opera en la resolución de cualquier problema. A las conexiones entre las distintas unidades neuronales que conforman la red se los denomina axones, por analogía con el cerebro humano.

En la *Figura 3.5* se muestra la forma de representación más típica de estas redes: una primera capa compuesta por las entradas que alimentan a la red, una o varias capas intermedias “ocultas” y, finalmente, una capa final con la salida o salidas de la red.

En una red neuronal como la de la figura, constituida únicamente por tres capas (entrada, oculta y salida), las neuronas de la capa de entrada envían los datos de entrada a la segunda capa mediante la sinapsis<sup>4</sup>; y ésta, a su vez, envía los datos a la capa de salida de igual forma. Este comportamiento se denomina *feedforward*. La complejidad de la red aumenta a medida que se añaden neuronas, conexiones entre éstas, y capas ocultas, pudiendo generar redes neuronales que sean capaces de realizar funciones extremadamente complejas entre la entrada y la salida.

Las unidades fundamentales, neuronas o perceptrones<sup>5</sup>, actúan de la siguiente forma: reciben

<sup>1</sup>Este efecto aparece al analizar y organizar datos con un gran número de dimensiones (cientos o miles de dimensiones), y debido a él los datos disponibles se vuelven dispersos.

<sup>2</sup>El sobreajuste u *overfitting* es un fenómeno que tiene lugar cuando un modelo es tan complejo que, se ajusta perfectamente a los datos, pero comete mucho error al generalizar.

<sup>3</sup>Existen otras técnicas también empleadas en la reducción de la dimensionalidad de los datos, como el análisis de factores (*Factor Analysis*) o la factorización en matrices no negativas (*Nonnegative Matrix Factorization*).

<sup>4</sup>Es la conexión entre el axón de una neurona y la dendrita de otra cercana mediante neurotransmisores. Permite a las células nerviosas comunicarse con otras, transformando una señal eléctrica en otra química.

<sup>5</sup>En este contexto, perceptrón toma la acepción de unidad básica, y no la de tipo de red neuronal

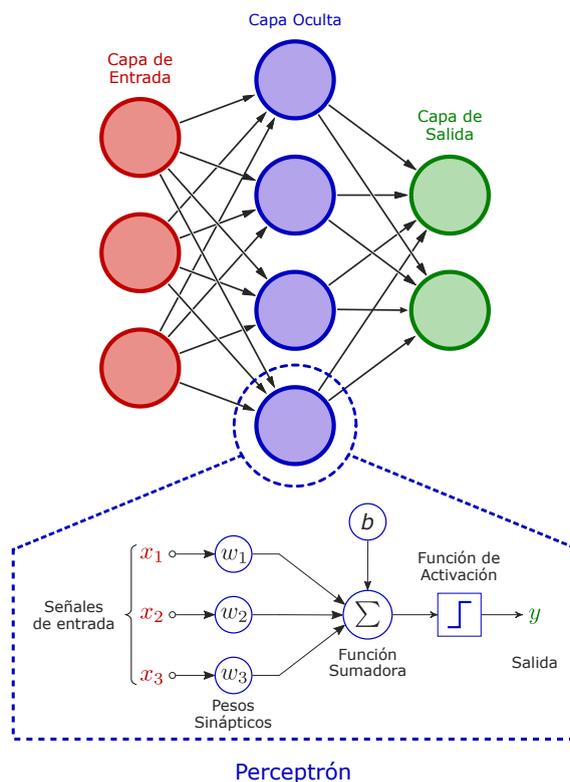


Figura 3.5. Red Neuronal genérica

varias entradas binarias ( $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ , en caso de la Figura 3.5) ponderadas por unos pesos ( $\omega_1$ ,  $\omega_2$  y  $\omega_3$ , respectivamente), los cuales representan la relevancia de esa entrada sobre la salida. De esta forma, el valor de salida es determinado por el valor de la expresión  $\sum_i \omega_i \cdot x_i$ , pudiendo ser este mayor o menor que un determinado umbral. De forma algebraica, se tiene lo siguiente:

$$salida = \begin{cases} \text{si } \sum_i \omega_i \cdot x_i > umbral, & 1 \text{ (activacion)} \\ \text{si } \sum_i \omega_i \cdot x_i \leq umbral, & 0 \text{ (no activacion)} \end{cases} \quad (3.1)$$

Esto es, precisamente, lo que se conoce como la función de activación, la cual activa (valor 1) o no (valor 0) la salida en función del resultado de la ponderación de los valores de entrada por los distintos pesos obtenidos tras el proceso de entrenamiento. En este caso, la función de activación empleada se denomina función sigmoide o *sigmoid function*, cuyo logaritmo presenta un aspecto como el que se muestra en la Figura 3.6. La salida, en cada caso, es obtenida como la suma ponderada de los valores de la entradas, como muestra la siguiente ecuación:

$$y = f(\omega_k \cdot x_k + b), \quad (3.2)$$

siendo  $f$  la función de activación, en este caso, el logaritmo de la función sigmoide.

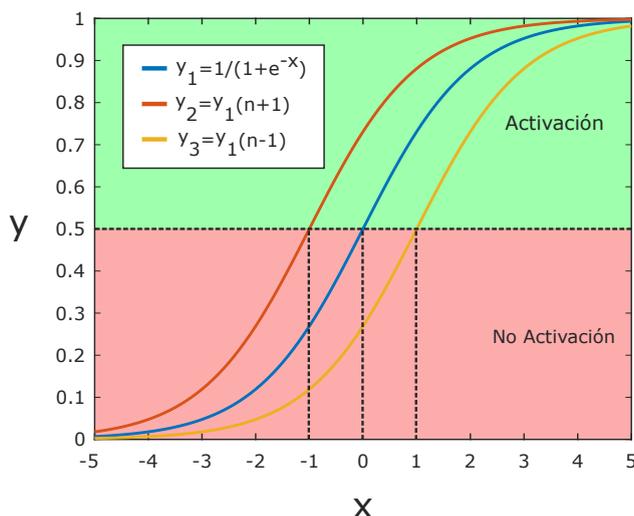


Figura 3.6. Función de activación logaritmo sigmoide (*logsig*)

Asimismo, típicamente se añade una neurona denominada *bias* ( $b$ ) por cada capa de la red neuronal, la cual permite desplazar el umbral de decisión, obteniendo, por tanto, funciones de activación desplazadas, como muestra la *Figura 3.6*. Esta neurona suele presentar un valor de 1, y su peso correspondiente se define como  $\omega_0$ . Su inclusión en la red neuronal aporta un grado de libertad adicional que puede ser de mucha utilidad en numerosos casos.

La forma en la que estas redes neuronales trabajan es generando una determinada salida (activación de la neurona de la capa de salida) para una determinada entrada. Para ello, existe un procedimiento previo de entrenamiento en el cual se calcularán los pesos sinápticos mediante el empleo de un determinado algoritmo de entrenamiento para, posteriormente, tratar de generalizar lo mejor posible cuando la red reciba nuevas entradas no incluidas dentro de aquellas que fueron empleadas durante la fase de entrenamiento.

La creación de cualquier red neuronal comienza por la inicialización de los pesos, los cuales toman un valor inicial definido de forma aleatoria. Generalmente, se evita inicializar estos valores a 0, debido a que esto implicaría que todas las capas ocultas de la red ejecutan la misma función; en su lugar, estos pesos se inicializan de forma aleatoria, siguiendo una distribución normal de media 0 y varianza 1.

Una vez inicializados, estos pesos son actualizados en cada iteración mediante el empleo de un algoritmo de entrenamiento. Para ello, se toman como datos de entrada un subconjunto del conjunto total de datos, típicamente del 70%, denominado conjunto de entrenamiento o *training set*. El 30% restante se reparte equitativamente entre el conjunto de validación o *validation set* y el conjunto de prueba o *test set*. Además, cabe señalar que la pertenencia de una determinada medida a uno de estos tres conjuntos se a partir de una división aleatoria del conjunto inicial.

Asimismo, puesto que se trata de un problema de aprendizaje supervisado, es necesario etiquetar los datos de salida previa aplicación de la fase de entrenamiento. Esto implica asignar una de las clases disponibles de salida a cada entrada del subconjunto de entrenamiento, de forma que los pesos se vayan actualizando en función del camino seguido desde una entrada hasta la salida que se activa.

Por su parte, diversas son las opciones ofrecidas por MATLAB en cuanto a lo que algoritmos de entrenamiento se refiere. A continuación, se enumeran y detallan algunos de los más relevantes:

- ▶ **Levenberg-Marquardt** → emplea la optimización de *Levenberg-Marquardt* para el cómputo de los pesos. Suele converger más rápido que el algoritmo de *backpropagation* y típicamente es la primera opción a utilizar, pese a que requiere más memoria que otros algoritmos [30].
- ▶ **BFGS Quasi-Newton** → emplea el método *Quasi-Newton* o de las secantes (pues únicamente considera las derivadas primeras) con actualización de pesos basada en *Broyden, Fletcher, Goldfarb, and Shanno* (BFGS). Es una alternativa a los métodos de gradiente conjugado, su convergencia suele ser muy rápida y su carga computacional se reduce con respecto al método de *Newton*, pues evita el cálculo de segundas derivadas [31].
- ▶ **Resilient Backpropagation** → este algoritmo elimina las limitaciones introducidas por la función de activación sigmoide cuando el dato a la entrada tiene un valor tan elevado que la pendiente del valor de salida es prácticamente nula, con lo que si se utiliza descenso por gradiente el tiempo empleado en converger es excesivamente alto. De esta forma, el algoritmo de *Resilient Backpropagation* no tiene en cuenta el valor de esta pendiente, si no su signo, para proceder con la actualización de los pesos [32].
- ▶ **Scaled Conjugate Gradient** → este algoritmo ha demostrado experimentalmente converger mucho más rápido que los descritos anteriormente. Además, independiza al usuario de la determinación del valor de ciertos parámetros que puedan afectar significativamente en el resultado final, haciéndolo totalmente de forma automática [33].

En el caso particular de este trabajo, se ha optado por emplear el último de los métodos descritos recientemente, este es, el de *Scaled Conjugate Gradient*, con propagación hacia atrás o *backpropagation*. Este algoritmo es empleado ampliamente en la optimización<sup>1</sup> de problemas de muy diversa naturaleza, presentando una velocidad de convergencia bastante alta con respecto a otros métodos debido, entre otras cosas, a que elimina la búsqueda lineal inicial para determinar el paso con el que el algoritmo itera en la dirección correspondiente. En su lugar, el paso y la dirección es obtenido mediante información de segundo orden, a partir de la cual se obtiene un sistema que es resuelto de forma numérica por el método de los gradientes conjugados. Más información acerca de este algoritmo queda recogida en el *Anexo I*.

A partir del momento en que se finaliza con la fase de entrenamiento, ya se dispone de la red neuronal, a la cual se introducirá el subconjunto de las medidas dedicado a la validación para determinar cuál es el rendimiento de la red. Finalmente, se procede a determinar la precisión que presenta la red a la hora de clasificar cuando esta recibe nuevas entradas, pertenecientes, en este caso, al último subconjunto de medidas: el de *test*.

---

<sup>1</sup>El particular caso del entrenamiento de una red neuronal puede entenderse como un problema de optimización, en el cual se trata de minimizar la función error global de la red. Es decir, se trata de encontrar aquellos parámetros (pesos), que hacen que la red neuronal sea capaz de clasificar con el mínimo error posible.

# CAPÍTULO 4

## Configuración experimental

Una vez realizada la descripción teórica detallada de todos los conceptos fundamentales que intervienen en este trabajo, tanto desde el punto de vista fotónico (*Capítulo 2*), como desde un punto de vista de la inteligencia artificial (*Capítulo 3*); es posible comenzar con la parte relativa al apartado experimental. Cabe señalar que, pese a que el objetivo final del trabajo es claro, el proceso de realización de medidas también servirá para analizar y demostrar determinadas hipótesis o conclusiones realizadas previamente y reflejadas en publicaciones científicas acerca de como ambos parámetros (*strain* y temperatura) afectan al fenómeno de *scattering* de *Brillouin*.

De esta forma, en las posteriores secciones de este capítulo se recoge todo el desarrollo experimental seguido, de forma cronológica, en la obtención de los datos a partir de la configuración BOTDA implementada.

### 4.1. Configuración BOTDA

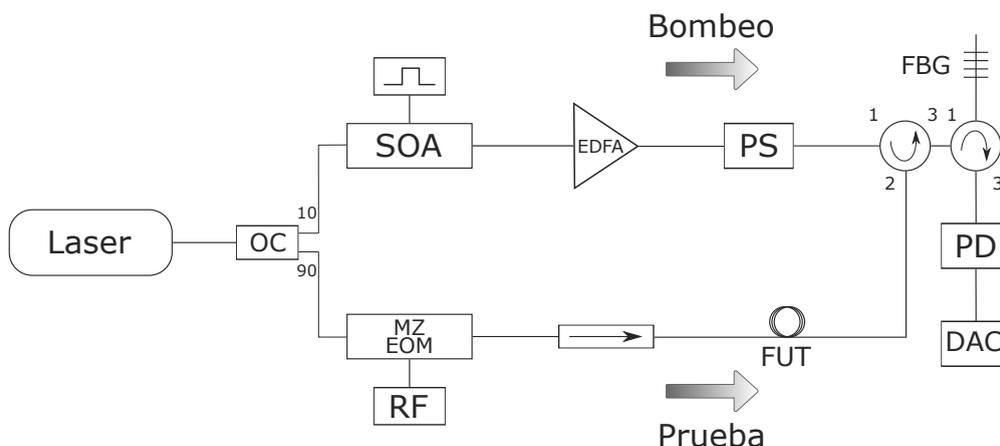
Esta primera sección del capítulo está destinada a la descripción de la configuración empleada para la obtención de las medidas. En este caso, se trata de una configuración BOTDA ya implementada en el laboratorio.

En la *Sección 2.5* se realizó una descripción teórica de los fundamentos físicos existentes detrás de un sistema BOTDA, a partir de dos ondas (bombeo y prueba) que se encuentran en la fibra tras propagarse en sentidos opuestos. Además, merece la pena recordar que era el parámetro de desplazamiento de frecuencia de *Brillouin* o BFS aquel que proveía información acerca de los cambios de *strain* y temperatura sufridos por la fibra en cuestión. A partir de esto, la configuración BOTDA implementada en el laboratorio que permite trasladar todo el desarrollo teórico al terreno práctico, con el fin de llevar a cabo la obtención de los datos de interés (*strain* y temperatura), se muestra en la *Figura 4.1*.

Como ya se ha mencionado previamente en varias ocasiones, en la configuración BOTDA, dos señales: pulsada (o bombeo) y continua (o prueba), interactúan a través del fenómeno de *scattering* estimulado de *Brillouin*. Para ello, la luz procedente de un láser<sup>1</sup> (en este caso,  $\lambda = 1550,63$  nm) es separada en dos ramas (superior correspondiente al bombeo e inferior a la prueba,

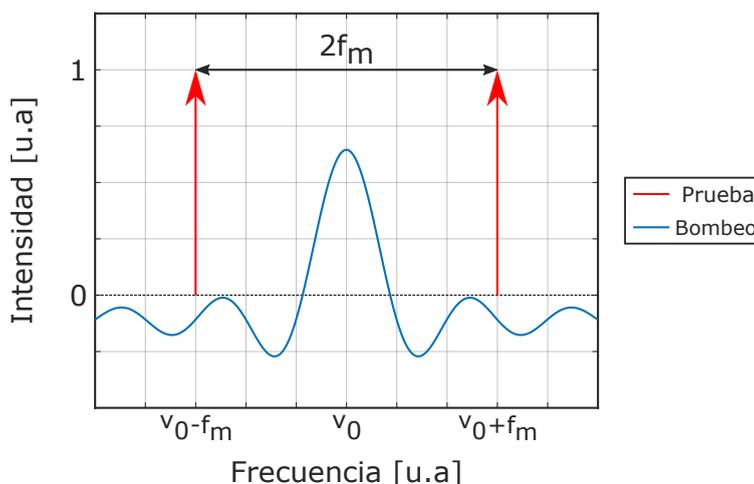
---

<sup>1</sup>Solo se emplea una fuente de luz láser para evitar efectos como la deriva de frecuencia, la cual influye de forma negativa en la resolución final de la medida



**Figura 4.1.** Esquemático sistema BOTDA experimental: Optical Coupler (OC), Semiconductor Optical Amplifier (SOA), Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA), Polarization Scrambler (PS), Mach-Zender Electro-Optical Modulator (MZ-EOM), Generador RF (RF), Fiber Under Test (FUT), Fiber Bragg Grating (FBG), Photodiode (PD), Digital Acquisition Card (DAC)

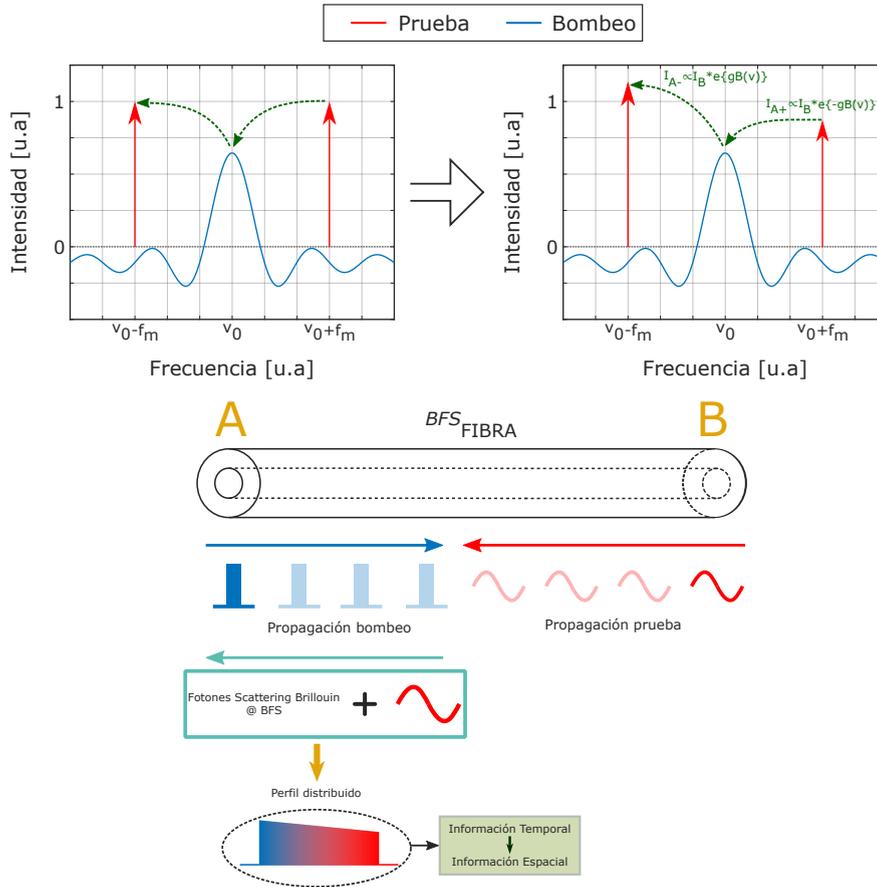
tal y como muestra la figura) a través de un acoplador óptico de relación 90/10, de forma que, el 10% de la potencia de salida del láser es destinada a la señal pulsada, mientras que el 90% restante es destinado a la señal de prueba. Dicha señal de prueba es modulada por un modulador electro-óptico (EOM, *Electro-Optical Modulator*) dando lugar a una señal sinusoidal de frecuencia  $\nu_0 \pm f_m$ , siendo  $\nu_0$  la frecuencia correspondiente al pulso de bombeo. De forma gráfica, en la siguiente figura se muestra el espectro ideal asociado a cada una de las dos ondas, tanto pulsada como continua:



**Figura 4.2.** Representación ideal en frecuencia de bombeo y prueba

De esta forma, mediante un barrido de frecuencia realizado a partir del EOM y la detección de la señal resultante del proceso de dispersión se consigue escanear un ancho de banda determinado en torno a la frecuencia de *Brillouin*, consiguiendo una reconstrucción del espectro de ganancia o BGS. Así, cuando la frecuencia de modulación  $f_m$  cae dentro de la BGS, entonces tiene lugar la interacción entre las ondas, estando la intensidad total gobernada por las ecuaciones estándar de

intensidad promedio [34]. La componente espectral de frecuencia  $\nu_0 - f_m$  es amplificada por el pulso a  $\nu_0$ , el cual sufre un aumento de su intensidad exponencial. Por otro lado, la componente a frecuencia  $\nu_0 + f_m$  amplifica al pulso de frecuencia  $\nu_0$ . Este proceso de transferencia de energía de unas componentes a otras tiene lugar hasta que el pulso termina por agotarse completamente. En la *Figura 4.3* se muestra dicho proceso de forma esquemática. En ella puede apreciarse la interacción entre las dos señales (bombeo y prueba) que se propagan en sentidos opuestos con una diferencia de frecuencia en torno al BFS característico de la fibra ( $BFS_{FIBRA}$ ). Esta interacción da lugar a una señal combinada suma de la señal de prueba más la señal producida por el *scattering*, la cual contiene información temporal distribuida de los parámetros de interés, pues es dependiente tanto del *strain* como de la temperatura. Finalmente, esta información temporal será traducida a información espacial a través de la *Ecuación 2.6*.



**Figura 4.3.** Proceso de intercambio de energía entre las componentes de la prueba y el bombeo

En este caso, entre los puntos A y B de la fibra donde ambas señales interactúan se produce una variación de la intensidad en las componentes frecuenciales de la prueba que siguen las siguientes ecuaciones [25]:

$$I_{-f_m}^A = I_{-f_m}^B \cdot e^{g_B(v)} \cdot I_C^A \cdot L_{eff}^{-\alpha} \cdot L \quad (4.1)$$

$$I_{+f_m}^A = I_{+f_m}^B \cdot e^{-g_B(v)} \cdot I_C^A \cdot L_{eff}^{-\alpha} \cdot L \quad (4.2)$$

Donde  $I_C^A$  es la intensidad a la frecuencia  $\nu_0$ ,  $g_B(v)$  la ganancia de *Brillouin* dependiente de la

frecuencia,  $L_{eff} = [1 - e^{-\alpha \cdot L}] / \alpha$  es la longitud usual efectiva de interacción para efectos no lineales,  $\alpha$  es el coeficiente de pérdida de la fibra y  $L$  es la longitud total de dicha fibra. Finalmente, asumiendo que las dos bandas laterales parten de inicio con el mismo valor de intensidad, es decir  $I_{+fm}^B = I_{-fm}^B = I_S^B$ , la intensidad total detectada será proporcional a:

$$I_{Total} = I_{-fm}^A + I_{+fm}^A = 2 \cdot e^{-\alpha \cdot L} \cdot I_S^B \cdot \cosh(g_B(v)) \cdot I_C^A \cdot L_{eff} \quad (4.3)$$

Una vez descrito el proceso de interacción entre la señal de bombeo y la de prueba que da lugar al proceso de *scattering* estimulado de *Brillouin*, a continuación, se describe de forma modular el funcionamiento de la configuración BOTDA, detallada en la propia *Figura 4.1*:

- ▶ **Rama superior:** Por la rama superior, una señal de bombeo con forma de pulso cuya anchura<sup>1</sup> es, como mínimo de 10 ns (tiempo de vida medio del fonón acústico), es generada mediante el SOA, a través de un generador de funciones capaz de generar pulsos rectangulares. A continuación, el pulso es amplificado por un amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA), otorgándole la suficiente potencia como para que se produzca *scattering* estimulado, pero con precaución de no amplificar tanto que puedan producirse efectos no lineales indeseados. Finalmente, el último elemento con el que se topa la señal pulsada antes de entrar en la fibra de medida es el aleatorizador o *scrambler* de polarización (PS), con el que se consigue, en cierta medida, eliminar la dependencia de la ganancia de *Brillouin* a lo largo de la fibra con la polarización. Para ello, se realiza un promediado sobre las variaciones de la polarización que tienen lugar según lo indicado en el campo *Scrambler* de la interfaz MATLAB (*Figura 4.4*). A través de este promediado, se consigue eliminar esta dependencia [35].
- ▶ **Rama inferior:** Por la rama inferior circula la señal de prueba. Esta es generada mediante un modulador electro-óptico de Mach-Zender (polarizado en el punto de transmisión nula) alimentado por un generador de RF, capaz de generar una señal sinusoidal; dando lugar a una modulación de doble banda lateral (DBL) con supresión de portadora. Seguidamente, la señal DBL atraviesa un aislador óptico, que evita que se produzcan reflexiones del haz<sup>2</sup> y que la señal pulsada de bombeo llegue a la salida del modulador.
- ▶ **Interacción en la fibra:** Una vez que bombeo y prueba han sido generados y han atravesado todos los componentes ópticos previamente mencionados, tiene lugar la interacción entre ambas señales a lo largo de la fibra óptica (FUT), produciéndose el *scattering* de *Brillouin* estimulado (SBS) a lo largo de este trayecto. En este caso concreto, ha sido empleada una fibra óptica monomodo estándar de telecomunicaciones (ITU-T G.652).
- ▶ **Detección:** Tras la interacción entre ambas señales ópticas, la señal resultante se dirige por el puerto 3 del circulador óptico hacia una red de difracción de *Bragg* (FBG), donde la banda de mayor frecuencia es eliminada<sup>3</sup>. Posteriormente, la señal óptica es detectada mediante un fotodetector (PD), para finalmente ser recogida por la tarjeta de adquisición (DAC), incluida en la CPU del ordenador empleado durante el proceso experimental.

Respecto a la tarjeta de adquisición (DAC), esta consiste en un osciloscopio que mide la tensión eléctrica producida por el fotodiodo. El control de gran parte de los equipos que conforman

<sup>1</sup>La anchura de pulso determina la resolución espacial en las medidas. Diferentes anchuras de pulso son evaluadas a lo largo del desarrollo práctico con el fin de comparar su incidencia en los resultados finales.

<sup>2</sup>Las reflexiones del haz de luz incidente podrían producir un efecto de cavidad o resonador óptico, que desembocarían en una amplificación indeseada de la señal de prueba. Este es el principio que aprovechan las fuentes láser en la generación de luz.

<sup>3</sup>En este caso, se trabaja teniendo en cuenta la energía cedida a la señal de prueba por el pulso, por lo que se considera la banda lateral de menor frecuencia. Si se considerara el caso contrario, la banda superior sería la seleccionada.

el montaje es llevado a cabo a través de una interfaz GUI MATLAB, desarrollada en [36], la cual facilita enormemente el proceso de control sobre las medidas y la visualización de los valores obtenidos de estas a partir de la representación casi en tiempo real de la traza de *Brillouin* obtenida. En la siguiente imagen se muestra una captura extraída de dicha interfaz en la que pueden apreciarse los distintos controles sobre los componentes del montaje detallado en la *Figura 4.1*.

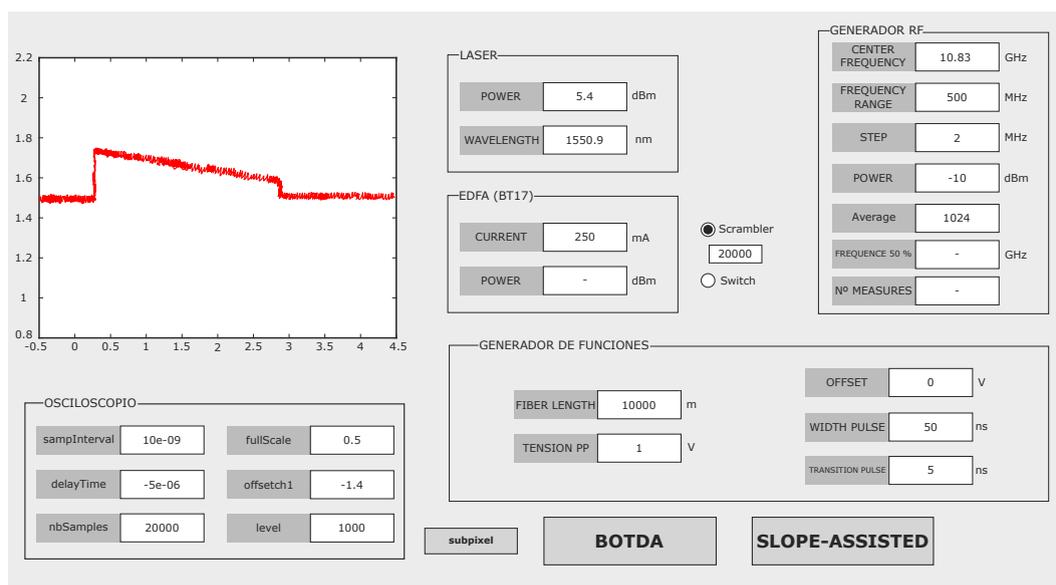


Figura 4.4. Apariencia interfaz gráfica Matlab

A destacar sobre esta interfaz, mencionar que en el cuadro de la parte superior izquierda puede observarse en *tiempo real*<sup>1</sup> la traza de *Brillouin*. Asimismo, mediante el cuadro ubicado en la parte inferior de dicha traza se pueden regular parámetros como el número de muestras, el intervalo de muestreo, el *offset* y la escala de la traza, entre otros. Adicionalmente, otros parámetros interesantes, ubicados en este caso en la sección de GENERADOR RF son la frecuencia central (*CENTER FREQUENCY*), la cual debe coincidir con el BFS característico de la fibra (obtenido previamente) o el rango de frecuencias a escanear (*FREQUENCY RANGE*) con un paso frecuencial definido por *STEP*. Finalmente, el promediado también será determinante en la medida, pues es un elemento muy determinante en la relación SNR finalmente obtenida.

Una vez finalizado el proceso de adquisición de datos, se trata de reconstruir el espectro de ganancia de *Brillouin* (BGS), a partir del cual se podrán extraer los valores de los parámetros finales de interés: *strain* y temperatura.

## 4.2. Obtención de medidas para configuración óptima

El primer paso del desarrollo experimental consiste en la realización de medidas independientes de ambos parámetros, de forma que sea posible obtener la configuración óptima para, posteriormente, realizar las medidas de forma conjunta. Además, a partir de este proceso de medidas se tratarán de verificar las relaciones existentes entre la anchura del espectro de ganancia de *Brillouin* y el desplazamiento en frecuencia (BFS), con las variaciones tanto de temperatura como

<sup>1</sup>No es cierto que sea exactamente en tiempo real, pues existe un tiempo de adquisición, pero prácticamente podría considerarse como tal, pues se trata de una representación cuya finalidad es servir como referencia al usuario.

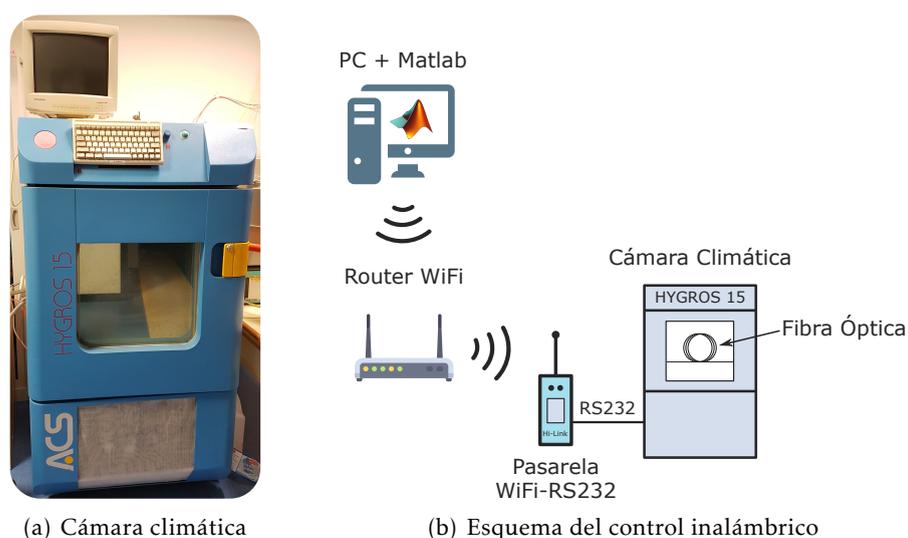
de *strain*.

El hecho de realizar en primer lugar las medidas de forma independiente tiene como objetivo llevar a cabo un estudio exhaustivo previo que permita determinar cuál es la configuración más adecuada. Este proceso será, sin ninguna duda, el que tome la mayor parte del tiempo de este trabajo, puesto que se pondrán a prueba distintas configuraciones y se realizarán numerosas medidas con el fin de, como ya se ha mencionado, escoger la configuración que mejores resultados aporte finalmente.

De esta forma, a continuación se detalla la configuración o configuraciones experimentales empleadas tanto en las medidas de temperatura como de *strain*.

#### 4.2.1. Obtención de medidas de temperatura

El primer conjunto de medidas a realizar lo constituye el de temperatura. Para ello, se hace uso de una cámara climática como la que se muestra en la *Figura 4.5(a)*, controlada de forma remota a través de una configuración cuyo esquema conceptual se corresponde con el representado en la *Figura 4.5(b)*. Aunque las medidas finales no se lleven a cabo empleando dicha cámara, sino a través de una bañera con agua *Sección 4.2.1*, los resultados obtenidos a partir de la primera son extrapolables a cualquier forma que permita obtener cambios de temperatura.



**Figura 4.5.** Cámara climática y control inalámbrico

Para la realización de las medidas de temperatura, la cámara climática es controlada de forma remota a través de un PC equipado con MATLAB. El *software* de control implementado en MATLAB está diseñado con el fin de que la realización de la medida se lleve a cabo cuando la temperatura de la cámara climática sea constante, de forma que se obtenga una medida lo más uniforme posible. La sección de fibra que será sometida a cambios de temperatura es de aproximadamente 2.6 km (prácticamente la totalidad de su longitud), por lo que se dispone de un *hotspot* de una gran longitud.

Durante el proceso experimental, la fibra sobre la que se van a realizar las medidas es introducida dentro de la cámara, de forma que dicha fibra es sometida a los cambios de temperatura impuestos por la misma. La *Figura 4.6* muestra esta planificación de medida sobre la configuración BOTDA detallada en la *Sección 4.1*.

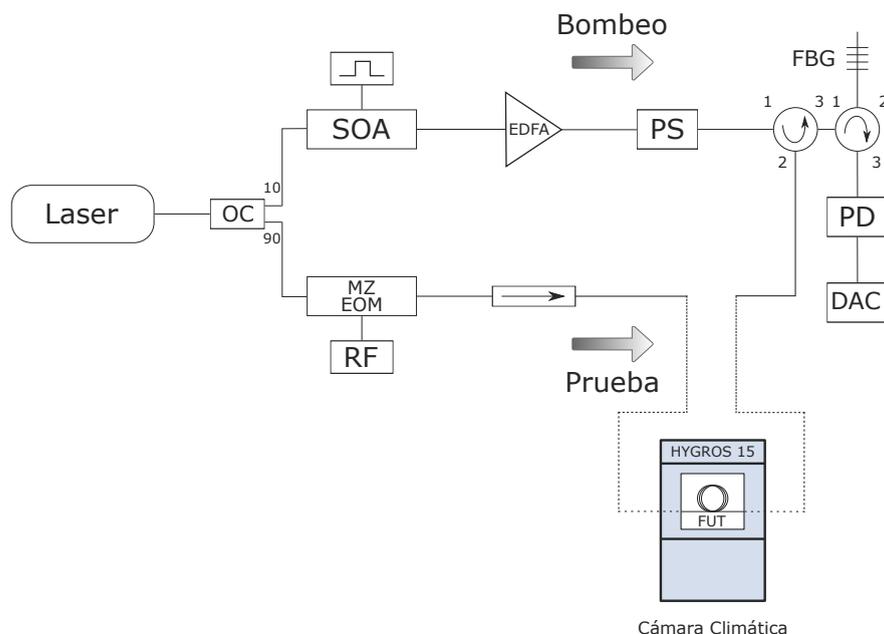


Figura 4.6. Esquema BOTDA con la fibra sometida a cambios de temperatura

La realización del proceso de medidas consta de tres bucles anidados en los cuales se varía, por un lado, la temperatura de la cámara climática entre 0 y 80 °C; así como por el otro, la anchura temporal del pulso entre 10 y 100 ns (se recuerda que la anchura temporal del pulso determina la resolución espacial de las medidas). Además, para cada temperatura y valor de ancho de pulso se realizan 10 medidas, sobre las cuales se obtendrá un promediado con objeto de eliminar cualquier comportamiento individual.

El hecho de realizar las medidas de temperatura empleando varios anchos de pulso se debe a que, como ya se ha comentado en la parte introductoria de este capítulo, pese a que el objetivo de realizar la medición experimental es obtener datos que permitan llevar a cabo la discriminación entre *strain* y temperatura, también se aprovechan dichas medidas para estudiar el comportamiento del fenómeno de *scattering* de Brillouin con la variación de ciertos parámetros. Más adelante, en la Sección 5.1.1 se analizarán y comentarán los resultados obtenidos a partir de estas mediciones.

Asimismo, cabe destacar que previa realización de las medidas de temperatura *per se*, es necesario determinar la frecuencia de Brillouin característica de la fibra empleada, para lo cual es necesario realizar un conjunto inicial de medidas sobre las cuales determinar el pico del espectro de ganancia de Brillouin, a partir del cual se determinará dicha frecuencia. Sin embargo, en este caso, este trabajo ya había sido llevado a cabo previamente, por lo que no ha sido necesario repetirlo ( $BFS_{fibra} \approx 10,83\text{GHz}$ ).

Una vez que esta frecuencia es determinada, las medidas para obtener el espectro de ganancia son realizadas sobre un ancho de banda de 500 MHz (Determinado a partir de medidas previas), lo que supone 250 MHz de barrido frecuencial a cada lado del BFS. Asimismo, el paso de frecuencia empleado a lo ancho del barrido es de 2 MHz, el promediado es de 1024 y el intervalo de muestreo de 2 ns.

La Tabla 4.1 recoge los parámetros de medida empleados.

Parámetro	Valor
Intervalo de muestreo	2 ns $\rightarrow$ 0.2 m entre muestras
Promediado	1024
Frecuencia central	$\approx$ 10.8 GHz
Rango frecuencial	500 MHz (10.55-11.05 GHz)
Paso frecuencial	2 MHz

Tabla 4.1. Parámetros de medida temperatura

#### 4.2.2. Obtención de medidas de *strain*

El segundo conjunto de medidas a realizar es el correspondiente a variaciones en el valor de *strain*. En este caso, este proceso de medidas presenta una complejidad significativamente mayor que el de temperatura cuando el objetivo final es tener unos cuantos metros de fibra sometidos a la misma tensión, de forma que se consiga disponer de un número suficiente de puntos para así tratar de conseguir una mayor precisión en el posterior proceso de discriminación. A diferencia de la mayoría de publicaciones sobre medida de *strain*, en este caso es necesario aplicar tensión a un tramo de una longitud de fibra suficiente, de forma que, con la resolución fijada por la anchura de pulso se dispongan de medidas sobre un conjunto suficiente puntos. Dicha resolución será como máximo de 1 metro, puesto que la anchura mínima de pulso que puede colocarse para evitar obtener unas medidas *inadecuadas* es de 10 ns y el sistema BOTDA empleado es un sistema convencional, es decir, sin empleo de técnicas que empleen pulsos diferenciales o pre-excitación, con los que se conseguiría una mayor resolución (del orden de unos pocos centímetros). Además, por medidas *inadecuadas* se entienden aquellas que reúnen, fundamentalmente, las siguientes dos características:

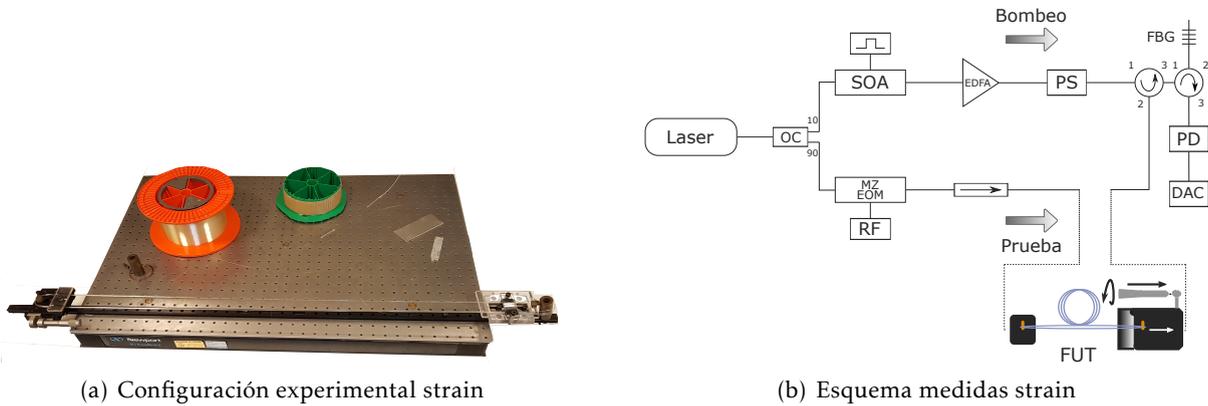
- (1) La corta duración del pulso (por debajo del tiempo de vida del fonón acústico) provoca una ganancia de *Brillouin* escasa y una anchura espectral de la BGS muy grande.
- (2) Consecuentemente, al disponer de un menor nivel de señal, la relación SNR disminuye.

Ambas condiciones no hacen sino perjudicar en la obtención de espectros adecuados para los propósitos de este trabajo.

En resumidas cuentas, se desea obtener una longitud suficiente de fibra sometida a un *strain* lo más uniforme posible, de forma que se disponga de un conjunto suficiente de puntos bajo su influencia. Asimismo, también es condición necesaria que las medidas realizadas puedan ser replicables, esto es, que no existan demasiadas variaciones entre medidas realizadas en instantes diferentes, por si fuese necesario replicarlas en un futuro.

Con todo esto, diferentes configuraciones han sido evaluadas en el proceso de medida de *strain*, hasta lograr dar con aquella capaz de proveer un valor más uniforme en la sección de fibra aplicada. A continuación, se detallan algunas de las configuraciones que han sido empleadas junto con los resultados obtenidos, de forma que el lector sea consciente del problema real y de la complejidad que supone obtener medidas constantes de *strain* sobre una longitud de unos cuantos metros de fibra óptica.

La **primera configuración** implementada se muestra en la *Figura 4.7(a)*, junto con su descripción esquemática (*Figura 4.7(b)*).



**Figura 4.7.** Configuración experimental y representación esquemática

La idea de funcionamiento de esta configuración es la siguiente: varias vueltas de fibra óptica (FUT) son enrolladas entre dos cilindros dispuestos sobre la misma línea recta, uno enfrente del otro, y separados por una distancia aproximada de 1 m, tal y como muestra la figura. Uno de ellos es situado sobre una superficie fija, mientras el otro se dispone sobre un desplazador lineal (*Figura 4.8*). Para someter la FUT a *strain*, simplemente se regula el desplazador, tirando de un extremo de la fibra, mientras el otro permanece inmóvil.



**Figura 4.8.** Desplazador

Como la aplicación de *strain* se realiza mediante la rotación del elemento que se muestra en la *Figura 4.8*, a partir del cual se obtiene un desplazamiento lineal de la fibra, puede ser interesante establecer una relación entre el número de vueltas aplicadas y los *micro-strain* asociados, la unidad comúnmente empleada en este tipo de casos. De esta forma, sabiendo que cada vuelta produce un desplazamiento lineal de 0.5 mm y que la longitud de fibra sobre la que es aplicada la tensión es de unos 130<sup>1</sup> cm, se tiene la siguiente expresión:

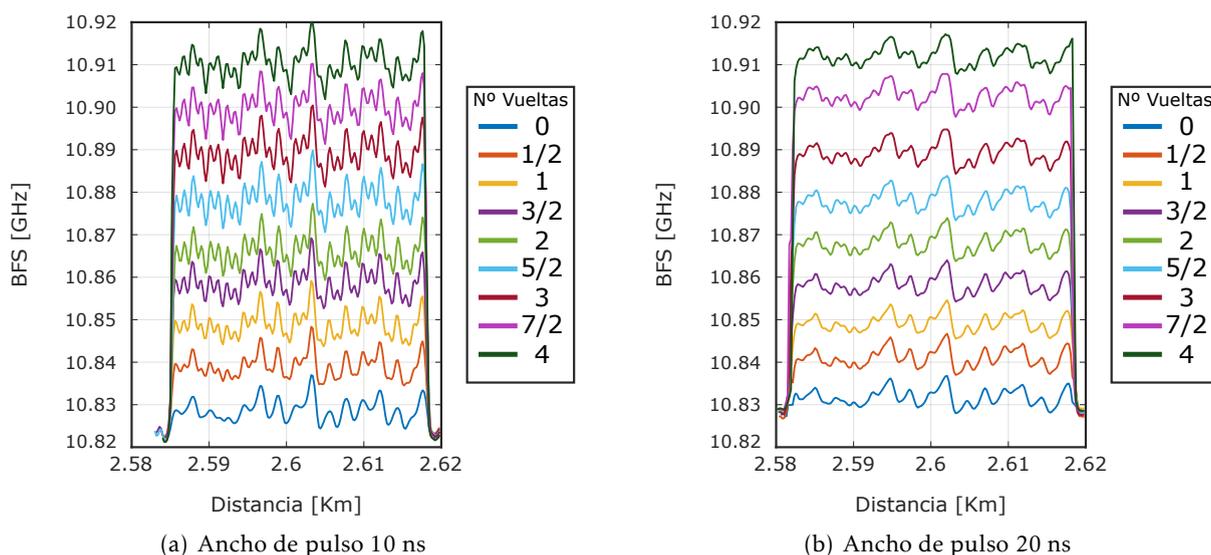
$$MicroStrain(\mu\epsilon)_{Vuelta} = \#_{vueltas} \cdot \frac{Elongacion\ lineal}{Longitud\ hotspot} \cdot 10^6 = \#_{vueltas} \cdot \frac{0,5 \cdot 10^{-3}m}{1,3m} \cdot 10^6 \quad (4.4)$$

Es decir, cada vuelta supone incrementar el valor de *strain* en 384.62  $\mu\epsilon$ , o lo que es lo mismo, 192.31  $\mu\epsilon$  por cada media vuelta, el paso que ha sido tomado entre cada medida. Además, como 0 vueltas de tensión se ha tomado un nivel de referencia aproximado para el cual no existe despla-

<sup>1</sup>Pese a que se dispone de un total de 35m de fibra enrollada, la tensión se aplica realmente sobre la longitud de fibra correspondiente a la separación entre las dos ruedas.

zamiento de la frecuencia de *Brillouin*, teniendo en cuenta que las medidas son realizadas a una temperatura ambiente de ( $\approx 25^\circ\text{C}$ ).

En este caso, a diferencia de las medidas de temperatura (*Sección 4.2.1*), el proceso de medida se realiza utilizando anchuras de pulso de 10, 15 y 20 ns. Esto es debido a que, a pesar de que en el caso de las medidas de temperatura también se emplearon anchuras de pulso de 50 y 100 ns; en este caso no se dispone de un *hotspot* tan grande como para poder emplear anchuras mayores, pues la resolución espacial sería menor. Sin embargo, aunque no todas las anchuras de pulso previamente mencionadas se encuentran por debajo de 30 ns, tiempo que emplea en formarse completamente el campo acústico que dispersa la señal de prueba provocando la ganancia de *Brillouin*, se cumple que todas ellas se encuentran por encima o igualan (en el caso del pulso de 10 ns) al tiempo de vida medio del fonón acústico (10 ns), por lo que las condiciones de ganancia son adecuadas. De esta forma, se obtienen los resultados<sup>1</sup> del BFS que se muestran en la *Figura 4.9*, correspondientes a la zona de fibra donde se aplica *strain*.



**Figura 4.9.** BFS obtenido para distintas anchuras de pulso

En ambos casos, se muestra el valor del BFS (*Brillouin Frequency Shift*) a lo largo de la sección de fibra sobre la que fue aplicada la tensión. A través de este valor, es posible determinar la uniformidad de la medida, puesto que, como ya se mencionó en el *Capítulo 2*, este valor es obtenido como la frecuencia asociada al pico del espectro de ganancia de *Brillouin* (BGS) y a través del mismo se obtiene directamente el valor de *strain* o temperatura al cual la fibra es sometida; por lo que variaciones en este valor se traducen directamente en variaciones de *strain*, es decir, en uniformidad.

Como se observa en la *Figura 4.9*, el error cometido debido a la uniformidad del *strain* hace que este esquema de medida sea prácticamente inviable. Puesto que varias vueltas de fibra han sido dispuestas en esta configuración de medida, resulta que cada una de ellas está sometida a un valor de tensión diferente, por lo que el BFS varía entre ellas, acrecentándose dicha variación a medida que aumenta el valor aplicado. En la siguiente tabla se muestra el valor de la desviación típica o desviación estándar del desplazamiento en frecuencia de *Brillouin* obtenido para cada una

<sup>1</sup>Pese a que es el *Capítulo 5* el destinado a la realización del análisis de los datos obtenidos, los correspondientes a estas medidas de *strain* "fallidas" se ubicarán en el presente capítulo, con objeto de no ensuciar demasiado el siguiente.

de las anchuras de pulso y valores de *strain* aplicados:

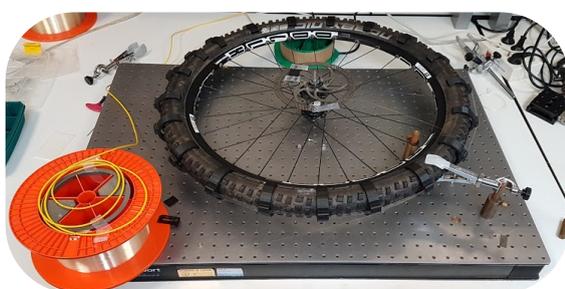
Anchura Pulso [ns]	N° Vueltas Strain								
	0	1/2	1	3/2	2	5/2	3	7/2	4
10	3.13	4.84	6.13	7.43	7.74	8.57	8.98	9.14	9.7
15	2.98	3.65	5.23	5.89	6.14	6.99	7.02	7.78	8.17
20	2.71	3.12	4.21	5.14	5.31	6.54	6.67	6.98	7.54

**Tabla 4.2.** Desviación estándar ( $\sigma$ ) del BFS para distintos valores de *strain* y anchuras de pulso [MHz]

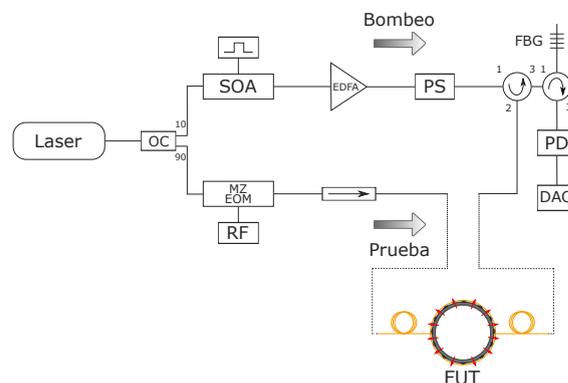
De los resultados recogidos en esta tabla puede concluirse que esta configuración no permite realizar unas medidas adecuadas por la baja uniformidad de los espectros, reflejado en los altos valores de desviación estándar del BFS. Para compararlo con el caso de la temperatura, se puede establecer una relación lineal de 1 a 1 entre los MHz de desviación y °C de error en temperatura, esto es, 10 MHz de desviación típica se corresponden aproximadamente con 10 °C de error.

El motivo de esta falta de uniformidad del perfil de *strain* obtenido puede estar en el hecho de que el radio del cilindro es tan pequeño y, por tanto, la curvatura de la fibra a su paso tan grande, que la fuerza de rozamiento existente en los puntos de curvatura absorba la mayor parte de la energía aplicada en forma de tensión, impidiendo transmitirla equitativamente a lo largo de todas las vueltas.

Una vez descartada esta configuración, una **segunda** es propuesta. En este caso, la configuración tiene un aspecto como el mostrado en la *Figura 4.10*, tanto su vista fotográfica como su correspondiente esquema conceptual.



(a) Configuración experimental strain



(b) Esquema medidas strain

**Figura 4.10.** Configuración experimental y representación esquemática

Como se observa en la figura, la forma en la que se aplica la tensión a la fibra en este caso es radicalmente diferente a la anterior. La idea es la siguiente: sobre unas piezas como la que se muestra en la *Figura 4.11*, colocadas cubriendo el neumático de la rueda, se colocan varias vueltas de fibra óptica reposadas sobre las muescas marcadas para tal propósito. Para generar tensión, simplemente se infla la cámara de aire ubicada entre el neumático y la llanta, con lo que se ejerce una fuerza más o menos uniforme sobre todos los puntos de la fibra. De esta forma, se consigue estirar la fibra y por tanto aplicar sobre ella un determinado *strain*.

En este caso, únicamente ha sido necesario evaluar una anchura de pulso (10 ns) para des-

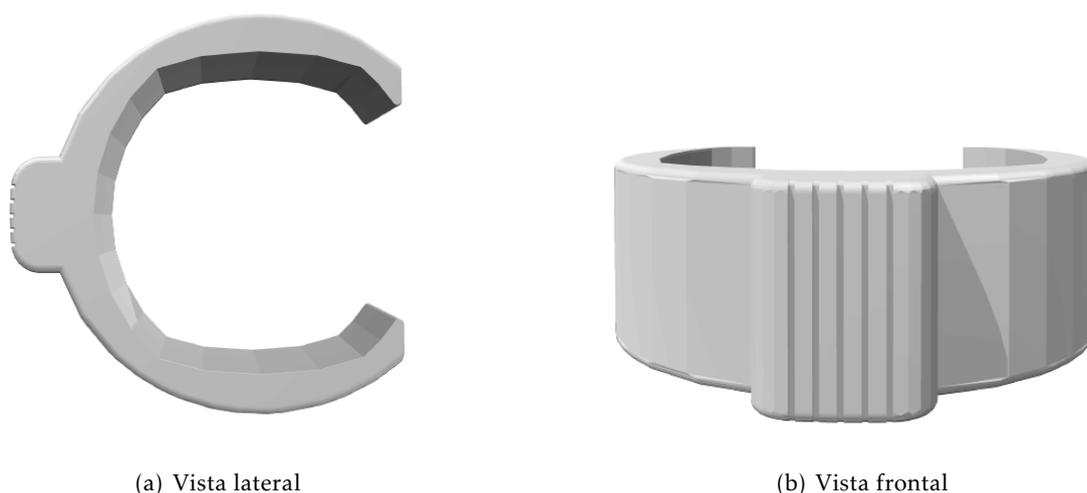


Figura 4.11. Vistas de la pieza 3D empleada

cartar esta configuración. La *Tabla 4.3* recoge el valor de la desviación del BFS para diferentes valores de *strain*. A diferencia del caso anterior, la tensión aplicada se especifica ahora como los MHz de desviación del BFS, pues establecer una correspondencia con los  $\mu\epsilon$  resulta notablemente complejo.

		Tensión aplicada [MHz]			
		0	10	20	50
Anchura Pulso [ns]	10	3.17	5.49	6.9	9.3

Tabla 4.3. Desviación estándar ( $\sigma$ ) del BFS para distintos valores de *strain* [MHz]

Como puede apreciarse, en este caso se consigue un error muy similar a aquel obtenido con la primera configuración<sup>1</sup>. Sin embargo, el principal problema de esta configuración no reside en el error cometido en las medidas, que también, si no en la falta de capacidad para ser reproducidas. Es decir, los resultados obtenidos en las diferentes medidas realizadas presentan una gran discrepancia, por lo que resulta realmente complicado poder generalizar en el comportamiento del espectro de ganancia de Brillouin (BGS) con el *strain*. Los motivos de esto parecen ser los siguientes:

- (1) Al introducir aire en la cámara para así aplicar tensión sobre la fibra óptica, se producen inevitables desplazamientos de la rueda, introduciendo un *strain* residual indeseable. Una posible solución a esto podría ser colocar una especie de tapones que limiten el movimiento de la fibra, fijándola para evitar que se mueva durante el proceso inflado/desinflado, sin embargo, esto conllevaría que la fibra ya no sería capaz de deslizarse sobre las muescas de las piezas de la *Figura 4.11*, introduciendo una fuerza de rozamiento tal que conllevaría un *strain* menos uniforme si cabe.
- (2) El segundo motivo de esta falta de replicabilidad de las medidas puede estar precisamente en las piezas 3D diseñadas para alojar la fibra. Durante el proceso de inflado/desinflado, es

<sup>1</sup>Tener en cuenta que 50 MHz de desviación del BFS se corresponden aproximadamente con la aplicación de 3 vueltas de *strain*.



La idea de funcionamiento de esta configuración es idéntica a la seguida en la primera de todas (Figura 4.7), para lo cual también se empleará un desplazador lineal como el mostrado en la Figura 4.8. Sin embargo, a diferencia de esta primera configuración, la fibra óptica es enrollada sobre unas ruedas cuyo diámetro es mucho mayor que aquel de los cilindros empleados. Por ello, la curvatura es menor y con ella las pérdidas por rozamiento se reducen. En este caso, 15 vueltas han sido enrolladas, lo que supone un total de aproximadamente 40 m de fibra sometida a tensión, suficiente para el propósito de estas medidas. A diferencia del caso de las medidas de temperatura, donde se dispusieron varios kilómetros de fibra sometido a cambios de temperatura, en este caso, disponer de tanta longitud de fibra sometida a una misma tensión es prácticamente imposible, puesto que a medida que se van enrollando vueltas de fibra sobre las ruedas, el rozamiento total es mayor y la obtención de una tensión uniforme se convierte en algo cada vez más complicado de conseguir.

Al igual que en el caso de las medidas de temperatura, también se procede a realizar varias medidas para cada uno de los valores de *strain* considerados, con objeto de, posteriormente, poder realizar un análisis de los resultados obtenidos a partir de una medida promedio; así como para disponer de un conjunto suficiente de medidas que permita determinar si estas podrán ser replicables cometiendo el mínimo error posible.

En este caso, y a diferencia de las medidas de temperatura, únicamente serán considerados anchos de pulso de 10, 15 y 20 ns, pues anchos de pulso mayores implicarán una resolución menor y, en este caso, únicamente se dispone de 40 m de longitud del *hotspot*. En cuanto a los parámetros de medida, se utilizará un intervalo de muestreo de 2 ns (0.2 m entre muestras), un valor de promediado de 1024, y un ancho de banda de escaneo de 500 MHz (250 MHz a cada lado del BFS) con un paso frecuencial de 2 MHz. Estos parámetros son los mismos que fueron empleados en las medidas de temperatura (ver Tabla 4.1).

Respecto a los resultados obtenidos a partir de esta configuración, estos son analizados en profundidad en el Capítulo 5, pues esta será la configuración finalmente utilizada para aplicar tensión a la fibra.

### 4.3. Obtención de medidas de temperatura y *strain*

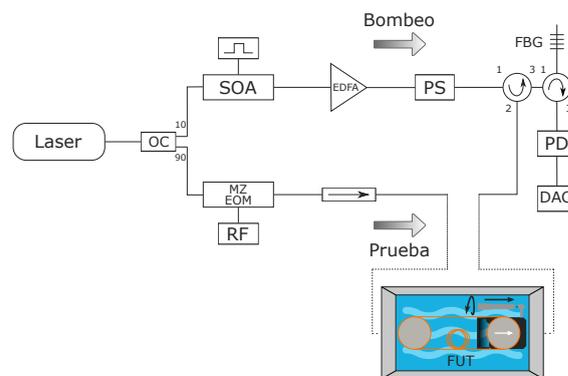
El último de los escenarios de medidas experimentales lo constituye la realización conjunta de medidas de *strain* y temperatura, para lo cual se someterá al sensor a ambos efectos de forma simultánea.

Si bien las medidas individuales de *strain* ya entrañaban una gran complejidad, como ya se ha señalado en la sección anterior, las medidas conjuntas de *strain* y temperatura añaden aún más dificultad al proceso de medida. En este caso, al realizar la medida de ambos parámetros de forma conjunta, resulta más complicado conseguir la uniformidad deseada, puesto que uniformidades debidas a ambos se suman, obteniendo por tanto un error mayor.

Debido a que el parámetro más limitante a la hora de escoger la configuración de medidas más adecuada es el *strain*, será la última configuración descrita en la sección anterior aquella que servirá para realizar las medidas de ambos parámetros de forma simultánea; pues es la que mejores resultados ha proporcionado. Ya que el tamaño de los elementos que configuran el esquema de medidas es mayor del existente en el interior de la cámara climática, dicha temperatura será variada a través del agua contenida en un depósito, en el que se introducirá la fibra, tal y como se muestra en la Figura 4.14.



(a) Configuración experimental temperatura y strain



(b) Esquema medidas temperatura y strain

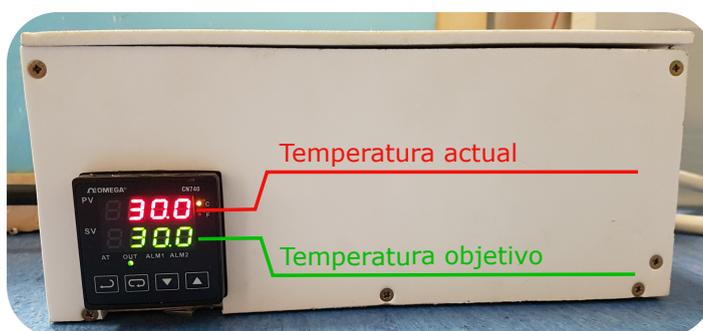
**Figura 4.14.** Configuración experimental y representación esquemática temperatura y strain

Emplear agua como medio transmisor de calor es una práctica muy habitual cuando se pretende conseguir una distribución uniforme de temperatura. En estos casos, hasta temperaturas de  $99\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup> suelen emplearse cámaras cerradas de agua, con un circuito que permite recircular el agua, en los casos en que se pretende conseguir una distribución uniforme. En este caso, la cámara está cubierta térmicamente por todos los lados excepto por uno, descubierto parcialmente, estando este en contacto con el aire presente en la sala, y actuando como un factor mínimamente limitante en la consecución de la uniformidad deseada.

Adicionalmente, para llevar a cabo un control de la temperatura, se dispone de un controlador realimentado, el cual consta de un termopar que permite controlar en cada momento la temperatura del agua contenido dentro de la bañera. Además, el sistema también cuenta con una resistencia a través de la cual se transfiere calor al agua. Finalmente, también se dispone de un motor que permite distribuir el agua más próximo a la resistencia, y por tanto más caliente, por toda la bañera, de forma que se obtenga una temperatura lo más uniforme posible en todos los puntos de la misma. En la siguiente figura se muestra el motor que permite la distribución uniforme de la temperatura (Figura 4.15(a)) y el control realimentado de temperatura (Figura 4.15(b)).



(a) Motor para temperatura distribuida



(b) Control de temperatura realimentado

**Figura 4.15.** Motor y control de temperatura

Con todo ello, el strain se aplica mediante sucesivas rotaciones del desplazador lineal, mientras que la temperatura se varía calentando el agua en el que está sumergida la fibra. A diferencia de las medidas individuales, unos 70 m de fibra han sido dispuestos, pues en la realización de las

<sup>1</sup>Para temperaturas superiores se utilizan métodos alternativos tales como aceites, silicona o arena.

medidas será empleado un pulso de anchura 20 ns, lo que implica una resolución espacial de 2 m. De esta forma, se dispone de un número mayor de puntos, a costa de obtener una menor uniformidad en las medidas (ver *Sección 5.1.3*). Además, por cada valor de temperatura y *strain*, se realizará un total de 8 medidas, con objeto de disponer de un mayor número de espectros.

De igual forma que en el caso de las medidas individuales de *strain*, la tensión se aplica sobre la misma sección de la fibra, por lo que se mantiene la equivalencia de  $384.6 \mu\epsilon$  por cada vuelta de tensión aplicada.

La siguiente tabla recoge los valores de temperatura y *strain* que serán evaluados:

	Temperatura [°C]	Strain[Nº vueltas]
<b>Rango de medida</b>	22 → 62	0 → 4
<b>Paso de medida</b>	10	1/2

Tabla 4.4. Paso y rango de medidas temperatura y strain

Finalmente, en cuanto a los parámetros de medida empleados, estos serán los mismos que aquellos de las medidas individuales de *strain* o temperatura (ver *Tabla 4.1*).

# CAPÍTULO 5

## Resultados experimentales

Una vez ha sido descrito el proceso de obtención de las medidas tanto de *strain* como de temperatura en el capítulo anterior, a partir de la configuración BOTDA implementada en el laboratorio, es turno de realizar un recorrido por los resultados obtenidos a partir de dichas medidas. Asimismo, también serán analizados los resultados finales obtenidos tras la aplicación de las correspondientes técnicas de procesado.

### 5.1. Resultados configuración experimental

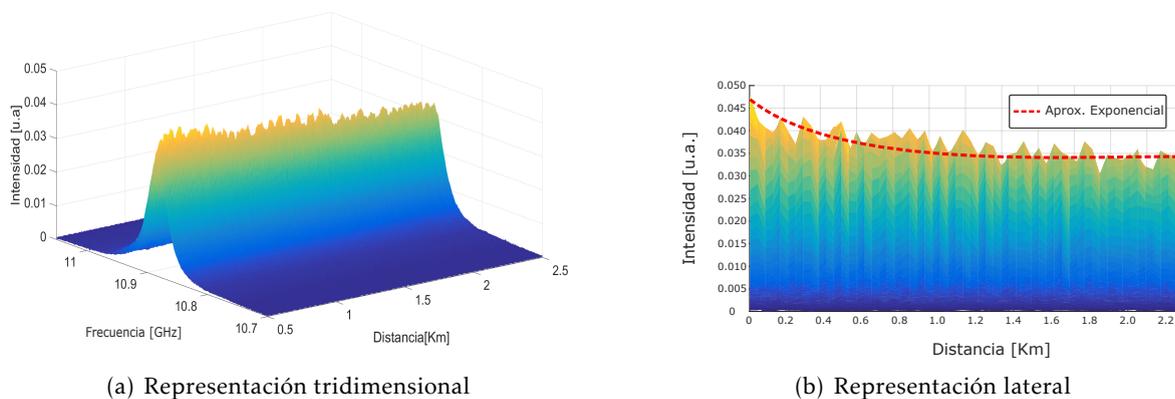
Para alcanzar el objetivo final de discriminación entre *strain* y temperatura que motiva este trabajo se han realizado medidas en el laboratorio de ambos parámetros por separado, así como de ambos parámetros de forma conjunta; siguiendo el proceso de medida descrito en el anterior capítulo. De esta forma, en los siguientes subapartados se procede a mostrar y comentar los resultados obtenidos en cada caso.

#### 5.1.1. Resultados de temperatura

En la *Sección 3.1* fue descrita la hipótesis en la que se basaba el proceso de discriminación entre ambos parámetros. A recordar, en [25] *Nickles et al.* demuestran la dependencia del ancho de línea del espectro de ganancia de *Brillouin* (BGS) con la temperatura y con el *strain* (*Sección 5.1.2*). En este apartado se va a tratar de verificar este hecho de forma experimental. Además, aprovechando el *set* de medidas realizadas a lo largo de un amplio conjunto de temperaturas (0, 20, 40, 60 y 80 °C), también se demostrará la dependencia del BFS o desplazamiento en frecuencia de *Brillouin* con los cambios de temperatura, presentados en el mismo artículo científico, y ya mencionados en la parte introductoria de este trabajo (ver *Figura 1.2*). Recordar que la evolución de la anchura del BGS y del BFS con temperatura y *strain* definen las dos ecuaciones del sistema planteado para poder distinguir entre ambos.

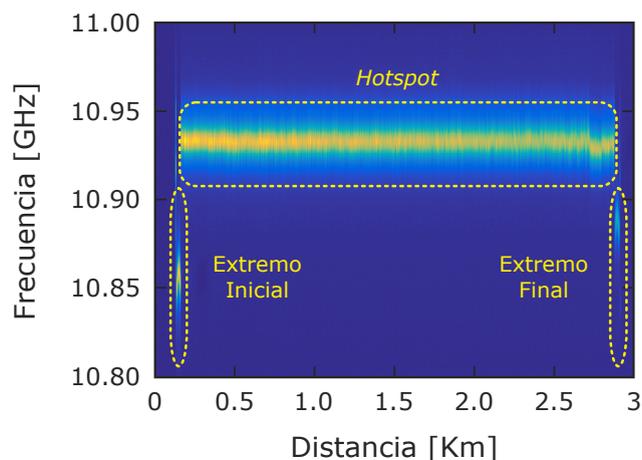
Antes de comenzar con el análisis de los resultados obtenidos, primero puede ser interesante visualizar el perfil de temperatura a lo largo de la fibra, es decir, las trazas de *Brillouin* con información de temperatura obtenidas a lo largo de los distintos puntos espaciales de la fibra evaluados. Así, la *Figura 5.1(a)* muestra las trazas obtenidas para una anchura de pulso de 50 ns

cuando la fibra es sometida a una temperatura de 80 °C. Este valor de anchura de pulso ha sido escogido por tratarse de un valor intermedio fuera de los límites que, potencialmente, podrían provocar algún efecto no deseado y cumpliendo con la condición de ser superior a 30 ns, con lo que el campo acústico que dispersa la señal de prueba ya ha sido completamente formado y por tanto la ganancia es mayor. Asimismo, en *Figura 5.1(b)* se muestra la misma medida vista desde uno de los dos perfiles, donde puede observarse como la intensidad de los espectros de ganancia de *Brillouin* decrece de forma exponencial con la distancia debido, fundamentalmente, a la atenuación introducida por la fibra óptica.



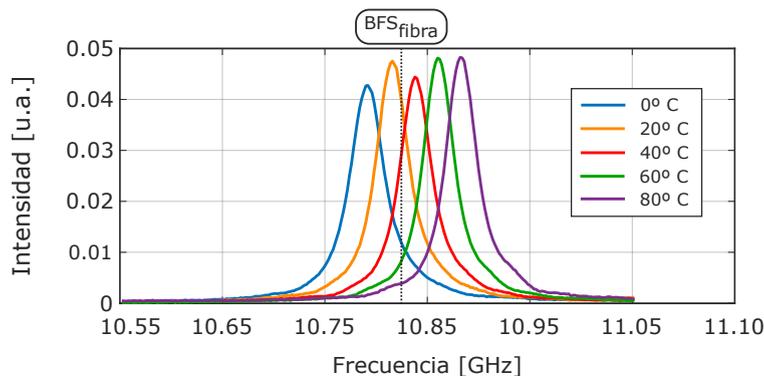
**Figura 5.1.** Medida distribuida a temperatura 80 °C con pulso de 50 ns

Al haber introducido por completo la fibra en la cámara climática, a excepción de los extremos por los cuales se introducen las señales de bombeo y prueba, puede que en la representación tridimensional no se aprecie el *hotspot* del todo bien, por lo que en la siguiente figura se muestra una vista de la misma desde los ejes X-Y:



**Figura 5.2.** Vista X-Y de la traza

En este caso, se trata del perfil obtenido para una temperatura concreta: 80 °C. Sin embargo, si se analiza una traza específica de todas las contenidas en la representación anterior (20000 a lo largo de toda la longitud de la fibra) localizada en la zona intermedia y para variaciones en el valor de la temperatura a la que se encuentra sometida dicha fibra, se obtiene el resultado que se muestra en la *Figura 5.3*.

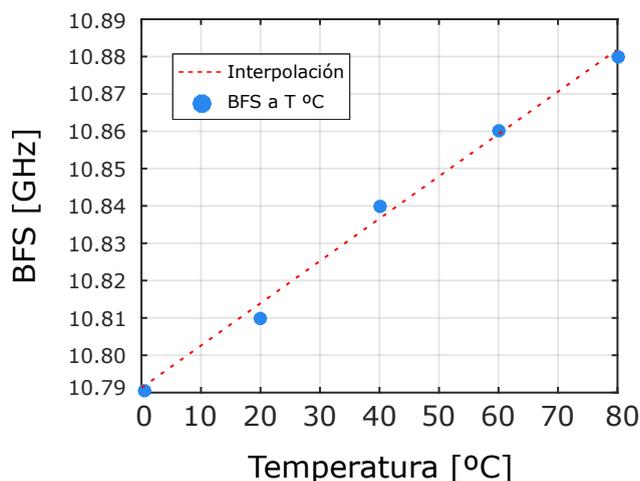


**Figura 5.3.** Espectro de ganancia de *Brillouin* para distintas temperaturas

Como puede apreciarse en esta gráfica, las curvas obtenidas se aproximan idealmente a una curva *Lorentziana*, como ya se anticipó en la *Sección 2.5*. Además, se aprecia como la intensidad del pico de la curva no aumenta conforme así lo hace la temperatura, aunque teóricamente debería (en la *Figura 5.6* se analiza la tendencia de este valor y se justifica su comportamiento).

De la *Figura 5.3* puede extraerse la siguiente conclusión: efectivamente, como ya fue demostrado en [25], y posteriormente en [29], el BFS o desplazamiento en frecuencia de *Brillouin* aumenta según lo hace la temperatura. Sin embargo, a partir de estas figuras no puede determinarse con exactitud como es dicha relación de dependencia entre la temperatura y el desplazamiento en frecuencia de *Brillouin*.

Dicha relación entre ambos parámetros, lineal para un cierto rango de temperaturas según [25], se muestra en *Figura 5.4*. La obtención del desplazamiento en frecuencia de *Brillouin* o BFS ha sido realizada, en este caso, a partir de un ajuste *Lorentziano* sobre el BGS obtenido a partir de las medidas experimentales. Aunque existe una cierta discusión acerca de diferentes métodos que pueden ser empleados en la determinación de este parámetro (BFS), en este caso se ha optado por obtenerlo a partir del ajuste a una curva *Lorentziana* en la parte superior, y *Gaussiana* en la inferior, puesto que este es uno de los métodos más precisos que existen.



**Figura 5.4.** BFS en función de la temperatura para un pulso de 50 ns

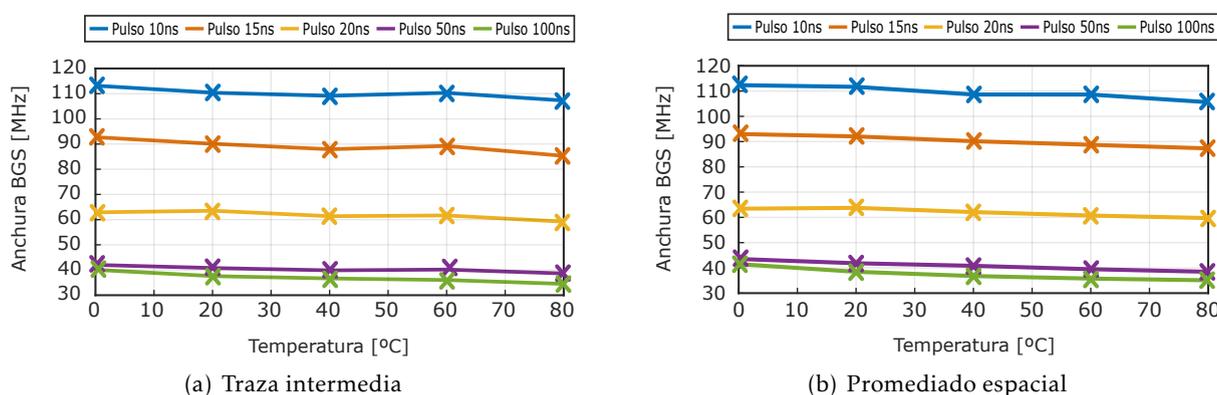
En este caso, para la misma anchura de pulso se ha representado el valor del BFS obtenido en función de la temperatura. Como puede apreciarse, la relación entre el desplazamiento en

frecuencia de *Brillouin* y la temperatura puede ser aproximada cometiendo apenas error por una línea recta, o lo que es lo mismo, la relación entre ambos parámetros es prácticamente lineal. Asimismo, cabe señalar que esta afirmación es correcta para el rango de temperaturas que ha sido evaluado (0-80°C), pudiendo no cumplirse este hecho para rangos de temperatura diferentes. De esta forma, en este punto ya sido verificada la primera de las ecuaciones para temperatura: dependencia lineal con el BFS.

Así, el siguiente paso consiste en confirmar la relación de la temperatura con el comportamiento espectral del BGS. Para ello, se ha optado por emplear dos tácticas distintas:

1. Considerar únicamente una traza intermedia<sup>1</sup> y establecer la relación que la FWHM y el pico del BGS siguen en función de la temperatura.
2. Realizar un promediado sobre un conjunto muy grande ( $\approx 10000$ ) de trazas (promediado espacial), y determinar la relación para cada ancho de pulso de la FWHM y el pico del BGS con la temperatura.

Así, a continuación se muestran los resultados asociados a la anchura espectral obtenidos en cada caso en función de la anchura de pulso:



**Figura 5.5.** Dependencia del ancho de línea del BGS con temperatura

En estas gráficas se verifica este comportamiento decreciente de la anchura del espectro de ganancia de *Brillouin*, como ya se anticipó en [25]. En el caso de evaluar únicamente una traza concreta (*Figura 5.5(a)*), se observa como el comportamiento es decreciente a excepción del pulso de 10 ns entre 40 y 60 ° C; mientras que para el caso de promediado espacial (*Figura 5.5(b)*), se muestra como, de forma global, el comportamiento es monótono decreciente.

Por su parte, la *Figura 5.6* muestra la tendencia seguida por el pico de intensidad del espectro de ganancia de *Brillouin*. Como puede apreciarse, es el pulso de 20 ns el que presenta un crecimiento de la intensidad asociada al pico del BGS más definido, puesto que el resto oscilan arriba y abajo sin una tendencia tan clara. A diferencia del caso anterior, pese a que el comportamiento no es el esperado, esto no es tan relevante, puesto que es realmente complicado realizar las medidas en las mismas condiciones de temperatura de los equipos involucrados (EDFA, aleatorizador de polarización, etc.), algo que afecta significativamente en la ganancia, camuflando esta tendencia creciente.

<sup>1</sup>La traza intermedia escogida pertenece a la zona intermedia del *hotspot*

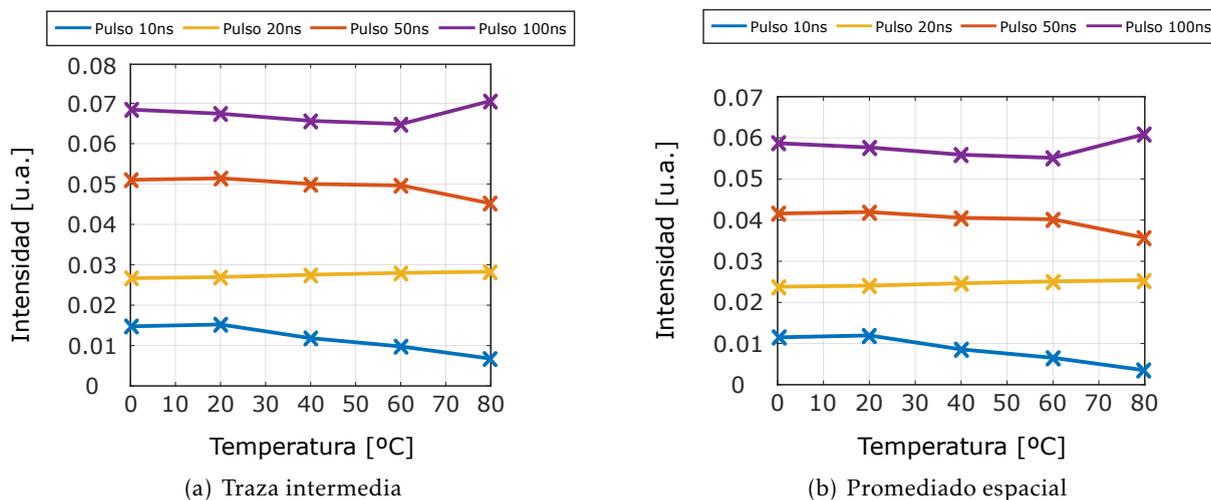


Figura 5.6. Dependencia del pico de intensidad del BGS con temperatura

Pese a que ambos acontecimientos son relevantes en el desarrollo de este trabajo, será el primero (ancho de línea del BGS) el que permita discriminar correctamente entre los dos parámetros de interés.

Igualmente, si se aproximan las curvas que representan la anchura del BGS con la temperatura de forma lineal y se analiza el ritmo o la pendiente de decrecimiento para dicha aproximación, se observa que esta no sigue una tendencia clara para cada uno de los anchos de pulso, tal y como muestran los resultados recogidos en la *Tabla 5.1*.

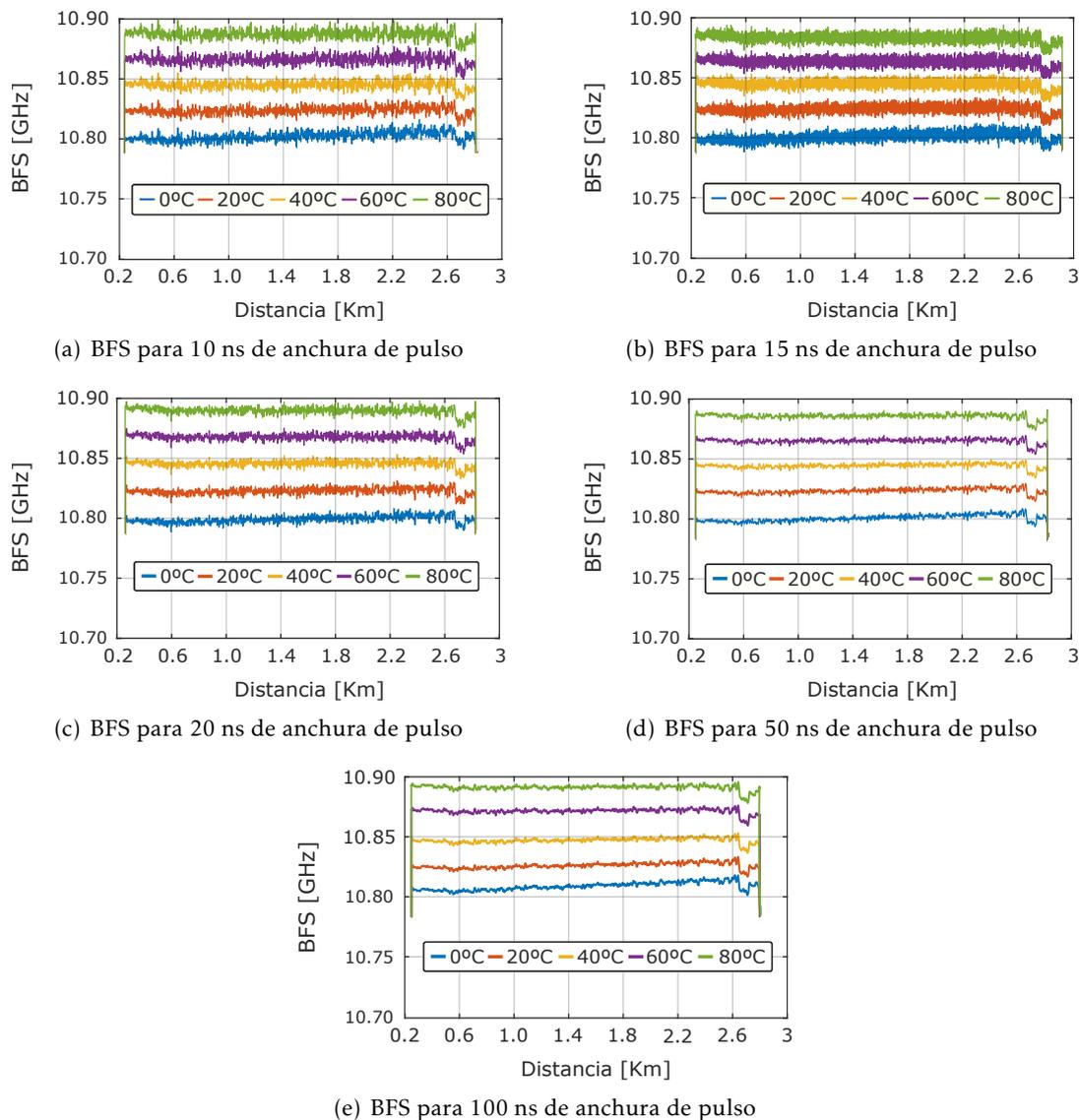
Anchura de pulso [ns]	10	15	20	50	100
Pendiente decrecimiento [MHz/° C]	-0.0843	-0.0712	-0.0464	-0.0633	-0.0801

Tabla 5.1. Pendiente relación temperatura-ancho BGS

Como puede apreciarse, es con el pulso de anchura de 10 ns con el cual se obtiene un ritmo de decrecimiento más rápido; siendo, por el contrario, el pulso de 20 ns el que presenta un decrecimiento más plano, esto es, más lento.

Finalmente, puesto que el objetivo final de la realización de estas medidas, como ya se ha señalado en numerosas ocasiones a lo largo del desarrollo de este trabajo, es servir como datos de entrada en la aplicación de IA, es conveniente que la medida resulte lo más uniforme posible, de modo que no se produzcan variaciones demasiado significativas entre puntos de *sensado* adyacentes que puedan ser contraproducentes en el resultado final de clasificación. El parámetro que mejor refleja la uniformidad de las medidas es el desplazamiento en frecuencia o BFS, dado que este está directamente relacionado con el valor de temperatura. De esta forma, en la *Figura 5.7* se muestra el valor del BFS obtenido dentro del *hotspot* en función de la temperatura para anchuras de pulso que toman valores de 10, 20, 50 y 100 ns, el cual, idealmente, debería ser constante puesto que se ha aplicado una misma temperatura en toda la fibra.

A partir de la visualización de los resultados mostrados en esta figura parece que para una anchura de pulso de 10 ns el valor del BFS oscila bastante más respecto al valor promedio que para el resto de anchuras de pulso, independientemente del valor de temperatura. En lo relativo al resto de anchuras, visualmente no se aprecian grandes diferencias, por lo que en la *Tabla 5.2* se procede



**Figura 5.7.** BFS en función de distancia y temperatura para distintas anchuras de pulso

a mostrar la desviación típica o desviación estándar (cuánto tienden los datos a alejarse del valor promedio) para el valor de desplazamiento en frecuencia de *Brillouin* (BFS), considerando cada anchura de pulso y valor de temperatura. Aunque los resultados mostrados están obtenidos directamente en MHz, estos también pueden ser considerados como grados de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), pues se mantiene una relación lineal de 1 a 1 entre ambos parámetros (*Figura 5.4*).

Efectivamente, tal y como se preveía los resultados obtenidos para una anchura de pulso de 10 ns son los menos uniformes. En el extremo opuesto se sitúan aquellos obtenidos para 100 ns, los cuales presentan la mínima desviación estándar para todas las temperaturas. El valor de desviación obtenido para cada una de las anchuras de pulso y valores de temperatura puede entenderse como la precisión obtenida en la medida. Esto es, si por ejemplo se considera una anchura de pulso de 50 ns, y una temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ , se tendrá una precisión de  $\pm 1.3^{\circ}\text{C}^1$ .

<sup>1</sup>Hay que tener en cuenta que este error es resultado de la suma del error introducido por el sensor y el introducido por la cámara climática, cuya temperatura real no presenta un valor constante indefinidamente.

	Anchura de pulso [ns]					
	10	15	20	50	100	
Temperatura [°C]	0	3.10	2.35	2.18	1.5	1.25
	20	2.96	2.43	2.23	1.35	0.99
	40	3.03	2.61	2.18	1.3	0.90
	60	3.38	2.89	2.25	1.3	0.87
	80	3.46	2.97	2.32	1.36	0.88

**Tabla 5.2.** Desviación estándar ( $\sigma$ ) del BFS para distintas temperaturas y anchuras de pulso [MHz ó °C]

Una vez mostrados los resultados de temperatura es turno de analizarlos y decidir cuál es la combinación de todas las empleadas que puede ayudar a lograr un mejor resultado final. Aunque, como ya se ha mencionado en el capítulo anterior, la aplicación de temperatura en la medida conjunta no se realice en la cámara climática, sino mediante el empleo de agua como medio transmisor de calor, estas medidas pueden servir como guía en la elección de la anchura de pulso más apropiada. A continuación se muestran algunas conclusiones extraídas a partir de este proceso de medida:

- (1) En cuanto al comportamiento de la **anchura del espectro de ganancia**, todas las anchuras de pulso provocan una reducción del valor de la FWHM según aumenta la temperatura a la que la fibra es sometida. Según esto, parece que no existe una restricción en cuanto a qué anchura emplear, si bien, como muestran los resultados representados en la *Tabla 5.1*, los pulsos de anchura 10 y 100 ns son los que mayor ritmo de decrecimiento presentan, es decir, los que provocan que la anchura de ganancia de *Brillouin* sea más sensible a los cambios de temperatura. Igualmente, la diferencia con el resto de pulsos no es demasiado significativa.
- (2) En lo referido al **máximo de ganancia del BGS**, este presenta un comportamiento cuya tendencia no parece demasiado definida, a excepción del pulso de anchura 20 ns, el cual propicia un crecimiento constante de este valor conforme aumenta la temperatura. Sin embargo, como ya se ha mencionado, este hecho no es determinante y no será tenido en cuenta en la definición de la configuración final de medidas.
- (3) Finalmente, en lo que a la **uniformidad de la medida** respecta, esta aumenta cuanto mayor es la anchura de pulso. En este caso, la elección de la anchura de pulso dependerá del paso de temperatura que sea utilizado en la realización de las medidas finales, puesto que este deberá ser superior al error introducido en la medida, para de esta forma ser capaces de distinguir adecuadamente entre las diferentes clases definidas.

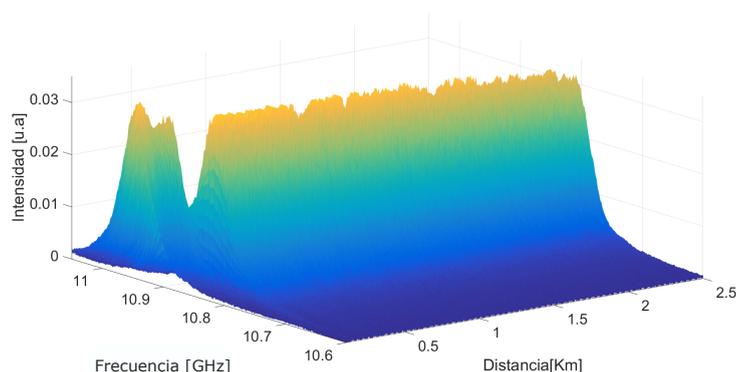
Como puede apreciarse, cuanto mayor es la anchura de pulso, generalmente, la tendencia tanto de la uniformidad como de la anchura del BGS es más adecuada para los propósitos de este trabajo. En este caso, el *hotspot* era de aproximadamente 2.6km, por lo que una resolución espacial de 10 m ( $\rightarrow$  Pulso 100 ns) podría ser empleada y aún así se dispondría de un conjunto suficiente de puntos. Sin embargo, como se verá posteriormente en el caso de las medidas de *strain*, no es posible disponer de un *hotspot* de tal tamaño, sino que este queda reducido a unas pocas decenas de metros, por lo que el aspecto de la resolución es más restrictivo. Por tanto,

se trata de solventar de la mejor forma posible el compromiso entre la **resolución** (número de puntos) y **comportamiento** respecto a **ensanchamiento espectral** y **uniformidad**.

### 5.1.2. Resultados de *strain*

Al igual que en la sección anterior, dedicada al estudio de los resultados obtenidos a partir de las medidas de temperatura, en este caso se hará lo propio con aquellos obtenidos a partir de las medidas de *strain*. De igual modo, en este caso se espera también que el comportamiento de la anchura espectral de *Brillouin* siga aquel demostrado en [25], de forma que temperatura y *strain* describan un comportamiento diferente respecto al ensanchamiento espectral para, de esta forma, servir como aspecto distintivo a la hora de realizar el correspondiente entrenamiento de la red neuronal. Así mismo, al igual que en el caso de las medidas de temperatura, se mostrarán resultados intermedios que permitan confirmar algunas de las afirmaciones que fueron llevadas a cabo teóricamente en el *Capítulo 2*.

De esta forma, se comienza por realizar una representación tridimensional de la traza distribuida de *Brillouin* en función de la posición. En este caso, la traza se corresponde con una anchura de pulso de 20 ns y un *strain* aplicado de 5 vueltas del desplazador lineal:

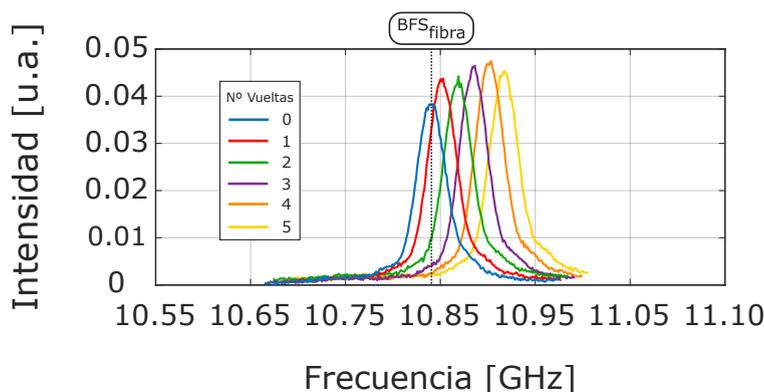


**Figura 5.8.** Perfil de *strain* distribuido

Como puede observarse, a diferencia de la representación correspondiente a la medida de temperatura (*Figura 5.1(a)*), en este caso únicamente unos pocos metros de fibra han sido sometidos a *strain*, por lo que solamente una zona de la curva ha sufrido un desplazamiento en frecuencia (*hotspot*), concretamente, la que se sitúa aproximadamente entre los kilómetros 0.09-0.125.

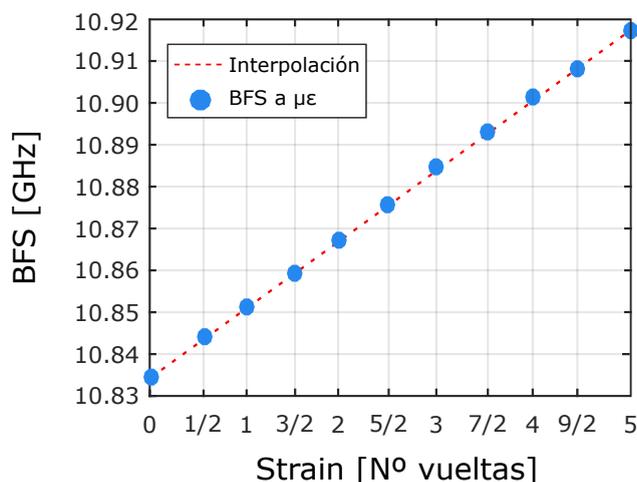
Por otra parte, si se analiza el comportamiento seguido por una traza perteneciente a dicho *hotspot*, para distintos valores de tensión aplicada, se obtiene una representación como la mostrada en la *Figura 5.9*.

En este caso, han sido representados pasos de 1 vuelta del desplazador lineal, o lo que es lo mismo, pasos de aproximadamente  $384\mu\epsilon$ . Al igual que ocurría en el caso de temperatura, los picos de intensidad no siguen una tendencia clara en función de la tensión aplicada. Aunque, en principio, este valor de intensidad debería disminuir conforme el *strain* aumenta, esto no se cumple por las mismas razones que no lo hacía en las medidas de temperatura: la ganancia es muy dependiente de las condiciones particulares de los equipos que intervienen en el proceso de medida (EDFA, aleatorizador de polarización, etc), y pequeñas variaciones camuflan la tendencia de este valor.



**Figura 5.9.** Espectro de ganancia de *Brillouin* para distintos valores de *strain*

Como puede observarse, también se cumple con estas medidas que el valor del BFS aumenta según el valor de tensión aplicada a la fibra también lo hace. La relación entre ambos, lineal según [25], se verifica en la *Figura 5.10*, donde se muestra el BFS obtenido en función de la tensión aplicada para una anchura de pulso de 20 ns y sobre una traza perteneciente al *hotspot*. Este valor de desplazamiento en frecuencia ha sido obtenido, al igual que en el caso anterior, a partir de un ajuste *Lorentziano-Gaussiano*, como la frecuencia asociada al valor máximo de dicha curva en cada caso. Además, al igual que en el caso de temperatura, se garantiza que la relación entre ambos parámetros es lineal en el rango de valores de tensión que han sido analizados, esto es, desde 0 hasta las 5 vueltas del desplazador aplicadas.

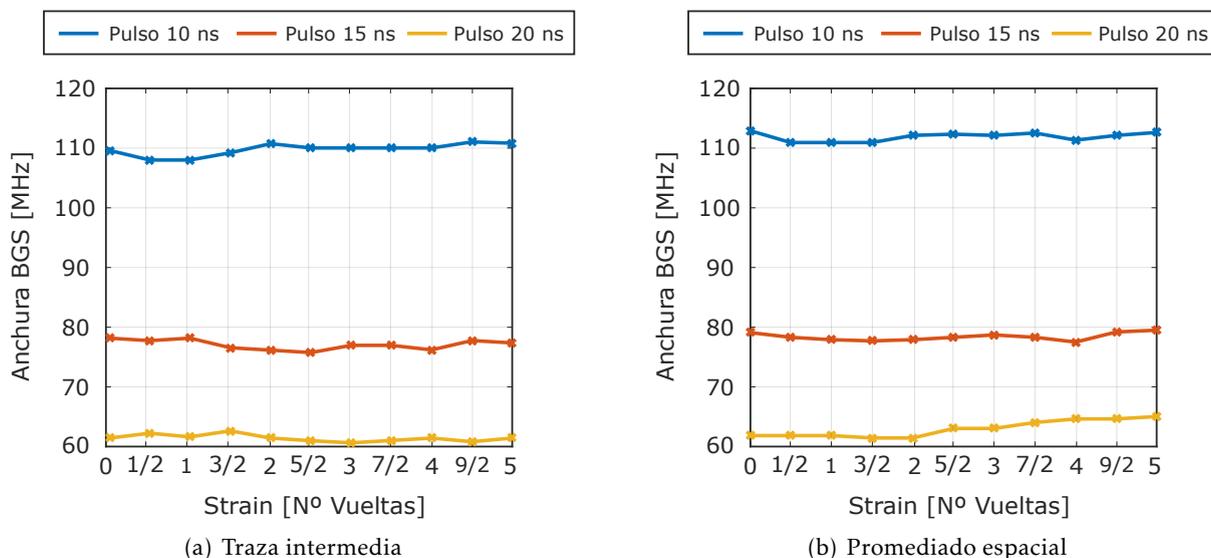


**Figura 5.10.** BFS en función del *strain* para una anchura de pulso de 20 ns

Una vez verificada la relación entre el BFS y el *strain* aplicado, es turno de hacer lo propio con el comportamiento de la anchura espectral y del pico de intensidad de las trazas para los distintos anchos de pulso. Como ya se ha mencionado previamente, en este caso únicamente se van a tener en cuenta anchos de pulso de 10, 15 y 20 ns, puesto que anchuras mayores implicarían una menor resolución, y esto no puede permitirse cuando se dispone de un *hotspot* limitado como en este caso.

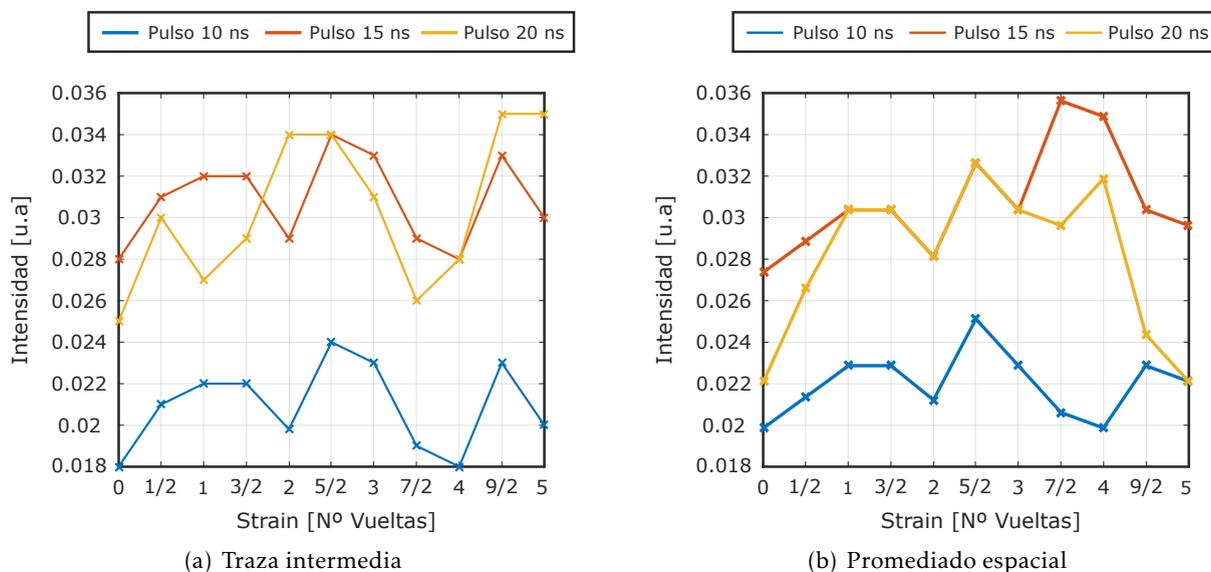
Para replicar el procedimiento que fue llevado a cabo en el caso del análisis de los resultados obtenidos tras la aplicación de temperatura, se procede a estudiar el comportamiento de la anchura espectral y del pico de intensidad para una traza concreta localizada dentro del *hotspot*, así

como para un promediado sobre todas las trazas que conforman dicho *hotspot*. Así, los resultados en el caso de la anchura espectral, a recordar, obtenida como el FWHM, se muestran en la *Figura 5.11*.



**Figura 5.11.** Dependencia del ancho de línea del BGS con el *strain*

Mientras que los correspondientes al pico de intensidad de dicho espectro se muestran en la *Figura 5.12*.



**Figura 5.12.** Dependencia del pico de intensidad del BGS con el *strain*

Respecto al comportamiento de la anchura espectral, en la *Figura 5.11* puede apreciarse como esta tiende a mantenerse constante, tal y como se presuponía. De especial interés es el caso del estudio del comportamiento de este parámetro sobre la zona más uniforme del *hotspot* (*Figura 5.11(b)*), pues este refleja la tendencia general de la anchura espectral de Brillouin cuando se aplica *strain*, en este caso sobre una zona de más de 30m. Puesto que a simple vista puede resultar

complicado determinar cuál es la anchura de pulso que proporciona una anchura espectral más constante, a continuación se muestra cuál sería el error cometido si se aproximaran las tres curvas por su valor medio, esto es, la desviación típica:

Anchura de pulso [ns]	10	15	20
Error aproximación media [MHz]	0.74	0.65	1.39

Tabla 5.3. Error anchura BGS aproximación valor medio

Es decir, el pulso de 15 ns es el más constante de los tres evaluados, pues es el que menos varía respecto a su valor medio. En cualquier caso, las tres anchuras de pulso proporcionan una evolución de la anchura del BGS lo suficientemente constante como para poder diferenciarse de la tendencia seguida en el caso de la temperatura, puesto que, en ese caso, para el mismo rango de estudio se producen decrecimientos de esta anchura como mínimo de 5 MHz (Figura 5.5). En otras palabras, las variaciones de la anchura espectral del espectro de ganancia de Brillouin cuando se aplica *strain* parecen lejos de confundirse con aquellas obtenidas cuando se aplica temperatura. De esta forma, en este punto se han verificado también las relaciones de dependencia de la anchura del BGS y el BFS con el *strain* aplicado, por lo que ya se dispone de información suficiente para poder distinguir entre temperatura y *strain* cuando ambos tengan lugar simultáneamente.

Por otro lado, atendiendo al comportamiento de la intensidad de pico del BGS, de la misma forma que ocurría con las medidas de temperatura, no existe un patrón definido para la tendencia de este valor, por lo que tampoco será considerado como parámetro distintivo en el posterior proceso de discriminación.

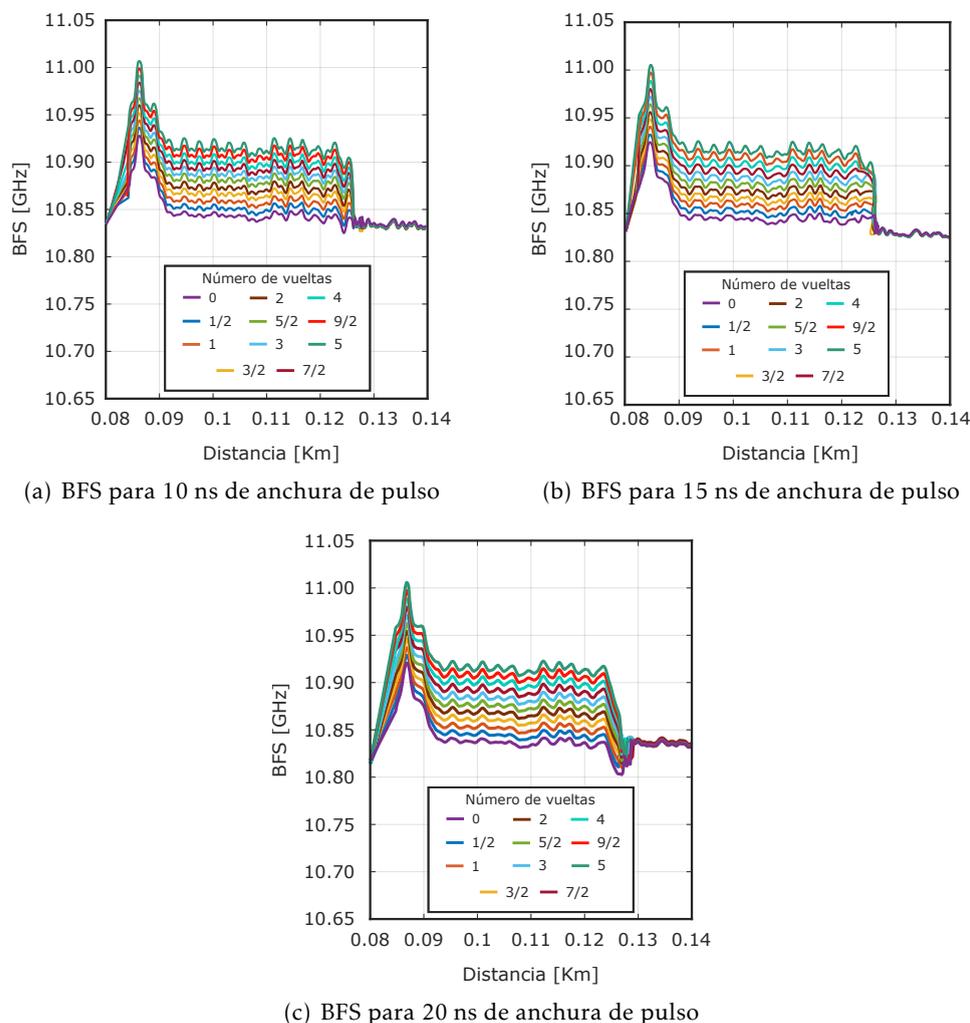
Adicionalmente, también es necesario analizar la uniformidad obtenida para los distintos anchos de pulso, algo especialmente complejo de conseguir cuando se trata de medidas de *strain*, como ya se ha mencionado en numerosas ocasiones a lo largo de este trabajo. De esta forma, en la Figura 5.13 se muestra el valor de BFS obtenido en función de la posición, naturalmente, dentro las posiciones delimitadas por el *hotspot*. A recordar de la sección correspondiente al análisis de los resultados de temperatura, el BFS es el parámetro que determinará la uniformidad de las medidas, pues este es obtenido a partir del espectro de ganancia de Brillouin.

Sin embargo, a partir de la representación gráfica resulta complicado decidir cuál es la anchura de pulso con la cual se obtiene una mayor uniformidad. Por ello, en la Tabla 5.4 se recogen los valores de desviación típica o desviación estándar del BFS para distintos valores de *strain* y anchura de pulso. Cabe señalar que estos valores de error han sido computados a lo largo de la zona más plana del *hotspot*, es decir, sin tener en cuenta los extremos donde se producen picos del BFS correspondientes a los puntos inicial y final de la porción de fibra sometida a la tensión.

	Strain [N° Vueltas]											
	0	1/2	1	3/2	2	5/2	3	7/2	4	9/2	5	
10	2.95	3.121	3.11	3.25	3.46	3.63	3.84	4.11	4.33	4.6	4.95	
15	3.00	3.18	3.36	3.52	3.67	3.82	3.91	4.01	4.17	4.4	4.47	
20	2.99	2.98	3.07	3.11	3.2	3.27	3.42	3.55	3.67	3.73	3.87	

Tabla 5.4. Desviación estándar ( $\sigma$ ) del BFS para distintas tensiones y anchuras de pulso [MHz]

Como era de esperar, y al igual que ocurría en el caso de la temperatura, a medida que aumenta



**Figura 5.13.** BFS en función de distancia y *strain* para distintas anchuras de pulso

el *strain* aplicado a la fibra, la uniformidad es menor. Respecto al comportamiento de cada pulso, el de anchura 20 ns es el que presenta un mejor comportamiento respecto a uniformidad, pues la desviación del BFS obtenido con el mismo es la menor. En cuanto a los pulsos de 10 y 15 ns, estos presentan una desviación muy similar, aunque parece que a medida que aumenta que el *strain* aplicado, el de 15 ns presenta un comportamiento más uniforme: preferible si se pretende ampliar el rango de tensión aplicada a la fibra.

Finalmente, puesto que esta configuración de medidas de *strain* va a ser la que se emplee cuando se lleven a cabo las medidas finales, puede ser interesante analizar la capacidad que este esquema tiene para reproducir medidas en el tiempo. Es decir, interesa que se cometa el mínimo error entre dos medidas con los mismos parámetros de anchura de pulso, valor de *strain*, promediado, etc., realizadas en instantes temporales distintos; puesto que de nada sirve el análisis de los resultados obtenidos llevado a cabo en esta sección, si cuando se proceda a configurar el esquema final de medidas el comportamiento es diferente. De esta forma, la *Tabla 5.5* recoge el error máximo cometido entre medidas consecutivas para las distintas anchuras de pulso y valores de tensión que han sido tenidos en cuenta a lo largo de esta sección.

	Strain [N° Vueltas]											
	0	1/2	1	3/2	2	5/2	3	7/2	4	9/2	5	
Anchura pulso [ns]	10	1.49	1.049	0.88	0.96	0.72	1.52	1.2	1.07	1.75	0.94	1.13
	15	0.58	1.68	0.35	1.81	0.51	0.46	0.55	0.72	0.47	0.63	0.59
	20	0.39	0.08	0.11	0.36	0.23	0.19	0.3	0.34	0.17	0.25	0.29

**Tabla 5.5.** Error entre medidas consecutivas de *strain* en las mismas condiciones [MHz]

Como puede observarse en los resultados recogidos en esta tabla, los errores entre distintas medidas no sobrepasan los 2 MHz, un error asumible teniendo en cuenta que las medidas han sido llevadas a cabo a lo largo de distintas fases del día, donde la temperatura ambiente sufre variaciones que directamente afectan a las medidas, pues obviamente el sensor es sensible a estos cambios. Además, también puede apreciarse como el error entre ellas es menor cuanto mayor es la anchura del pulso, es decir, menor error se cometerá al replicarlas cuanto mayor sea la anchura del pulso empleado.

Una vez analizados por completo los resultados obtenidos a partir de estas medidas, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- (1) En cuanto al comportamiento de la **anchura del espectro de ganancia**, las tres anchuras de pulso evaluadas presentan una tendencia constante cuando se producen cambios en el *strain* aplicado a la fibra, resultando la de 15 ns la que presenta un comportamiento más constante. Sin embargo, cualquier anchura de pulso sería válido, pues los cambios de anchura espectral que tienen lugar cuando se producen cambios de temperatura en el mismo rango son como mínimo 5 veces superior, suficiente para distinguir cambios en ambos parámetros.
- (2) En lo referido al **máximo de ganancia del BGS**, este presenta un comportamiento cuya tendencia no parece demasiado definida, por lo que no será tenido en cuenta en el proceso de discriminación.
- (3) Por otro lado, en lo que a la **uniformidad de la medida** respecta, esta es mayor cuanto mayor es la anchura del pulso. En este caso, será el paso tomado en las medidas de ambos parámetros de forma conjunta el que determine la máxima desviación admisible, teniendo en cuenta la que es introducida de forma aditiva por la aplicación de cambios de temperatura.
- (4) Finalmente, este esquema de medida demuestra que puede proporcionar medidas fácilmente replicables con un error relativamente pequeño, menor cuanto mayor anchura de pulso se emplea.

Tras haber analizado los resultados obtenidos a partir de ambas medidas, se dispone de información suficiente para seleccionar el pulso que, finalmente, mejores resultados de clasificación pueda reportar. Concretamente, se procederá a emplear un pulso de 20 ns en la realización de las medidas finales (*strain* y temperatura), por los motivos que se enumeran a continuación:

- (1) La resolución ofrecida por esta **anchura de pulso**, 2 m, es adecuada para disponer de un conjunto suficiente de puntos que estén sometidos a variaciones de *strain* y temperatura, siempre y cuando se aumente el *hotspot* respecto al de las medidas individuales de *strain*.

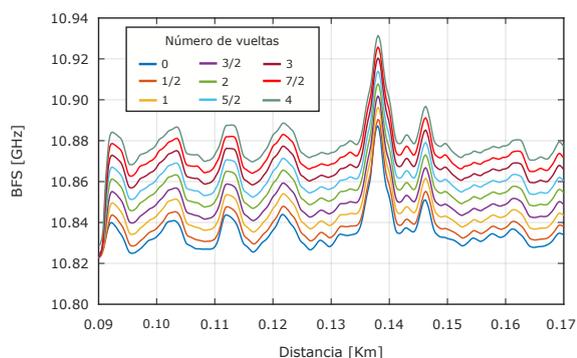
- (2) El **ancho de banda** resultante de la aplicación de temperatura o *strain* en el rango de estudio se sitúa en torno a los 60 MHz, un valor más que aceptable.
- (3) En el rango de temperatura-*strain* analizado, las variaciones de anchura espectral experimentadas por cada uno de estos parámetros distan lo suficiente como para poder distinguirse. En el caso de la temperatura, se produce un decremento de la **anchura espectral** de unos 6 MHz, mientras que en el caso del *strain* se producen una variación media de, aproximadamente, 1.4 MHz.
- (4) En lo relativo a **uniformidad** de las medidas, en ambos casos se obtiene una desviación que apenas supera los 3 MHz, es decir, aproximadamente 6 MHz de desviación si se aplicaran ambos de forma simultánea, lo cual permite emplear un paso relativamente pequeño entre medidas (media vuelta de *strain*  $\approx 8^\circ\text{C}$  de temperatura).
- (5) Aunque **anchuras de pulso mayores** proveen, en términos generales, un mejor comportamiento en lo relativo a los tres puntos anteriores, la limitación del *hotspot* de fibra sometido a tensión es tal que un aumento del tamaño del pulso implicaría un menor número de puntos, es decir, un menor número de entradas para la red neuronal, lo que la dificultaría el proceso de clasificación.
- (6) Por otro lado, **anchuras de pulso menores** conllevarían disponer de un mayor número de puntos, pero rondar los 10 ns de anchura puede perjudicar más que beneficiar, pues este es el tiempo de vida medio de un fonón acústico, con lo que podría ser que cuando se produce la interacción pulso-prueba el campo acústico no se llegue a formar completamente, produciéndose un ensanchamiento del espectro de ganancia de Brillouin que, potencialmente, podría camuflar, entre otras cosas, la tendencia seguida por el BFS cuando se producen cambios de *strain* y temperatura. Además, a esto hay que añadirle la complejidad de generar un pulso de un tamaño tan pequeño con la precisión adecuada. Al mínimo error en el orden de los nanosegundos en la generación del mismo, podría darse el caso que no se produzca suficiente *scattering* estimulado.

### 5.1.3. Resultados de temperatura y *strain*

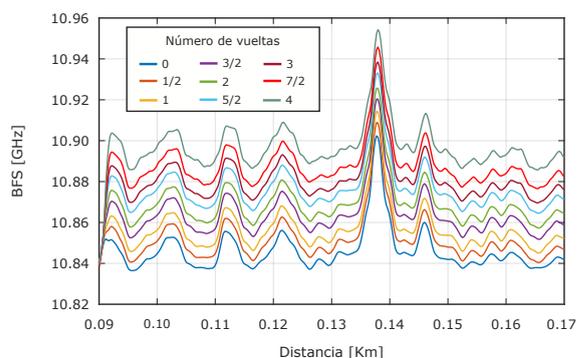
En esta última parte de análisis de resultados se van a tratar aquellos obtenidos a partir de las medidas conjuntas de temperatura y *strain*. Como ya se señaló en el capítulo anterior, el proceso de realización de estas medidas es especialmente delicado, puesto que, si bien las medidas individuales de *strain* implican una gran complejidad, incluir la temperatura lo hace aún más complejo; pues no solo es necesario lograr un valor de *strain* uniforme a lo largo de todo el tramo de fibra, si no que la temperatura también debe ser uniforme en ese mismo tramo.

En esta ocasión, no se realizará un análisis tan en profundidad como en las secciones anteriores, para evitar caer en conclusiones redundantes. Por tanto, se mostrarán, a modo de comprobación, algunas gráficas representativas de la uniformidad obtenida en estas medidas, pues debido al empleo de una anchura de pulso de 20ns, se ha estimado oportuno aumentar la longitud de fibra correspondiente al *hotspot*, de forma que pueda disponerse de un mayor número de puntos a costa de perjudicar levemente la uniformidad de las medidas.

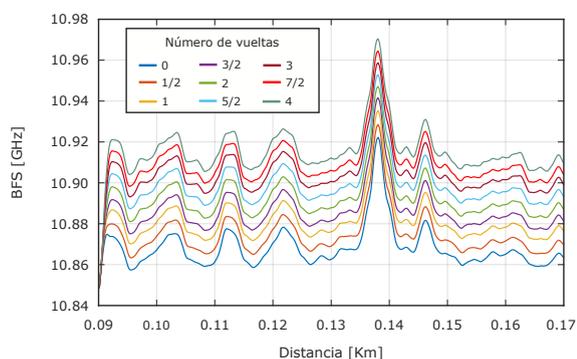
Con todo ello, en la siguiente figura se muestran los resultados relativos al BFS obtenidos para cada uno de los valores de temperatura y *strain* evaluados, realizando un promedio sobre las 8 medidas llevadas a cabo:



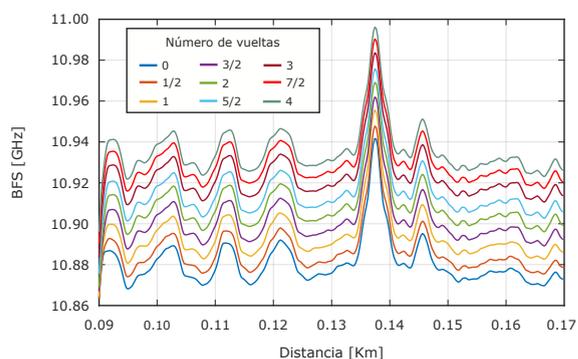
(a) BFS a temperatura ambiente ( $\approx 22^{\circ}\text{C}$ )



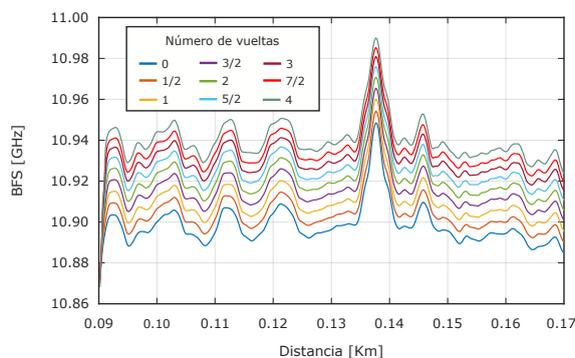
(b) BFS a temperatura de  $32^{\circ}\text{C}$



(c) BFS a temperatura de  $42^{\circ}\text{C}$



(d) BFS a temperatura de  $52^{\circ}\text{C}$



(e) BFS a temperatura de  $62^{\circ}\text{C}$

**Figura 5.14.** BFS en función de distancia para distintos valores de *strain* y temperatura

Como puede apreciarse, en todas las figuras se observa una zona donde existe un pico de desviación del BFS superior a 40 MHz. Esto, sin ninguna duda, es debido a que una de las vueltas que han sido arrolladas sobre las ruedas (ver *Figura 4.13*) ha sido colocada con una tensión muy superior al resto. A la hora de servir como entrada para la red neuronal, los espectros asociados a esta zona (en torno a 0.14 Km) serán descartados<sup>1</sup>, por desviarse tanto de la media que su contribución pueda afectar a un gran conjunto de clases.

De igual forma, en la siguiente tabla se muestra de forma cuantitativa la uniformidad de los resultados obtenidos, a través de la desviación estándar del BFS, para cada uno de los valores de

<sup>1</sup>Las observaciones que distan mucho del resto son denominadas *outliers*, y su contribución suele afectar notablemente a la capacidad de generalización de una red neuronal, por lo que típicamente son descartados.

temperatura y *strain* considerados (NOTA: los valores obtenidos no tienen en cuenta la desviación sufrida en torno a los 0.14 Km):

	Strain [N° Vueltas]									
	0	1/2	1	3/2	2	5/2	3	7/2	4	
Temperatura [°C]	22	4.41	4.51	4.60	4.75	4.68	4.81	4.85	4.87	4.94
	32	5.29	5.68	5.74	5.69	5.69	5.83	5.84	5.86	5.84
	42	5.57	5.64	5.65	5.76	5.85	5.86	5.88	5.96	5.93
	52	5.64	5.67	5.68	5.90	5.93	5.94	5.97	5.96	5.98
	62	5.98	6.1	6.13	6.35	6.49	6.52	6.74	6.76	6.97

**Tabla 5.6.** Desviación estándar ( $\sigma$ ) del BFS para distintos valores de *strain* y temperatura [MHz]

En este caso, como puede apreciarse, la desviación estándar del BFS es mayor que la obtenida cuando solo se aplicaba *strain* a la fibra (ver *Tabla 5.4*), pues no solo los cambios en el valor de *strain* contribuyen a la uniformidad de los resultados, si no que los de temperatura contribuyen con una desviación que se suma a la primera. Respecto al caso correspondiente a un valor de temperatura de 22 °C, temperatura ambiente, el error es ligeramente superior al que fue obtenido en las medidas individuales de *strain*, con la configuración expuesta al efecto del aire. Este hecho se debe simplemente a que, en ese caso, se enrollaron un total de 35 metros de fibra, mientras que ahora, son algo más de 70 metros los que han sido dispuestos. Es por ello que existe esa diferencia, pues a mayor longitud del *hotspot*, más dificultad para obtener uniformidad en el mismo.

## 5.2. Procesado de datos

Los resultados analizados en la sección anterior son de gran relevancia y poseen una gran influencia sobre los que serán analizados en esta, pero estos últimos son los que finalmente determinarán cuánto de bien ha sido capaz de distinguir entre temperatura y *strain* todo el sistema completo. En este punto, quizá sea interesante ilustrar donde se ubica este procesado de datos dentro de la problemática del trabajo. De esta forma, en la *Figura 5.15* se contextualiza de forma gráfica la operativa de trabajo seguida una vez han sido obtenidos los datos a partir de la configuración BOTDA detallada en el capítulo anterior.

Como puede extraerse de la figura, los espectros obtenidos a partir de la configuración BOTDA son tratados en primera instancia por lo que se denominará el preprocesado de datos. Ahí, dichos espectros atravesarán un proceso de adaptación específico para este problema en cuestión, diseñado a partir de los resultados obtenidos. A continuación, mediante el empleo de la red neuronal se tratará de clasificar los espectros en función de la clase de entrada a la que pertenezcan, esto es, según sea el valor de *strain* y temperatura que se corresponda con cada espectro. A partir del entrenamiento de esta red, se procederá a evaluar su rendimiento.

Para el propósito de este trabajo, diferentes estrategias han sido utilizadas desde el punto de vista de procesado de datos con el fin de tratar de conseguir el mejor resultado de clasificación posible. Precisamente, en los siguientes apartados se detallará cuál ha sido este procesado de datos y se procederá a analizar los resultados de clasificación obtenidos en cada caso.

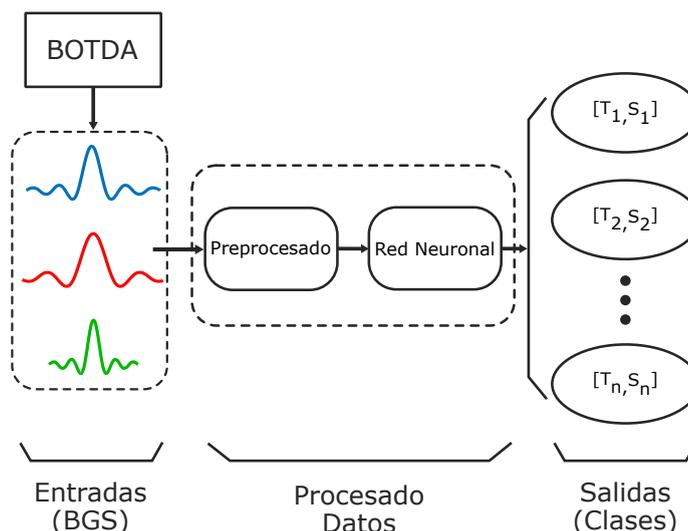


Figura 5.15. Operativa de clasificación a partir de las medidas experimentales

### 5.2.1. Técnicas de preprocesado de datos

La adaptación de los datos previa aplicación de cualquiera que sea la técnica de inteligencia artificial a emplear es una práctica muy común en cualquier problema de este tipo. En el caso particular de este trabajo, diferentes son las estrategias que han sido evaluadas una vez analizados los datos obtenidos. A continuación, se procede a enumerarlas y justificar su aplicación.

#### Normalización de los espectros de ganancia

Puesto que el valor de intensidad de los espectros de ganancia de *Brillouin* no aporta información, como ya se justificó en las secciones correspondientes a los análisis de los resultados tanto de temperatura como de *strain*, se procederá en todos los casos a normalizar estos espectros, ya que su influencia puede resultar incluso negativa, pues espectros pertenecientes a la misma clase pueden variar en sus valores de intensidad y convertirse en una característica distintiva descontrolada. Por tanto, previa aplicación de cualquier otra técnica, se realizará una normalización de los espectros de ganancia.

#### Filtrado espacial

En este caso, por filtrado espacial se entiende la eliminación de los espectros cuya desviación es tal que puede interferir en una o varias clases adyacentes, produciendo confusión en el entrenamiento de la red neuronal. Como ejemplo práctico, si se considera un espectro correspondiente a una temperatura de 32 °C y 1 vuelta de *strain*, y su desviación es tal que le hace corresponderse con uno de temperatura 42 °C y 1 vuelta de *strain*, se estará etiquetando una entrada como correspondiente a una clase determinada y, debido al error, en realidad su espectro correspondiente se parecerá más al de la clase adyacente.

Por ello, se ha optado por eliminar todos los espectros cuya desviación en frecuencia del BFS asociado sea mayor de 5 MHz. Además, cabe señalar que este preprocesado se realizará en todos los casos, previa aplicación de cualquier otra técnica.

### Ajuste *Lorentziano-Gaussiano*

En la *Sección 2.3*, dedicada a la descripción teórica de la configuración BOTDA, ya se anticipó que los espectros de ganancia de *Brillouin* presentaban una forma idealmente *Lorentziana* en la parte superior, y *Gaussiana* en las colas. Aprovechando este hecho, se va a analizar el comportamiento de la red neuronal cuando se introduce el ajuste *Lorentziano-Gaussiano* asociado a cada espectro.

### Análisis de Componentes Principales

En la *Sección 3.2.1* se realizó una breve descripción del Análisis de Componentes Principales o *Principal Components Analysis* desde un punto de vista teórico. En este caso, se va a emplear esta técnica para tratar de reducir el número de variables introducidas a la red neuronal (251 por defecto, una por cada frecuencia del espectro) y que, de esta forma, el proceso de entrenamiento se simplifique y los resultados obtenidos sean mejores.

En cuanto a su modo de aplicación, los PCA se aplicarán a los espectros que han *sobrevivido* al proceso de filtrado y ya han sido normalizados. Además, se aplicarán también una vez realizado el ajuste *Lorentziano-Gaussiano* para analizar cuál es la opción que mejores resultados de clasificación aporta.

### Selección manual de variables

Como medida alternativa a la selección de variables mediante el empleo del Análisis de Componentes Principales, se propone escoger de forma manual dichas variables. De esta forma, puesto que una de las características distintivas entre *strain* y temperatura, como ya se ha demostrado, es la tendencia de la anchura del BGS, se ha determinado definir una variable que sea precisamente el valor de dicha anchura cuando el espectro en cuestión es ajustado según el ajuste *Lorentziano-Gaussiano*. Además, una segunda variable que contiene el valor del BFS (a recordar, obtenido como el valor correspondiente al pico del BGS) es definida. Así, dos son las variables que se corresponden con cada espectro de entrada.

#### 5.2.2. Entrenamiento de la red neuronal

Una vez descritas las distintas técnicas de preprocesado de datos consideradas en este trabajo, se procede a realizar el entrenamiento de la red neuronal. En este caso, se variará el número de neuronas de la capa de entrada en los casos en los que el preprocesado de datos lo suponga, así como el número de neuronas de la capa intermedia, hasta encontrar los mejores resultados posibles. En cualquier caso, el número de neuronas de la capa de salida no cambiará, pues este depende de las clases de salida existentes, 40 en nuestro caso (una para cada valor de *strain* y temperatura → *Tabla 4.4*).

Además, en todos los casos, se empleará una división de los conjuntos de entrenamiento, validación y *test* del 70, 15 y 15%, respectivamente, obtenidos del conjunto inicial a partir de una división aleatoria. Además, como ya se señaló en el *Capítulo 3*, el algoritmo de entrenamiento empleado es el de gradiente conjugado. Respecto a la salida, se empleará el criterio *softmax*, por lo que los valores de salida serán interpretados como probabilidades y la salida activada será la

de mayor valor (probabilidad).

El esquema conceptual de la red neuronal, independientemente de cuál haya sido la técnica de preprocesado de datos empleada, se muestra en la siguiente figura:

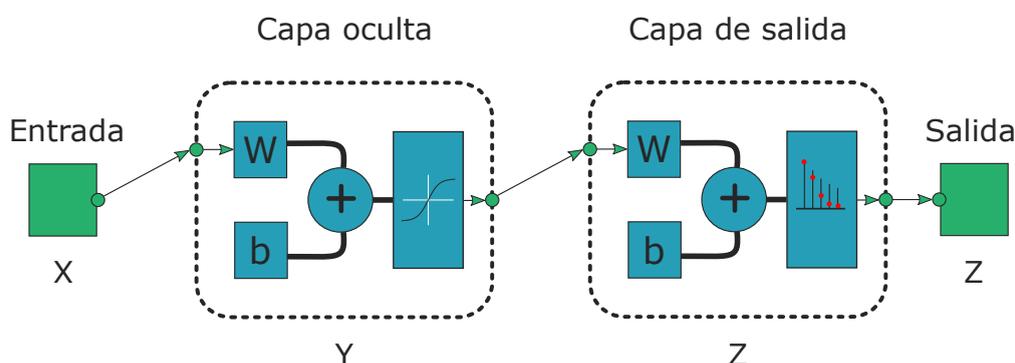


Figura 5.16. Esquema conceptual red neuronal

Donde  $X$  es el número de variables a la entrada,  $Y$  es el número de neuronas de la capa intermedia y  $Z$  es el número de clases a la salida. Esta última variable tomará siempre el valor 40, pues son las clases definidas. Respecto al valor de  $X$ , este variará según se introduzca el espectro con todas sus componentes frecuenciales, se apliquen PCAs o una selección manual de las variables de entrada. Finalmente, el valor de  $Y$  servirá para evaluar el rendimiento de la red en función del número de neuronas de la capa intermedia.

Además, la cuantificación de dicho rendimiento se realizará atendiendo principalmente a dos parámetros: la entropía cruzada (*cross-entropy*) y el porcentaje de acierto en clasificación. El segundo de ellos, generalmente utilizado, mide cómo de bien clasifica la red. Es decir, su valor es obtenido como el número de veces que la red ha clasificado satisfactoriamente entre el total de intentos. Sin embargo, el primero, la entropía cruzada, mide cuánto de cerca o lejos está la red de que el valor de la salida coincida con el objetivo. De esta forma, la entropía cruzada actúa penalizando mucho los casos en los que la salida  $y$  discrepa mucho del objetivo  $t$  ( $y$  cerca de  $1 - t$ ), y penalizando levemente los casos en los que  $y$  está muy próximo a  $t$ . Concretamente, para cada par salida-objetivo ( $y-t$ ), la entropía cruzada se calcula como  $ce = -t \cdot \log(y)$ , y minimizar este valor se traduce en mejorar el rendimiento de la red.

### 5.3. Resultados finales de clasificación

De todas las técnicas de preprocesado de datos descritas en la Sección 5.2.1 que han sido evaluadas, la que mejores resultados ha proporcionado es la que aplica PCA sobre los espectros normalizados que han pasado el filtrado espacial. Ni el ajuste *Lorentziano-Gaussiano* ( $\approx 60\%$  de generalización en el mejor caso), ni la selección manual de variables de entrada ( $\approx 70\%$  de generalización en el mejor caso) han sido capaces de mejorar estos resultados (*Anexo II*).

Los resultados de clasificación en función del número de neuronas de la capa intermedia se recogen en la *Tabla 5.7*.

Como puede observarse, el mejor resultado de clasificación se obtiene para un total de 80 neuronas. En ese caso, la red presenta una capacidad de generalización del 88.2%, justamente el valor de la precisión de la red cuando se introducen espectros pertenecientes al conjunto de *test*.

Además, para este número de neuronas, si se observa la evolución de la entropía cruzada

Nº Neuronas	Precisión Entrenamiento[%]	Precisión Validación[%]	Precisión Test[%]	Precisión Total[%]
20	86.9	77.5	77.1	84
25	88.3	78.7	78.5	85.4
30	88.1	80.4	80	85.73
35	88.9	81.4	80.6	86.53
40	91.3	82.2	82.7	88.65
50	93.8	83.6	83.8	90.77
80	96.8	87.7	88.2	94.1

Tabla 5.7. Resultados de clasificación red neuronal tras aplicar PCAs

con el número de iteraciones se obtiene un resultado como el representado en la *Figura 5.17*. En esta gráfica puede apreciarse como, a medida que aumenta el número de iteraciones, la entropía cruzada para el conjunto de entrenamiento disminuye permanentemente. En cambio, para los otros dos conjuntos (validación y *test*), este valor tiende a hacerse constante cuando se sobrepasa la iteración número 47. Precisamente, en ese punto se consigue el mínimo de entropía cruzada para ambos conjuntos y ahí termina el entrenamiento de la red neuronal; pues en ese punto se cumple que la entropía cruzada del conjunto de validación deja de decrecer, una de las condiciones para terminar con el proceso de entrenamiento.

Otro aspecto relevante a destacar es el hecho de que la curva asociada al conjunto de entrenamiento no se desvíe demasiado de las otras dos, motivo que parece indicar que la red no se está sobreajustando demasiado al conjunto de entrenamiento.

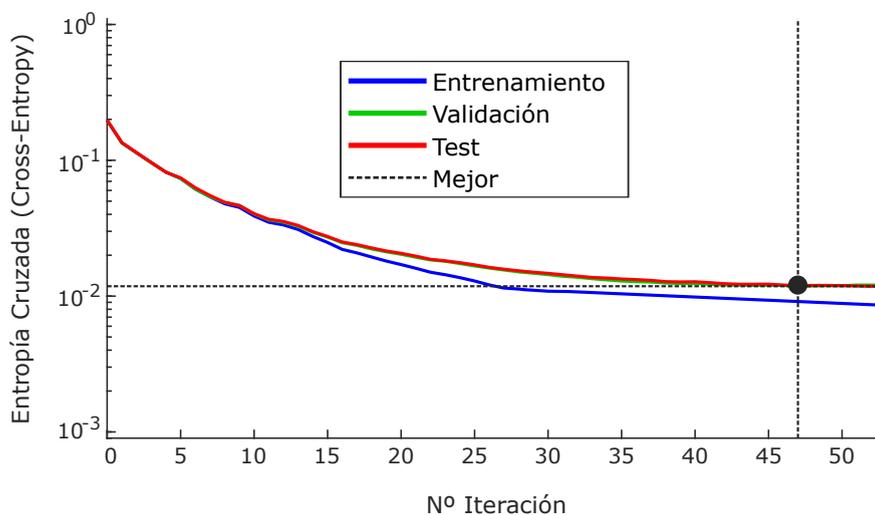


Figura 5.17. Entropía cruzada para entrenamiento, validación y test

Finalmente, mencionar que aunque han sido evaluadas otras técnicas de inteligencia artificial como el *Deep Learning*, tratando los datos obtenidos como imágenes en lugar de como simples números, los resultados obtenidos no han conseguido superar estos aquí reportados. Esto no implica que esta configuración de red neuronal sea la que mejores resultados proporcione, pues el campo de la IA es tan extenso que es probable que exista alguna forma alternativa de obtener unos mejores resultados de clasificación.

# CAPÍTULO 6

## Conclusiones y líneas futuras

Una vez analizados todos los resultados asociados al proceso de medida y clasificación, es turno de recapitular y evaluar el trabajo desde el punto de vista del cumplimiento de los objetivos que en el primer capítulo fueron definidos. Además, también supone una tarea de igual importancia el reflexionar sobre las posibles líneas de mejora a partir de las cuales puedan obtenerse unos resultados potencialmente mejores en el futuro. De este modo, este último capítulo del trabajo queda dividido en dos pequeñas secciones: la primera, dedicada a la evaluación del trabajo; la segunda, dedicada a las líneas de mejora futura.

### 6.1. Evaluación del trabajo

Como ya se anticipó en la *Sección 3.1*, la motivación principal de este trabajo ha sido tratar de mejorar los resultados finales de clasificación que fueron obtenidos en [29]. Como ahí se indicó, el motivo principal de la obtención de unos resultados de clasificación relativamente bajos pudo ser el empleo como señal de bombeo de un pulso cuya anchura rondaba el tiempo de vida medio del fonón acústico. De esta forma, el proceso de *scattering* estimulado de *Brillouin* no proporcionaba a la prueba la suficiente ganancia, ensanchando el espectro excesivamente, y camuflando por tanto el efecto de la aplicación de temperatura o *strain* sobre dicho espectro.

Tras esto, a lo largo de este trabajo se han analizado diferentes configuraciones tanto físicas, como de parámetros de medida, con el fin de tratar de mejorar estos resultados de clasificación. Tras un análisis detallado de como afecta la anchura de pulso a la *calidad* de las medidas, se ha resuelto tomar como duración del pulso 20 ns. El comportamiento de esta anchura frente al ensanchamiento del espectro de ganancia, la resolución espacial y la uniformidad de las medidas lo han convertido en el perfecto candidato para servir como señal de bombeo en el esquema BOTDA implementado.

Una muestra evidente de la mejora introducida por la modificación de la duración del pulso empleado son los resultados de clasificación finalmente obtenidos. Para una red neuronal formada por tres capas (entrada, capa oculta y salida), han sido obtenidos resultados de clasificación superiores a aquellos obtenidos en [29]. Concretamente, cuando son 80 las neuronas que constituyen la capa oculta de la red, esta es capaz de generalizar con una precisión del 88.2%.

## 6.2. Líneas de mejora

Aunque se ha conseguido el objetivo principal de mejorar los resultados de clasificación obtenidos, siempre existe algún punto de mejora que puede permitir conseguir unos resultados incluso mejores. Teniendo en cuenta que el desarrollo práctico puede dividirse en dos partes bien diferenciadas: (1) obtención de datos a partir de la configuración BOTDA implementada y (2) procesado de dichos datos y clasificación mediante redes neuronales; a continuación se describen las potenciales líneas de mejora que surgen tras el análisis de los resultados obtenidos.

► Desde el punto de vista experimental:

- (1) Para el rango de temperaturas que ha sido evaluado en este trabajo, el agua sirve como elemento transmisor de calor. Sin embargo, el empleo de una cámara específica para tal propósito podría proporcionar una temperatura más controlada en lo que a uniformidad se refiere.
- (2) La forma en la que ha sido aplicado *strain* a la fibra ha logrado aportar unos resultados de uniformidad suficientes. El hecho de tener que aplicar cambios de temperatura y *strain* a la fibra de forma simultánea limita enormemente la forma en la que este último es aplicado. Aunque pueda resultar complejo, sería conveniente tratar de encontrar un configuración alternativa que permita conseguir unos resultados más uniformes.

► Desde el punto de vista de procesado de datos:

- (1) El empleo de una red neuronal simple ha logrado aportar unos resultados satisfactorios. Sin embargo, el campo de la inteligencia artificial es tan amplio y existen tantas formas diferentes de abordar los problemas, que es probable que exista alguna técnica con la que estos resultados de clasificación puedan ser mejorados tomando como datos aquellos obtenidos con el mismo esquema de medidas.
- (2) Aunque en este trabajo también ha sido evaluado (*Convolutional Neural Networks - CNN, Autoencoders, etc.*), pero sin lograr los resultados esperados, la aplicación de técnicas de aprendizaje profundo (*Deep Learning*) se plantean como una alternativa a la mejora de resultados. La infinidad de variantes que ofrecen estas técnicas de IA, tan empleadas en la actualidad, hacen que su empleo hasta la obtención de unos resultados satisfactorios sea un proceso complejo.

De esta forma, con estas propuestas se trata de motivar la continua mejora de resultados en lo que a la discriminación entre temperatura y *strain* se refiere en sistemas BOTDA convencionales. Pese a que los resultados obtenidos en este trabajo han supuesto una gran mejora en este proceso de discriminación, existe aún un margen que podría ser explorado.

# Anexo I

Este primer anexo del trabajo contiene una breve descripción del algoritmo de entrenamiento empleado durante el entrenamiento de la red neuronal, a modo de ampliación de la información provista en la *Sección 3.2.2*. Aunque el algoritmo resulta bastante complejo y su entendimiento escapa los objetivos de este trabajo, a continuación se detalla la descripción en *pseudo-código* del mismo, con la finalidad única de resultar un poco más transparente al lector la forma en la que este problema (entrenamiento de la red neuronal) va a ser resuelto.

Así, si se considera la resolución de un sistema de ecuaciones lineal genérico  $A \cdot x = b$ , siendo  $A$  una matriz real, simétrica y definida positiva<sup>1</sup>; y siendo  $x_0$  una solución aproximada ó 0, entonces se tiene lo siguiente:

---

**Algoritmo 1** Descripción en *pseudo-código* del método de gradientes conjugados

---

```
1:  $r_0 := b - Ax_0$ 
2:  $\rho_0 := r_0$ 
3:  $k := 0$ 
4: While 1:
5:    $\alpha_k := \frac{r_k^T r_k}{p_k^T A p_k}$ 
6:    $x_{k+1} := x_k + \alpha_k \rho_k$ 
7:    $r_{k+1} := r_k - \alpha_k A \rho_k$ 
8:   if  $r_{k+1}$  is sufficiently small then
9:     exit loop
10:  end if
11:   $\beta_k := \frac{r_{k+1}^T r_{k+1}}{r_k^T r_k}$ 
12:   $\rho_{k+1} := r_{k+1} + \beta_k \rho_k$ 
13:   $k := k + 1$ 
14: Result:  $x_{k+1}$ 
```

---

Donde  $r_k$  es el error en el  $k$ -ésimo paso,  $\rho_k$  el vector de los conjugados de la iteración  $k$ -ésima.

De esta forma, MATLAB actualiza el valor de los pesos una vez ejecutado el algoritmo de entrenamiento de manera *offline*, es decir, una vez han sido propagadas por la red todas las medidas de entrada del subconjunto de entrenamiento.

---

<sup>1</sup>Una matriz cuadrada de orden  $n$  es definida positiva si las  $n$  raíces de su polinomio característico son mayores que 0.

## Anexo II

Este segundo anexo del trabajo trata brevemente el impacto del ruido de intensidad<sup>1</sup> en el sistema de medida BOTDA empleado en las medidas experimentales llevadas a cabo a lo largo del trabajo. Aunque en el *Capítulo 5* no se detallan, por cuestiones de extensión, los resultados de clasificación obtenidos introduciendo directamente a la red neuronal los espectros obtenidos del proceso de medida, ni aquellos que han pasado previamente por un ajuste *Lorentziano-Gaussiano*; los resultados de clasificación son mejores en el primer caso que el segundo.

Aunque la hipótesis de partida para la distinción entre *strain* y temperatura es el comportamiento que exhibe la anchura del espectro de ganancia de *Brillouin*, parece que el comportamiento de este ruido proporciona información adicional que permite llevar a cabo una discriminación más precisa.

De esta forma, pese a que en todas las medidas que han sido realizadas la distribución de probabilidades del ruido es normal o *gaussiana*, existe entre ellas una diferenciación en la varianza que podría actuar como otro parámetro de distinción entre las clases definidas. En lo referido a la media, esta toma siempre un valor nulo.

Para comprobarlo, en la siguiente tabla se recogen los valores de varianza ( $\sigma^2$ ) del ruido, para cada una de las clases definidas en el *Capítulo 5*, obtenidos a partir de una normalización de los espectros de ganancia (*NOTA: los valores que están mostrados quedan multiplicados por un factor  $10^{-4}$* ).

	Strain [N° Vueltas]								
	0	1/2	1	3/2	2	5/2	3	7/2	4
Temperatura [°C]	22	1.9576	2.1673	2.2137	2.2256	2.2463	2.4432	2.4577	2.5295
	32	1.8351	1.9512	1.9188	1.9824	2.0424	2.1137	2.3413	2.3853
	42	1.9743	2.007	2.2070	2.2716	2.2187	2.3703	2.4951	2.5748
	52	1.8224	1.8938	1.9237	1.9418	2.1804	2.3396	2.4198	2.5391
	62	1.9871	2.0885	2.1870	2.3531	2.4302	2.5666	2.6631	2.6935

**Tabla A1.** Varianza ( $\sigma^2$ ) del ruido para BGS normalizado en intensidad [u.a]

<sup>1</sup>Este ruido es obtenido como la diferencia de intensidad normalizada entre la medida obtenida y su correspondiente ajuste *Lorentziano-Gaussiano* en la zona del *hotspot*

Aunque, como se observa en la tabla, la relación entre los cambios en el valor de la temperatura aplicada a la fibra y la varianza del ruido no sigan una tendencia concreta; se observa como, a medida que aumenta el valor de *strain* aplicado, aumenta la varianza del ruido. Es decir, con el aumento del *strain*, aumenta la dispersión del ruido. Este aspecto tiene gran relevancia en los resultados obtenidos, puesto que para distinguir entre clases con distinta temperatura se dispone de la tendencia decreciente del ancho del BGS; pero, sin embargo, dentro de una misma temperatura, parece que la tendencia de dicha anchura con el aumento de *strain* no varía suficiente como para ser un elemento distintivo.

Por ello, esta dependencia del ruido de intensidad con el *strain* parece ser el principal motivo por el cual los resultados de clasificación obtenidos cuando se alimenta a la red neuronal con el espectro obtenido a partir del proceso de medida son mejores que aquellos que se obtienen cuando se introducen como parámetros únicamente la anchura espectral y el desplazamiento en frecuencia.

# Bibliografía

- [1] Hong-Nan Li, Dong-Sheng Li, and Gang-Bing Song. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering structures*, 26(11):1647–1657, 2004.
- [2] Raffaella Di Sante. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: recent advances and applications. *Sensors*, 15(8):18666–18713, 2015.
- [3] Ebrahim Mehrani, Ashraf Ayoub, and Amir Ayoub. Evaluation of fiber optic sensors for remote health monitoring of bridge structures. *Materials and Structures*, 42(2):183–199, 2009.
- [4] José Miguel López-Higuera, Luis Rodríguez Cobo, Antonio Quintela Incera, and Adolfo Cobo. Fiber optic sensors in structural health monitoring. *Journal of lightwave technology*, 29(4):587–608, 2011.
- [5] Marc Niklès. Fibre optic distributed scattering sensing system: perspectives and challenges for high performance applications. In *Third European Workshop on Optical Fibre Sensors*, pages 66190D–66190D. International Society for Optics and Photonics, 2007.
- [6] Ginu Rajan. *Optical fiber sensors: advanced techniques and applications*. CRC press, 2015.
- [7] Avi Motil, Arik Bergman, and Moshe Tur. [invited] state of the art of brillouin fiber-optic distributed sensing. *Optics & Laser Technology*, 78:81–103, 2016.
- [8] Byoung-ho Lee. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical fiber technology*, 9(2):57–79, 2003.
- [9] Lihui Liu, Hao Zhang, Qida Zhao, Yuliang Liu, and Fang Li. Temperature-independent fbg pressure sensor with high sensitivity. *Optical fiber technology*, 13(1):78–80, 2007.
- [10] Lipi Mohanty, Liang Mong Koh, and Swee Chuan Tjin. Fiber bragg grating microphone system. *Applied physics letters*, 89(16):161109, 2006.
- [11] Jung-Ryul Lee and Hiroshi Tsuda. A novel fiber bragg grating acoustic emission sensor head for mechanical tests. *Scripta materialia*, 53(10):1181–1186, 2005.
- [12] Daniele Tosi, Massimo Olivero, and Guido Perrone. Low-cost fiber bragg grating vibroacoustic sensor for voice and heartbeat detection. *Applied optics*, 47(28):5123–5129, 2008.
- [13] KScea Kuang, R Kenny, MP Whelan, WJ Cantwell, and PR Chalker. Embedded fibre bragg grating sensors in advanced composite materials. *Composites Science and Technology*, 61(10):1379–1387, 2001.

- [14] VM Murukeshan, PY Chan, LS Ong, and LK Seah. Cure monitoring of smart composites using fiber bragg grating based embedded sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 79(2):153–161, 2000.
- [15] Tommy HT Chan, Ling Yu, Hwa-Yaw Tam, Yi-Qing Ni, SY Liu, WH Chung, and LK Cheng. Fiber bragg grating sensors for structural health monitoring of tsing ma bridge: Background and experimental observation. *Engineering structures*, 28(5):648–659, 2006.
- [16] Hideaki Murayama, Kazuro Kageyama, Hiroshi Naruse, Akiyoshi Shimada, and Kiyoshi Uzuwa. Application of fiber-optic distributed sensors to health monitoring for full-scale composite structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 14(1):3–13, 2003.
- [17] J P Dakin, D J Pratt, G W Bibby, and J N Ross. Temperature distribution measurement using raman ratio thermometry. In *29th Annual Technical Symposium*, pages 249–256. International Society for Optics and Photonics, 1986.
- [18] Daniele Inaudi and Branko Glisic. Distributed fiber optic strain and temperature sensing for structural health monitoring. *Proceedings of the IABMAS*, 6, 2006.
- [19] Branko Glisic. Distributed fiber optic sensing technologies and applications—an overview. *American Concrete Institute Special Publication*, 292:1–18, 2013.
- [20] Léon Brillouin. *La Diffraction de la lumière par les ultra-sons: Brillouin, L [éon]*. Hermann, 1933.
- [21] Toshio Kurashima, Tsuneo Horiguchi, and Mitsuhiro Tateda. Distributed-temperature sensing using stimulated brillouin scattering in optical silica fibers. *Optics letters*, 15(18):1038–1040, 1990.
- [22] T Horiguchi, T Kurashima, and M Tateda. Nondestructive measurement of optical-fiber tensile strain distribution based on brillouin spectroscopy. *Trans. IEICE Japan*, 73(2):144–152, 1990.
- [23] Javier Urricelqui Polvorinos. Contribution to the development of brillouin optical time-domain analysis sensors. 2016.
- [24] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate. Investigation of strain-and temperature-dependences of brillouin frequency shifts in geo 2-doped optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 26(13):1854–1861, 2008.
- [25] Marc Nikles, Luc Thevenaz, and Philippe A Robert. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 15(10):1842–1851, 1997.
- [26] Abul Kalam Azad, Liang Wang, Nan Guo, Hwa-Yaw Tam, and Chao Lu. Signal processing using artificial neural network for botda sensor system. *Optics express*, 24(6):6769–6782, 2016.
- [27] Marcelo A Soto and Luc Thévenaz. Modeling and evaluating the performance of brillouin distributed optical fiber sensors. *Optics express*, 21(25):31347–31366, 2013.
- [28] Da-Peng Zhou, Wenhai Li, Liang Chen, and Xiaoyi Bao. Distributed temperature and strain discrimination with stimulated brillouin scattering and rayleigh backscatter in an optical fiber. *Sensors*, 13(2):1836–1845, 2013.

- [29] Arianna Piccolo. Discrimination of strain and temperature in brillouin optical time domain analyzers via artificial neural networks. 2016.
- [30] M.T. Hagan and M. Menhaj. Training feed-forward networks with the marquardt algorithm. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 5(6):989–993, 1994.
- [31] Murray Gill and Wright. *Practical Optimization*. 1981.
- [32] M. Riedmiller and H. Braun. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The rprop algorithm. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, pages 586–591, 1993.
- [33] Moller. *Neural networks*. 6:525–533, 1991.
- [34] Govind P Agrawal. *Nonlinear fiber optics*. Academic press, 2007.
- [35] Tsuneo Horiguchi and Mitsuhiro Tateda. Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated brillouin scattering between a pulse and a continuous wave. *Optics Letters*, 14(8):408–410, 1989.
- [36] Jaime Garcia Castillo. Automatización de montajes botda para sensores distribuidos de fibra óptica. 2016.