

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE MADRID

INSTITUTO UNIVERSITARIO DE MICROGRAVEDAD
“IGNACIO DA RIVA”



POLITÉCNICA



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Sensores de medida distribuida basados en fibra óptica.

ANDRÉS PEDRAZA RODRÍGUEZ

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES

SEPTIEMBRE 2022

Resumen

Este trabajo se plantea como una continuación del trabajo realizado en el Caso de Estudio 2 y en el Caso de Estudio 3 (véanse [1] y [2]), donde se abordarán los siguientes conceptos:

- Análisis detallado de la fenomenología y funcionamiento de la fibra óptica convencional monomodo SMF.
- Análisis de las medidas recogidas por los equipos disponibles y estudio de su potencial de aplicación.
- Desarrollo, en base a los puntos anteriores, de nuevas metodologías.
- Aplicación de la metodología existente a procesos de fabricación y monitorización de ensayos.

Índice

Índice de figuras	I
Índice de tablas	V
Nomenclatura	VI
1. Introducción	1
2. Estado del arte	2
2.1. Estructura de la fibra óptica	2
2.2. La rejilla de Bragg (FBG)	3
2.3. Refractometría óptica de retrodispersión (OBR)	5
2.4. Aplicaciones de FOS basados en medida distribuida	9
3. Metodología	10
3.1. Creación de sensores de fibra óptica	10
3.2. OBR-4600	11
3.3. Códigos y programación	11
4. Fenomenología de la fibra óptica monomodo (SMF)	12
4.1. Polarización en fibras ópticas	12
4.1.1. El formalismo de Jones	13
4.1.2. El formalismo de Stokes	14
4.2. Birrefringencia en fibras ópticas	17
4.2.1. El vector de birrefringencia	18
4.3. La dispersión de Rayleigh	20
5. Medidas del interferómetro	22

5.1. Instrumentos empleados	22
5.2. Lecturas del interferómetro	24
5.2.1. Reflectividad espectral y retardo de grupo	25
5.2.2. Dispersión de modos de polarización	25
6. Óptica estadística	26
6.1. Caracterización del ruido	26
6.2. Análisis de espectro cruzado	29
6.2.1. PSD, CSD, coherencia y espectro de fase	30
6.2.2. Incertidumbre del espectro de fase	33
6.3. Desplazamiento espectral del espectro de fase	35
7. Aplicación en el curado de laminados de material compuesto	39
7.1. Monitorización del proceso de curado	39
7.2. Probetas empleadas	40
7.3. Procedimiento, útiles y equipos	42
7.4. Medidas obtenidas	43
8. Monitorización de ensayos	47
8.1. Flexión de una viga de material compuesto	47
8.2. Detección de fracturas en una estructura de hormigón	50
9. Conclusiones	55
10. Futuros trabajos	56
A. Algunos códigos empleados	57
A.1. Cross-spectrum analysis	57
Bibliografía	60

Índice de figuras

1.	Sección típica de una fibra mono-modo (izda.) y recubrimientos protectores típicamente empleados (dcha.).	2
2.	Esquema de una rejilla de Bragg o FBG.	3
3.	Principio de funcionamiento de una rejilla de Bragg.	3
4.	Representación esquemática del principio de funcionamiento de la medida distribuida por reflectometría óptica.	5
5.	Esquema básico de los dos tipos básicos de interferómetros. En (a) interferómetro Mach-Zehner y en (b) interferómetro Michelson.	5
6.	Esquema de la red óptica OBR donde se muestra la fuente de luz tuneable (TLS), los acopladores, el dispositivo que se testea (DUT).	6
7.	Esquema de la red óptica Optical Backscatter Reflectometer (OBR) donde se muestra la fuente de luz tuneable, los acopladores, el dispositivo que se testea y el <i>beam splitter</i>	7
8.	Algoritmo empleado en el cómputo del desplazamiento espectral.	8
9.	Varios tipos de pigtails empleados para la conexión de sensores de fibra óptica.	10
10.	Herramientas empleadas en la soldadura de fibra óptica.	10
11.	Interrogador óptico OBR 4600 de LUNA Innovations ([3]).	11
12.	Representación del campo electromagnético ($\vec{F} = \vec{E} + jc\vec{B}$) al propagarse por la fibra (izquierda), esquema gráfico del significado de los estados de polarización s-p (centro) y ellipse de polarización (derecha).	12
13.	Significado físico de los parámetros de Stokes.	14
14.	Esfera de Poincaré en la que se representan todos los posibles estados de polarización: LHP – <i>linear horizontal polarization</i> ; LVP – <i>linear vertical polarization</i> ; $+45^\circ$ – <i>linear polarization at $+45^\circ$</i> ; 45° – <i>linear polarization at 45°</i> ; RCP – <i>right circular polarization</i> ; LCP – <i>left circular polarization</i>	15
15.	<i>Diferential group delay</i> inducido por un elemento con birrefringencia lineal.	17
16.	Representación, en la esfera de Poincaré, de la evolución con la distancia de dos haces con estados de polarización diferentes \hat{s}_a y \hat{s}_b	19
17.	Espectro en frecuencias de las dispersiones que presenta una sección de la fibra respecto a una onda incidente de longitud de onda λ_0	20
18.	Representación de la retrodispersión de Rayleigh en la esfera de Poincaré.	21

19.	Histogramas de error para las predicciones de temperatura (a) y deformación (b) y regresión lineal de las predicciones de temperatura (c) y deformación (d) frente a los valores reales.	22
20.	Regiones más relevantes de las señales proporcionadas para temperatura (a) y deformación (b).	23
21.	Red de medición para de polarización diversa. Tunable Laser Source (TLS) = <i>Tunable Laser Source</i> , Analog to Digital Converter (ADC) = <i>Analog to Digital Converter</i> , Polarization Controller (PC) = <i>Polarization Controller</i> , Polarization Beam Splitter (PBS) = <i>Polarization Beam Splitter</i> , τ_{tr} = retardo diferencial de los dos caminos en el <i>trigger interferometer</i> . El Device Under Test (DUT) (<i>Device Under Test</i>) se caracteriza por la reflectividad espectral compleja, $\bar{r}(\omega)$	24
22.	Distribución de valores para el estado de polarización p , para toda la longitud de fibra óptica.	26
23.	Distribución de valores para el estado de polarización p , para un segmento de fibra óptica localizado.	26
24.	Condiciones ambientales a las que se ha sometido la fibra óptica y significado de las etiquetas empleadas.	27
25.	Distribución de valores medios y varianzas de cada segmento a lo largo de la fibra. . . .	27
26.	Distribución de valores para el estado de polarización p , para toda la longitud de fibra óptica.	28
27.	Distribución de valores para el estado de polarización p , para un segmento de fibra óptica localizado.	28
28.	Señales de ejemplo.	30
29.	PSD (\hat{f}^{MT}) de las señales de ejemplo.	31
30.	(\hat{f}_{xy}^{MT}) de las señales de ejemplo.	31
31.	Coherencia (\hat{Coh}_{xy}) de las señales de ejemplo.	32
32.	Espectro de fase (ϕ_{xy}) de las señales de ejemplo.	32
33.	Incertidumbre del espectro de fase de las señales de ejemplo.	33
34.	Incertidumbre del espectro de fase y espectro de fase (ϕ_{xy}) de las señales de ejemplo. .	34
35.	Retardo espacial del espectro de fase ($\phi_{xy}(z)$).	34
36.	Retardo espacial del espectro de fase ($\phi_{xy}(z)$).	35

37.	Distribución de valores experimentales.	36
38.	Histogramas de error para el ajuste de temperatura (a) y deformación (b) y regresión lineal del sistema de temperatura (c) y deformación (d) frente a los valores experimentales empleados para el ajuste.	37
39.	Distribución de la fibra óptica embebida con los segmentos numerados.	40
40.	Distribución de la fibra óptica embebida para las diferentes intercapas con los segmentos numerados.	41
41.	Ciclo de curado del preimpregnado IM7-8552 de Hexcell Composites ([4]).	42
42.	Prensa de platos calientes y equipos empleados para la monitorización del curado. . . .	42
43.	Útiles empleados para el curado de las probetas en la prensa de platos calientes. . . .	42
44.	Distribución espacial de las medidas tomadas y en escala de colores los diferentes tiempos (inicio del enfriamiento como referencia).	43
45.	Evolución temporal del promedio de un segmento.	43
46.	Evolución temporal de los promedios de cada segmento de las probetas del primer grupo. .	44
47.	Evolución temporal de los promedios de cada segmento de las probetas del segundo grupo con apilado simétrico.	44
48.	Evolución temporal de los promedios de cada segmento de las probetas del segundo grupo con apilado asimétrico.	44
49.	Valores del desplazamiento espectral una vez transcurridos 35 minutos de enfriamiento para el primer grupo de probetas.	45
50.	Valores del desplazamiento espectral una vez transcurridos 35 minutos de enfriamiento para el segundo grupo de probetas.	45
51.	Esquema del ensayo a flexión de las vigas.	47
52.	Grieta iniciada en el alma inferior de la viga.	48
53.	Viga durante el ensayo en la cual se puede apreciar el pandeo del ala superior. . . .	48
54.	Viga una vez despegada el ala superior del alma.	48
55.	Viga 1: conformada con resina convencional y sin rigidizadores en L (fallo de la viga a 45 kN).	49
56.	Viga 2: conformada con resina experimental y sin rigidizadores en L (fallo de la viga a 65 kN).	49

57.	Viga 3: conformada con resina convencional y con rigidizadores en L (parada del ensayo a 115 kN, para conservar los rigidizadores, con fallo de la medida a partir de 70 kN).	49
58.	Viga 4: conformada con resina experimental y con rigidizadores en L (fallo de la viga a 135 kN).	49
59.	Tres de las cuatro vigas estudiadas tras el despegue del ala superior.	50
60.	Esquema del ensayo de la columna de hormigón con unión atornillada.	51
61.	Ensayo de la columna con unión atornillada.	51
62.	Grietas atravesando la fibra óptica y los extensómetros.	51
63.	Medidas obtenidas del ensayo de la columna con unión atornillada.	52
64.	Evolución de los segmentos (arriba) y grietas (abajo) seleccionadas. A la derecha se muestran qué intervalos se han seleccionado para cada caso.	52
65.	Medidas obtenidas adimensionalizadas con la carga.	53
66.	Evolución de las medidas obtenidas adimensionalizadas con la carga y respecto al estado inicial.	54



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Índice de tablas

1.	Métricas de error del modelo de inteligencia artificial.	23
2.	Métricas de error de la regresión lineal con los datos experimentales.	37

Nomenclatura

Propiedades físicas

α Coeficiente de expansión térmico

λ Longitud de onda

ν Frecuencia

$\omega(t)$ Frecuencia instantánea

τ Desfase temporal

ε Deformación mecánica

c Velocidad de la luz

T Temperatura

t Tiempo

Fibra óptica

$-\frac{\Delta\nu}{\nu}(x)$ Desplazamiento espectral de la serie temporal x .

ρ_e Coeficiente foto-elástico (Fiber Bragg Grating (FBG))

η Coeficiente termo-óptico (FBG)

K_T Coeficiente termo-óptico (OBR)

K_ε Coeficiente foto-elástico (OBR)

Señales ópticas

\vec{F} Vector de Riemann–Silberstein o vector de Weber

H Función de transferencia

\vec{E} Campo eléctrico

\vec{B} Campo magnético

P, E_p Señal del detector del estado de polarización p

S, E_s Señal del detector del estado de polarización s



\hat{T}_p Operador de la proyección que representa el estado de polarización p

\hat{T}_s Operador de la proyección que representa el estado de polarización s

Luz polarizada

β Retardo de fase (*phase delay*)

$|J\rangle$ Vector de Jones

β_{rad} Birrefringencia de fase (*phase birefringence*)

$\langle s |$ Vector *bra* de Jones

τ_g Retardo de grupo (*group delay*)

$|s\rangle$ Vector *ket* de Jones

T Matriz de transferencia

U Matriz de Jones

\hat{s} Vector normalizado de Stokes en la esfera de Poincaré

\vec{S} Vector de Stokes

\vec{s} Vector de Stokes 3D (sin la primera componente)

I Intensidad

p Grado de polarización de la luz

ψ Ángulo de orientación de la elipse de polarización

χ Ángulo de elipticidad de la elipse de polarización

M Matriz de Mueller

Óptica estadística

\hat{f}_{xx}^{MT} de la señal x estimado mediante el método *multitapper*

\hat{f}_{xy}^{MT} de las señales x e y estimado mediante el método *multitapper*

\hat{Coh}_{xy} Coherencia entre las señales x e y .

ϕ_{xy} Fase del espectro cruzado, o espectro de fase, de las señales x e y .

Acrónimos

ADC Analog to Digital Converter.

CSD Cross-Spectral Density.

DGD Differential Group Delay.

DIFT Discrete Inverse Fourier Transform.

DUT Device Under Test.

FBG Fiber Bragg Grating.

FOS Fiber Optic Sensor.

OBR Optical Backscatter Reflectometer.

OFDR Optical Frequency Domain Reflectometer.

PBS Polarization Beam Splitter.

PC Polarization Controller.

PMD Polarization Mode Dispersion.

PMF Polarization Maintaining Fiber.

PSD Power Spectral Density.

SMF Single Mode Fiber.

STFT Short Time Fourier Transform.

TLS Tunable Laser Source.

XAI eXplainable Artificial Intelligence.



1. Introducción

El actual desarrollo de lanzadores reutilizables implica una demanda creciente de métodos de inspección no destructivos que puedan asegurar la fiabilidad de los componentes del vehículo una vez ha efectuado su aterrizaje. El empleo de sensores de fibra óptica en estas estructuras resulta especialmente interesante ya que son capaces de medir deformaciones, temperatura y presencia de hidrógeno de forma continua o discreta a tiempo real. Los sensores de fibra óptica además, son de pequeño tamaño y resultan fáciles de integrar entre las capas de laminado del material compuesto sin penalizar prácticamente sus propiedades mecánicas.

En anteriores trabajos, véase Caso de Estudio 2 [1], se caracterizaron varios de estos sensores de fibra óptica y se estudió su respuesta a fenómenos térmicos y mecánicos. Se estudió especialmente el comportamiento y la aplicación al curado de materiales compuestos de sensores de medida distribuida. Estos sensores están basados en reflectometría óptica de retrodispersión (OBR) y la información se obtiene mediante el uso de interferómetros tipo OFDR (*Optical Frequency-Domain Reflectometer*). Sin embargo, estos sensores son sensibles tanto a incrementos de temperatura como de deformación y en situaciones en las que ambos fenómenos coexisten se produce cierta confusión. Normalmente se suelen incluir otros sensores para desacoplar ambas medidas, pero en el Caso de Estudio 2, se desarrolló un modelo de inteligencia artificial capaz de discernir entre ambas medidas con una confianza razonable.

Posteriormente, véase Caso de Estudio 3 [2], se trató de analizar tanto la señal como el modelo de inteligencia artificial desarrollado. De esta forma se pudieron construir potentes y versátiles herramientas de análisis de señal a la vez que se analizaba la señal de forma más profunda. Por otro lado, el estudio del modelo de inteligencia artificial, mediante métodos de inteligencia artificial explicable permitieron verificar el modelo y extraer información sobre cómo se establece la distinción de temperatura y deformación.

En este Trabajo de Fin de Máster, se ha querido dar un paso más en el análisis de señal, aplicando todo el conocimiento y experiencia adquiridos anteriormente, con el fin de determinar un método fiable para el desacoplamiento de los fenómenos mecánicos y térmicos recogidos mediante interrogación óptica de medida distribuida, ya que esto es actualmente el mayor impedimento para su implementación como técnica de monitorización. Comúnmente este problema se ha solucionado añadiendo un segundo conjunto de sensores para determinar el estado del sistema estudiado. Otra opción, tal y como se muestra en [5], [6] y [7], es emplear otros tipos de fibra óptica para obtener una medida de la temperatura y la deformación empleando un único segmento de fibra óptica.

2. Estado del arte

2.1. Estructura de la fibra óptica

La fibra óptica empleada consiste en un hilo de vidrio de sílice extruido. Alrededor de la guía de luz se añaden una serie de recubrimientos con el fin de proteger la fibra y la señal que por ella se transmite. Cuando se emplea como sensor es necesario retirar estos recubrimientos pues el material actuará como protector y puesto que se necesita que el elemento sea lo menos disruptivo posible dentro de la estructura. En la Figura 1 se ilustra en detalle la estructura de la guía y los revestimientos.

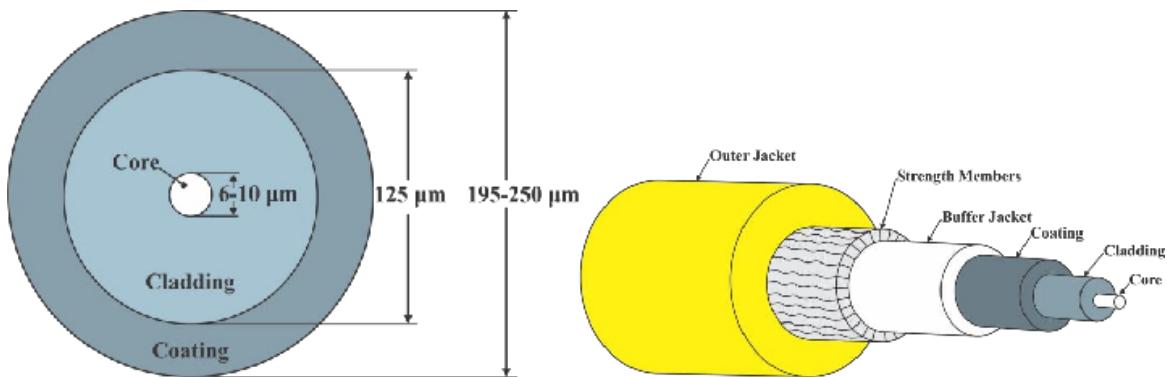


Figura 1: Sección típica de una fibra mono-modo (izda.) y recubrimientos protectores típicamente empleados (dcha.).

La guía está formada por un núcleo (core) de unas 6-10 micras con un revestimiento (cladding) de unas 125 micras. Por debajo de las 10 micras la luz está restringida en el núcleo a un único modo de propagación (mono-modo) y todas las señales enviadas son recibidas al mismo tiempo. Núcleo y revestimiento tienen distintos órdenes de refracción, así la luz emitida por el núcleo, al llegar a una de las paredes con un ángulo de incidencia muy grande, experimenta una refracción absoluta y continúa propagándose sin pérdidas. Si el radio de doblado de la fibra es muy pequeño el ángulo de incidencia disminuirá y parte de la luz atravesará el revestimiento de vidrio. Los revestimientos protectores (*coating*) y las camisas (*jacket*) sirven para aislar y proteger la guía. Estos elementos soportan además los esfuerzos axiales y confieren rigidez. Como se mencionó anteriormente, en telecomunicaciones estos componentes resultan de gran utilidad puesto que confieren robustez al sistema pero en la monitorización de estructuras es necesario que sean retirados.



2.2. La rejilla de Bragg (FBG)

Debido a la alta relación señal a ruido de la fibra óptica el método más sencillo y empleado se basa en la modificación del índice de refracción de la fibra con el fin de restringir el paso de ciertas longitudes de onda emitidas. Así en una región pequeña se graba una rejilla de Bragg o FBG por sus siglas en inglés (Fiber Bragg Grating). Para inscribir la FBG se emplea un láser capaz de modificar la estructura de la fibra y una rejilla para que las marcas del láser queden de forma equiespaciada y localizada (véase Figura 2) de manera que el índice de refracción queda modulado periódicamente.

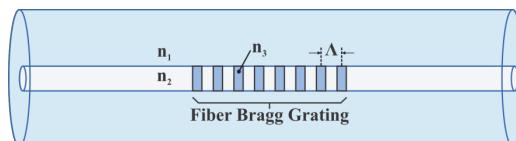


Figura 2: Esquema de una rejilla de Bragg o FBG.

Así cierta longitud de onda, proporcional a la separación entre las marcas, es incapaz de propagarse por la fibra. En la Figura 3 se ilustra este fenómeno.

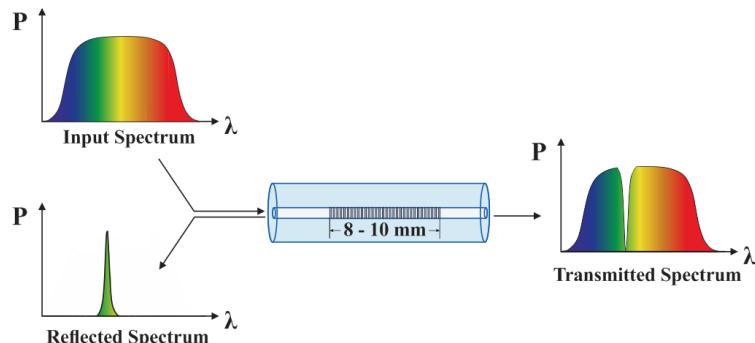


Figura 3: Principio de funcionamiento de una rejilla de Bragg.

Un cambio en la longitud de la fibra supondrá un cambio entre la separación de las marcas y la frecuencia de la señal reflejada cambiará. Los cambios en el índice de refracción también modificarán la señal reflejada. Para considerar ambos efectos se recurre a la fórmula de la longitud de onda de Bragg:

$$\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda , \quad (1)$$

donde $n_{eff}(\varepsilon, T)$ es el índice de refracción efectivo del núcleo y $\Lambda(\varepsilon, T)$ es el periodo de separación de las marcas y ambas dependen de la deformación mecánica ε y de la temperatura T .

A partir de esta expresión se puede obtener la dependencia con la deformación:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\lambda_B}{dL} &= 2n_{eff} \left(\frac{d\Lambda}{dL} \right) + 2\Lambda \left(\frac{dn_{eff}}{dL} \right) \\
 \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta L} &= \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dL} \lambda_B + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dL} \lambda_B \\
 \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= \Delta L \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dL} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dL} \right) \\
 \Rightarrow \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= (1 - \rho_e) \epsilon,
 \end{aligned} \tag{2}$$

donde ρ_e es el coeficiente foto-elástico que caracteriza el cambio del índice refractivo a medida que el material se elonga.

y con la temperatura:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\lambda_B}{dT} &= 2n_{eff} \left(\frac{d\Lambda}{dT} \right) + 2\Lambda \left(\frac{dn_{eff}}{dT} \right) \\
 \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} &= \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \lambda_B + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \lambda_B \\
 \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= \Delta T \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \right) \\
 \Rightarrow \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= \Delta T(\alpha + \eta),
 \end{aligned} \tag{3}$$

donde α es el coeficiente de expansión térmica del sílice y η es el coeficiente termo-óptico

Combinando ambas expresiones se obtiene la dependencia mecánico-térmica de la longitud de onda de Bragg:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \epsilon + \Delta T(\alpha + \eta). \tag{4}$$

2.3. Refrectometría óptica de retrodispersión (OBR)

Durante el proceso de extrusión del vidrio que conforma la fibra óptica se producen ciertas modificaciones en el índice de refracción del núcleo de forma aleatoria. Estas variaciones son de muy pequeño orden pero, dado que se mantienen fijas a menos que la fibra se estire o se caliente, permiten usar la totalidad de la fibra óptica como sensor. Dado que estas variaciones son de un orden mucho menor que el ruido ambiente es necesario contar con un equipo capaz de eliminar el ruido y que cuente con una alta sensibilidad para poder apreciar el fenómeno. Existen muchas técnicas para medir dónde y con cuánta intensidad se produce el desplazamiento de esas variaciones respecto a un estado de referencia y cada una de ellas se asocia con un fenómeno de dispersión de luz. En este caso se estudiará la refrectometría óptica de dispersión u *optical backscatter reflectometry* (en adelante OBR).

Mediante el tiempo que tarda una señal de pulso corto y banda ancha en ser emitida, reflejada y recibida es posible situar las perturbaciones de la fibra. Por otro lado, debido a la dispersión de Rayleigh se experimenta una pérdida de intensidad que se usa para terminar de mapear todas las imperfecciones. Esto se conoce como Optical Frequency Domain Reflectometer (OFDR) (*Optical Frequency Domain Reflectometry*). En el caso de la OBR se realiza un barrido en longitud de onda lo que permite determinar una medida de la dispersión de Rayleigh con una resolución superior a $10 \mu\text{m}$. En la Figura 4 se muestra una representación gráfica del concepto.

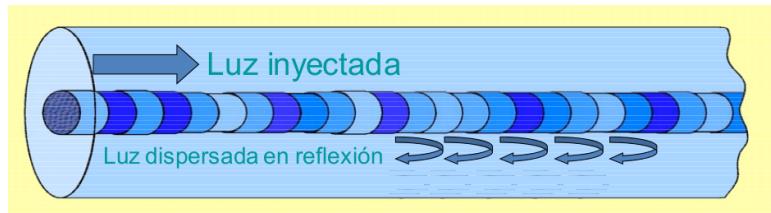


Figura 4: Representación esquemática del principio de funcionamiento de la medida distribuida por reflectometría óptica.

Para realizar la medida, existen dos tipos básicos de interferómetros: Mach-Zehnder y Michelson (véase Figura 5) y ambos pueden ser tratados mediante las mismas ecuaciones.

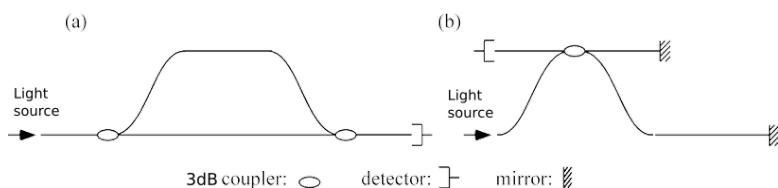


Figura 5: Esquema básico de los dos tipos básicos de interferómetros. En (a) interferómetro Mach-Zehner y en (b) interferómetro Michelson.

Considérese una fuente que produce un campo eléctrico con la forma:

$$E_{in} = E_0(t)e^{-i\omega(t)t}, \quad (5)$$

donde $\omega(t)$ representa la frecuencia instantánea del láser tuneable (TLS) para un tiempo t . Nótese que, como la luz se detecta en un único punto, se ha ignorado la dependencia espacial del campo.

En el primer *coupler* el la fuente se divide en dos: E_1 y E_2 y tras propagarse a través de fibras de diferente longitud y ser recombinadas se tiene un campo sobre el detector de la forma:

$$E_{out} = E_0(t + \tau_1)e^{-i\omega(t+\tau_1)t} + E_0(t + \tau_2)e^{-i\omega(t+\tau_2)t}, \quad (6)$$

donde τ_i es el desfase temporal correspondiente a cada uno de los recorridos.

El detector proporciona una salida en función de la intensidad la cual puede ser expresada como:

$$I(\omega) = |E_0(t)|^2 + |E_0(t - \tau)|^2 + 2E_0(t)E_0(t - \tau)\cos[\omega(t)\tau], \quad (7)$$

donde $\tau = \tau_1 - \tau_2$ la diferencia entre desfases temporales.

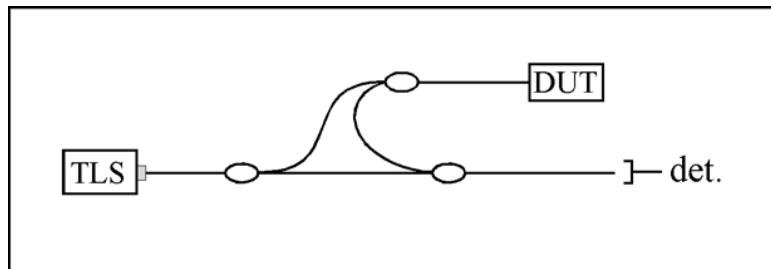


Figura 6: Esquema de la red óptica OBR donde se muestra la fuente de luz tuneable (TLS), los acopladores, el dispositivo que se prueba (DUT).

Estas ecuaciones básicas son empleadas para construir un OBR. Modificando una de las ramas del interferómetro Mach-Zehner (como se muestra en la Figura 6) se puede caracterizar la fibra empleada como sensor mediante su función de transferencia $H(\omega)$ que contiene información respecto a la amplitud $\rho(\omega)$ y la fase $\phi(\omega)$:

$$H(\omega) = \rho(\omega)e^{i\phi(\omega)}. \quad (8)$$

Así, el detector recibirá una señal con intensidad:

$$I = |E_0(t)|^2 + |E_0(t - \tau)|^2 \rho(\omega)^2 + 2\rho(\omega)E_0(t)E_0(t - \tau) \cos[\omega(t)\tau - \phi(\omega)]. \quad (9)$$

Después, se realiza la transformada de Fourier para separar espectralmente los tres sumandos del segundo término de la ecuación. El tercero normalmente se denomina término de interferencia y es el que más información ofrece ya que este término oscila con frecuencia $\omega(t)\tau$ mientras que el resto se mantienen estáticos y además si se conoce el *delay* se puede ubicar la interferencia si se conoce la velocidad de propagación de la luz en el dispositivo que se interroga.

Además, el equipo empleado incluye un divisor de haz (*beam splitter*) que permite separar la función de transferencia total en las funciones de transferencia de cada uno de los estados de polarización *p-s*. El esquema de la red óptica del instrumento es, por tanto, la mostrada en la Figura 7 y las señales recibidas por los dos detectores son:

$$E_s(t) = 2r_\tau g_s(\tau) \left[\left(\hat{T}_s \vec{E}_{\text{meas}} \right) \cdot \left(\hat{T}_s \vec{E}_{\text{ref}} \right) \right] e^{j(\omega_o\tau + \gamma\tau t + \sigma(t-\tau)\tau + \phi_\tau)}, \\ E_p(t) = 2r_\tau g_p(\tau) \left[\left(\hat{T}_p \vec{E}_{\text{meas}} \right) \cdot \left(\hat{T}_p \vec{E}_{\text{ref}} \right) \right] e^{j(\omega_o\tau + \gamma\tau t + \sigma(t-\tau)\tau + \phi_\tau)}, \quad (10)$$

donde $j = \sqrt{-1}$; $\omega(t) = \omega_o + \gamma t + \sigma(t)$ es la frecuencia instantánea del láser compuesta por una frecuencia inicial a la que se añade una variación lineal de ratio γ y un error $\sigma(t)$; r_τ y ϕ_τ son el módulo y la fase de la reflectividad del evento; \vec{E}_{meas} y \vec{E}_{ref} son los campos eléctricos de la rama que se está midiendo y de la de referencia respectivamente; \hat{T}_s y \hat{T}_p son los operadores de las proyecciones que representan los dos estados de polarización ortogonales *p-s*; y, por último, $g_s(\tau)$ y $g_p(\tau)$ son las ganancias de los canales de adquisición de datos.

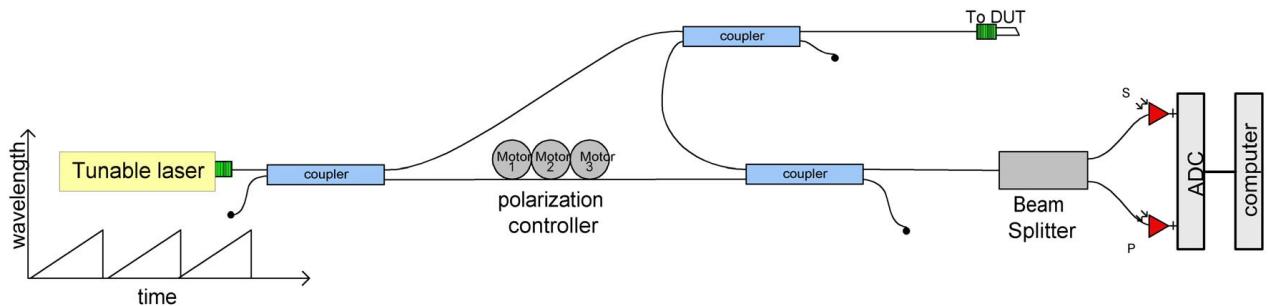


Figura 7: Esquema de la red óptica OBR donde se muestra la fuente de luz tuneable, los acopladores, el dispositivo que se prueba y el *beam splitter*.

Mediante la correlación cruzada de los estados de polarización se puede obtener una magnitud relacionada con el incremento de temperatura y de deformación de una forma similar a como se hace con las rejillas de Bragg, solo que en este caso, en lugar de estudiar el desplazamiento de la longitud de onda de la rejilla, se estudia el desplazamiento espectral de sucesivas secciones del segmento total de fibra óptica. En la Figura 8 se muestra el algoritmo necesario para computar la correlación cruzada entre dos estados de polarización iguales del mismo segmento de fibra óptica en dos estados de temperatura y deformación diferentes.

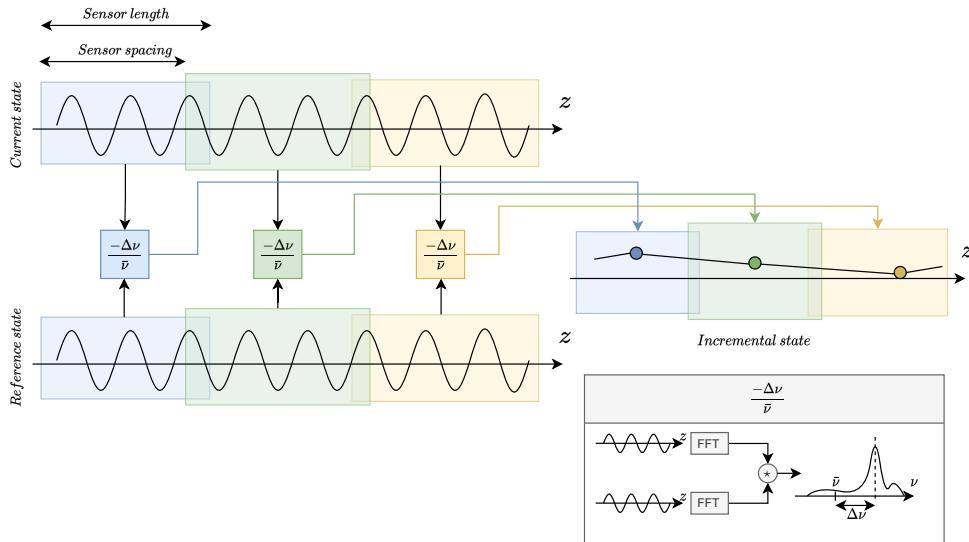


Figura 8: Algoritmo empleado en el cómputo del desplazamiento espectral.

Una vez obtenida la distribución del desplazamiento espectral relativo, éste puede relacionarse con la temperatura y la deformación de acuerdo a:

$$-\frac{\Delta\nu}{\bar{\nu}} = K_T \Delta T + K_\varepsilon \Delta \varepsilon, \quad (11)$$

donde $\Delta\nu$ es el desplazamiento espectral de la frecuencia y $\bar{\nu}$ es la frecuencia media del intervalo que se analiza. Los coeficientes K_T y K_ε son equivalentes a $(1 - \rho_e)$ y $(\alpha + \eta)$, respectivamente, solo que tienen valores diferentes.

Nótese que tanto el ancho de la ventana como el espaciado entre ellas será determinante a la hora de encontrar un punto intermedio entre la precisión y la resolución de la medida obtenida.

Información referente a esta Sección ha sido extraída de [8] y del manual del interrogador óptico OBR 4600 de LUNA innovations [3], así como algunas de las imágenes empleadas.

2.4. Aplicaciones de FOS basados en medida distribuida

Los sensores basados en medida distribuida tienen, por lo general, una menor aceptación que los FBGs ya que se trata de una tecnología menos desarrollada y más costosa. Además, una de sus mayores limitaciones es que, dependiendo del método, es imposible distinguir entre medidas de temperatura y deformación. Sin embargo, sí se ha aplicado a los siguientes casos:

- **Ensayo de palas de aerogenerador:** ya que se trata de una estructura de grandes dimensiones sometida a un incremento de temperatura nula; en comparación con la instalación de un sinfín de galgas extensiométricas la adhesión de un segmento de fibra óptica de hasta 70 metros para obtener la distribución de deformaciones resulta interesante; por otra parte, no se pueden obtener datos de forma dinámica lo cual limita el tipo de ensayos.
- **Estructuras civiles:** de nuevo, la capacidad de obtener medidas continuas a lo largo de varias decenas de metros supone un gran atractivo; en este caso, además, al tratarse de materiales cerámicos, el disponer de datos continuos a lo largo de la estructura permite la detección temprana de grietas; por contrapartida, estructuras de este tipo sí se ven sometidas a cambios de temperatura, los cuales pueden distorsionar las medidas obtenidas por este tipo de sensores.
- **Curado de material compuesto:** en este caso la fácil integración de sensores permite determinar la evolución de la temperatura a lo largo de las capas sin distorsionar; por otro lado, se trata de un proceso que lleva asociado un incremento de deformaciones y separar ambos fenómenos es complejo y normalmente lleva asociado el uso de equipos complejos o de otros métodos de monitorización.
- **Detección de daños en materiales compuestos:** en el caso de detección de daños, de nuevo se tiene una aplicación en la cual no existe un incremento de temperatura y por tanto se puede obtener una distribución de esfuerzos sin problema.

Más información respecto a este punto puede ser encontrada en [9].

3. Metodología

3.1. Creación de sensores de fibra óptica

Una de las ventajas de los sensores de fibra óptica basados en la medida distribuida es que no es necesario modificar la fibra para convertirla en sensor. En algunas ocasiones se trabaja con fibras que mantienen la polarización (PMF) pero en este caso se ha trabajado con fibra óptica convencional monomodo (SMF) la cual, tiene una mayor disponibilidad y un precio más reducido.

Sin embargo, para poder conectar la fibra al equipo, se le ha de soldar un conector cerámico en uno de sus extremos con el fin de que el interrogador óptico pueda propagar correctamente un pulso de luz y así determinar la longitud de onda reflejada. El conector suele incluir un segmento de fibra óptica y este montaje se conoce comúnmente como pigtail (véase Figura 9).



Figura 9: Varios tipos de pigtails empleados para la conexión de sensores de fibra óptica.

El segmento de fibra óptica que incluye el pigtail está revestido por lo que ha de pelarse y soldarse a la fibra. Para realizar esta soldadura se emplean los útiles que se muestran en la Figura 10.



(a) Soldadora de arco Fujikura-
FSM-18S (b) Cable cleaver Fujikura CT-30 (c) Pelador de fibra.

Figura 10: Herramientas empleadas en la soldadura de fibra óptica.

3.2. OBR-4600

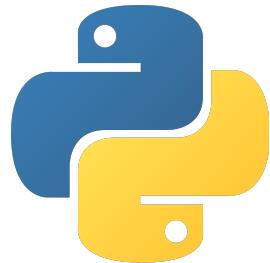
En el caso de la medida distribuida se emplea un interferómetro basado en el interferómetro Mach-Zehnder ya que este ha de ser capaz de distinguir entre el ruido externo y las variaciones en el índice reflexivo de la fibra consecuencia de su propia fabricación. En este caso se ha empleado el interrogador óptico de LUNA innovations que se muestra en la Figura 11. Este interferómetro es de tipo OFDR (*Optical Frequency Domain Reflectometer*) y cuenta con un *beam splitter* para separar las lecturas de los dos estados de polarización de la luz en cada punto de la fibra.



Figura 11: Interrogador óptico OBR 4600 de LUNA Innovations ([3]).

3.3. Códigos y programación

Además, una vez obtenidos los archivos binarios con información sobre la función de transferencia de la fibra, se han tenido que procesar estos para obtener la distribución de esfuerzos y deformaciones. Para ello se han creado códigos y librerías en PYTHON valiéndose de librerías como *Numpy* y *Scipy* de código libre para procesar las señales.



4. Fenomenología de la fibra óptica monomodo (SMF)

4.1. Polarización en fibras ópticas

El primer paso para aprovechar el máximo potencial de este tipo de sensores es comprender cómo se comporta el campo electromagnético a medida que atraviesa un segmento de fibra. La Figura 12 es una representación gráfica de cómo la luz se propaga por el interior de la fibra, experimentando cambios de polarización y cómo el campo electromagnético, representado mediante el vector de Riemann–Silberstein (también conocido como vector de Weber): $\vec{F} = \vec{E} + jc\vec{B}$, se proyecta punto a punto sobre dos ejes ortogonales $s-p$ cuyos operadores son \hat{T}_s y \hat{T}_p .

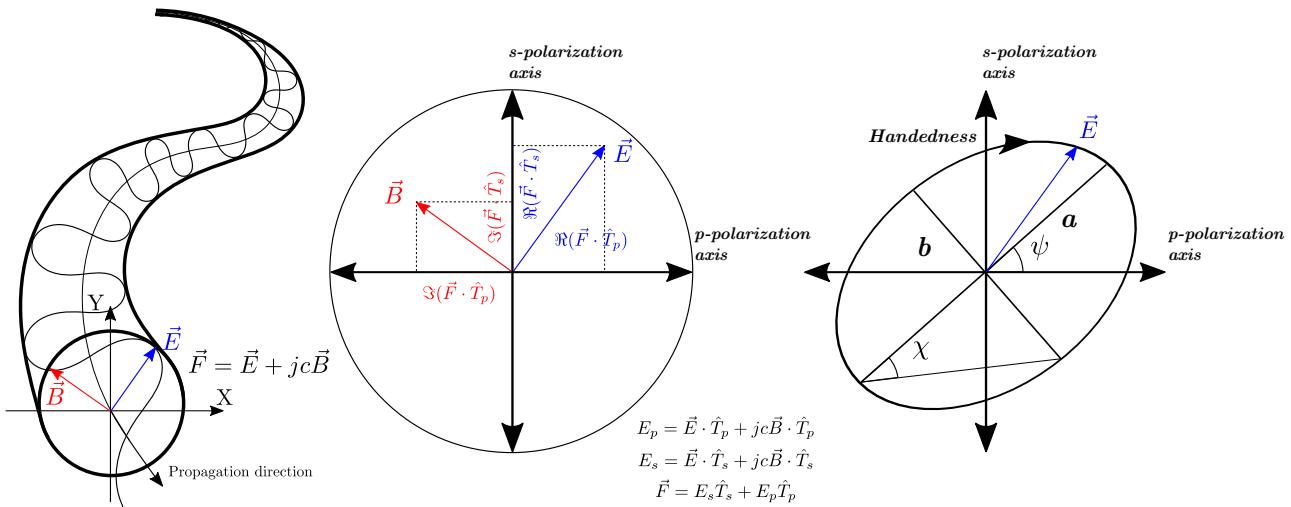
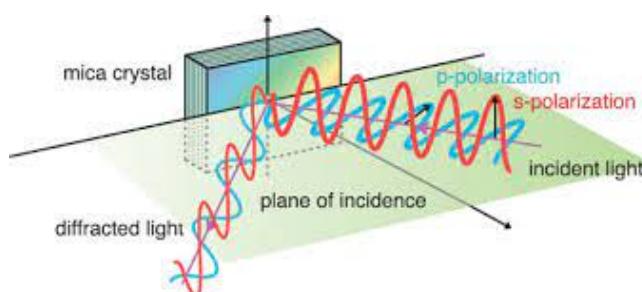


Figura 12: Representación del campo electromagnético ($\vec{F} = \vec{E} + jc\vec{B}$) al propagarse por la fibra (izquierda), esquema gráfico del significado de los estados de polarización s-p (centro) y elipse de polarización (derecha).

En este caso se trabaja con la designación s-p para determinar el sistema de coordenadas ya que son las magnitudes proporcionadas por el equipo empleado aunque las lecturas recogidas por los detectores no sean directamente las proyecciones del campo electromagnético que se transmite por la fibra estudiada.



$$\begin{aligned} E_p &= \vec{E} \cdot \hat{T}_p + jc\vec{B} \cdot \hat{T}_p, \\ E_s &= \vec{E} \cdot \hat{T}_s + jc\vec{B} \cdot \hat{T}_s, \\ \vec{F} &= E_s \hat{T}_s + E_p \hat{T}_p. \end{aligned} \quad (12)$$

4.1.1. El formalismo de Jones

El formalismo de Jones usa las dos proyecciones ortogonales para definir un vector cuyas componentes son fasores y que caracteriza la intensidad, fase y estado de polarización de cualquier onda monocromática. Este vector, $|J\rangle$ se construye mediante:

$$|J\rangle = \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \end{bmatrix}, \quad (13)$$

y además puede ser normalizado, en cuyo caso se denomina el vector *ket* de Jones:

$$|s\rangle = \begin{bmatrix} e_p \\ e_s \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{|E_p|^2 + |E_s|^2}} \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_p e^{i\varphi_p} \\ s_s e^{i\varphi_s} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Como se puede observar este formalismo hace uso de los operadores *bra* y *ket* de forma que, al estar normalizado $\langle s|s \rangle = 1$.

Matriz de transferencia

La transmisión a través de un elemento óptico se puede representar en el espacio de Jones mediante una matriz compleja 2x2:

$$|t\rangle = \mathbf{T}|s\rangle = \exp(i\phi_0) \mathbf{U}|s\rangle, \quad (15)$$

donde $|t\rangle$ es el vector *ket* de salida, \mathbf{T} es la matriz de transferencia, $|s\rangle$ es el vector *ket* de entrada, la parte real de ϕ_0 representa un cambio en la fase mientras que la parte imaginaria de ϕ_0 representa la ganancia u atenuación del medio, y \mathbf{U} representa la matriz de Jones la cual, para un medio sin pérdidas ($\det(\mathbf{U})=1$), puede ser generalmente expresada como:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} e^{i\zeta} \cos \kappa & -e^{i\varrho} \sin \kappa \\ e^{-i\varrho} \sin \kappa & e^{-i\zeta} \cos \kappa \end{bmatrix} \quad (16)$$

donde las dos fases ζ y ϱ , y la amplitud κ representan las tres variables independientes de la matriz.

4.1.2. El formalismo de Stokes

A partir de las medidas de los dos estados de polarización de la luz, es posible construir un vector de Stokes el cual describe cualquier fuente de luz paraxial y bidimensional, polarizada o no a partir de su intensidad I , grado de polarización p y orientación ψ y elipticidad χ :

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |E_p|^2 + |E_s|^2 \\ |E_p|^2 - |E_s|^2 \\ 2 \operatorname{Re}(E_p E_s^*) \\ 2 \operatorname{Im}(E_p E_s^*) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ Ip \cos 2\psi \cos 2\chi \\ Ip \sin 2\psi \cos 2\chi \\ Ip \sin 2\chi \end{pmatrix} \quad (17)$$

Los parámetros que conforman el vector de Stokes tienen un significado físico y se relacionan con la forma en la que el campo electromagnético se polariza. En la Figura 13 se representa el significado de los tres últimos ya que el primero, S_0 , da cuenta de la intensidad del haz.

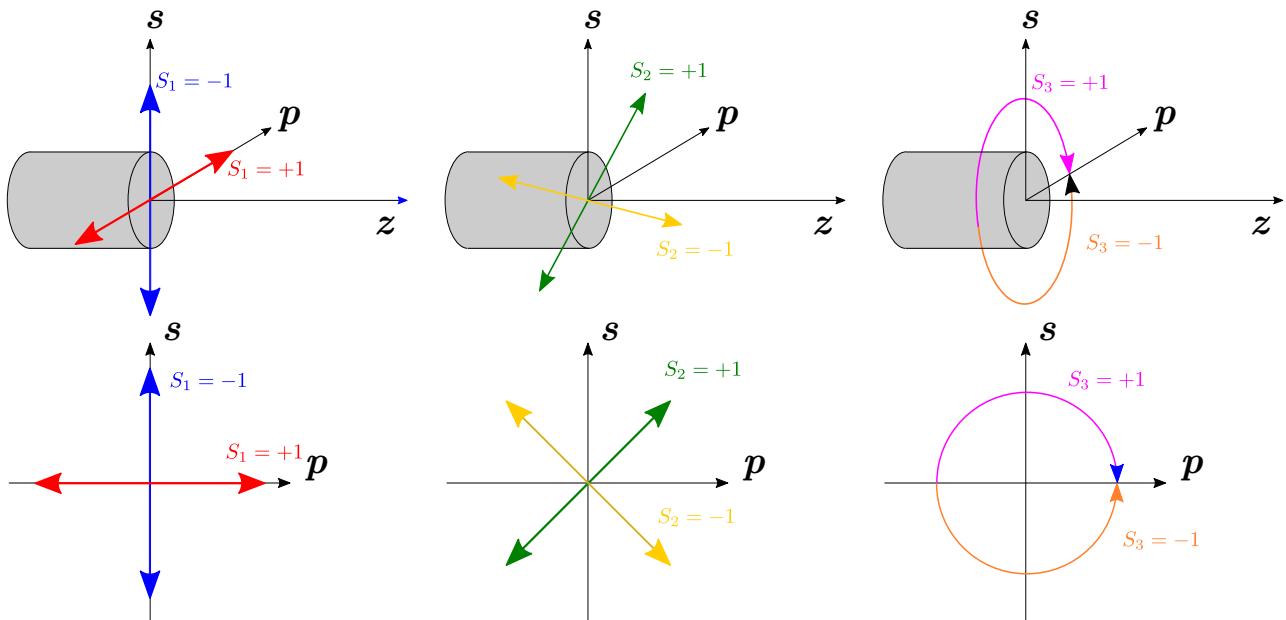


Figura 13: Significado físico de los parámetros de Stokes.



Los parámetros de Stokes se pueden construir a partir del vector de Jones haciendo uso de las matrices de spin de Pauli:

$$\begin{aligned} S_0 &= \langle J | \sigma_0 | J \rangle , \\ S_1 &= \langle J | \sigma_1 | J \rangle , \\ S_2 &= \langle J | \sigma_2 | J \rangle , \\ S_3 &= \langle J | \sigma_3 | J \rangle , \end{aligned} \quad (18)$$

donde

$$\sigma_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \sigma_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \sigma_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \sigma_3 = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

La esfera de Poincaré

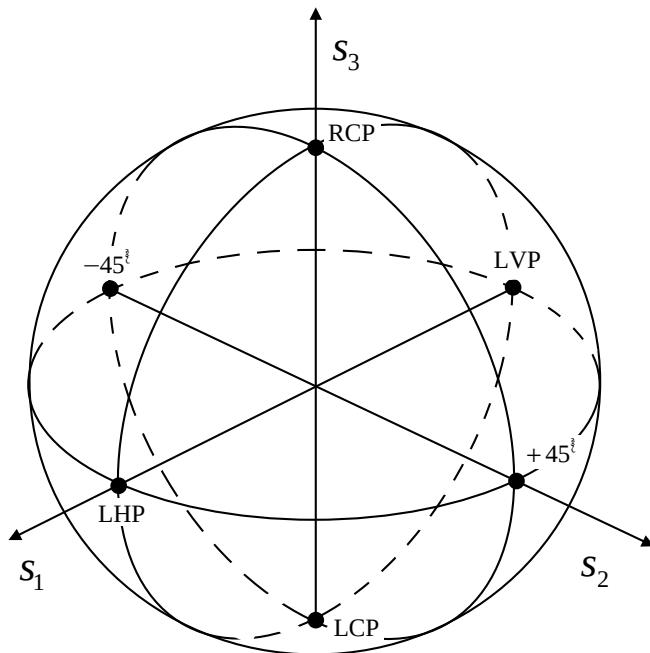


Figura 14: Esfera de Poincaré en la que se representan todos los posibles estados de polarización: LHP – *linear horizontal polarization*; LVP – *linear vertical polarization*; $+45^\circ$ – *linear polarization at $+45^\circ$* ; 45° – *linear polarization at 45°* ; RCP – *right circular polarization*; LCP – *left circular polarization*.

A partir de los tres últimos parámetros de Stokes, se puede construir el vector normalizado de Stokes que puede ser representado mediante la esfera de Poincaré empleando las componentes de este vector como coordenadas cartesianas (véase Figura 14).

$$\vec{s} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}; \hat{s} = \frac{\vec{s}}{|\vec{s}|} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle s | \sigma_1 | s \rangle \\ \langle s | \sigma_2 | s \rangle \\ \langle s | \sigma_3 | s \rangle \end{bmatrix} \quad (20)$$

La matriz de Mueller

Si se tiene la medida del vector de Stokes entre dos puntos de la fibra, la evolución de la luz a lo largo del medio óptico puede describirse mediante la siguiente ecuación matricial:

$$\vec{S}_{out} = \mathbf{M} \vec{S}_{in}, \quad (21)$$

donde \vec{S}_{in} y \vec{S}_{out} son los vectores de Stokes a la entrada y salida del medio óptico y $\mathbf{M} \in \mathfrak{M}_{4x4}$ es la matriz de Mueller.

Esta matriz se puede relacionar con la matriz de Jones por medio de la siguiente expresión:

$$M_{i+1,j+1} = \frac{1}{2} \text{Tr} \left(\mathbf{U} \sigma_j \mathbf{U}^\dagger \sigma_i \right), \quad (22)$$

donde el operador \dagger hace referencia a la conjugada transpuesta.

Para la matriz de Jones descrita en la ecuación 16 la matriz de Mueller correspondiente es:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos 2\kappa & -\cos(\zeta - \varrho) \sin 2\kappa & -\sin(\zeta - \varrho) \sin 2\kappa \\ \cos(\zeta + \varrho) \sin 2\kappa & \cos 2\zeta \cos^2 \kappa - \cos 2\varrho \sin^2 \kappa & \sin 2\zeta \cos^2 \kappa + \sin 2\varrho \sin^2 \kappa \\ -\sin(\zeta + \varrho) \sin 2\kappa & -\sin 2\zeta \cos^2 \kappa + \sin 2\varrho \sin^2 \kappa & \cos 2\zeta \cos^2 \kappa + \cos 2\varrho \sin^2 \kappa \end{bmatrix}, \quad (23)$$

donde $\det(\mathbf{R}) = 1$.

4.2. Birrefringencia en fibras ópticas

La birrefringencia en fibras SMF es consecuencia de la pérdida de simetría circular en el núcleo de la fibra. Esta pérdida puede estar ocasionada tanto por la propia anisotropía del material como por fenómenos externos como deformaciones mecánicas e incrementos de temperatura.

La birrefringencia, como parámetro, se define como la diferencia local (en valor absoluto) de los índices de propagación del medio en dos direcciones ortogonales. Esto se conoce más concretamente como birrefringencia de fase (*phase birefringence*) β_{rad} [rad/m] y para una onda con velocidad c y longitud de onda λ :

$$\beta_{rad} = |\beta_{rad,x} - \beta_{rad,y}| = \frac{2\pi}{\lambda} |n_x - n_y| = \frac{\omega}{c} \Delta n . \quad (24)$$

La birrefringencia inducirá un retardo entre los dos estados de polarización, lo cual se conoce como retardo de fase (*phase delay*) β [s/m] el cual también puede ser expresado mediante la longitud de pulso (*beat length*) L_b [m]:

$$L_b = \frac{\lambda}{c\beta} = \frac{2\pi}{\beta_{rad}} , \quad (25)$$

El retardo de grupo (*group delay*) τ_g , por otra parte, está relacionado con la derivada respecto de la frecuencia:

$$\tau_g \equiv \left| \frac{\partial \beta_{rad}}{\partial \omega} \right| = \left| \beta - \lambda \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \right| , \quad (26)$$

y es de especial utilidad para calcular el retardo diferencial de grupo (DGD) $\Delta\tau_g = \tau_g \Delta z$, donde Δz es la longitud del segmento estudiado (véase Figura 15).

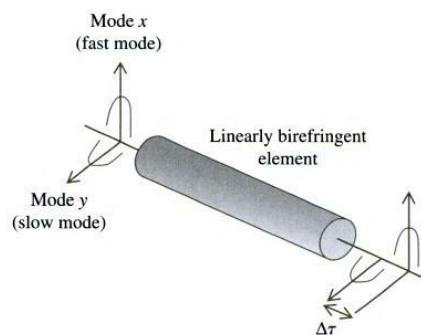


Figura 15: *Diferential group delay* inducido por un elemento con birrefringencia lineal.

4.2.1. El vector de birrefringencia

A partir de los autovalores y autovectores de la matriz de transferencia se puede obtener una representación generalizada de la birrefringencia local. Describiendo una pequeña sección de SMF mediante una matriz unitaria como la de la ecuación 16, el problema de autovalores es el siguiente:

$$\mathbf{U} |s_{\pm}\rangle = e^{\pm i\varphi} |s_{\pm}\rangle , \quad (27)$$

donde $|s_+\rangle$ y $|s_-\rangle$ son los autovectores de \mathbf{U} correspondientes a los autovalores $e^{+i\varphi}$ y $e^{-i\varphi}$ respectivamente.

Estos autovectores forman una base i.e. $\langle s_-|$ y $|s_+\rangle$ y representan físicamente los dos modos ortogonales de propagación. Por definición, si el estado de polarización inicial está determinado por $|s_{\pm}\rangle$ entonces la matriz de transferencia no cambia la polarización, sino que únicamente induce una fase.

Para cada par de autovalores $|s_{\pm}\rangle$ existe un par correspondiente de autovectores \hat{p}_{\pm} en el espacio de Stokes (3D), donde, al ser ortogonales, cumplen que $\hat{p}_- \cdot \hat{p}_+ = -1$. En este espacio la birrefringencia se puede expresar como una magnitud vectorial:

$$\vec{\beta} = \frac{2\varphi}{z} \hat{p}_+, \quad (28)$$

donde la magnitud $2\varphi/z$ representa el retardo de fase por unidad de longitud entre dos señales propagadas en cada uno de los autovectores del sistema.

Además, el vector de birrefringencia puede descomponerse en parte lineal $\vec{\beta}_{\text{lin}}$ y en parte circular $\vec{\beta}_{\text{circ}}$:

$$\vec{\beta} = \vec{\beta}_{\text{lin}} + \vec{\beta}_{\text{circ}} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \beta_3 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

La birrefringencia lineal $\vec{\beta}_{\text{lin}}$ y la circular $\vec{\beta}_{\text{circ}}$ se asocian a esfuerzos laterales y torsión respectivamente. En situaciones en las que ambos fenómenos están presentes se habla de birrefringencia elíptica.

El vector de birrefringencia local determina cómo evoluciona el estado de polarización dentro de un pequeño segmento de fibra, además, la evolución del vector de Stokes \hat{s} con la distancia z está determinada por:

$$\frac{\partial \hat{s}}{\partial z} = \vec{\beta} \times \hat{s}. \quad (30)$$

La evolución de dos campos con estados de polarización \hat{s}_a y \hat{s}_b para un vector de birrefringencia $\hat{\beta}$ es el que se muestra en la Figura 16. Como se puede observar en dicha Figura, los vectores iniciales realizan un giro alrededor del eje $\hat{\beta}$.

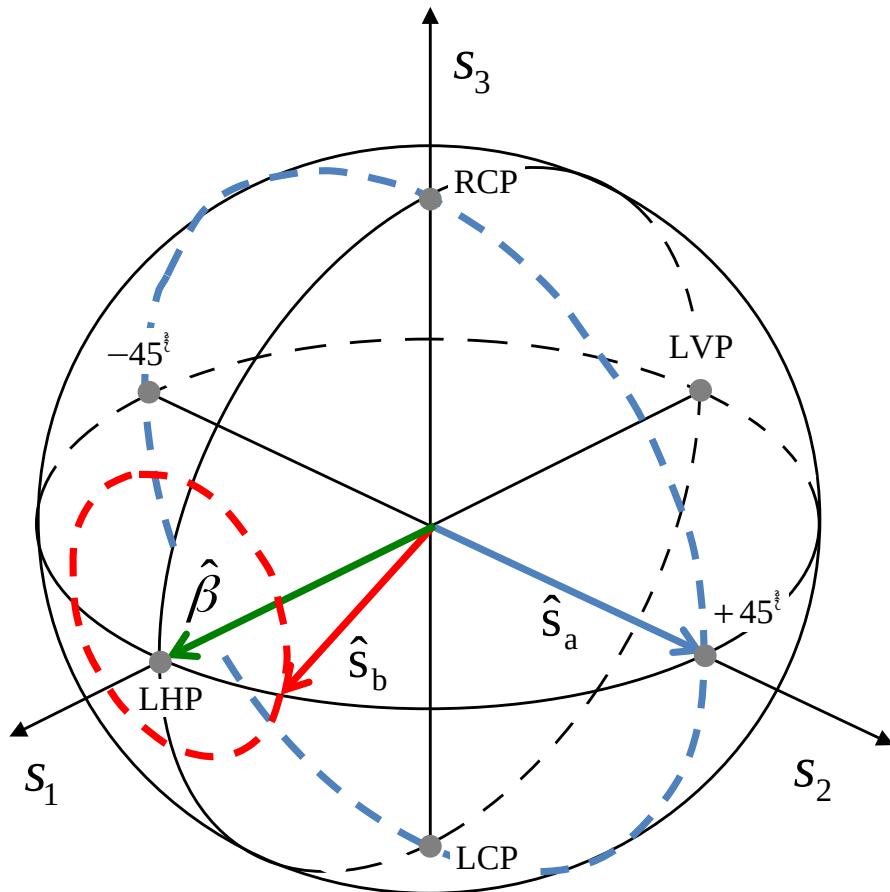


Figura 16: Representación, en la esfera de Poincaré, de la evolución con la distancia de dos haces con estados de polarización diferentes \hat{s}_a y \hat{s}_b

4.3. La dispersión de Rayleigh

La dispersión de la luz en las fibras ópticas se debe básicamente a la interacción entre los fotones y las partículas del medio, lo cual origina que la luz se disperse en todas las direcciones. Este fenómeno puede verse potenciado por factores externos como la deformación y la temperatura. Existen dos tipos principales de dispersión de luz: elástica e inelástica. En la dispersión elástica, la frecuencia de los fotones incidentes y la de los dispersados son iguales, mientras que en la dispersión inelástica la frecuencia de los fotones dispersados se desplaza a frecuencias más bajas (Stokes) o más altas (Anti-Stokes). Estos desplazamientos son iguales a las frecuencias de vibración características de las moléculas. En función del origen de la dispersión se distinguen los siguientes fenómenos (véase Figura 17):

- La dispersión de Rayleigh es el fenómeno de dispersión elástica que resulta de la irregularidad de la estructura molecular, y tiene un gran impacto en la atenuación de la fibra óptica.
- La dispersión de Brillouin es la dispersión inelástica que se produce debido a la deformación o a las ondas acústicas excitadas térmicamente.
- La dispersión de Raman también es una dispersión inelástica y se ve reforzada por las vibraciones moleculares dependientes de la temperatura.

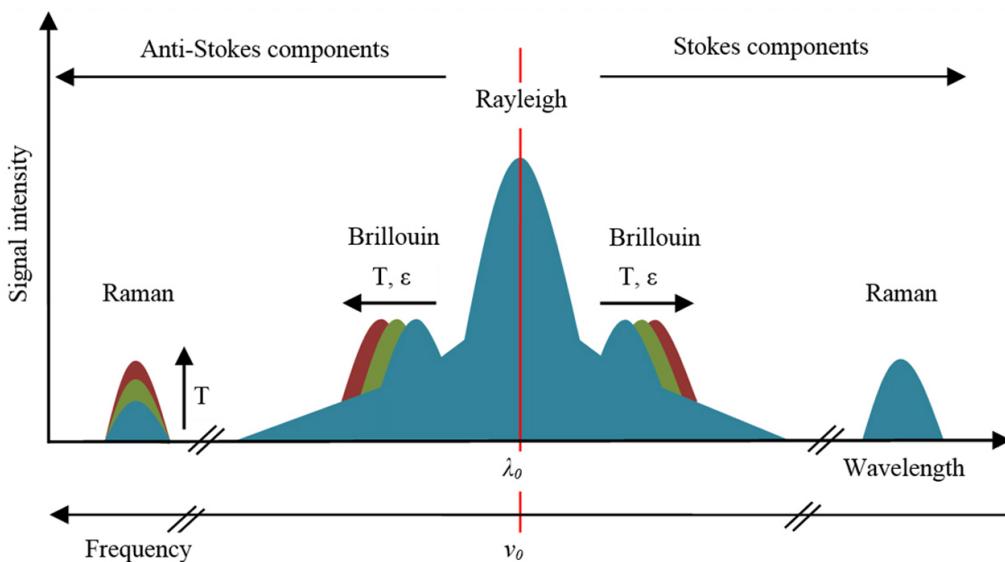


Figura 17: Espectro en frecuencias de las dispersiones que presenta una sección de la fibra respecto a una onda incidente de longitud de onda λ_0



El instrumento empleado para el desarrollo del presente trabajo proporciona únicamente información respecto a la dispersión de Rayleigh y es por ello que será necesario estudiar cómo afecta este fenómeno a la polarización de la luz. La retrodispersión de Rayleigh equivale a una reflexión especular [10], y se representa en la esfera de Poincaré mediante una simetría, $\hat{S}_{\mathbf{s}_1 O \mathbf{s}_2}$, con respecto al ecuador. Por lo tanto, denotando mediante $\hat{R}_{tot}(z)$ la rotación total inducida en el punto de la fibra z , el estado de polarización de la luz retrodispersada viene dado por:

$$\begin{aligned}\hat{s}_{out} &= \hat{R}_{tot}^{-1}(z) \hat{S}_{xOy} \hat{R}_{tot}(z) \hat{s}_{in} = \\ &= \hat{s}_{in} - 2 \left(\hat{R}_{tot}^{-1}(z) \vec{e}_{\mathbf{s}_3} \cdot \hat{s}_{in} \right) \hat{R}_{tot}(z) \vec{e}_{\mathbf{s}_3},\end{aligned}\quad (31)$$

donde se ha empleado que $\hat{S}_{xOy} \hat{s} = \hat{s} - 2(\vec{e}_{\mathbf{s}_3} \cdot \hat{s}) \vec{e}_{\mathbf{s}_3}$. En la Figura 18 se muestra una representación gráfica de este último punto.

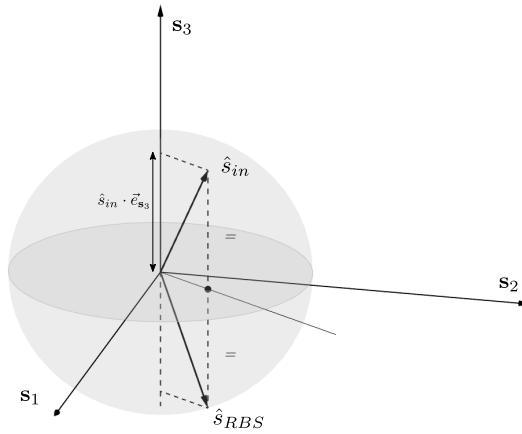


Figura 18: Representación de la retrodispersión de Rayleigh en la esfera de Poincaré.

Para un interrogador óptico la luz retrodispersada interfiere con una reflexión fija que se conoce comúnmente como oscilador local (o LO por sus siglas en inglés). Esta interferencia está modulada por un factor dependiente de la polarización A_{pol} :

$$\begin{aligned}A_{pol} &\equiv \frac{1 + \hat{s}_{out} \cdot \hat{s}_{LO}}{2} = \\ &= \frac{1 + \hat{s}_{in} \cdot \hat{s}_{LO}}{2} - \left(\hat{R}_{tot}(z) \hat{s}_{in} \cdot \vec{e}_{\mathbf{s}_3} \right) \left(\hat{R}_{tot}(z) \hat{s}_{LO} \cdot \vec{e}_{\mathbf{s}_3} \right).\end{aligned}\quad (32)$$

La información referente a esta sección ha sido extraída de [11].

5. Medidas del interferómetro

5.1. Instrumentos empleados

Antes de plantear cualquier tipo de desarrollo es importante plantearse si el equipo empleado para realizar las mediciones proporciona la información requerida.

En algunos casos se usan otro tipo de equipos e incluso se extrae información de otros fenómenos como la dispersión de Brillouin y, además, en ocasiones se emplean otros tipos de fibra óptica que son capaces de mantener la polarización (PMF). En este caso se ha trabajado con fibra óptica monomodo (SMF) y un interrogador óptico comercial tipo OFDR (más información en la Sección 2.3 y 3).

Para determinar si este equipo y esta fibra son capaces de proporcionar información suficiente se recurrió, en el Caso de Estudio 2 [1], a un modelo de inteligencia artificial alimentado con los datos de la correlación entre los distintos estados de polarización de una misma fibra óptica bajo distintas condiciones. Los resultados se muestran en la Figura 19 y las métricas se plasman en la Tabla 1.

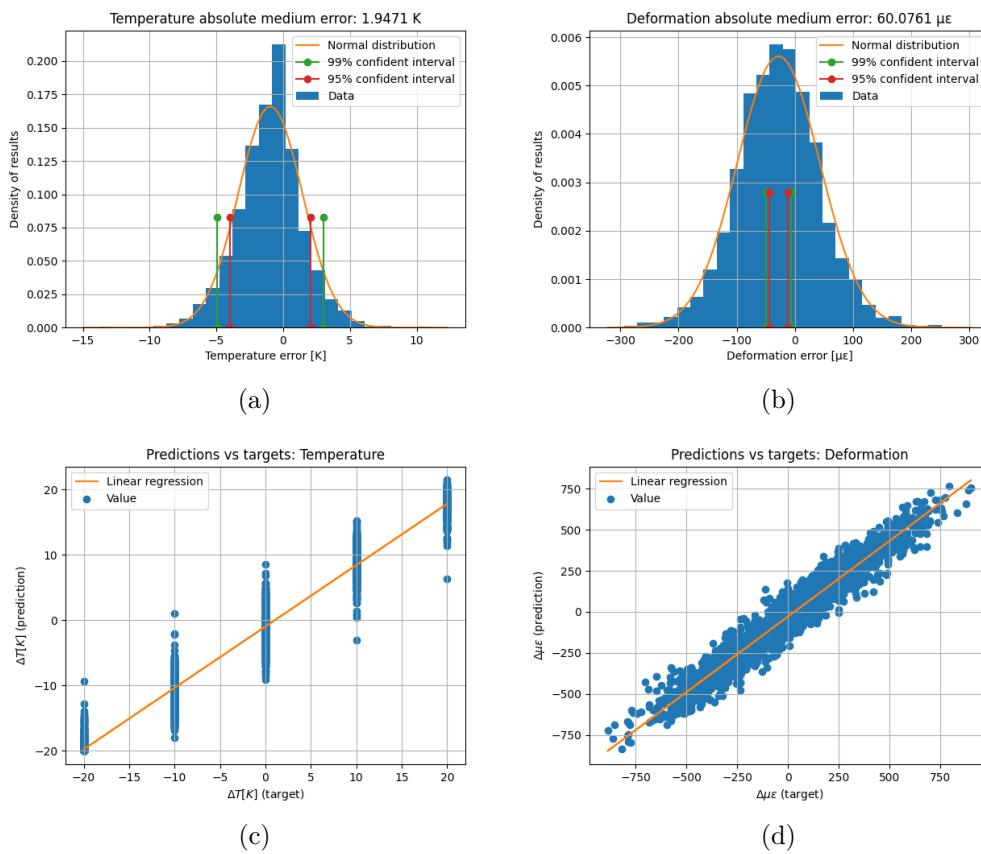
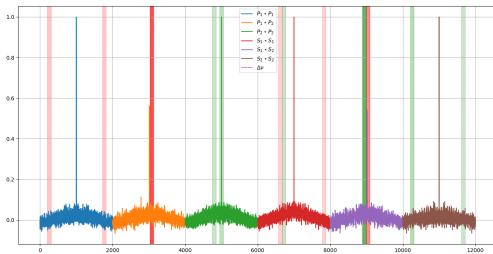


Figura 19: Histogramas de error para las predicciones de temperatura (a) y deformación (b) y regresión lineal de las predicciones de temperatura (c) y deformación (d) frente a los valores reales.

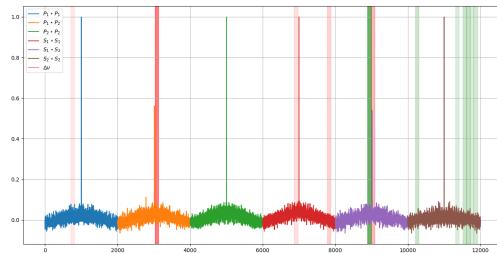
Tabla 1: Métricas de error del modelo de inteligencia artificial.

	Normal distributions for error		Confident intervals		Linear regression $y = mx + n$		
	Variable	$N(\mu, \sigma^2)$	σ^2	99 % Confident interval	95 % Confident interval	m	n
ΔT [K]	-0.5948	2.4044	[-4.5889, 3.3994]	[-3.6339, 2.4444]	0.94	-0.61	0.96
$\Delta \mu\varepsilon$	-27.2083	71.4478	[-48.9810, -5.4357]	[-43.7753, -10.6414]	0.93	-27.39	0.94

Mediante este modelo queda patente la posibilidad de desacoplar las medidas de temperatura y deformación mediante el equipo y fibra óptica empleados. Además, para verificar que el modelo predice siguiendo cierta lógica se ha estudiado éste mediante técnicas de Inteligencia Artificial Explicable (eXplainable Artificial Intelligence (XAI)) de forma que el modelo muestre las partes más relevantes dentro de la información proporcionada (véase Caso de Estudio 3 [2]). Para ello se ha hecho uso de la librería LIME [12] y los resultados son los que se muestran en la Figura 20.



(a)



(b)

Figura 20: Regiones más relevantes de las señales proporcionadas para temperatura (a) y deformación (b).

Como se puede observar el modelo reconoce el desplazamiento espectral y relaciona éste con la información de la autocorrelación para terminar de discernir. Este resultado concuerda con los resultados de Froggat *et al.* [13] donde mide la birrefringencia de una PMF mediante su OBR-4600, que es el mismo que se emplea en este trabajo solo que en este caso se trata de una fibra óptica tipo SMF.

5.2. Lecturas del interferómetro

Como se puede apreciar en la Figura 21, el instrumento empleado no proporciona información sobre los campos eléctricos de la medición ni del oscilador local sino únicamente su interferencia lo cual hace imposible determinar directamente el estado de polarización de la fibra. En el *beam splitter*, el campo eléctrico existente es:

$$|E_{PBS}\rangle = |E_{lo}\rangle + \bar{r}(\omega) |E_m\rangle e^{j\omega(t)\Delta\tau}, \quad (33)$$

donde los campos eléctricos del oscilador local $|E_{lo}\rangle$ y del brazo de medición $\bar{r}(\omega) |E_m\rangle e^{j\omega(t)\Delta\tau}$ se describen con vectores de Jones. En el brazo de medición se tiene un cambio de amplitud $\bar{r}(\omega)$ y un cambio de fase $e^{j\omega(t)\Delta\tau}$ debido a la dispersión de Rayleigh.

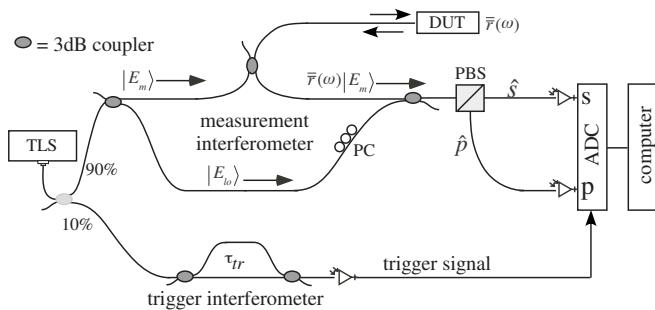


Figura 21: Red de medición para diversidad de polarización. TLS = Tunable Laser Source, ADC = Analog to Digital Converter, PC = Polarization Controller, PBS = Polarization Beam Splitter, τ_{tr} = retardo diferencial de los dos caminos en el trigger interferometer. El DUT (Device Under Test) se caracteriza por la reflectividad espectral compleja, $\bar{r}(\omega)$.

A partir del vector de Jones de la ecuación 33 y asumiendo que la intensidad recibida por cada uno de los detectores **s** y **p** es proporcional al cuadrado del campo eléctrico: $i(\omega) \propto |E_{PBS}\rangle|^2$, los términos de interferencia de cada uno de los detectores serán:

$$\begin{aligned} i_s(\omega) &= 2 \operatorname{Re} \left\{ \left\langle E_{lo} \left| \bar{T}_s^\dagger \bar{T}_s \bar{r}(\omega) \right| E_m \right\rangle \exp[j\omega(t)\Delta\tau] \right\}, \\ i_p(\omega) &= 2 \operatorname{Re} \left\{ \left\langle E_{lo} \left| \bar{T}_p^\dagger \bar{T}_p \bar{r}(\omega) \right| E_m \right\rangle \exp[j\omega(t)\Delta\tau] \right\}, \end{aligned} \quad (34)$$

donde, en esta ocasión, se han empleado los operadores matriciales \bar{T}_s y \bar{T}_p para representar la acción divisora del *beam splitter*.

5.2.1. Reflectividad espectral y retardo de grupo

Los valores reales obtenidos en el dominio de la frecuencia son transformados en valores complejos por medio de la transformada inversa discreta de Fourier (DIFT) en la cual se usa un ancho de ventana tal que se pueda extraer la respuesta del DUT a lo largo del tiempo. A continuación, se realiza la transformada de tiempo corto de Fourier (STFT) para obtener la respuesta en frecuencia de cada ventana y poder calcular así la reflectividad espectral $r(\omega)$ y el *group delay* $\tau_g(\omega)$:

$$r(\omega) = \sqrt{|i_s(\omega)|^2 + |i_p(\omega)|^2}, \quad (35)$$

$$\tau_g(\omega) = \frac{\angle\{i_s(\omega)i_s^*(\omega + \Delta\omega) + i_p(\omega)i_p^*(\omega + \Delta\omega)\}}{\Delta\omega}, \quad (36)$$

donde $\Delta\omega$ es la resolución espectral efectiva y el operador $\angle\{u\}$ denota la fase del número complejo u .

Para más cálculos relacionados con los términos de interferencia es necesario recurrir al tratamiento matricial descrito en la teoría de modos acoplados (*Coupled Mode Theory*) en [14] se puede encontrar más información al respecto de esta sección.

5.2.2. Dispersión de modos de polarización

Para fibras largas la birrefringencia no es constante, sino que tanto su magnitud como su orientación evolucionan aleatoriamente a lo largo de ella. Para modelar este comportamiento se estudia la fibra como una concatenación de segmentos birrefringentes donde los modos rápido y lento tienen tiempos de llegada distintos. Además, al pasar por este segmento, el estado de polarización se verá afectado tal y como describe la ecuación 30. Esto supone un acoplamiento entre la birrefringencia y el estado de polarización y, debido a ello, el Differential Group Delay (DGD) de cada segmento puede contribuir de forma aditiva o sustractiva generando así un comportamiento aleatorio aunque estocástico que será analizado más adelante.

Esta propagación aleatoria del pulso óptico se conoce como dispersión de modos de polarización o PMD y está relacionada directamente con el DGD mediante:

$$\Delta\tau_g = \text{PMD}\sqrt{\Delta z}. \quad (37)$$

6. Óptica estadística

La reflectometría óptica de retrodispersión se basa en aprovechar los cambios aleatorios en el índice de propagación de la fibra originados durante su fabricación ya que, aunque para las telecomunicaciones esto sea un ruido intrínseco del sistema, este ruido es idéntico para dos medidas obtenidas de un segmento de fibra bajo las mismas condiciones ambientales i.e. misma temperatura y estado de deformación. Este ruido intrínseco, tal y como se describió en la Sección 5.2, hace que la retrodispersión de luz en el interior de la fibra óptica ocurra de manera aleatoria. Es por ello que, para poder relacionar las medidas obtenidas del interrogador con las condiciones ambientales de la fibra, es necesario emplear técnicas de análisis estadístico sobre los datos obtenidos.

6.1. Caracterización del ruido

Lo primero que ha de ser estudiado es el carácter de esta distribución aleatoria para poder aplicar unos u otros métodos de análisis estadístico. Como se puede observar en las Figuras 22 y 23 para las medidas obtenidas, tanto en la totalidad de la fibra óptica como en cada uno de los segmentos, se obtiene una distribución gaussiana para las componentes real e imaginaria. En estas Figuras se muestra solo la medida del estado de polarización p ya que los resultados obtenidos para el estado de polarización s son similares y conducen a las mismas conclusiones.

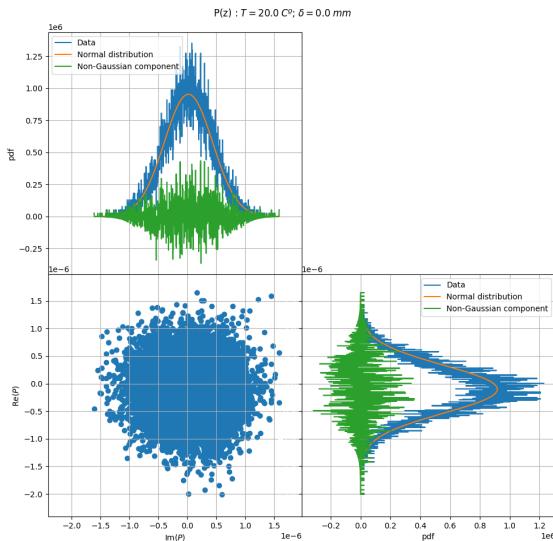


Figura 22: Distribución de valores para el estado de polarización p , para toda la longitud de fibra óptica.

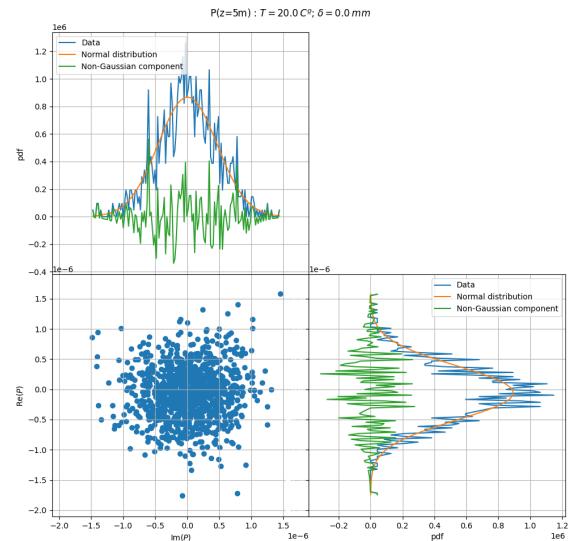


Figura 23: Distribución de valores para el estado de polarización p , para un segmento de fibra óptica localizado.



Si se representa la media y la desviación típica para segmentos contiguos de fibra óptica en diferentes condiciones ambientales (véase Figura 24) se obtienen las distribuciones que se muestran en la Figura 25.

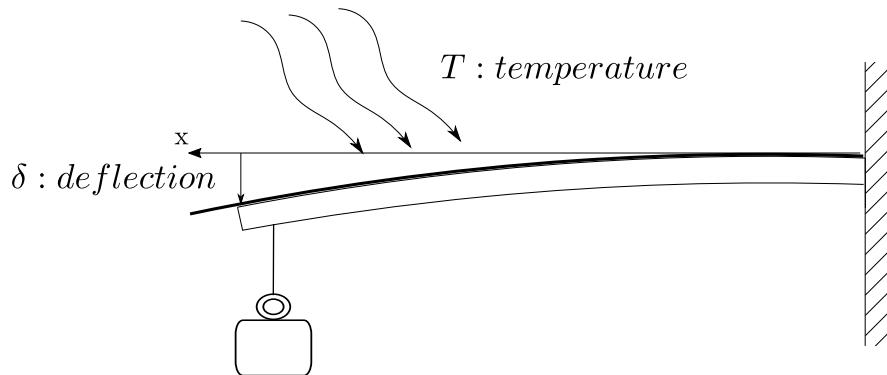


Figura 24: Condiciones ambientales a las que se ha sometido la fibra óptica y significado de las etiquetas empleadas.

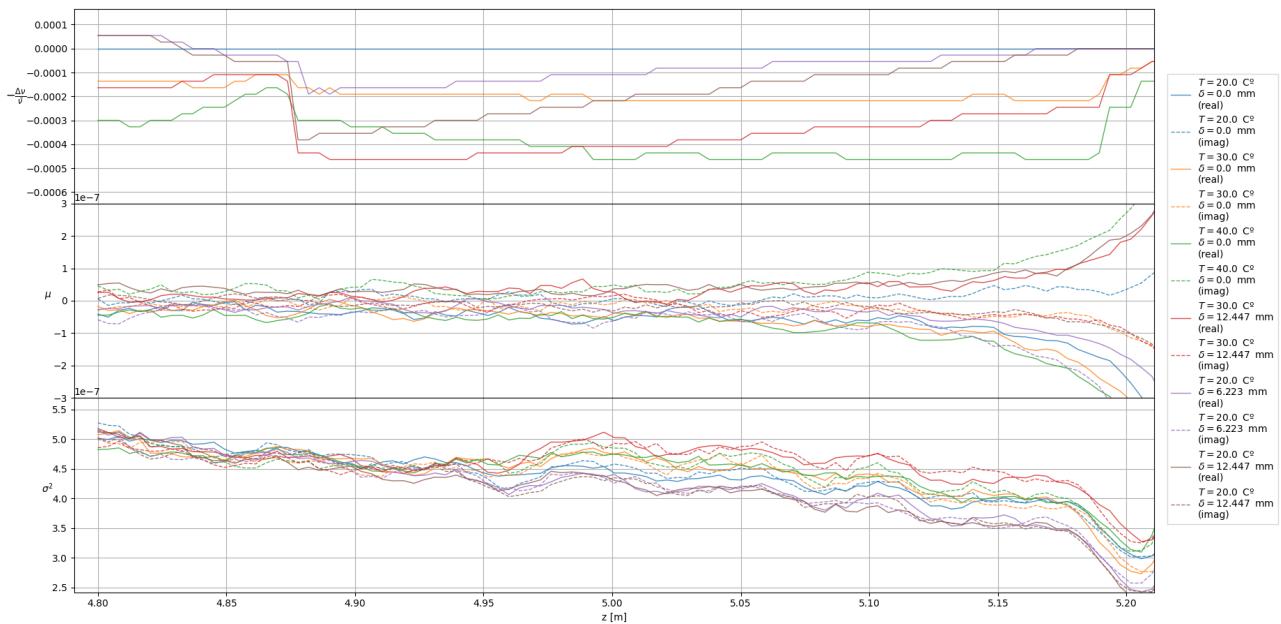


Figura 25: Distribución de valores medios y varianzas de cada segmento a lo largo de la fibra.

Otra forma de estudiar la distribución de valores es mediante su representación en términos de módulo y fase. En este caso, tal y como se muestra en las Figuras 26 y 27, los valores tienen una distribución de Weibull y polinómica para módulo y fase respectivamente. Por un lado, dado que la representación binomial tiene una distribución gaussiana en ambas componentes, es de esperar que el módulo tenga una distribución de Weibull. Por otro lado, la distribución de la fase induce a pensar que se trata de una función de densidad uniforme ya que aunque no es una línea recta no se ha de olvidar que los valores de los extremos del espectro son iguales.

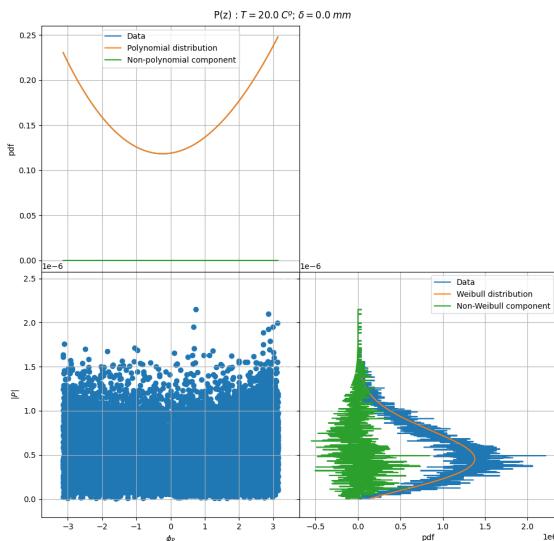


Figura 26: Distribución de valores para el estado de polarización p , para toda la longitud de fibra óptica.

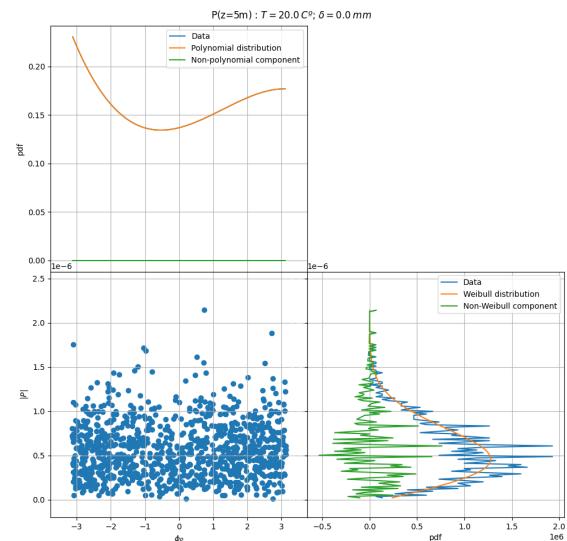


Figura 27: Distribución de valores para el estado de polarización p , para un segmento de fibra óptica localizado.

6.2. Análisis de espectro cruzado

En el análisis de series temporales, el espectro cruzado se utiliza como parte del análisis en el dominio de la frecuencia de la correlación cruzada o la covarianza cruzada entre dos series temporales. Sean $x(t)$ y $y(t)$ dos procesos estocásticos que son conjuntamente estacionarios en sentido amplio, con funciones de autocovariancia γ_{xx} y γ_{yy} y covarianza cruzada γ_{xy} , se define el espectro cruzado Γ_{xy} como la transformada de Fourier de γ_{xy} :

$$\Gamma_{xy}(\nu) = \mathcal{F}\{\gamma_{xy}\}(\nu) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \gamma_{xy}(\tau) e^{-2\pi i \tau f}, \quad (38)$$

donde

$$\gamma_{xy}(\tau) = E[(x_t - \mu_x)(y_{t+\tau} - \mu_y)]. \quad (39)$$

El espectro cruzado se puede descomponer en parte real (co-espectro) e imaginaria (espectro de cuadratura)

$$\Gamma_{xy}(\nu) = \Lambda_{xy}(\nu) - i\Psi_{xy}(\nu), \quad (40)$$

o se puede usar la notación de Euler

$$\Gamma_{xy}(\nu) = A_{xy}(\nu) e^{i\phi_{xy}(\nu)}. \quad (41)$$

donde la amplitud del espectro $A_{xy}(\nu)$ está definida por

$$A_{xy}(\nu) = (\Lambda_{xy}(\nu)^2 + \Psi_{xy}(\nu)^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (42)$$

y la fase $\phi_{xy}(\nu)$

$$\begin{cases} \tan^{-1}(\Psi_{xy}(\nu)/\Lambda_{xy}(\nu)) & \text{if } \Psi_{xy}(\nu) \neq 0 \text{ and } \Lambda_{xy}(\nu) \neq 0 \\ 0 & \text{if } \Psi_{xy}(\nu) = 0 \text{ and } \Lambda_{xy}(\nu) > 0 \\ \pm\pi & \text{if } \Psi_{xy}(\nu) = 0 \text{ and } \Lambda_{xy}(\nu) < 0 \\ \pi/2 & \text{if } \Psi_{xy}(\nu) > 0 \text{ and } \Lambda_{xy}(\nu) = 0 \\ -\pi/2 & \text{if } \Psi_{xy}(\nu) < 0 \text{ and } \Lambda_{xy}(\nu) = 0 \end{cases} \quad (43)$$

Que al computar el desplazamiento espectral se pueda obtener una medida relacionada directamente con el incremento de temperatura y deformación, indica que las series temporales están correladas y contienen cierta causalidad. A lo largo de este desarrollo se estudiarán las dos señales de los dos estados de polarización de un segmento de fibra óptica (véase Figura 28), entre las cuales existe un $-\Delta\nu/\bar{\nu} = 0$. El análisis espectral puede proporcionar información adicional sobre las frecuencias en las que existe correlación, y además el correspondiente desfase temporal.

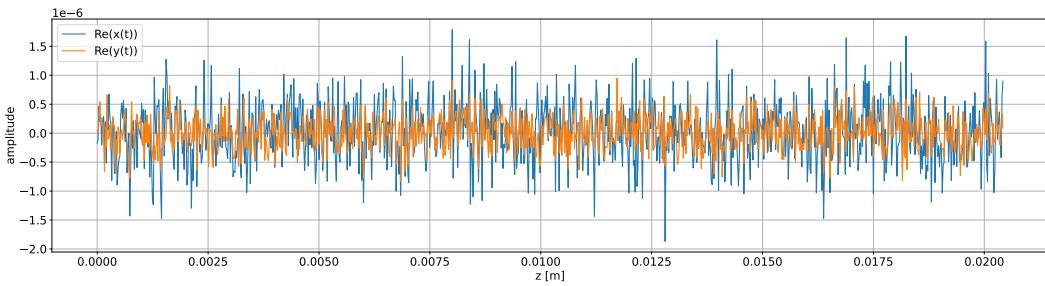


Figura 28: Señales de ejemplo.

6.2.1. PSD, CSD, coherencia y espectro de fase

Para esto último, lo primero es obtener ciertas magnitudes, empezando por la densidad espectral de potencia PSD. Para ello se empleará la función *mtem* descrita en el Anexo A, Sección A.1. Esta función estima el espectro $\hat{\nu}$ en el dominio de la frecuencia (ω) tomando K tapers para obtener un set de K autoespectros incluyendo k autocomponentes a partir de las series temporales $x(t)$ e $y(t)$ digitalizadas mediante N puntos y un ratio de escaneo constante i.e $t = 1, 2, \dots, N$. El set de autoespectros de $x(t)$ estará pues definido como:

$$\hat{f}_{xx}^k(\omega) = \left| \sum_{t=1}^N x(t)g_k(t)e^{-\omega t} \right|^2, \quad (44)$$

donde $g_k(t)$ es el *data taper* para el autocomponente k -ésimo y $e^{-\omega t}$ la transformada de Fourier.

el set de *data tapers* tiene la forma de secuencias Slepianas, lo cual permite una buena robustez.

A partir de esto, el PSD estimado por este método, conocido como *multitaper*, \hat{f}^{MT} (Figura 29) tiene la siguiente expresión:

$$\hat{f}_{xx}^{MT}(\omega) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \hat{f}_{xx}^k(\omega), \quad (45)$$

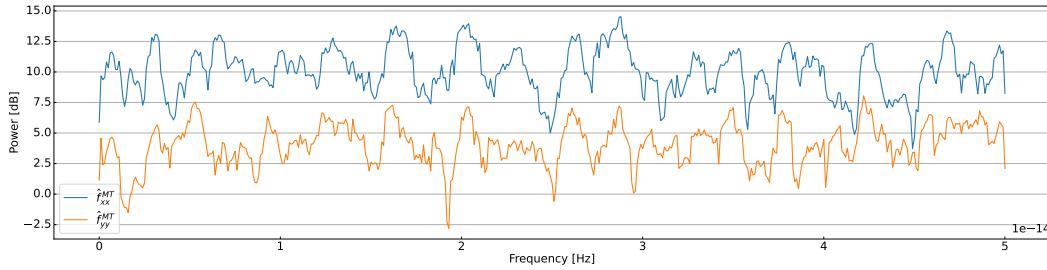


Figura 29: PSD (\hat{f}^{MT}) de las señales de ejemplo.

La estimación de la densidad del espectro cruzado (CSD) (Figura 30) se obtiene a partir del PSD de las series temporales:

$$\hat{f}_{xy}^{MT}(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{f}_{xx}^{MT}(\omega) \hat{f}_{yy}^{*MT}(\omega). \quad (46)$$

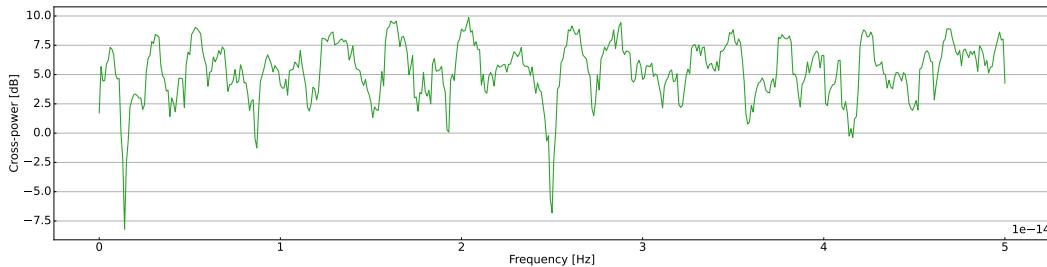


Figura 30: (\hat{f}_{xy}^{MT}) de las señales de ejemplo.

A partir de los PSDs y el CSD se puede computar la coherencia $\hat{Coh}_{xy}(\omega)$ (véase Figura 31) que es un indicativo de cuánto está relacionada la serie $x(t)$ con $y(t)$ a cada una de las frecuencias:

$$\hat{Coh}_{xy}(\omega) = \frac{\left| \hat{f}_{xy}^{MT}(\omega) \right|^2}{\hat{f}_{xx}^{MT}(\omega) \hat{f}_{yy}^{MT}(\omega)}. \quad (47)$$

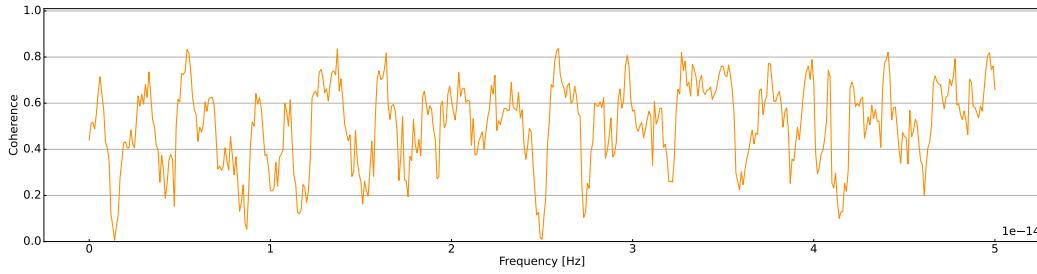


Figura 31: Coherencia (\hat{Coh}_{xy}) de las señales de ejemplo.

Por otro lado, el espectro de fase $\phi_{xy}(\omega)$ representa la diferencia de fase entre $x(t)$ e $y(t)$ a cada frecuencia (Figura 32) y se calcula con las partes real e imaginarias del CSD:

$$\varphi_{xy}(\omega) = \left[\begin{array}{c} \text{Im } \hat{f}_{xy}^{MT}(\omega) \\ \text{Re } \hat{f}_{xy}^{MT}(\omega) \end{array} \right] \quad (48)$$

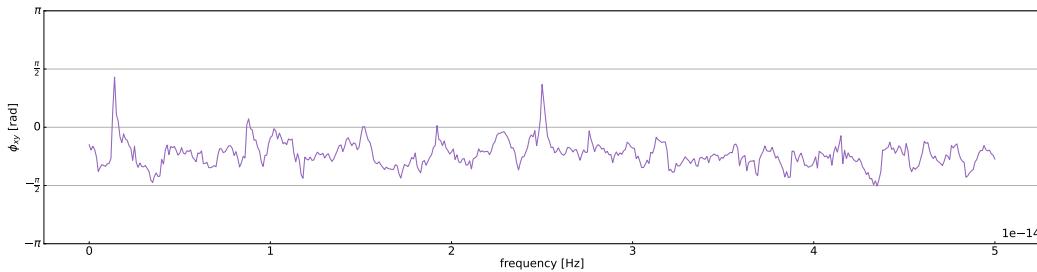


Figura 32: Espectro de fase (ϕ_{xy}) de las señales de ejemplo.

el retardo temporal, $\phi_{xy}(t)$, se obtiene directamente con $\phi_{xy}(t) = \phi_{xy}(\omega)/(2\pi\omega)$.

6.2.2. Incertidumbre del espectro de fase

La incertidumbre del espectro de fase se estima aplicando una simulación de Monte-Carlo. Este método adopta un muestreo semi-aleatorio repetido para obtener la distribución del espectro de fase. Las series temporales semi-aleatorias de $x(t)$ e $y(t)$ se crean de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x_{\text{rand}}(t) &= X(\omega)e^{+\omega t} \\ y_{\text{rand}}(t) &= \left(Y(\omega)\sqrt{1 - \hat{Coh}_{xy}(\omega)^2} \right) e^{+\omega t} + Y(\omega)e^{+\omega t} \end{aligned} \quad (49)$$

donde $X(\omega)$ e $Y(\omega)$ representan las transformadas de Fourier de las señales aleatorias con distribución normal del tamaño de las series temporales divididas por la suma absoluta de la norma de cada señal aleatoria.

A partir de estas series temporales semi-aleatorias, se estima el espectro de fase para 15 simulaciones de Monte-Carlo y los valores de fase se estiman con un nivel de confianza del 95 % para cada frecuencia. De este modo se obtiene una distribución como la que se muestra en la Figura 33. Si se combina esta estimación con el espectro de fase real se obtiene una gráfica como la de la Figura 34 donde a partir del espectro de fase original se puede obtener una banda en la cual los valores de fase con ese nivel de confianza del 95 %.

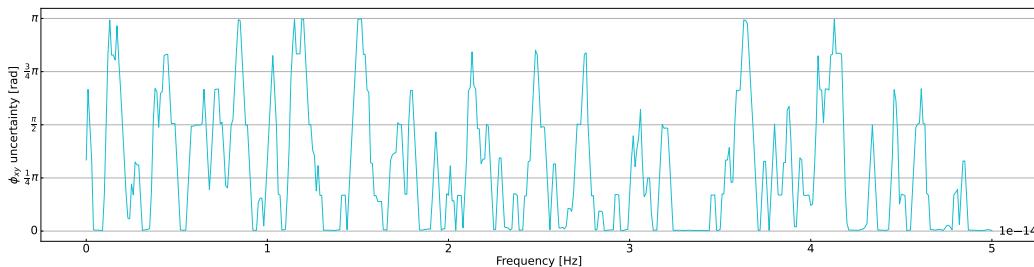


Figura 33: Incertidumbre del espectro de fase de las señales de ejemplo.

Como se puede observar en la Figura 33, existe una baja incertidumbre a la hora de determinar la fase del espectro, ya que la mayoría de puntos tiene una incertidumbre inferior a $\pi/4$ radianes.

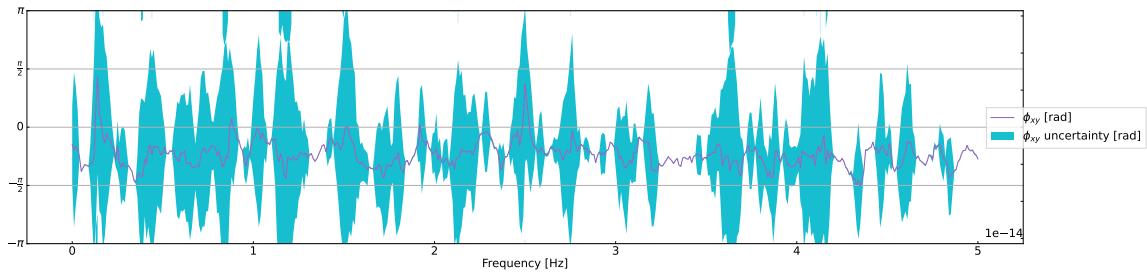


Figura 34: Incertidumbre del espectro de fase y espectro de fase (ϕ_{xy}) de las señales de ejemplo.

A continuación, el espectro de fase en el dominio de la frecuencia se transforma para obtener el desfase temporal, el cual se relaciona directamente con el desfase espacial (Figura 35) mediante la velocidad c y el índice de propagación de la luz medio \tilde{n} .

$$\phi_{xy}(z) = \frac{c}{\tilde{n}} \frac{\phi_{xy}(\omega)}{2\pi\omega} \quad (50)$$

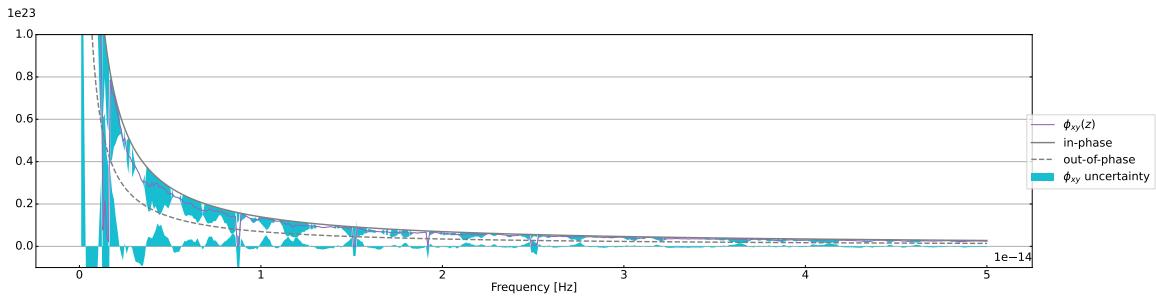


Figura 35: Retardo espacial del espectro de fase ($\phi_{xy}(z)$).

Información referente a este apartado ha sido extraída de [15] y [16].

6.3. Desplazamiento espectral del espectro de fase

Si se computa el espectro de fase cruzado, entre los estados de polarización s-p (véase Sección 4) y se compara con el espectro de fase del mismo segmento de fibra óptica bajo otras condiciones ambientales se obtiene una medida linealmente proporcional a la temperatura y la deformación a las que está sometido el segmento de fibra. En la Figura 36 se muestra el algoritmo empleado para obtener esta medida.

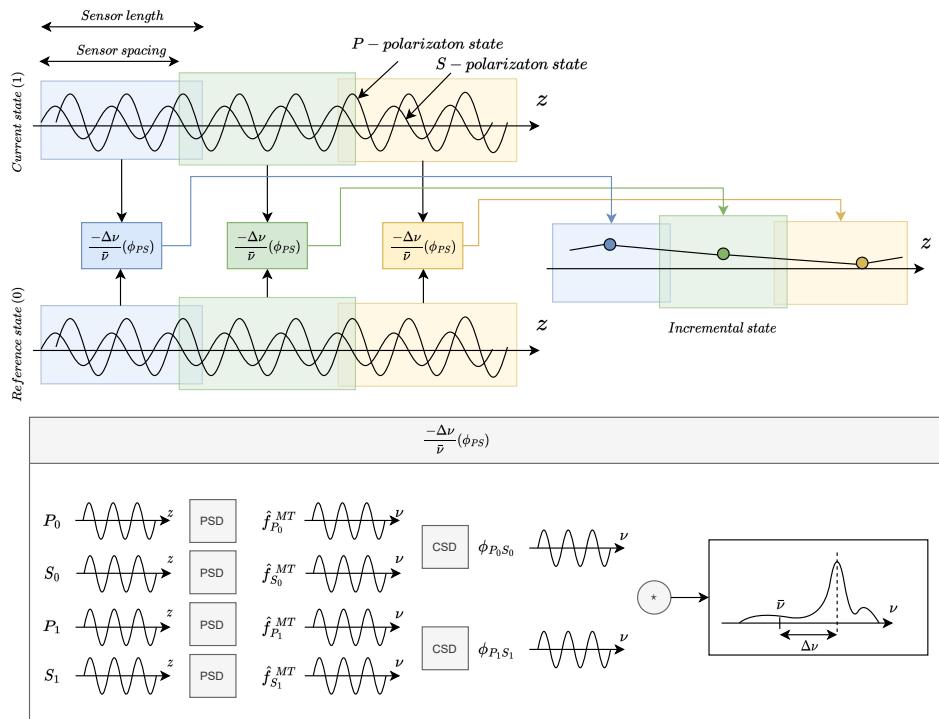


Figura 36: Retardo espacial del espectro de fase ($\phi_{xy}(z)$).

Esta medida, aunque se obtiene de forma similar al desplazamiento espectral clásico, se realiza sobre el espectro de fase en lugar de sobre la señal obtenida para un solo estado de polarización. Al tratarse en este caso de una magnitud relacionada con ambos estados de polarización y del espectro cruzado que conforman entre sí, se obtiene una medida adicional que no es proporcional a la anterior.

Para probar este último punto, se han tomado 909 medidas etiquetadas cada una de ellas con un incremento de temperatura y de estado de deformación. Véase Figura 37 para apreciar la distribución de medidas disponibles.

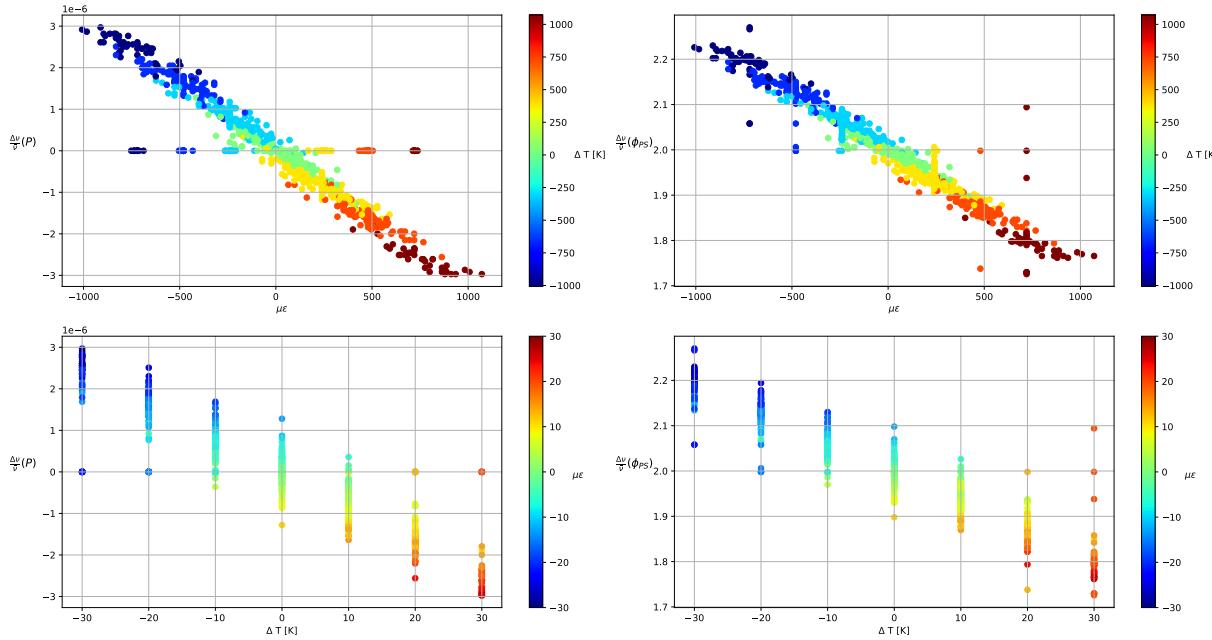


Figura 37: Distribución de valores experimentales.

Una vez obtenidas estas medidas, se realiza una regresión lineal, para obtener la matriz que relaciona los desplazamientos espectrales con los incrementos de temperatura y deformación

$$\begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{\Delta\nu}{\bar{\nu}}(P) \\ -\frac{\Delta\nu}{\bar{\nu}}(\phi_{PS}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}, \quad (51)$$

Una vez obtenidos los valores de los coeficientes de la matriz y del término independiente mediante la regresión lineal por mínimos cuadrados de las medidas experimentales se obtiene lo siguiente:

$$\begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3.591 \cdot 10^7 & -3.353 \cdot 10^3 \\ -3.780 \cdot 10^5 & -1.399 \cdot 10^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{\Delta\nu}{\bar{\nu}}(P) \\ -\frac{\Delta\nu}{\bar{\nu}}(\phi_{PS}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 6698.102 \\ 279.459 \end{pmatrix}, \quad (52)$$

$$\det(\mathbf{K}) = 3.758 \cdot 10^9, \quad (53)$$

lo cual demuestra que las ecuaciones que conforman el sistema son linealmente independientes y por tanto, de acuerdo con el teorema de Rouché-Frobenius, existe solución y es única.

La regresión lineal se ha realizado sobre medidas experimentales, las cuales llevan asociado un error que puede comprometer la bondad de los coeficientes obtenidos. Por ello, se muestran, al estilo de la Subsección 5.1, las métricas de error del ajuste mediante la Figura 38 y la Tabla 2.

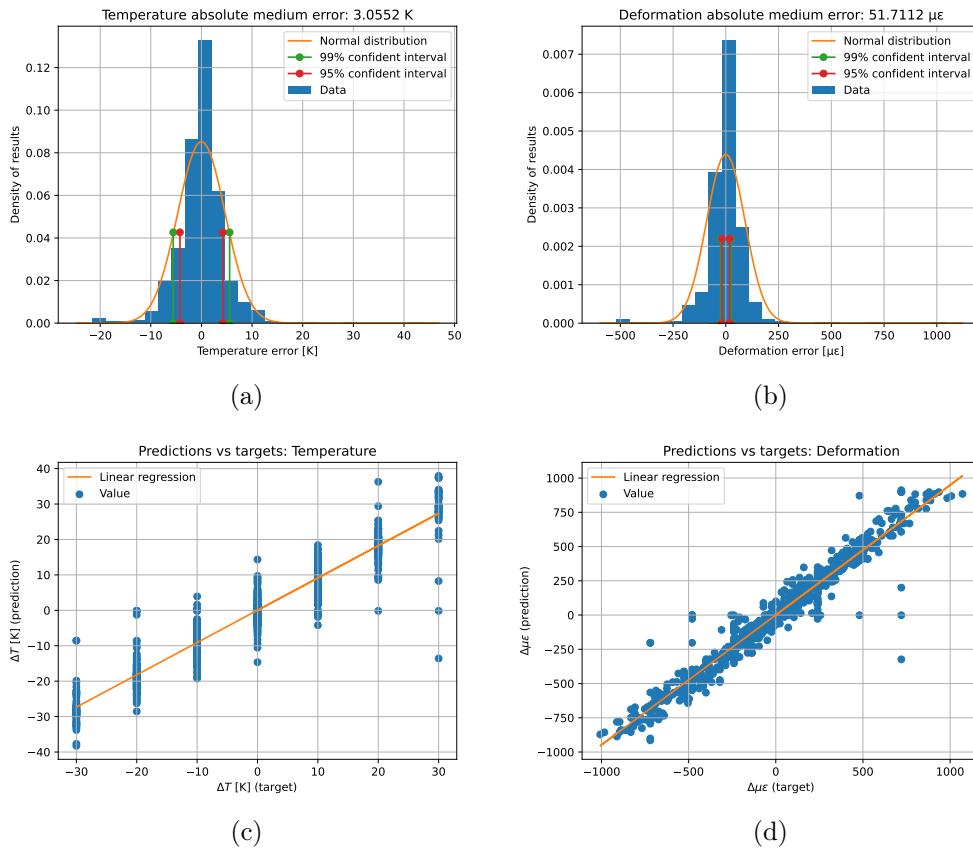


Figura 38: Histogramas de error para el ajuste de temperatura (a) y deformación (b) y regresión lineal del sistema de temperatura (c) y deformación (d) frente a los valores experimentales empleados para el ajuste.

Tabla 2: Métricas de error de la regresión lineal con los datos experimentales.

	Normal distributions for error		Confident intervals		Linear regression $y = mx + n$		
Variable	$N(\mu, \sigma^2)$	σ^2	99 % Confident interval	95 % Confident interval	m	n	r^2
ΔT [K]	0	4.6759	[-5.5699, 5.5699]	[-4.2382, 4.2382]	0.91	0.02	0.91
$\Delta \mu\epsilon$	0	90.6106	[-24.5192, 24.5192]	[-18.6568, 18.6568]	0.95	0.38	0.95



Aunque estos resultados hayan sido presentados de manera similar a los obtenidos mediante inteligencia artificial, esto no debe dar lugar a confusión ya que son conceptos diferentes. Por un lado, la inteligencia artificial tomaba un conjunto de señales y a partir de ella obtenía la distribución de pesos que minimizaba el error de salida, mientras que, por otro lado, el sistema de ecuaciones lineal planteado supone una simple transformación lineal del espacio de los desplazamientos espectrales al de los incrementos de temperatura y deformación.

Huelga decir, que los datos experimentales disponibles no son lo suficientemente fiables como para establecer una relación lo suficientemente precisa. Sin embargo, es sencillo ajustar con precisión los coeficientes de la matriz siempre y cuando se cuente con un banco de ensayos adecuado.

Por último, ha de mencionarse que, aunque se ha obtenido una segunda medida para cerrar el sistema de ecuaciones, este puede ampliarse con la inclusión de terceras variables a considerar, tales como: esfuerzos transversales y de torsión; interferencias electromagnéticas; estado y composición del *coating* de la fibra óptica; etc. Para poder determinar este tipo de variables será necesario seguir estudiando la respuesta de la fibra óptica desde el enfoque de la óptica estadística.

7. Aplicación en el curado de laminados de material compuesto

Los sensores de fibra óptica son de tamaño reducido y tienen un amplio rango de funcionamiento, estas características los convierten en un candidato idóneo para su uso como sensores embebidos dentro del material compuesto ya que pueden ser colocados durante el proceso de fabricación y ser usados tanto para monitorizar el mismo como para monitorizar la vida en servicio de una pieza ya fabricada.

7.1. Monitorización del proceso de curado

A la hora de monitorizar el curado es importante considerar qué variables físicas son las de interés o las accesibles para los sensores empleados.

El primer parámetro de interés es la temperatura, pues de ella dependen las transformaciones térmicas y otros procesos químicos involucrados en el proceso. Así, mediante sensores de fibra óptica, se puede determinar el mapa de temperaturas, el punto de gelificación y el grado de curado de la pieza.

El segundo parámetro de interés es la deformación ya que es fruto de los esfuerzos residuales. Éstos últimos, pueden ser de diversa índole pero solo los dos últimos provocan distorsiones:

- Microscópicos: entre los propios constituyentes, debido a los diferentes coeficientes de expansión térmica y al encogimiento de la resina.
- Macroscópicos: entre las capas de laminado (plies).
- Estructurales: en la dirección through-thickness.

Además de las medidas experimentales se puede recurrir a métodos analíticos o incluso numéricos para predecir la deformación. Dado que no son excluyentes, la medida extraída experimentalmente con sensores de fibra óptica se puede usar para comprobar los modelos teóricos como en [17] y [18]. Sin embargo, en este caso, simplemente se estudiará el desempeño de sensores de fibra óptica basados en medida distribuida para la monitorización del proceso de curado. En un primer lugar será necesario determinar si los sensores son capaces de obtener medidas de todo el proceso de curado y de ser así, se emplearán estos datos para determinar la influencia de la secuencia de apilado así como los útiles empleados.

7.2. Probetas empleadas

Las probetas empleadas para el estudio del curado de material compuesto mediante estos sensores de medida distribuida se dividen en dos grupos.

- Por un lado están las probetas empleadas para caracterizar el efecto de la simetría, asimetría y compensado (primer grupo) cuyas secuencias de apilado son:

Apilado simétrico : $[90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$,

Apilado asimétrico : $[90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ]$,

Apilado compensado : $[90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, \textcolor{red}{90^\circ}]$,

donde la capa añadida a posteriori se ha marcado en rojo. En este caso se ha embebido fibra óptica justo en la mitad del laminado (entre la segunda y tercera capa) siguiendo el patrón que se muestra en la Figura 39.

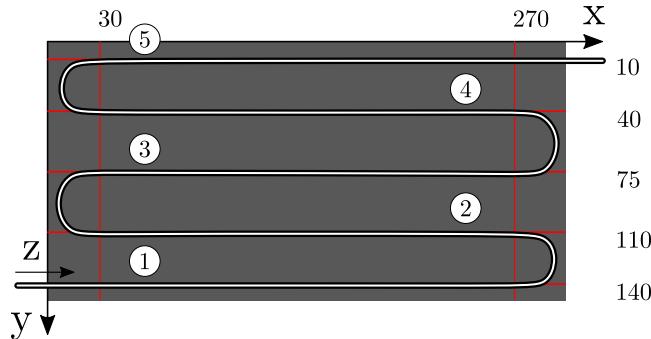


Figura 39: Distribución de la fibra óptica embebida con los segmentos numerados.

- Por otro lado, las probetas empleadas para el estudio de la influencia del material del útil (segundo grupo) tienen las siguientes secuencias de apilado:

Apilado simétrico : $[0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ]$,

Apilado asimétrico : $[0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$,

En este caso la fibra óptica se ha embebido en tres alturas: entre la primera y segunda capa; entre la tercera y la cuarta; y sobre la sexta y última, en el exterior. El patrón que sigue la fibra en este caso es el que se muestra en la Figura 40.

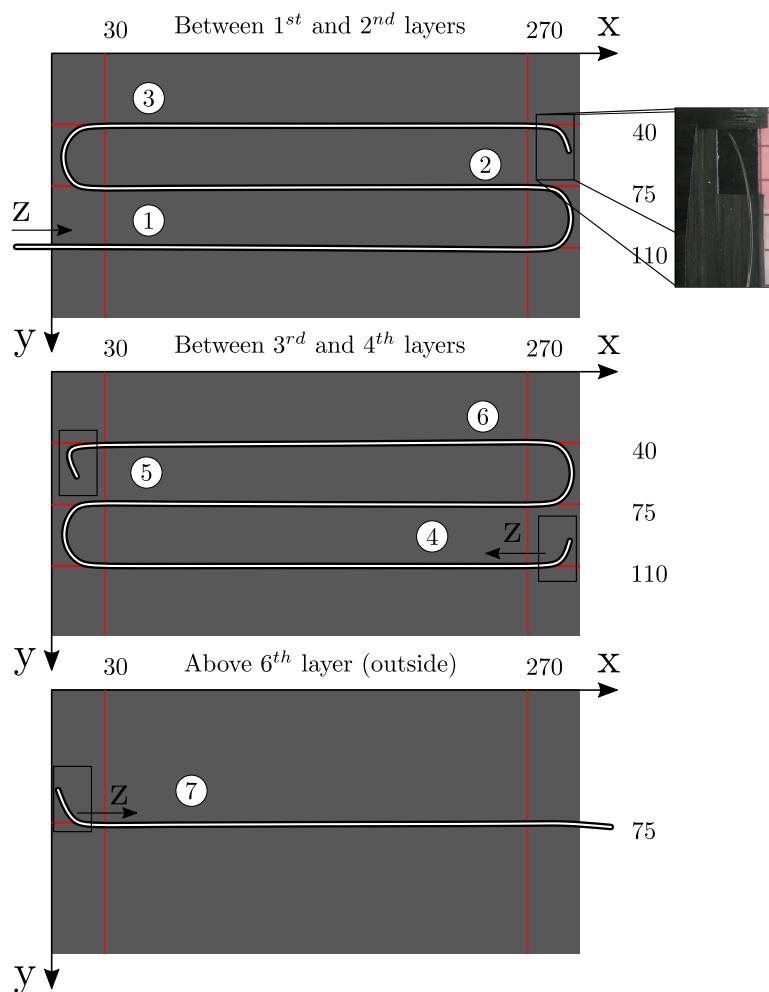


Figura 40: Distribución de la fibra óptica embebida para las diferentes intercapas con los segmentos numerados.

7.3. Procedimiento, útiles y equipos

Todas las probetas están fabricadas de preimpregnado IM7-8552 (véase [19], [20], [21] y [22]). Este material cura a 180°C y 7 bar durante 2 horas (véase [4] y Figura 41), y para cumplir con estas especificaciones, dado que las probetas son planas, se ha usado una prensa de platos calientes. En la Figura 42 se muestran los equipos y útiles empleados para llevar a cabo la monitorización del curado.

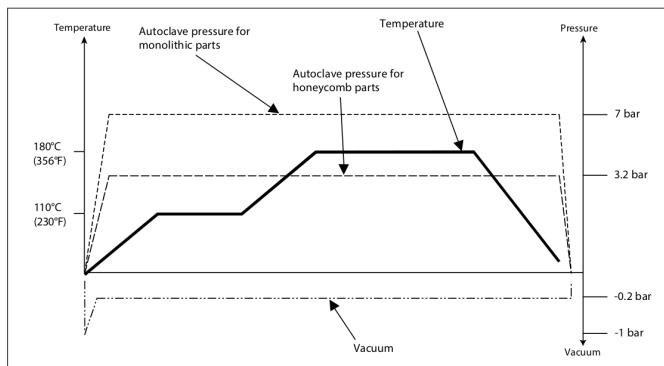


Figura 41: Ciclo de curado del preimpregnado IM7-8552 de Hexcell Composites ([4]).



Figura 42: Prensa de platos calientes y equipos empleados para la monitorización del curado.

Dado que el curado se realiza en una prensa de platos calientes se sitúa una lámina por encima y otra por debajo como útiles de fabricación. En el caso del primer grupo de probetas, se han empleado dos planchas de aluminio recubiertas de film antiadherente. En el caso del segundo grupo de probetas, se han empleado planchas de aluminio, acero y fibra de carbono sobre las cuales se ha aplicado desmoldeante. En la Figura 43 se muestran los útiles empleados.

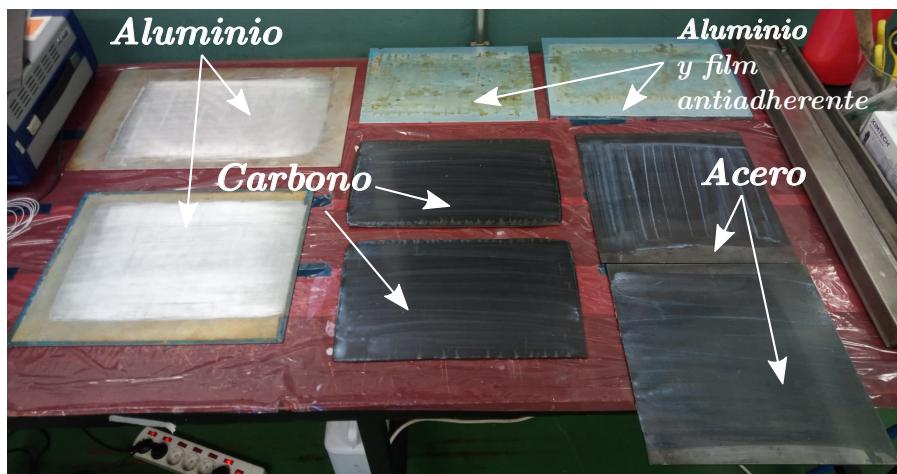


Figura 43: Útiles empleados para el curado de las probetas en la prensa de platos calientes.

7.4. Medidas obtenidas

Una vez monitorizadas todas las probetas se procesan las medidas obtenidas por el interferómetro y se computa el desplazamiento espectral de la señal. Se ha empleado esta medida y no otra ya que el desplazamiento espectral relativo varía con la temperatura y la deformación de acuerdo a:

$$-\frac{\Delta\nu}{\bar{\nu}} = K_T \Delta T + K_\varepsilon \Delta \varepsilon , \quad (54)$$

y dado que el espesor de las probetas es reducido (1.2 mm en el caso de seis capas) se puede asumir que la temperatura es homogénea para el laminado, siendo la diferencia de desplazamiento espectral relativo proporcional a la diferencia de estados de deformación entre unos segmentos y otros. Tomando medidas cada minuto durante el ciclo de curado, se obtienen distribuciones como la que se muestra en la Figura 44 donde se aprecia tanto la distribución espacial de medidas como la temporal. Además, sobre esa misma Figura se han delimitado los intervalos correspondientes a los segmentos rectos de fibra para realizar un promedio ya que en teoría la distribución de esfuerzos y térmica debería ser homogénea. Representando la evolución temporal de dichos promedios para cada segmento se obtienen evoluciones como la de la Figura 45.

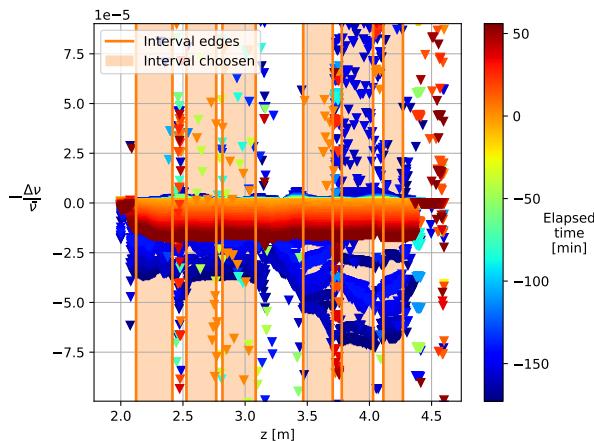


Figura 44: Distribución espacial de las medidas tomadas y en escala de colores los diferentes tiempos (inicio del enfriamiento como referencia).

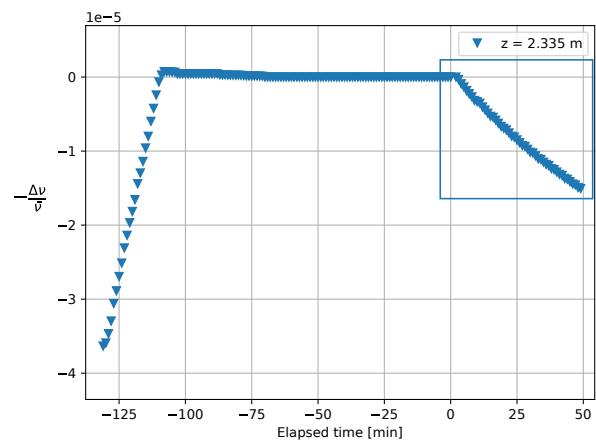
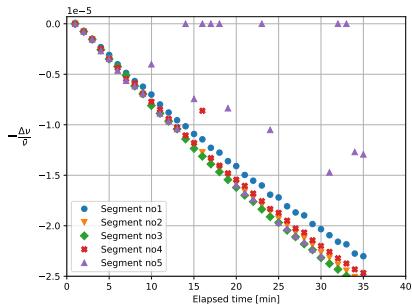
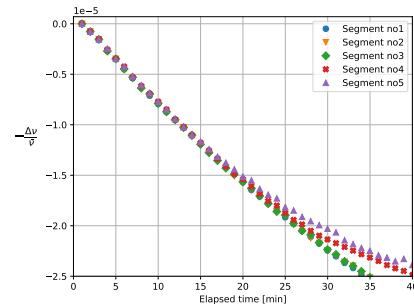


Figura 45: Evolución temporal del promedio de un segmento.

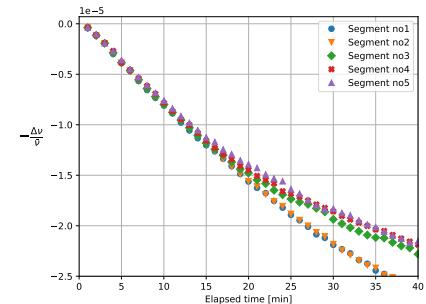
Para las diferentes probetas analizadas la evolución temporal del promedio de cada segmento se muestra en las Figuras 46 a 48, donde se muestra solo la parte del enfriamiento (recuadrada en la Figura 45) ya que es ahí donde se originan los esfuerzos residuales.



(a) Apilado simétrico

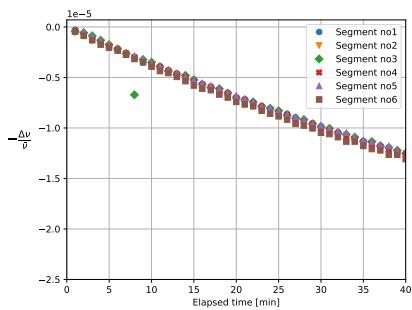


(b) Apilado asimétrico.

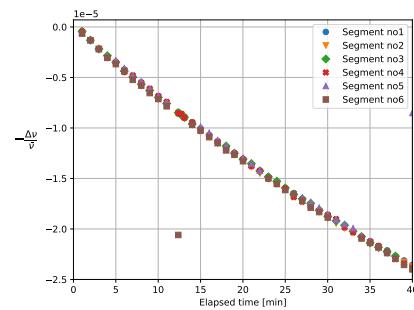


(c) Compensación.

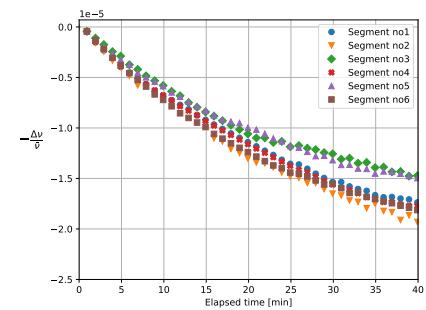
Figura 46: Evolución temporal de los promedios de cada segmento de las probetas del primer grupo.



(a) Carbono

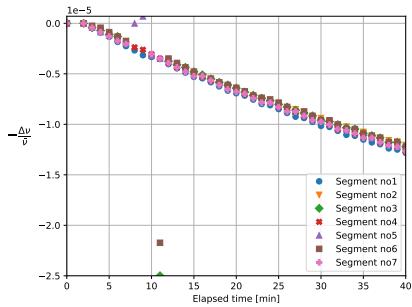


(b) Acero.

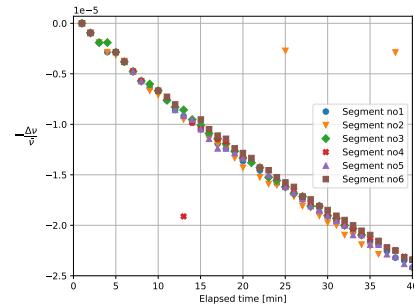


(c) Aluminio.

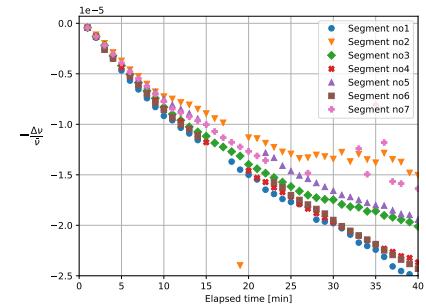
Figura 47: Evolución temporal de los promedios de cada segmento de las probetas del segundo grupo con apilado simétrico.



(a) Carbono



(b) Acero.



(c) Aluminio.

Figura 48: Evolución temporal de los promedios de cada segmento de las probetas del segundo grupo con apilado asimétrico.

Como se puede observar, una vez comienza el enfriamiento, existe una evolución dispar de las distintas configuraciones, es decir, que se obtiene la distribución de esfuerzos residuales del laminado una vez fabricado. Si se toman los valores una vez transcurridos 35 minutos (a unos 144 C°) se obtienen, para el caso del primer grupo de probetas los resultados que se muestran en la Figura 49 y para el segundo grupo de probetas los resultados que se muestran en la Figura 50 donde se ha eliminado el valor del séptimo segmento ya que en algunos casos se ha dañado, perdiéndose así la información.

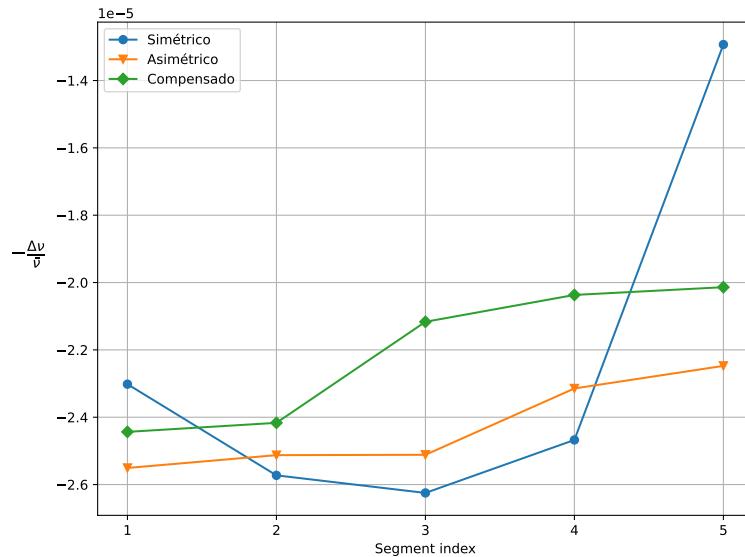


Figura 49: Valores del desplazamiento espectral una vez transcurridos 35 minutos de enfriamiento para el primer grupo de probetas.

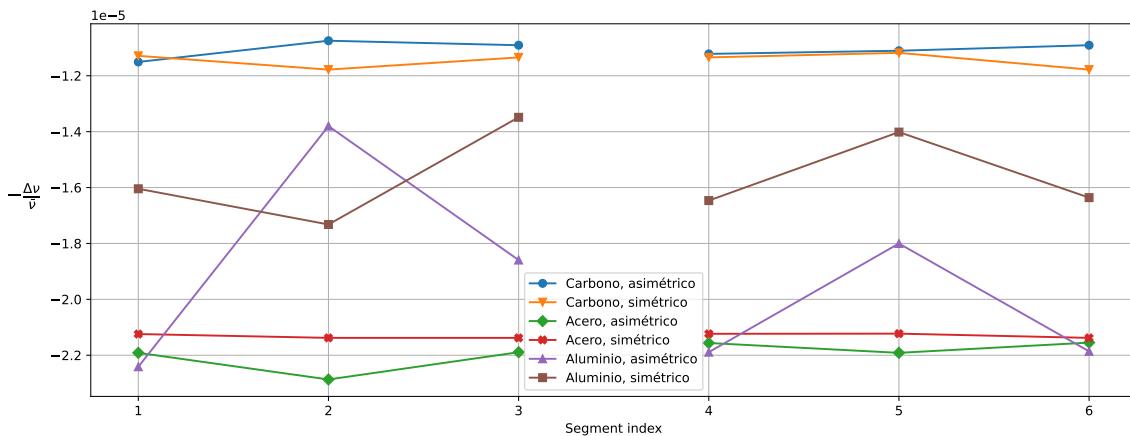


Figura 50: Valores del desplazamiento espectral una vez transcurridos 35 minutos de enfriamiento para el segundo grupo de probetas.



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

En estas Figuras se puede observar una distribución no uniforme a lo largo del laminado, originada por los esfuerzos de borde, y una distribución simétrica o asimétrica de los mismos en función del tipo del laminado. Además para el caso de útiles de aluminio, esta discordancia es mayor que la de carbono o acero. En vista de estos resultados sería interesante monitorizar todo el proceso de curado, hasta llegar a temperatura ambiente pero adquiriendo datos con más frecuencia en las zonas más relevantes y reduciendo la tasa de adquisición en las partes menos importantes.

8. Monitorización de ensayos

Gracias a la colaboración del Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial [23] y el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja [24], se han podido monitorizar una serie de ensayos mediante con el OBR-4600 de LUNA-Innovations. Gracias a esto se pueden obtener los resultados que se muestran en el presente trabajo los cuales se han empleado para correlar las medidas obtenidas en los distintos ensayos mediante sensores más convencionales como galgas extensiométricas y extensómetros.

8.1. Flexión de una viga de material compuesto

Este ensayo ha consistido en la flexión de cuatro vigas de material compuesto de fibra de vidrio como parte de un proyecto de DACOMAT (véase [25]). Dos de estas vigas (1 y 3) estaban fabricadas con fibra de vidrio convencional mientras que las otras dos (2 y 4) estaban fabricadas con una resina experimental. El objetivo era monitorizar el ensayo a flexión y a su vez analizar mediante sensores piezoelectrónicos la evolución de una grieta previamente iniciada en el centro del ala inferior. Además, se propuso el uso de FOS de medida distribuida para monitorizar tanto las deformaciones como la evolución de la grieta de forma paralela. En la Figura 51 se muestra un esquema del ensayo y la distribución de fibra óptica y en la Figura 52 se puede ver la grieta iniciada en la parte inferior.

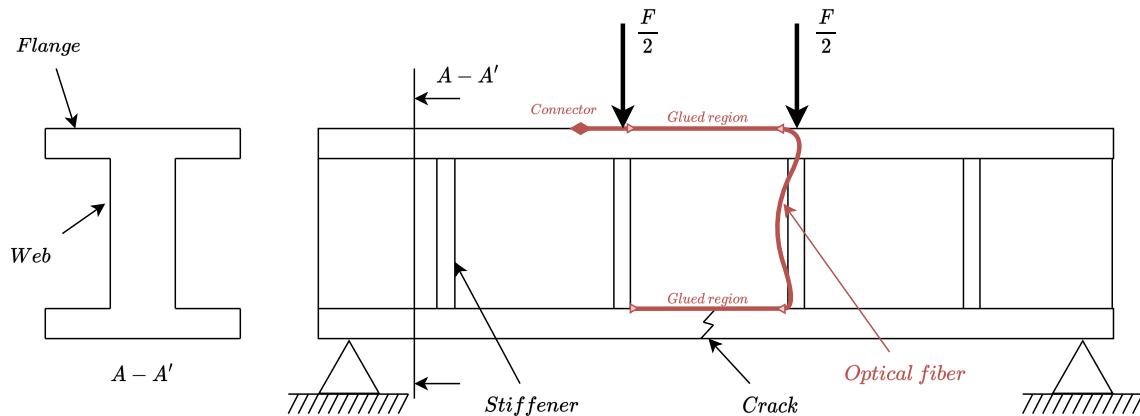


Figura 51: Esquema del ensayo a flexión de las vigas.

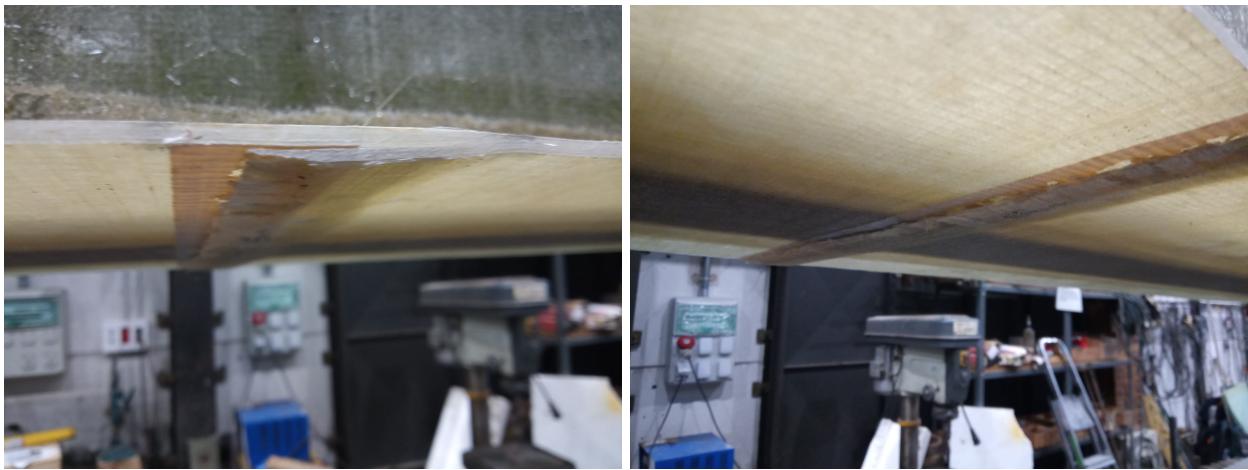


Figura 52: Grieta iniciada en el alma inferior de la viga.

Lamentablemente, el cálculo de elementos finitos no fue capaz de prever el pandeo del ala superior de la viga (Figura 53) que acabó provocando que esa región se despegara del alma (Figura 54), de forma que la grieta no llegó a propagarse hasta originar la rotura castaстрófica tal y como se esperaba. Para tratar de minimizar este efecto se atornillaron dos perfiles en L de acero al ala superior de dos vigas (3 y 4, una de cada tipo) y se repitió el ensayo, sin embargo esta medida, aunque eficaz, no pudo evitar el pandeo a cargas superiores. A pesar de ello, fue posible monitorizar el ensayo por completo mediante fibra óptica, incluso una vez despegada el ala superior.



Figura 53: Viga durante el ensayo en la cual se puede apreciar el pandeo del ala superior.



Figura 54: Viga una vez despegada el ala superior del alma.

En las Figuras 55 a 58 se muestran los resultados de los ensayos de las distintas vigas. En ellas se puede distinguir, a la izquierda, la zona pegada al ala superior (donde aparecen las oscilaciones de pandeo) y a la derecha, la zona pegada al ala inferior donde solo se producen esfuerzos de tracción, más acentuados en las cercanías de la grieta. Como se puede observar la inclusión de rigidizadores en L permite retrasar el pandeo del ala superior pero no eliminarlo.

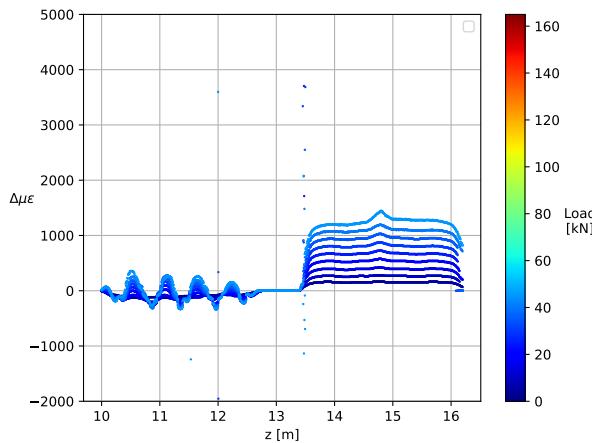


Figura 55: Viga 1: conformada con resina convencional y sin rigidizadores en L (fallo de la viga a 45 kN).

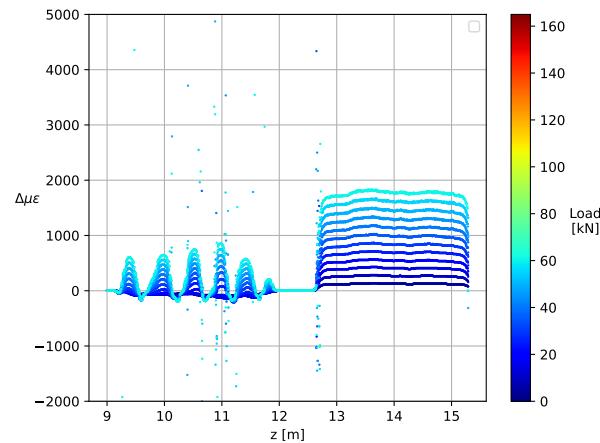


Figura 56: Viga 2: conformada con resina experimental y sin rigidizadores en L (fallo de la viga a 65 kN).

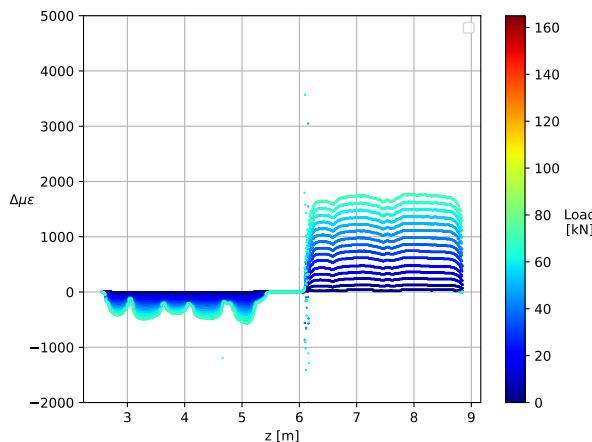


Figura 57: Viga 3: conformada con resina convencional y con rigidizadores en L (parada del ensayo a 115 kN, para conservar los rigidizadores, con fallo de la medida a partir de 70 kN).

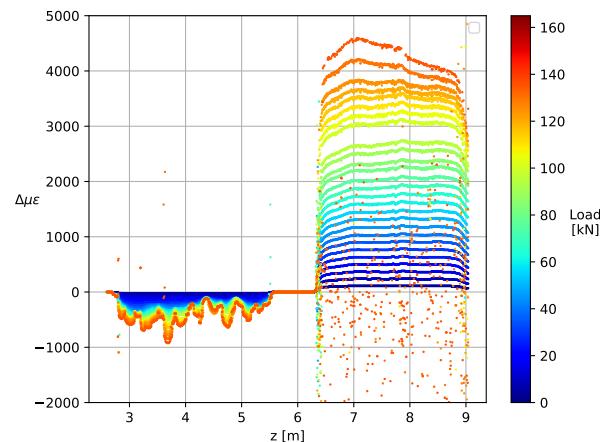


Figura 58: Viga 4: conformada con resina experimental y con rigidizadores en L (fallo de la viga a 135 kN).

Como la fibra óptica se mantuvo funcional tras el fallo (a excepción de la tercera viga) se han podido comparar los estados de las vigas tras el despegue del ala superior. Estos resultados se muestran en la Figura 59

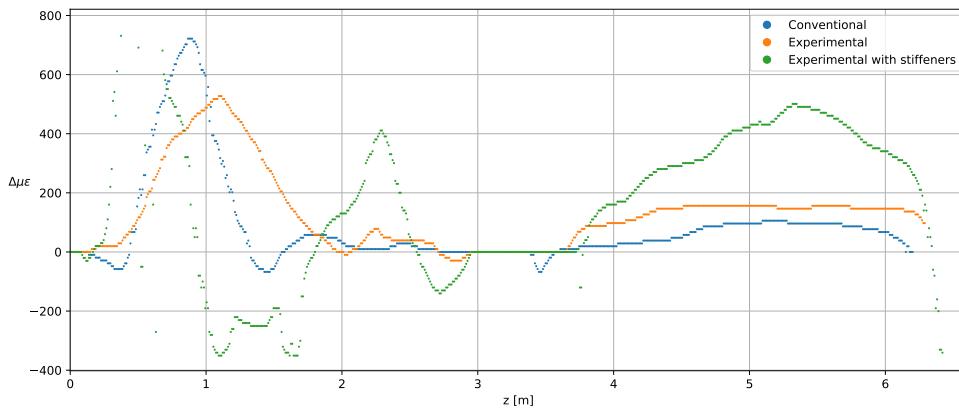


Figura 59: Tres de las cuatro vigas estudiadas tras el despegue del ala superior.

8.2. Detección de fracturas en una estructura de hormigón

En este ensayo se ha monitorizado el comportamiento de una columna de hormigón unida a su zapata mediante una unión atornillada. Para calificar esta unión, ha sido necesario someter la unión a un momento flector, para lo cual se ha empotrado la zapata y se ha ejercido fuerza sobre el extremo de la columna. Para poder calificar adecuadamente esta unión la carga se ha aplicado siguiendo unos ciclos de carga y descarga previamente fijados. En la Figura 60 se muestra un esquema del ensayo así como la distribución de fibra óptica adherida a la columna para monitorizar su comportamiento y la aparición de grietas como las que se ven en la Figura 62. En la Figura 61 se puede apreciar el *setup* del ensayo y al fondo la columna, la cual contaba además con unos extensómetros pegados en la parte superior e inferior (véase Figura 62) y unos conos metálicos embebidos para la medición con un calibre de la elongación de las zonas marcadas. En la parte central se puede apreciar la fibra óptica adherida con resina epoxy.

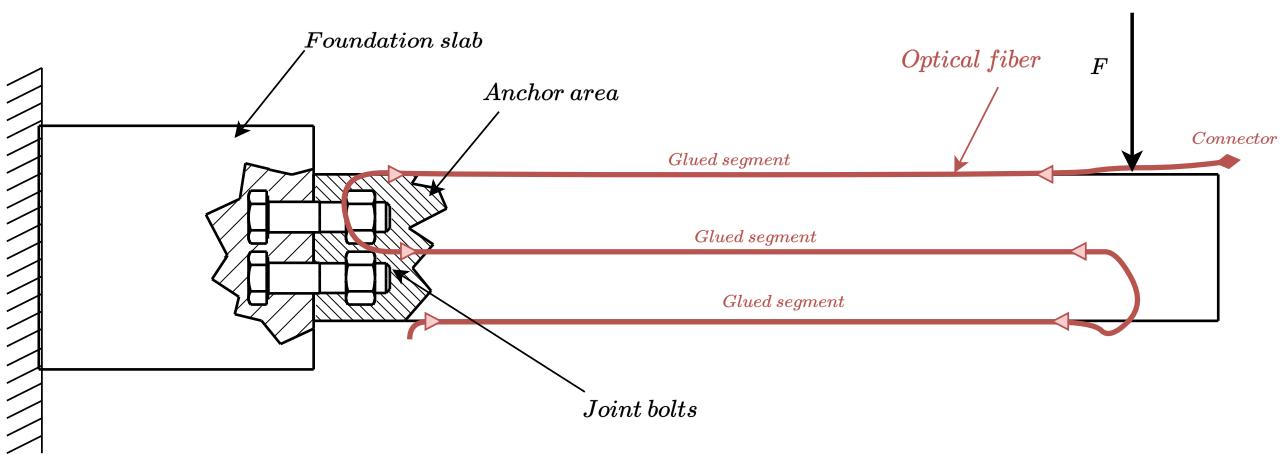


Figura 60: Esquema del ensayo de la columna de hormigón con unión atornillada.



Figura 61: Ensayo de la columna con unión atornillada.

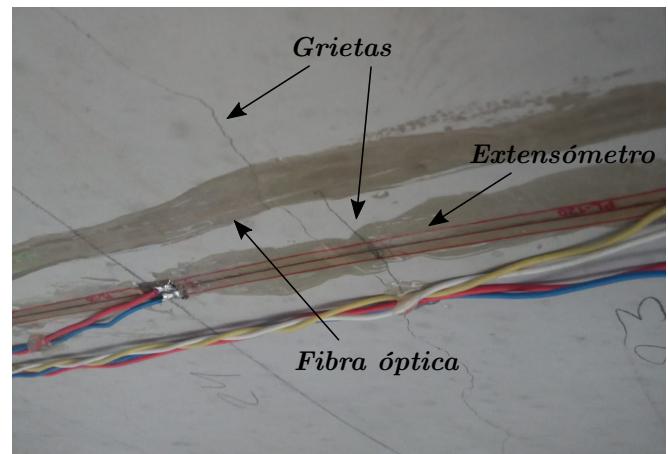


Figura 62: Grietas atravesando la fibra óptica y los extensómetros.

Los resultados del ensayo se muestran en la Figura 63. Además se han seleccionado tres segmentos para monitorizar su evolución y otros tres para mostrar la evolución de una de las grietas (véase Figura 64).

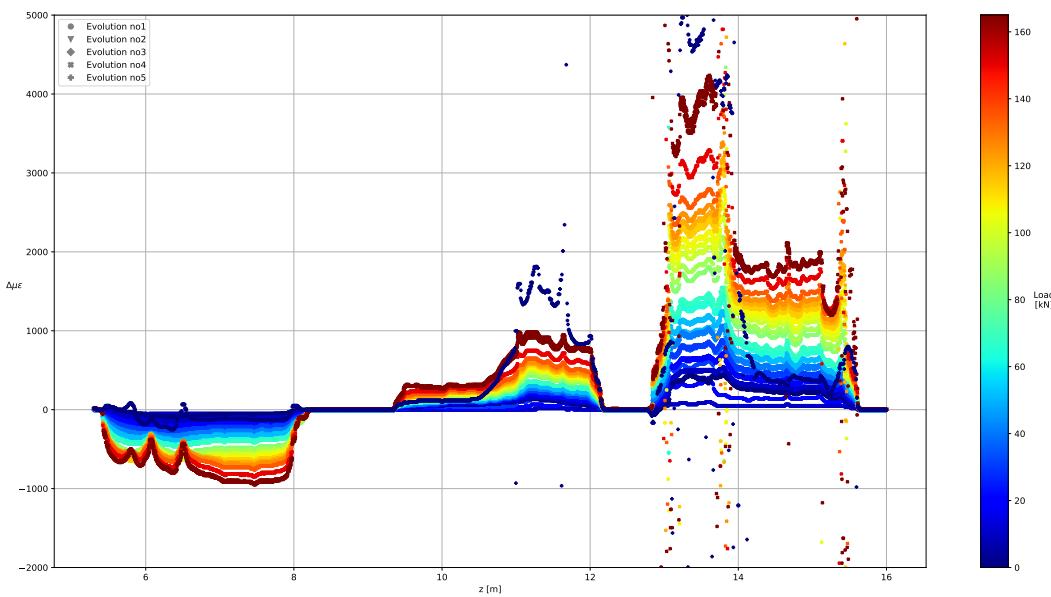


Figura 63: Medidas obtenidas del ensayo de la columna con unión atornillada.

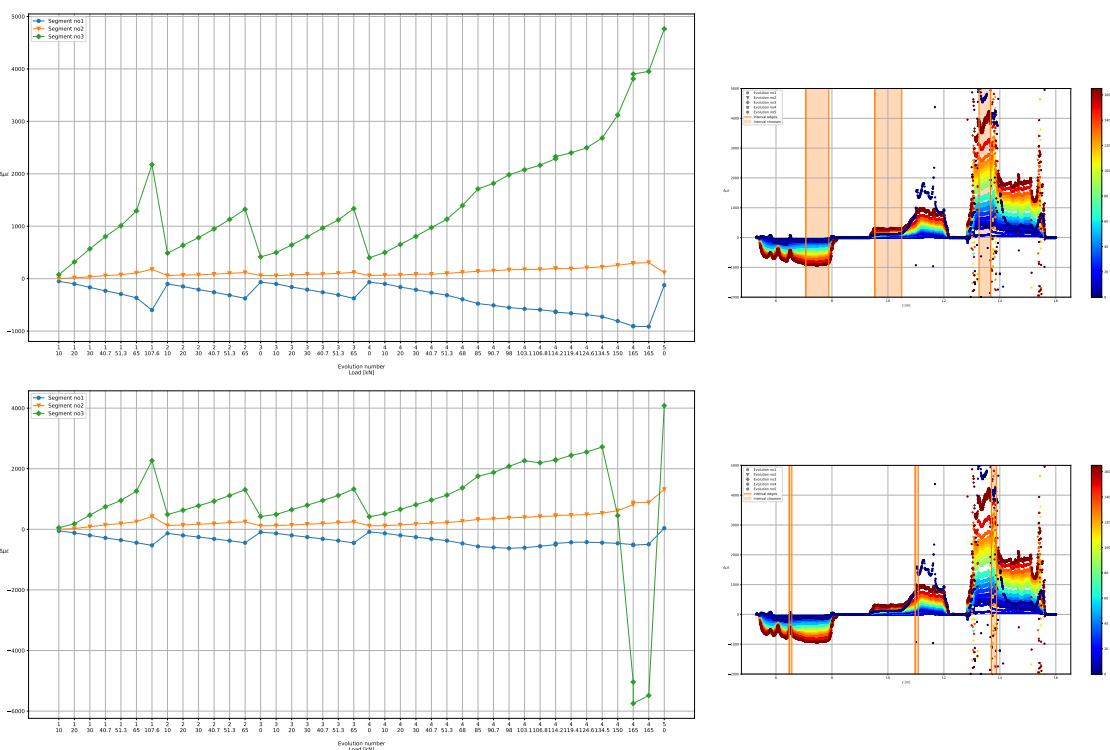


Figura 64: Evolución de los segmentos (arriba) y grietas (abajo) seleccionadas. A la derecha se muestran qué intervalos se han seleccionado para cada caso.



Adimensionalizando las deformaciones con la carga aplicada es posible determinar si la columna ha sufrido deformaciones permanentes o si por el contrario sigue en régimen elástico. Si los valores se mantienen constantes no habrá habido fractura, pero si por el contrario son dispares se habrá producido un comportamiento no lineal. En la Figura 65 se muestran estos valores adimensionalizados y en la Figura 66 la evolución de estos valores respecto al valor inicial. Además en estas Figuras, únicamente se muestran las medidas de los segmentos de fibra óptica adheridos a la columna de hormigón que se muestran en la Figura 60, correspondiéndose en posición y orientación con los mismos segmentos adheridos.

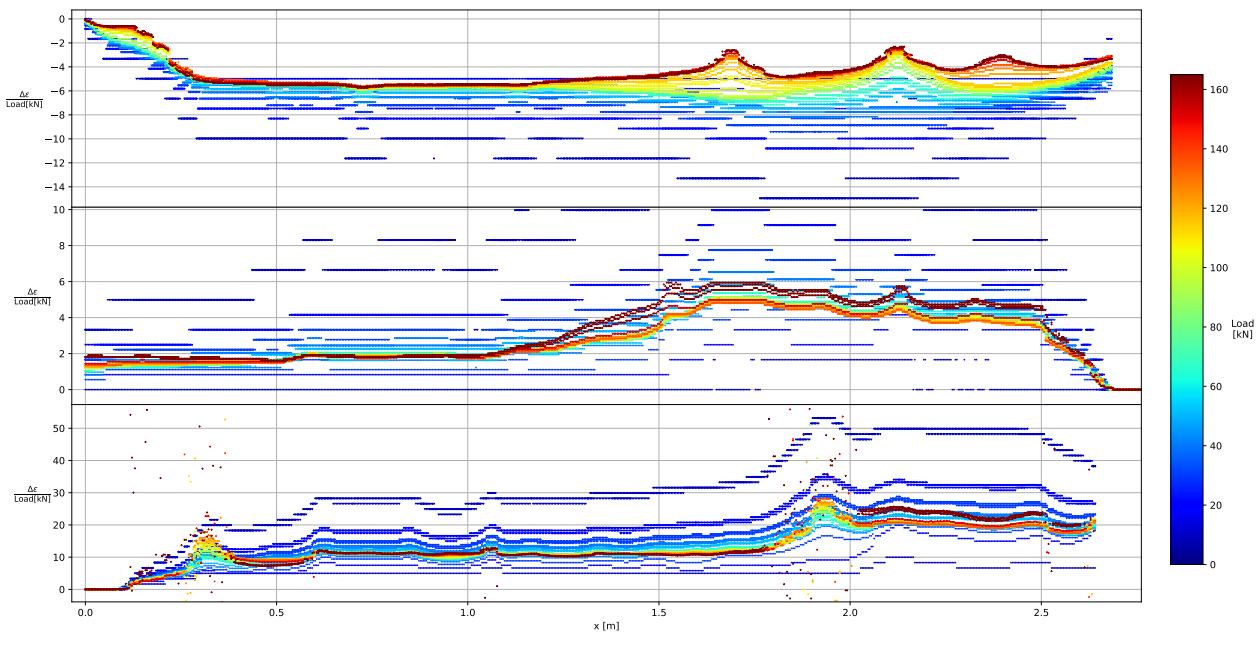


Figura 65: Medidas obtenidas adimensionalizadas con la carga.

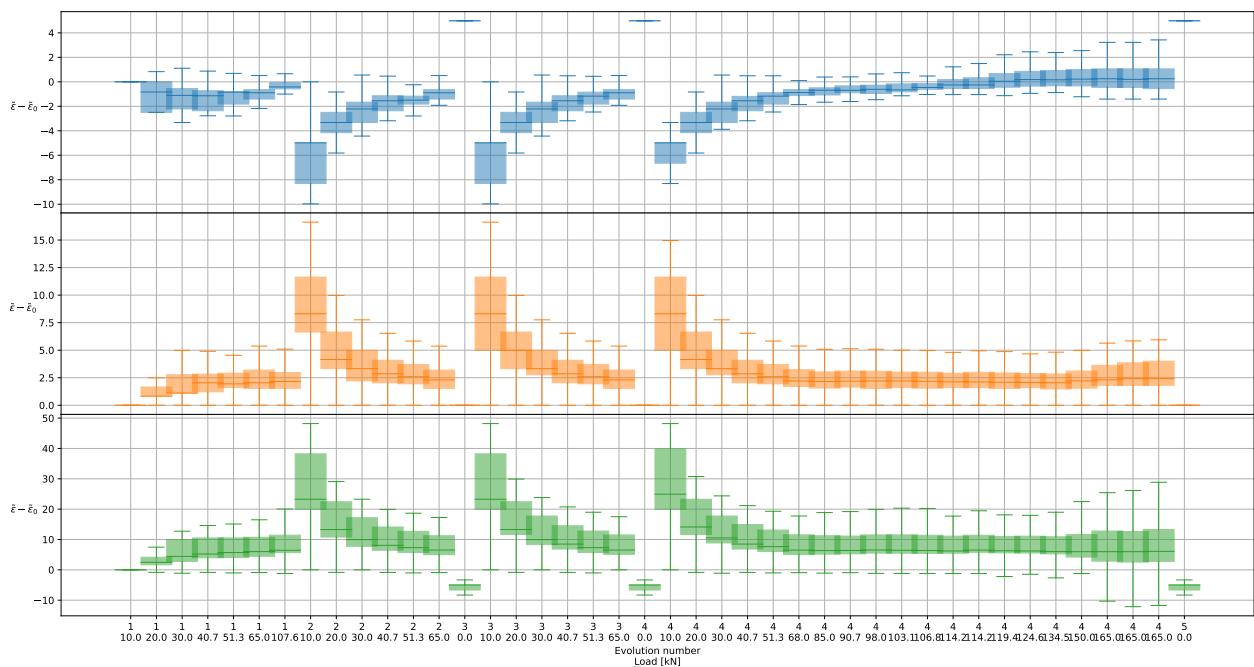


Figura 66: Evolución de las medidas obtenidas adimensionalizadas con la carga y respecto al estado inicial.

9. Conclusiones

Del trabajo realizado se extraen las siguientes conclusiones:

- La fenomenología de la fibra óptica es harto compleja y es necesario un estudio detallado de su comportamiento para así poder establecer hipótesis fundamentadas en procesos físicos y confecionadas para encajar con los instrumentos empleados y la información provista por los mismos.
- Sin embargo, a nivel de detalle, son las técnicas de análisis estadístico las que deben ser empleadas, en este caso, sobre las señales recogidas por el interferómetro.
- Estas técnicas han permitido, en el presente trabajo, obtener una segunda magnitud para desacoplar los fenómenos térmicos de los mecánicos. Más concretamente, el sistema de ecuaciones es el siguiente:

$$\begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3.591 \cdot 10^7 & -3.353 \cdot 10^3 \\ -3.780 \cdot 10^5 & -1.399 \cdot 10^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{\Delta\nu}{\bar{\nu}}(P) \\ -\frac{\Delta\nu}{\bar{\nu}}(\phi_{PS}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 6698.102 \\ 279.459 \end{pmatrix}, \quad (55)$$

donde $\det(\mathbf{K}) = 3.758 \cdot 10^9$ lo cual significa para cada dupla de desplazamientos espectrales existe otra de incrementos de temperatura y deformación.

- Por otro lado, en lo que concierne a la aplicación de esta tecnología a problemas reales de ingeniería, queda patente, gracias a las Secciones 7 y 8, que la fibra óptica tiene un gran potencial en la monitorización de procesos de fabricación y del comportamiento en servicio de estructuras respectivamente.
- Más en detalle, en lo que a monitorización de procesos de fabricación con fibra de carbono refiere, la fibra óptica permite la monitorización completa del proceso de curado.
- De igual modo, esta monitorización continua y distribuida permite determinar los momentos clave dentro de un ensayo y localizar las zonas de concentración de tensiones para poder estudiarlas con detalle.



10. Futuros trabajos

En vista a los resultados obtenidos en este trabajo, se proponen los siguientes puntos a desarrollar en futuras investigaciones:

- En vista de las ecuaciones recogidas en la Sección 4 es posible simular la dispersión de modos de polarización, tal y como se hace en [11], para tratar de predecir el comportamiento de la fibra óptica bajo ciertas condiciones ambientales.
- Los resultados del análisis de espectro cruzado permiten establecer una relación entre los dos estados de polarización. En este caso se ha relatado el tratamiento del espectro de fase, pero es posible que existan otras magnitudes relacionadas con la temperatura y la deformación a la que la fibra óptica está sometida.
- Los coeficientes del ajuste lineal habrán de ser calculados en condiciones más controladas, a ser posible en un segmento con deformación axial constante y con incrementos de temperatura más pequeños.
- Gracias a esta magnitud los datos obtenidos en los ensayos podrán ser determinados sin necesidad de asumir que la temperatura o la deformación es constante, mejorando así el método y dotándolo de una mayor robustez.



A. Algunos códigos empleados

A.1. Cross-spectrum analysis

Multitaper estimation method

```
1 def mtem(i, j, dt):
2     """
3         multitaper estimation method
4         Input:
5             i      first time series
6             j      second time series
7
8         Output:
9             fki    power spectral density i
10            fkj    power spectral density j
11            cij    cross-spectral density ij
12            coh    coherence
13            ph     phase spectrum between ij at input freq
14
15        """
16
17
18    import numpy as np
19    import nitime.algorithms as tsa
20
21    print('i size', i.shape)
22    print('j size', j.shape)
23
24    # apply multi taper cross spectral density from nitime module
25    f, pcasd_est = tsa.multi_taper_csd(np.vstack([i,j]), Fs=1/dt, low_bias=True, adapti
26
27    # output is MxMxN matrix, extract the psd and csd
28    fki = pcasd_est.diagonal().T[0]
29    fkj = pcasd_est.diagonal().T[1]
30    cij = pcasd_est.diagonal(+1).T.ravel()
31
32    # using complex argument of cxy extract phase component
33    ph = np.angle(cij)
34
35    # calculate coherence using csd and psd
36    coh = np.abs(cij)**2 / (fki * fkj)
```



```
37     return f, fki, fkj, cij, ph, coh
```

Uncertainty function using Monte Carlo analysis

```
1 def mtem_unct(i_, j_, dt_, cf, mc_no=20):
2     """
3         Uncertainty function using Monte Carlo analysis
4         Input:
5             i_      timeseries i
6             j_      timeseries j
7             cf     coherence function between i and j
8             mc_no  number of iterations default is 20, minimum is 3
9
10        Output:
11            phif   phase uncertainty bounded between 0 and pi
12        """
13
14    import numpy as np
15    import nitime.algorithms as tsa
16
17
18    print('iteration no is', mc_no)
19
20    data = np.vstack([i_, j_])
21    # number of iterations
22    # flip coherence and horizontal stack
23    cg = np.hstack((cf[:-1], np.flipud(cf[:-1])))
24
25    # random time series fi
26    mc_fi = np.random.standard_normal(size=(mc_no, len(data[0])))
27    mc_fi = mc_fi / np.sum(np.abs(mc_fi), axis=1)[None].T
28
29    # random time series fj
30    mc_fj = np.random.standard_normal(size=(mc_no, len(data[0])))
31    mc_fj = mc_fj / np.sum(np.abs(mc_fj), axis=1)[None].T
32
33    # create semi random timeseries based on magnitude squared coherence
34    # and inverse fourier transform for js
35    js = np.real(np.fft.ifft(mc_fj * np.sqrt(1 - cg ** 2)))
36    js_ = js + np.real(np.fft.ifft(mc_fi * cg))
37
38    # inverse fourier transform for xs
39    is_ = np.real(np.fft.ifft(mc_fi))
```



```
40
41     # spectral analysis
42     f_s, pcasd_est = tsa.multi_taper_csd(np.vstack([is_,js_]), Fs=1/dt_, low_bias=True,
43     cijx = pcasd_est.diagonal(+int(is_.shape[0])).T
44     phi = np.angle(cijx)
45
46     # sort and average the highest uncertainties
47     pl = int(round(0.95*mc_no)+1)
48     phi = np.sort(phi, axis=0)
49     phi = phi[((mc_no+1)-pl):pl]
50     phi = np.array([phi[pl-2,:,:], -phi[pl-mc_no,:,:]])
51     phi = phi.mean(axis=0)#
52     phi = np.convolve(phi, np.array([1,1,1])/3)
53     phif = phi[1:-1]
54     return phif
```

Referencias

- [1] A. Pedraza, Caso de estudio 2: Desarrollo y caracterización de sensores de fibra óptica y aplicaciones en la fabricación de materiales compuestos (2022).
URL <https://github.com/temisAP/Reports>
- [2] A. Pedraza, Caso de estudio 3: Desarrollo y mejora de los sensores de medida distribuida basadas en reflectometría Óptica de retrodispersión (ofdr-nbr) (2022).
URL <https://github.com/temisAP/Reports>
- [3] Luna innovations | fiber optic sensing and measurement systems.
URL <https://lunainc.com/>
- [4] Hexcell, Prepreg data sheet | hexcel.
URL <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg>
- [5] X. Lu, M. A. Soto, L. Thévenaz, Temperature-strain discrimination in distributed optical fiber sensing using phase-sensitive optical time-domain reflectometry, Optics Express 25 (2017) 16059. doi:10.1364/oe.25.016059.
- [6] X. Lu, M. A. Soto, L. Thévenaz, Discrimination of temperature and strain by combined refractive index and birefringence measurements using coherent rayleigh sensing, Vol. 10323, SPIE, 2017, p. 103230N. doi:10.1117/12.2264636.
- [7] M. A. Soto, X. Lu, H. F. Martins, M. Gonzalez-Herraez, L. Thévenaz, Distributed phase birefringence measurements based on polarization correlation in phase-sensitive optical time-domain reflectometers, Optics Express 23 (2015) 24923. doi:10.1364/oe.23.024923.
- [8] SENSURON, Fiber optic sensing fundamental.
- [9] A. Güemes, A. Fernández-López, B. Soller, Optical fiber distributed sensing - physical principles and applications:, <http://dx.doi.org/10.1177/1475921710365263> 9 (2010) 233–245. doi:10.1177/1475921710365263.
URL <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1475921710365263>
- [10] B. Huttner, J. Reecht, N. Gisin, R. Passy, J. P. V. D. Weid, Local birefringence measurements in single-mode fibers with coherent optical frequency-domain reflectometry (1998).

- [11] N. J. Muga, Polarization effects in fiber-optic communication systems (2011).
URL <https://www.researchgate.net/publication/230743750>
- [12] M. T. Ribeiro, S. Singh, C. Guestrin, "why should I trust you?": Explaining the predictions of any classifier, in: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco, CA, USA, August 13-17, 2016, 2016, pp. 1135–1144.
- [13] M. E. Foggatt, D. K. Gifford, S. Kreger, M. Wolfe, B. J. Soller, Characterization of polarization-maintaining fiber using high-sensitivity optical-frequency-domain reflectometry, *Journal of Lightwave Technology* 24 (2006) 4149–4154. doi:10.1109/JLT.2006.883607.
- [14] B. J. Soller, D. K. Gifford, M. S. Wolfe, M. E. Foggatt, High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies, *Optics Express* 13 (2005) 666. doi:10.1364/opex.13.000666.
- [15] Cross-spectral analysis by Mattijn van Hoek.
URL <https://nbviewer.org/github/mattijn/pynotebook/blob/master/2016/2016-05-25%20cross-spectral%20analysis.ipynb>
- [16] Cross-spectrum.
URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-spectrum>
- [17] F. Colpo, L. Humbert, J. Botsis, Characterisation of residual stresses in a single fibre composite with fbg sensor, *Composites Science and Technology* 67 (2007) 1830–1841. doi:10.1016/j.compscitech.2006.10.024.
- [18] J. Botsis, L. Humbert, F. Colpo, P. Giaccari, Embedded fiber bragg grating sensor for internal strain measurements in polymeric materials, *Optics and Lasers in Engineering* 43 (2005) 491–510. doi:10.1016/j.optlaseng.2004.04.009.
- [19] NIAR, As4-unitape-1.
- [20] D. Boll, R. Cole, A. Crockett, S. Daggett, J. Diepenbrock, S. Ellery, E. Hooper, L. Ilcewicz, E. Kececi, D. Ostrodka, A. Poursartip, Fabrication of nms 128 qualification, equivalency, and acceptance test panels (for hexcel 8552 and 8552s prepregs).
- [21] NIAR, 8552-ncamp-material-base-specification.

- [22] Y. Ng, J. Tomblin, E. Hooper, Hexcel 8552 im7 unidirectional prepreg 190 gsm & 35 %rc qualification material property data report faa special project number sp4614wi-q revision a (2011).
- [23] E.T.S.I. Aeronáutica y del Espacio: Materiales y Producción Aeroespacial.
URL <https://www.etsiae.upm.es/index.php?id=225&L=262>
- [24] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC).
URL <https://www.ietcc.csic.es/>
- [25] DACOMAT - Damage Controlled Composite Materials.
URL <https://www.sintef.no/projectweb/dacomat/>