



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

CASO DE ESTUDIO 2

DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA Y APLICACIONES EN LA
FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS.
MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES

Autor: Andrés Pedraza Rodríguez

Profesor: Antonio Fernández López

MADRID, 1 DE JUNIO, 2022

Resumen

El conocimiento detallado del estado de la estructura es fundamental para el desarrollo de la próxima generación de lanzadores reutilizables, lo que exige nuevas metodologías de inspección no destructiva (SHM), que requieren de la integración de sensores y sistemas en la estructura. Para cumplir con estos requisitos se ha propuesto la utilización de sensores basados en fibra óptica para los cuales, en este Caso de Estudio, se propone la realización de las siguientes tareas:

- Desarrollo de sensores de fibra óptica para la monitorización de deformaciones y temperatura a lo largo de la estructura.
- Medida y caracterización de los sensores con equipos de laboratorio.
- Integración de sensores en laminados de material compuesto como prueba de concepto.

Índice

Índice de figuras	I
Índice de tablas	V
Nomenclaturas	VI
1. Introducción	1
1.1. Estructura de la fibra óptica	1
1.2. La rejilla de Bragg (FBG)	2
1.3. Refractometría óptica de retrodispersión (OBR)	4
1.4. Monitorización del proceso de curado	10
2. Estado del arte	12
2.1. Fiber Bragg Grating	12
2.2. Medida distribuida	14
3. Metodología	15
3.1. Creación de FBGs	15
3.2. Interrogador óptico	18
3.3. Optical Backscatter Reflectometry	18
4. Caracterización de los sensores	19
4.1. Calibración térmica de FBGs	19
4.2. Calibración mecánica de FBGs	21
4.3. Calibración térmica de OBRs	24
4.4. Calibración mecánica de OBRs	27
5. Desacoplamiento de temperatura y deformación para OBRs	28

5.1.	Birrefringencia y autocorrelación	28
5.2.	Inteligencia Artificial	30
5.2.1.	Datos de entrenamiento	30
5.2.2.	Clusterización	33
5.2.3.	Arquitectura de la red	34
5.2.4.	Entrenamiento	36
5.2.5.	Resultados	37
5.3.	Filtrado de resultados	42
6.	Curado de laminados	43
6.1.	Desempeño de la red neuronal en la monitorización de curados	43
6.2.	Laminado simétrico	45
6.3.	Laminado asimétrico	48
6.4.	Compensación del laminado asimétrico	51
7.	Conclusiones	54
8.	Futuros trabajos	55
Bibliografía		56

Índice de figuras

1.	Sección típica de una fibra mono-modo (izda.) y recubrimientos protectores típicamente empleados (dcha.).	1
2.	Esquema de una rejilla de Bragg o FBG.	2
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 TLS denota la fuente de luz tuneable y DUT es el dispositivo que se prueba.	6
7.	Función de transferencia en el dominio de dos estados de una fibra óptica. Nótese la caída brusca precedida de un pico en la zona en la que no hay más fibra óptica.	7
8.	Funciones de transferencia comparadas en el dominio del tiempo.	8
9.	Funciones de transferencia comparadas en el dominio de la frecuencia.	8
10.	Resultado de la correlación cruzada entre dos estados de la función de transferencia de una fibra óptica.	9
11.	Distribución del desplazamiento espectral relativo a lo largo de una fibra óptica sometida a deformación y temperatura. Nótese, en este caso, que existen fuertes anomalías en las regiones en las que se ha soldado la fibra (en torno a $z=1.5$ m) y en el final de la misma (en torno a $z=2.3$ m).	10
12.	Modelo de láser excímero de la serie PULSEMASTER-P800 de Lumonics (actualmente IPEX-800 SERIES de LightMachinery) [1]	16
13.	Máscara de fase empleada para la grabación de rejillas de Bragg sobre la fibra óptica.	16
14.	Varios tipos de pigtail empleados para la conexión de sensores de fibra óptica.	17
15.	Herramientas empleadas en la soldadura de fibra óptica.	17
16.	Interrogador óptico SM130 de Micron Optics ([2]) (actualmente LUNA Innovations ([3])).	18
17.	Interrogador óptico OBR 4600 de LUNA Innovations ([3]).	18
18.	Seis sensores dobles FBG. Un FBG está escrito a mitad del cable y el otro está al final y encapsulado.	19

19.	Extremo final del pigtail con conector cerámico.	20
20.	Sensor de fibra óptica FBG encapsulado en una vaina de acero inoxidable.	20
21.	Disposición de los sensores en la bandeja de la estufa.	20
22.	Vista interior de la estufa.	20
23.	Ajuste por mínimos cuadrados del coeficiente termo-óptico.	21
24.	Viga empotrada con flecha impuesta a 350 mm de la raíz. La fibra óptica en la cual se ha grabado una red de FBGs se ha unido adhesivamente al centro la parte superior con cianoacrilato. Se pueden apreciar marcas rojas sobre las zonas en las que se han inscrito los FBGs.	22
25.	Desplazamiento espectral de los FBGs y deformada analítica de la viga.	23
26.	Ajuste por mínimos cuadrados del parámetro mecánico.	23
27.	Fibra óptica dispuesta en forma de aro sobre una placa de aluminio recubierta de teflón. La fibra es iluminada con luz roja para comprobar que la luz llega hasta el lazo final. .	24
28.	Fibra óptica y termopar tipo K monitorizado a través del módulo MAX6675 de Arduino [4]	24
29.	Interior de la estufa con la fibra óptica en forma de aro sobre la placa y los instrumentos de medida.	25
30.	Placa recubierta con papel de aluminio para evitar que la convección modifique las medidas a lo largo del aro.	25
31.	Desplazamiento espectral relativo en la fibra óptica en forma de aro para diferentes temperaturas.	26
32.	Ajuste por mínimos cuadrados del parámetro térmico donde se ha realizado un calentamiento de 19 a 180 grados.	26
33.	Desplazamiento espectral relativo en la fibra óptica adherida a la viga a flexión para distintos valores de flecha.	27
34.	Ajuste por mínimos cuadrados del parámetro mecánico.	27
35.	Comparación de autocorrelaciones para: diferentes temperaturas y el mismo estado de deformación (arriba); diferentes estados de deformación y la misma temperatura (centro); y distintos estados de la fibra óptica (abajo).	29
36.	Configuración del ensayo: pletina de duraluminio ($E = 70.3 \text{ GPa}$, $\alpha = 24 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$) de dimensiones 300x30x2 mm. Se han añadido hasta cuatro pesas de 50 g en el extremo (ya que el peso se mantiene con la temperatura).	30

37.	Proceso llevado a cabo para la obtención del dataset con el que se ha entrenado el modelo.	32
38.	Resultado del algoritmo de clusterización.	33
39.	Esquema de la red neuronal empleada. En la parte superior, en azul, se muestra el preprocesso de la señal previa a la red neuronal; la operación marcada con la * denota la correlación cruzada, en el caso en el que entran dos señales, y la autocorrelación, en el caso en el que entra solo una.	35
40.	Entrenamiento y validación de la red para ambas variables objetivo.	36
41.	Histograma de errores de temperatura y distribución normal de los mismos, así como límites de intervalos de confianza de dicha distribución.	38
42.	Histograma de errores de deformación y distribución normal de los mismos, así como límites de intervalos de confianza de dicha distribución.	38
43.	Representación 2D de valores predichos (<i>predict</i>) frente a objetivo (<i>target</i>) para temperatura y regresión lineal de los mismos.	40
44.	Representación 2D de valores predichos (<i>predict</i>) frente a objetivo (<i>target</i>) para deformación y regresión lineal de los mismos.	40
45.	Distribución de etiquetas de los datos: temperatura.	41
46.	Distribución de etiquetas de los datos: deformación.	41
47.	Valor esperado, predicción del modelo y predicción tras aplicar distintos filtros. Los filtros <i>Savitzky-Golay</i> y <i>IIR/FIR</i> se han obtenido de la librería <i>scipy.signal</i> donde figuran como <i>savgol_filter</i> y <i>lfilter</i> ; por otra parte el filtro <i>STL(trend)</i> corresponde al <i>hpfilter</i> de <i>statsmodels.api.tsa.filters</i> ; y por último el filtro de Kalman ha creado a partir del script disponible en [5].	42
48.	Procesado de las señales recogidas por el modelo de inteligencia artificial en comparación a la lectura obtenida a través del cómputo del desplazamiento espectral.	44
49.	Sujeción temporal de la fibra óptica en las posiciones prefijadas mediante cinta de carrocería.	45
50.	Fibra óptica dispuesta sobre el laminado.	46
51.	Laminado simétrico apilado con fibra óptica embebida.	46
52.	Distribución espacial del desplazamiento espectral para diferentes instantes de tiempo.	47
53.	Evolución temporal del desplazamiento espectral para diferentes puntos de la fibra escogidos (véase Figura 52 para ubicar los puntos).	47
54.	Laminado simétrico una vez curado.	48

55. Sujeción temporal de la fibra óptica en las posiciones prefijadas mediante cinta de ca-	49
rrocero (derecha) y colocación de la tercera capa justo sobre la fibra (izquierda).	
56. Distribución espacial del desplazamiento espectral para diferentes instantes de tiempo.	50
57. Evolución temporal del desplazamiento espectral para diferentes puntos de la fibra es-	
cogidos (véase Figura 56 para ubicar los puntos). .	50
58. Laminado asimétrico una vez curado. .	51
59. Distribución espacial del desplazamiento espectral para diferentes instantes de tiempo.	52
60. Evolución temporal del desplazamiento espectral para diferentes puntos de la fibra es-	
cogidos (véase Figura 59 para ubicar los puntos). .	52
61. Laminado inicialmente asimétrico convertido en simétrico mediante adición de capas a	
posteriori una vez curado por segunda vez. .	53

Índice de tablas

1.	Coeficientes de las distribuciones normales para los errores de temperatura y deformación.	37
2.	Intervalo de confianza de las distribuciones normales para los errores de temperatura y deformación.	37
3.	Coeficientes de la regresión lineal para los valores predichos (<i>predict</i>) frente a los objetivo (<i>target</i>) para temperatura y deformación.	39
4.	Parámetros empleados en cada uno de los filtros y medida del error (véase Figura 47 para más información acerca del significado de los parámetros	42
5.	Coeficientes de las distribuciones normales para los errores de temperatura y deformación.	54
6.	Intervalo de confianza de las distribuciones normales para los errores de temperatura y deformación.	54

Nomenclaturas

Fibra óptica

η	Coeficiente termo-óptico (FBG)
Λ	Periodo de la rejilla de Bragg
ρ_e	Coeficiente foto-elástico (FBG)
K_ε	Coeficiente foto-elástico (OBR)
K_T	Coeficiente termo-óptico (OBR)
n_{eff}	Índice de refracción efectivo del núcleo

Propiedades físicas

α	Coeficiente de expansión térmico
τ	Desfase temporal
ε	Deformación mecánica
T	Temperatura
t	Tiempo
ν	Frecuencia

Señales ópticas

$\omega(t)$	Frecuencia instantánea
ϕ	Fase
ρ	Amplitud
E	Campo electromagnético
H	Función de transferencia
P	Función de transferencia del estado de polarización p
S	Función de transferencia del estado de polarización s

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.

La fibra óptica al ser embebida en el momento del apilado (en el caso de preimpregados) o de la colocación de la fibra (en el caso de fabricación con fibra seca), permite monitorizar además todo el proceso de fabricación. Tiene especial interés el análisis por medio de estos sensores de los procesos de curado e integración ya que son los que determinarán más adelante las capacidades de la estructura de material compuesto resultante.

Este Caso de Estudio se centrará especialmente en la caracterización de sensores basados en fibra óptica y se ensayarán en el proceso de curado de estructuras fabricadas con preimpregnado.

1.1. 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.

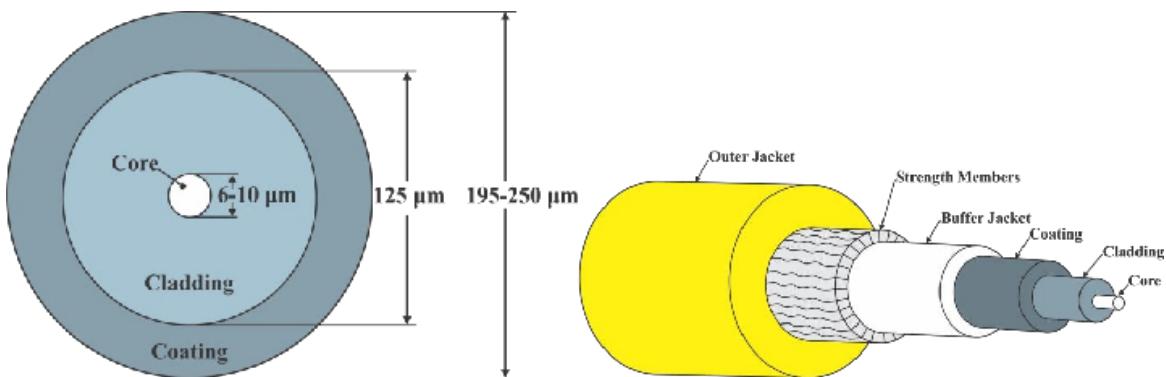


Figura 1: Sección típica de una fibra mono-modo (izda.) y recubrimientos protectores típicamente empleados (dcha.).

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.

1.2. 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.

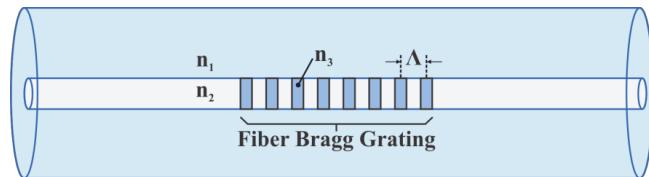


Figura 2: Esquema de una rejilla de Bragg o FBG.

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.

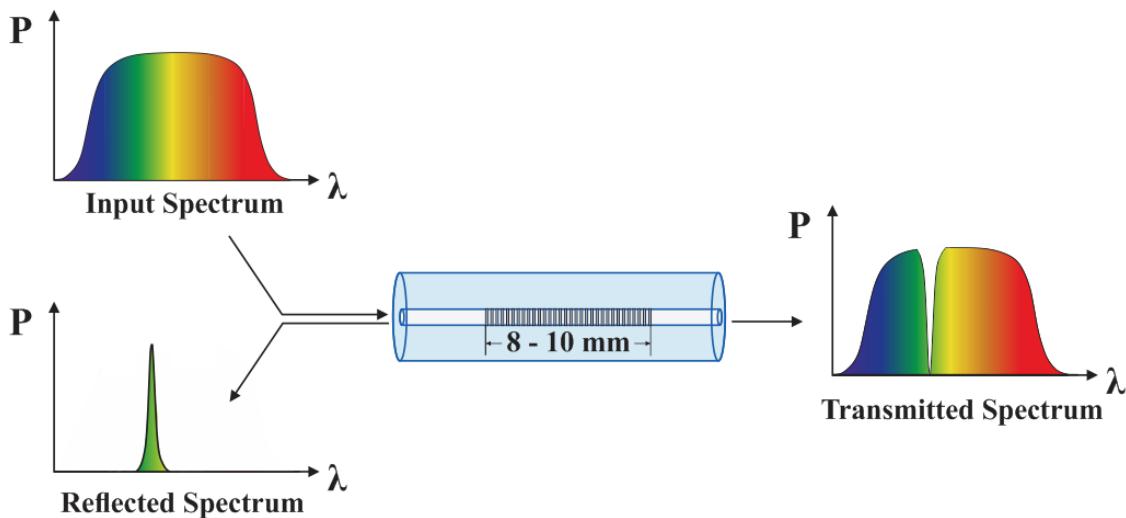


Figura 3: Principio de funcionamiento de una rejilla de Bragg.

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 $\Lambda(\epsilon, T)$ 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:

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

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 silice y η es el coeficiente termo-óptico

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

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

1.3. 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 cuanta 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 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.

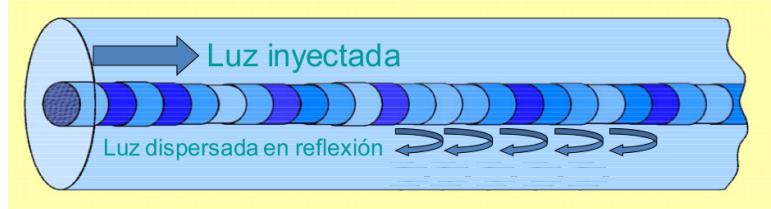


Figura 4: Representación esquemática del principio de funcionamiento de la medida distribuida por reflectometría óptica.

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.

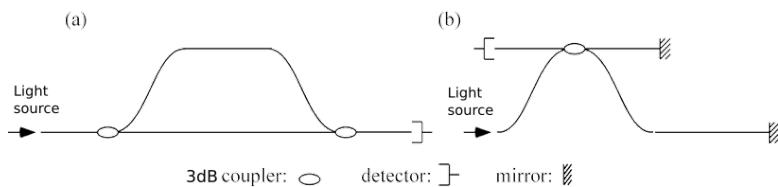


Figura 5: Esquema básico de los dos tipos básicos de interferómetros. En (a) interferómetro Mach-Zehnder y en (b) interferómetro Michelson.

Considérese una fuente que produce un campo electromagnético 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 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* 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.

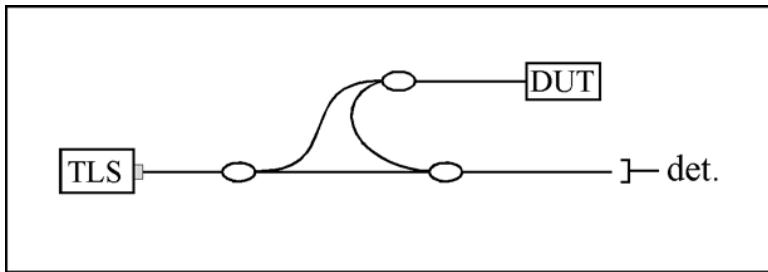


Figura 6: Esquema de la red óptica OBR donde TLS denota la fuente de luz tuneable y DUT es el dispositivo que se prueba.

Estas ecuaciones básicas son empleadas para construir un ORB. 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 $\phi(\omega)$:

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

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*.

Así, el detector recibirá una señal con intensidad:

$$\begin{aligned} I = & |E_0(t)|^2 + |E_0(t - \tau)|^2 \rho(\omega)^2 \\ & + 2\rho(\omega)E_0(t)E_0(t - \tau) \cos[\omega(t)\tau - \phi(\omega)]. \end{aligned} \quad (9)$$

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.

Si se tienen las dos funciones de transferencia de una fibra en dos estados diferentes éstas se pueden comparar entre sí para obtener una medida conjunta de variación de temperatura y deformación de una forma similar a como se hace con las rejillas de Bragg:

- En primer lugar, se selecciona una región donde efectuar los cálculos. La distancia entre las regiones de evaluación, así como el número de puntos para el cómputo condicionará directamente la resolución de las medidas obtenidas y tendrá también un impacto directo en el tiempo de cálculo. En la Figura 7 se muestran la función de transferencia, en el dominio del tiempo, de una misma fibra en dos estados diferentes de deformación-temperatura.

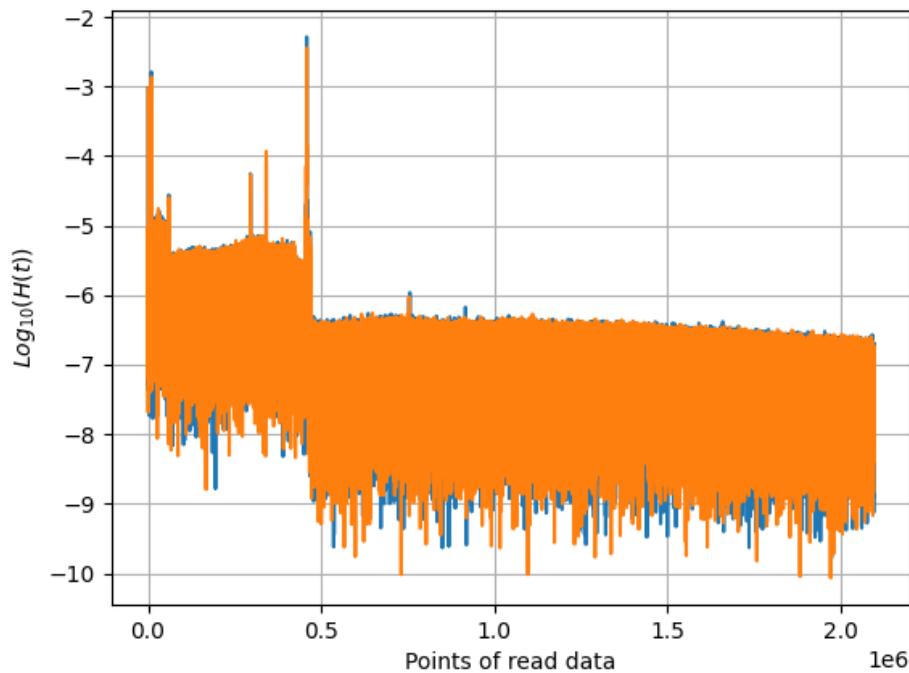


Figura 7: Función de transferencia en el dominio de dos estados de una fibra óptica. Nótese la caída brusca precedida de un pico en la zona en la que no hay más fibra óptica.

- Después, se calcula el desplazamiento espectral de la región por medio de la correlación cruzada de las señales. Para ello, lo primero es llevar las medidas de función de transferencia al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier (FFT), luego se computa la correlación cruzada entre ambas señales. Luego, la localización del máximo de la correlación cruzada se relaciona con el desplazamiento espectral mediante el ratio de escaneo. En las Figuras 8 a 10 se puede apreciar cómo se realiza este paso.

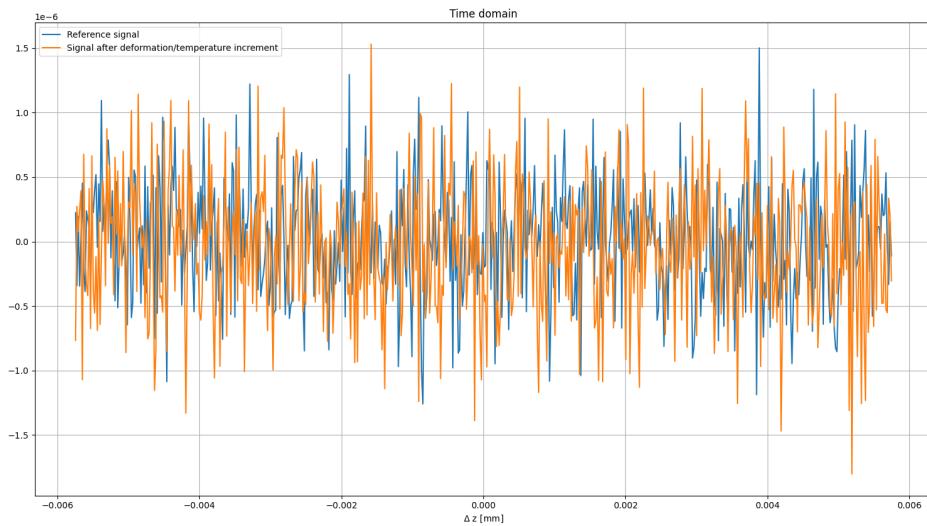


Figura 8: Funciones de transferencia comparadas en el dominio del tiempo.

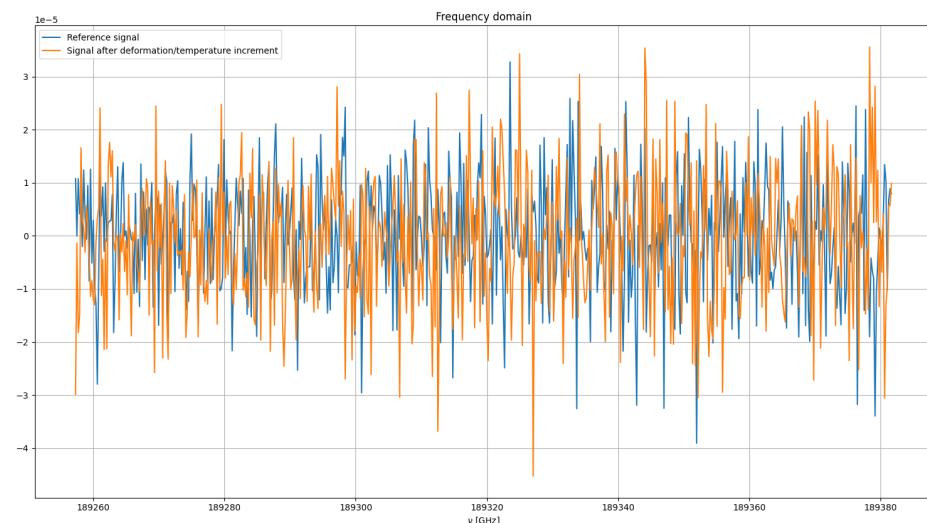


Figura 9: Funciones de transferencia comparadas en el dominio de la frecuencia.

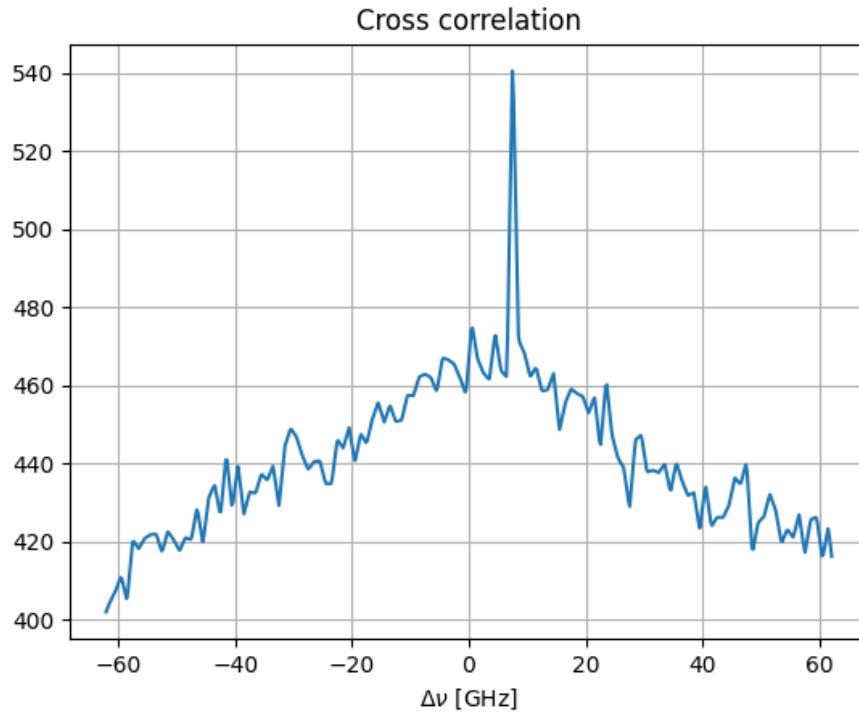


Figura 10: Resultado de la correlación cruzada entre dos estados de la función de transferencia de una fibra óptica.

- Por último, el desplazamiento espectral se divide entre la frecuencia central de manera que puede relacionarse con la medida conjunta de deformación y temperatura mediante:

$$-\frac{\Delta\nu}{\bar{\nu}} = K_T \Delta T + K_\varepsilon \Delta \varepsilon, \quad (10)$$

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.

Este procedimiento, llevado a cabo a lo largo de la fibra permite obtener un perfil de deformación-temperatura como el de la Figura 11

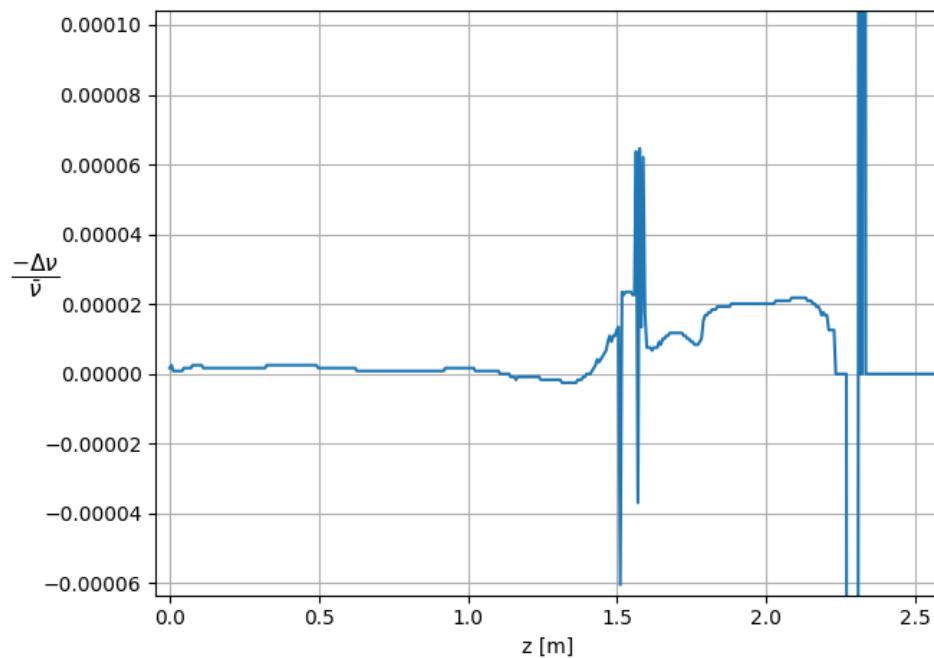


Figura 11: Distribución del desplazamientopectral relativo a lo largo de una fibra óptica sometida a deformación y temperatura. Nótese, en este caso, que existen fuertes anomalías en las regiones en las que se ha soldado la fibra (en torno a $z=1.5$ m) y en el final de la misma (en torno a $z=2.3$ m).

1.4. 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 [6] y [7].

El primer paso en el caso de los FBGs es inscribir la rejilla sobre la fibra óptica. Luego, para ambos sensores se ha de realizar una calibración valiéndose de los equipos necesarios. Después se embeben los sensores en el material compuesto. En el caso de los FBGs unos sensores irán desnudos (para medir temperatura y deformación) y otros encapsulados (para medir solo la temperatura). La disposición y el número de sensores dependerá del experimento que se quiera realizar.

Información referente a esta Introducción 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. Estado del arte

2.1. Fiber Bragg Grating

Monitorización de curado

El uso de FBGs para la monitorización del curado se presenta como un método bastante eficaz ya que permite introducir sensores a lo largo del laminado sin apenas modificar sus propiedades.

Gracias a este tipo de sensores J.Chen *et al.* ([9]) en 2020 realizaron el análisis de un laminado unidireccional demostrando así cómo el coeficiente de deformación se mantiene constante mientras que el de temperatura varía con la propia temperatura. El análisis posterior demuestra que la distribución en el plano de la temperatura es relativamente uniforme pero que existe un gradiente en la dirección del espesor y por tanto una distribución de esfuerzos mostrándose la parte en contacto con el útil como la más afectada. Por su parte, ([10]) emplearon FBGs y dielectrometría para monitorizar el curado de un laminado [0⁵ 90⁵] en un ciclo convencional y en uno destinado a reducir las tensiones térmicas. Gracias a los FBGs y a los dielectrómetros se pudo verificar que el ciclo dedicado a reducir las tensiones térmicas era bastante efectivo ya que se reducían a la mitad, aumentando la resistencia un 16 % y la vida a fatiga hasta un 614 %. M. Mulle *et al.* ([11] y [12]) realizaron un experimento similar pero en este caso los FBGs embebidos en el material compuesto permitieron monitorizar los fenómenos de fluencia tras someter un espécimen a temperaturas similares a las de curado y además se comparó con un modelo numérico de elementos finitos (FEM). Además, los FBGs han permitido caracterizar, sin necesidad de ensayos destructivos, las propiedades de resinas experimentales, como las de curado a temperatura ambiente ([13]) o las de curado rápido ([14]).

Otro aspecto susceptible de ser estudiado con esta tecnología es el punto de gelificación. Esto puede ser muy interesante a la hora de determinar la cinética de curado como en donde se embeben FBGs y otros sensores durante el ciclo de curado. Luego estos resultados se validan con la teorías analíticas como la de Flory-Stockmayer ([15]) se usan para correlar resultados ([16]). En laminados gruesos los FBGs también pueden ser de utilidad para determinar el grado de curado y las tensiones que genera la matriz al contraerse a lo largo de todo el espesor ([17]).

Monitorización de uniones y vida en servicio

Además de su uso en la monitorización del proceso de curado los FBGs se están empleando en la monitorización de uniones y vida en servicio. Los FBGs han permitido estudiar tanto las técnicas convencionales de unión ([18]) como el comportamiento de las mismas en servicio ([19]). Por otra parte la vida a fatiga de las estructuras también puede ser caracterizada por estos sensores ([20])

Mejora del método

Recientemente se han estudiado métodos para la mejora del método. En lo que a monitorización térmica refiere E.K. Boateng *et al.* ([21]) publicaron un artículo en 2019 demostrando que la encapsulación de FBGs en capilares de cristal confiere a estos una mayor sensibilidad a la temperatura que el encapsulado convencional en acero inoxidable. Por otra parte, en lo que a monitorización de deformaciones refiere D. Feng *et al.* ([22]) consiguieron conferirles una mayor estabilidad en las medidas, una menor cantidad de ruido, una mayor precisión y una mayor linealidad a unos sensores FBG mediante la aplicación de una precarga sobre las fibras.

Uso como otros sensores

Además de ser sensibles a la temperatura y a las deformaciones los FBGs han demostrado ser sensibles a otros parámetros. En [23] se comparan FBGs encapsulados en acero inoxidables y en poliimida estudiándose diferentes características del sensor como la sensibilidad a humedad y temperatura, histéresis, repetitividad, estabilidad y resistencia al agua. Por otra parte en [24] usan dos sensores en cascada, un FBG y un FPI (Fabry-Pérot Interferometer) para medir la temperatura y la presión de un gas. El FBG sirve para medir la temperatura y el FPI mide la temperatura y la presión ambiente. Se plantea su uso para medidas puntuales para biosensores y aplicaciones médicas.

Aplicación en otros campos

A día de hoy se plantean más aplicaciones para los sensores FBG fuera del campo de los materiales compuestos. Por ejemplo, en [25] se plantea su uso en la fabricación de acelerómetros y actualmente se están empleando para caracterizar otros materiales como vigas de cemento ([26]) o roca ([27]). También se llevan tiempo usando para monitorizar *bolted flange joints* ([27]).

2.2. Medida distribuida

Los sensores basados en medida distribuida tienen, por lo general, una menor aceptación 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 [28]

3. Metodología

3.1. Creación de FBGs

Para modificar los índices refractivos de la fibra óptica y crear una rejilla de Bragg es necesario alterar la estructura de la fibra óptica. Para ello existen diversos métodos que permiten crear diferentes patrones:

- **Interferencia**

Este fue el primer método ampliamente utilizado para la fabricación de rejillas de Bragg en fibra y utiliza la interferencia de dos haces ultravioleta (UV) creando así una distribución periódica de la intensidad.

- **Escritura secuencial**

Se fabrican perfiles de rejilla complejos exponiendo en secuencia un gran número de rejillas pequeñas y parcialmente superpuestas sobre las cuales incide el láser ultravioleta.

- **Máscara de fase**

Otra opción es utilizar directamente una máscara de fase que tenga las características de la rejilla prevista. La máscara de fase se coloca entre la fuente de luz UV y la fibra fotosensible. La sombra de la máscara de fase determina entonces la estructura de la rejilla basándose en la intensidad transmitida de la luz que incide en la fibra. Las máscaras de fases se utilizan específicamente en la fabricación de las rejillas de Bragg de fibra chirpada.

- **Punto por punto**

También se puede utilizar un único rayo láser UV para grabar la rejilla en la fibra punto por punto. En este caso, el láser tiene un haz estrecho que es igual al periodo de la rejilla. El método punto por punto se utiliza en la fabricación de rejillas inclinadas.

- **Producción**

Originalmente, la fabricación de la fibra óptica fotosensible y el grabado de la fibra con rejilla de Bragg se hacían por separado. Hoy en día, las líneas de producción suelen extraer la fibra de la preforma y grabar la rejilla. Además de reducir los costes y el tiempo asociados, esto también permite la producción en masa de rejillas de fibra de Bragg lo que facilita las aplicaciones en estructuras inteligentes que utilizan un gran número de rejillas de Bragg distribuidas a lo largo de una sola longitud de fibra.

Como se puede observar, es necesario contar con un láser ultravioleta en todos los procedimientos anteriores. En este caso, para producir el haz ultravioleta se ha empleado un láser excímero de Kripton-Flúor. El equipo es un modelo PULSEMASTER - PM844 de Lumonics (actualmente LightMachinery) el cual se muestra en la Figura 12.



Figura 12: Modelo de láser excímero de la serie PULSEMASTER-P800 de Lumonics (actualmente IPLEX-800 SERIES de LightMachinery) [1]

Este tipo de láseres funciona a partir de la excitación de una mezcla de gases presurizados (en torno a 5000 mbar) por medio de una descarga eléctrica (en torno a 40 kV). El gas, una vez excitado, comienza emitir fotones y los espejos situados a ambos extremos de la vasija que contiene el gas permiten únicamente la salida fotones con una longitud de onda determinada. Así se genera un haz coherente de alta frecuencia (UV) y por tanto de alta energía.

Este haz, una vez alineado y enfocado con una serie de espejos, se hace incidir sobre una máscara de fase la cual delimita las regiones en las que el láser incide sobre el núcleo de la fibra y en las que no. En la Figura 13 se puede ver una de las máscaras de fases empleadas.



Figura 13: Máscara de fase empleada para la grabación de rejillas de Bragg sobre la fibra óptica.

A la fibra óptica, ahora convertida en sensor, se le ha de soldar un conector cerámico en uno de sus extremos con el fin de que el interrogador óptico pueda 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 14).



Figura 14: 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 sobre la que se ha escrito el sensor para completar el sensor. Para realizar esta soldadura se emplean los útiles que se muestran en la Figura 15.



(a) Soldadora de arco Fujikura-FSM-18S



(b) Cable cleaver Fujikura CT-30

(c) Pelador de fibra.

Figura 15: Herramientas empleadas en la soldadura de fibra óptica.

3.2. Interrogador óptico

Una vez creados los FBGs es necesario disponer de un equipo que sea capaz de emitir luz en el rango de frecuencias deseado y que a su vez sea capaz de recibir la señal y procesarla. Existen varios equipos capaces de realizar esto (incluso los equipos de medida distribuida son capaces de ello) pero en este caso se ha empleado el interrogador óptico de Micron Optics que se muestra en la Figura 16.



Figura 16: Interrogador óptico SM130 de Micron Optics ([2]) (actualmente LUNA Innovations ([3])).

3.3. Optical Backscatter Reflectometry

En el caso de la medida distribuida se emplea un interferómetro diferente 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 17.



Figura 17: Interrogador óptico OBR 4600 de LUNA Innovations ([3]).

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 en PYTHON valiéndose de librerías como *Numpy* y *Scipy* para procesar las señales.

4. Caracterización de los sensores

4.1. Calibración térmica de FBGs

Tal como se vio en la sección 1, la ecuación 4 muestra que la longitud de onda que la fibra refleja es dependiente de la deformación y la temperatura:

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

Por lo tanto es necesario obtener el coeficiente foto-elástico y el termo-óptico experimentalmente. Dado que temperatura y deformación están acopladas en la ecuación será necesario realizar ensayos en los cuales se desacoplen ambos fenómenos. Sin duda la caracterización térmica es la más sencilla puesto que basta con encapsular un FBG y estudiar su comportamiento a diferentes temperaturas.

Este encapsulado se lleva a cabo introduciendo un FBG que esté escrito al final de una fibra en un tubo de acero inoxidable. Luego se fija la fibra al tubo con un adhesivo (normalmente silicona) y se cierra el otro extremo del tubo para que, en caso de ser integrado este sensor en una estructura de material compuesto, la resina no pueda entrar. Así se tiene un FBG simplemente apoyado en un extremo por lo que la deformación de la estructura en la cual se sitúe el tubo será indiferente al sensor. En las Figuras 18 a 22 se muestran los sensores con FBG encapsulado y el posicionamiento de los mismos en una estufa.



Figura 18: Seis sensores dobles FBG. Un FBG está escrito a mitad del cable y el otro está al final y encapsulado.



Figura 19: Extremo final del pigtail con conector cerámico.

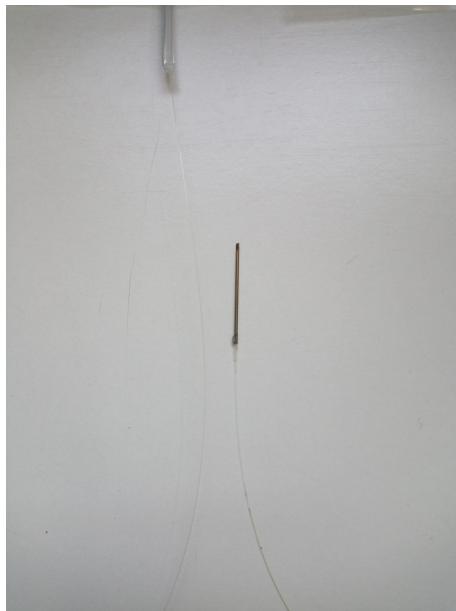


Figura 20: Sensor de fibra óptica FBG encapsulado en una vaina de acero inoxidable.



Figura 21: Disposición de los sensores en la bandeja de la estufa.

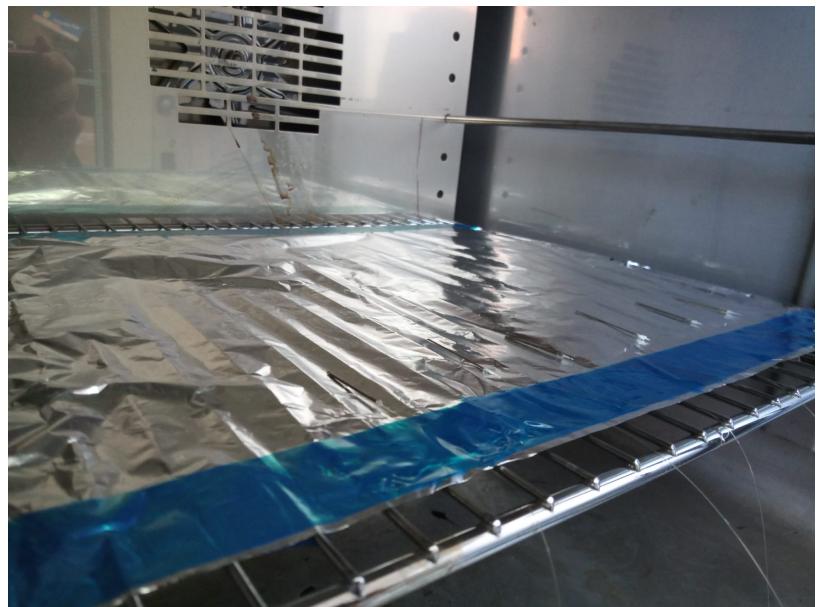


Figura 22: Vista interior de la estufa.

Finalmente se realiza un ajuste de mínimos cuadrados para obtener el parámetro térmico. En la Figura 23 se muestra el comportamiento de un FBG encapsulado. Se puede apreciar que, a pesar de ser las líneas de los ajustes casi paralelas se experimenta una desviación al llegar al máximo fruto de la difusión atómica a estas temperaturas.

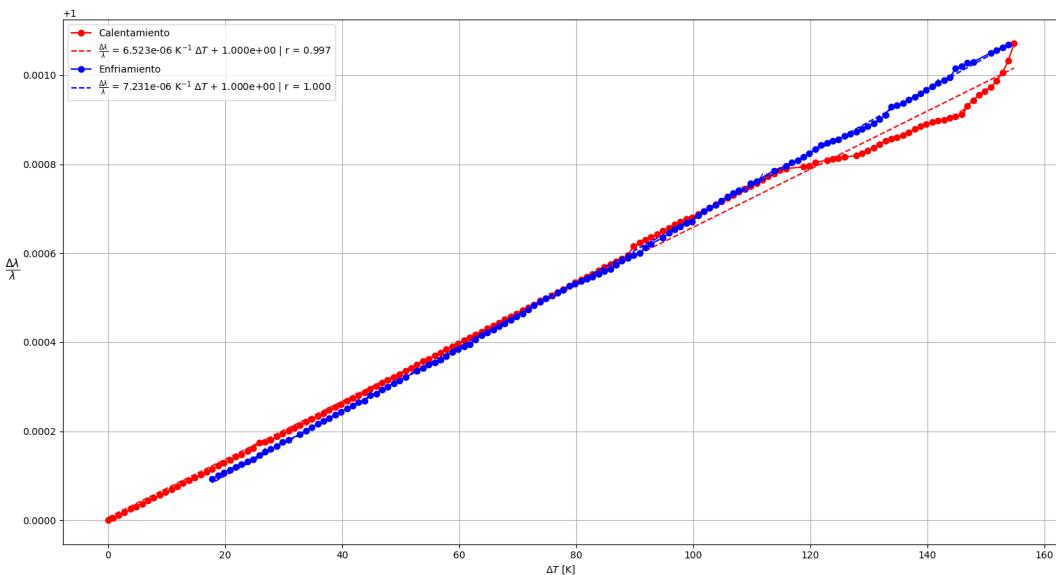


Figura 23: Ajuste por mínimos cuadrados del coeficiente termo-óptico.

4.2. Calibración mecánica de FBGs

Para calibrar el parámetro de deformación se puede aplicar directamente la tensión sobre el sensor o se puede aplicar indirectamente. Si se aplica directamente es necesario embeber el sensor en un material para que la carga no recaiga directamente sobre el sensor y se rompa. Las imperfecciones de la unión entre el sensor y el material conducen a un mayor error cometido en la calibración.

Por otro lado, existe el método indirecto que consiste en embeber sensores en una pieza de material compuesto, curar la pieza en el autoclave, cortarla en probetas dejando las rejilla de los FBGs en mitad de cada probeta y por último realizar un ensayo a tracción sobre las probetas. Otra opción (y es la que será llevada a cabo en este trabajo) consiste en unir adhesivamente (con una fina película de cianoacrilato) la fibra óptica a una viga de aluminio la cual se somete a flexión imponiendo una flecha conocida en el extremo en voladizo. En la Figura 24 se muestra el dispositivo empleado y con la viga a flexión y los FBGs dispuestos en la parte superior.



Figura 24: Viga empotrada con flecha impuesta a 350 mm de la raíz. La fibra óptica en la cual se ha grabado una red de FBGs se ha unido adhesivamente al centro la parte superior con cianoacrilato. Se pueden apreciar marcas rojas sobre las zonas en las que se han inscrito los FBGs.

Por medio de la solución analítica de la deformada de la viga se puede determinar la distribución de deformaciones y correlar estos datos con las medidas obtenidas tal y como se hace en las Figuras 25 y 26.

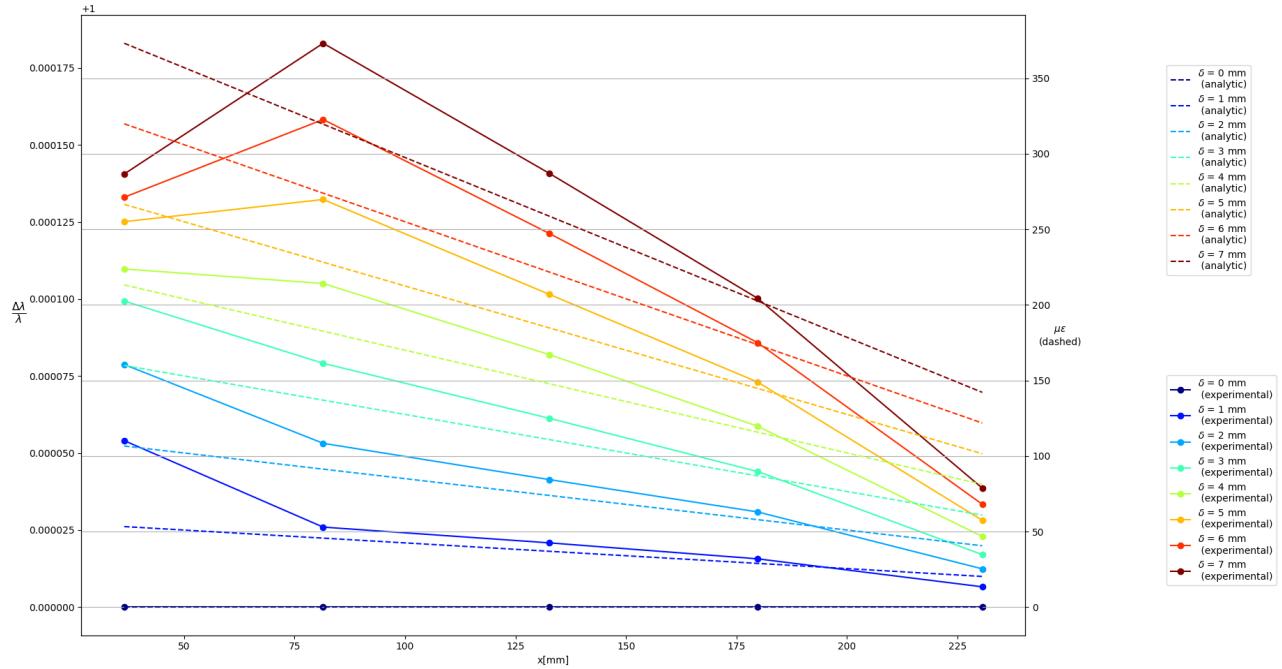


Figura 25: Desplazamiento espectral de los FBGs y deformada analítica de la viga.

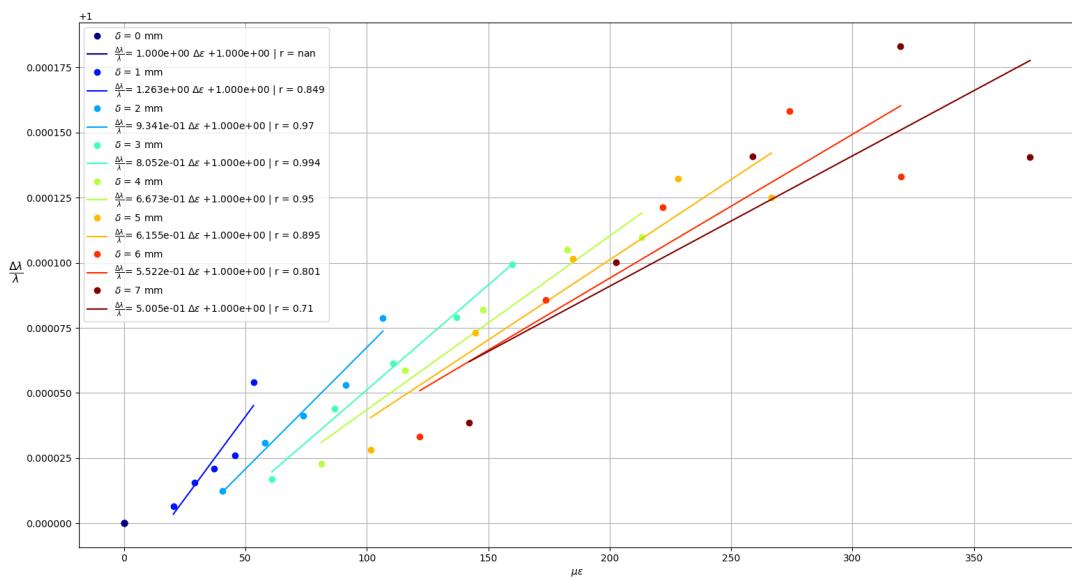


Figura 26: Ajuste por mínimos cuadrados del parámetro mecánico.

4.3. Calibración térmica de OBRs

En este caso se procede de forma similar a la calibración de FBGs solo que en esta caso se dispone un segmento de fibra de mayor longitud en forma de aro (para que la distribución de temperaturas dentro de la estufa no tenga un impacto directo). También se busca que la fibra no sea sensible a las posibles deformaciones del útil sobre el que se apoya así que se ha interpuesto una capa de teflón suelta entre una chapa de aluminio y la fibra y esta última se ha sujetado al teflón con cinta adhesiva pero tapando la zona en contacto con la fibra óptica de manera que no quede pegada. Este procedimiento se ilustra con la Figuras 27 a 30.

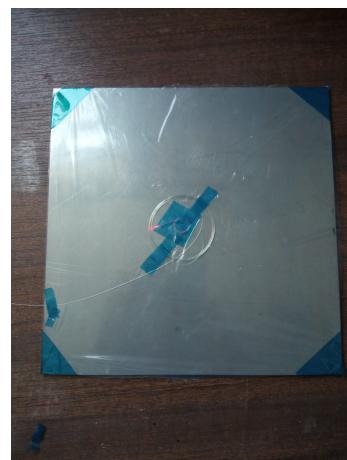


Figura 27: Fibra óptica dispuesta en forma de aro sobre una placa de aluminio recubierta de teflón. La fibra es iluminada con luz roja para comprobar que la luz llega hasta el lazo final.

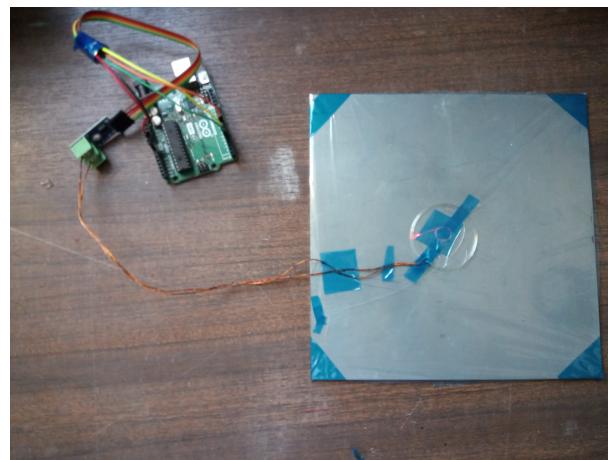


Figura 28: Fibra óptica y termopar tipo K monitorizado a través del módulo MAX6675 de Arduino [4]



Figura 29: Interior de la estufa con la fibra óptica en forma de aro sobre la placa y los instrumentos de medida.



Figura 30: Placa recubierta con papel de aluminio para evitar que la convección modifique las medidas a lo largo del aro.

La forma de aro permite obtener una media del desplazamiento espectral relativo y después éste se relaciona con la temperatura para poder así eliminar desviaciones debidas a cualquier heterogeneidad en la distribución de temperatura. Después, por medio de un ajuste de mínimos cuadrados, se obtienen el parámetro de calibración que relaciona el desplazamiento espectral relativo con el incremento de temperatura. En la Figura 31 se muestra el desplazamiento espectral relativo para algunas de las medidas adquiridas en el calentamiento de la fibra óptica de 19 a 180 grados y en la Figura 32 se muestra el resultado del ajuste de mínimos cuadrados con todos los datos obtenidos.

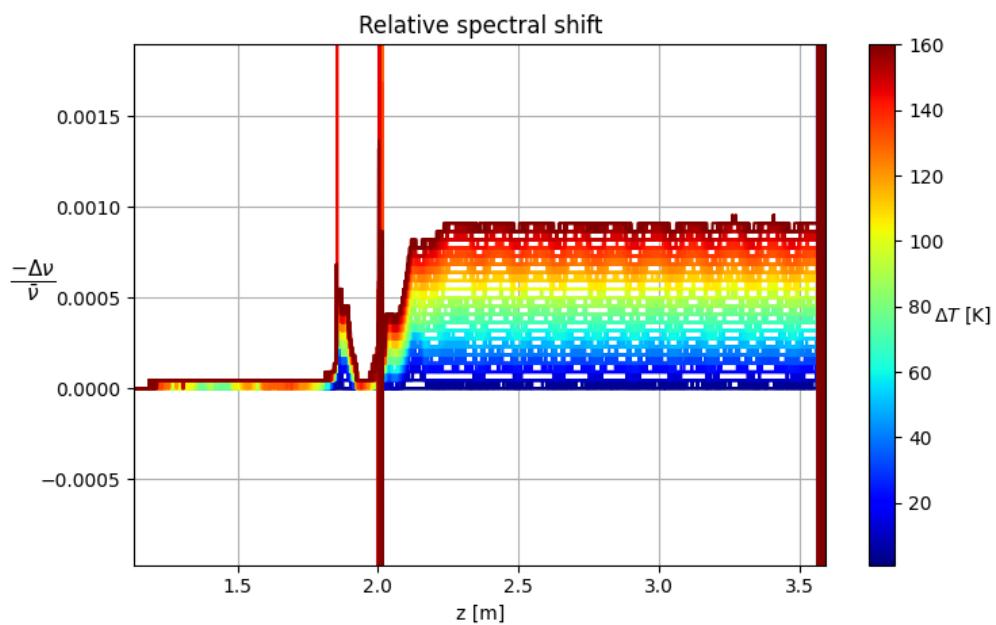


Figura 31: Desplazamiento espectral relativo en la fibra óptica en forma de aro para diferentes temperaturas.

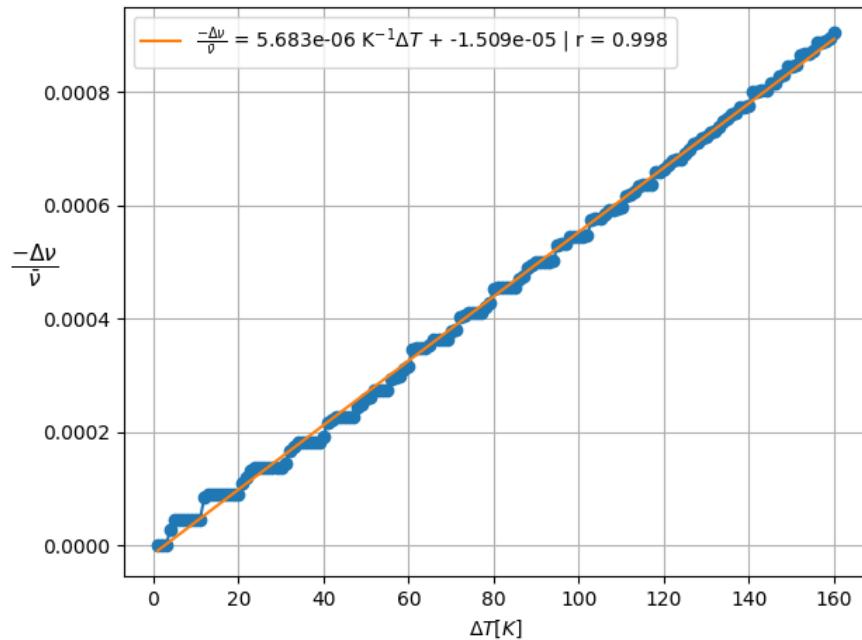


Figura 32: Ajuste por mínimos cuadrados del parámetro térmico donde se ha realizado un calentamiento de 19 a 180 grados.

4.4. Calibración mecánica de OBRs

De nuevo, el procedimiento llevado a cabo es similar al caso de los FBGs. En este caso se pega una fibra y se realiza el ensayo a flexión solo que en lugar de relacionar el desplazamiento espectral de un punto se ha de relacionar el de una serie de ellos. Para ello se obtienen las distribuciones de desplazamiento espectral relativo (véase Figura 33) y se relacionan con la deformada analítica para obtener el parámetro mecánico, también mediante mínimos cuadrados (véase Figura 34).

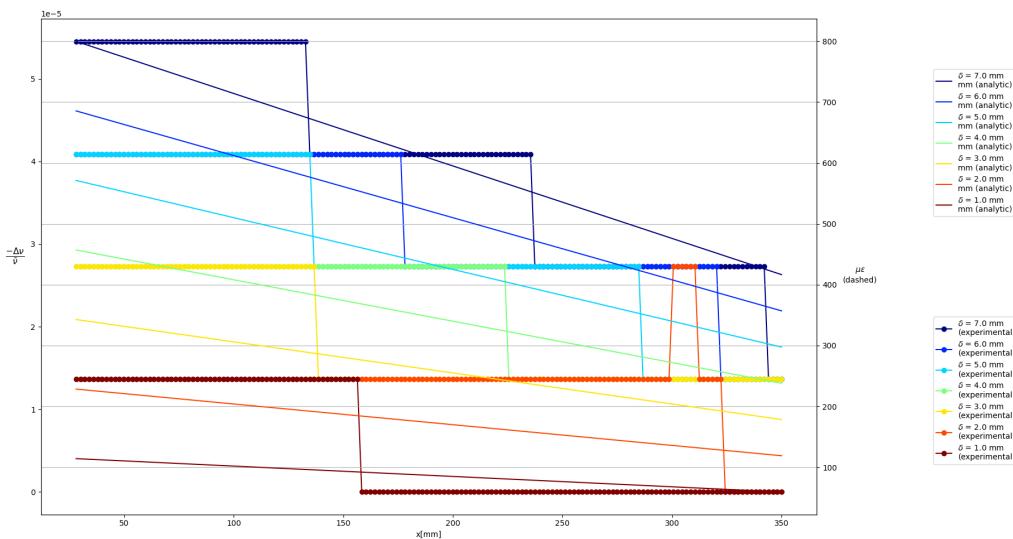


Figura 33: Desplazamiento espectral relativo en la fibra óptica adherida a la viga a flexión para distintos valores de flecha.

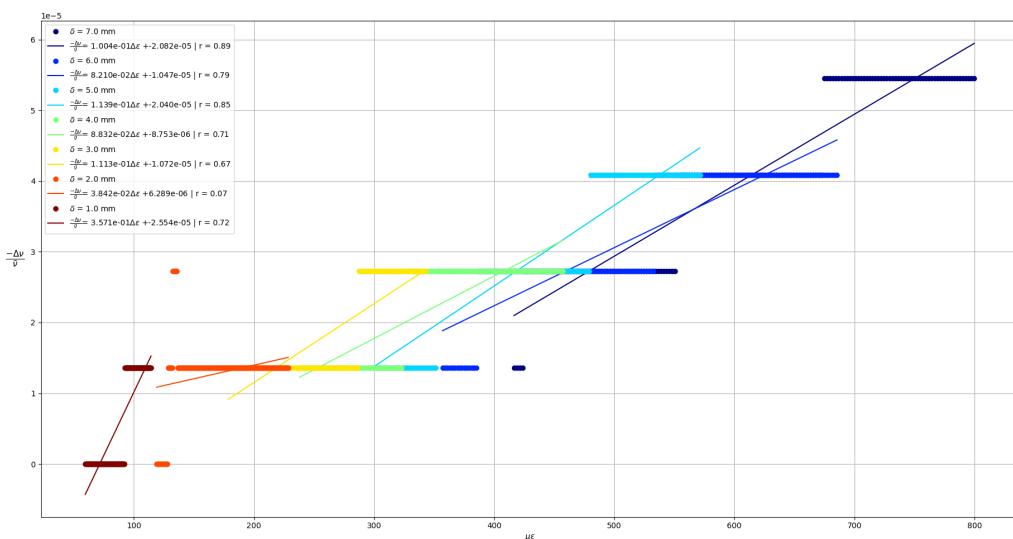


Figura 34: Ajuste por mínimos cuadrados del parámetro mecánico.

5. Desacoplamiento de temperatura y deformación para OBRs

Como se pretende usar también la misma fibra óptica como sensor de temperatura y deformación se ha realizado un ensayo similar a los anteriores con diferentes combinaciones de temperatura y estado de deformación. Se han analizado las señales resultantes y se ha transformado esta de forma que se puedan identificar la deformación y la temperatura.

El proceso para realizar este desacoplamiento no es para nada trivial y no se había hecho con anterioridad para este tipo de fibra y método de interrogación, por lo que el punto de partida y destino estaban separados por un camino largo, arduo y posiblemente intransitable. Sin embargo, después de el empleo de diversos métodos que se detallarán a continuación se consiguieron desacoplar ambas medidas.

5.1. Birrefringencia y autocorrelación

En primer lugar se trató de encontrar alguna propiedad de la señal que añadiera, de forma no redundante, más información a la ya obtenida por medio del desplazamiento espectral para así poder plantear un sistema de dos incógnitas (incremento de temperatura y deformación) y dos ecuaciones (Ecuación 10 y una por el momento desconocida).

A partir de la información recabada en [29] y [30], la ecuación restante del sistema parecía estar relacionada con el fenómeno de la birrefringencia, la cual parecía factible de obtener ya que el interrogador óptico proporciona información sobre los dos estados de polarización. Para computar la birrefringencia a lo largo de la fibra se trataron de aplicar los métodos de [31] y [32] a el problema actual. En concreto Froggat *et al.* computan la autocorrelación para determinar la birrefringencia en un segmento de fibra que mantiene la polarización (PMF) y en [32] se emplea otro equipo de interrogación, y es por ello que no es obtuvieron los mismos resultados. Sin embargo, por medio de la comparación (módulo de la resta) de funciones de autocorrelación (véase Ecuación 11) para dos segmentos de fibra óptica sí se puede apreciar un comportamiento diferente para los casos de temperatura y deformación.

$$C(P, k) = \frac{\sum_n P(n+k)\bar{P}(n)}{\sigma^2 n},$$

$$C(P) = (C(P, 1), C(P, 2), \dots, C(P, n-1), C(P, n)),$$

$$AC(P_1, P_2) = |C(P_1) - C(P_2)|,$$
(11)

donde $C(P, k)$ es el coeficiente de autocorrelación discreto para el índice k y la función evaluada P (que está representada con n puntos), $C(P)$ es la función de autocorrelación para la función P y con $AC(P_1, P_2)$ se denota el módulo de la resta de las funciones de autocorrelación de P_1 y P_2 .

En la Figura 35 se muestra la comparación de autocorrelaciones para distintos estados de la misma fibra óptica computados en un mismo punto.

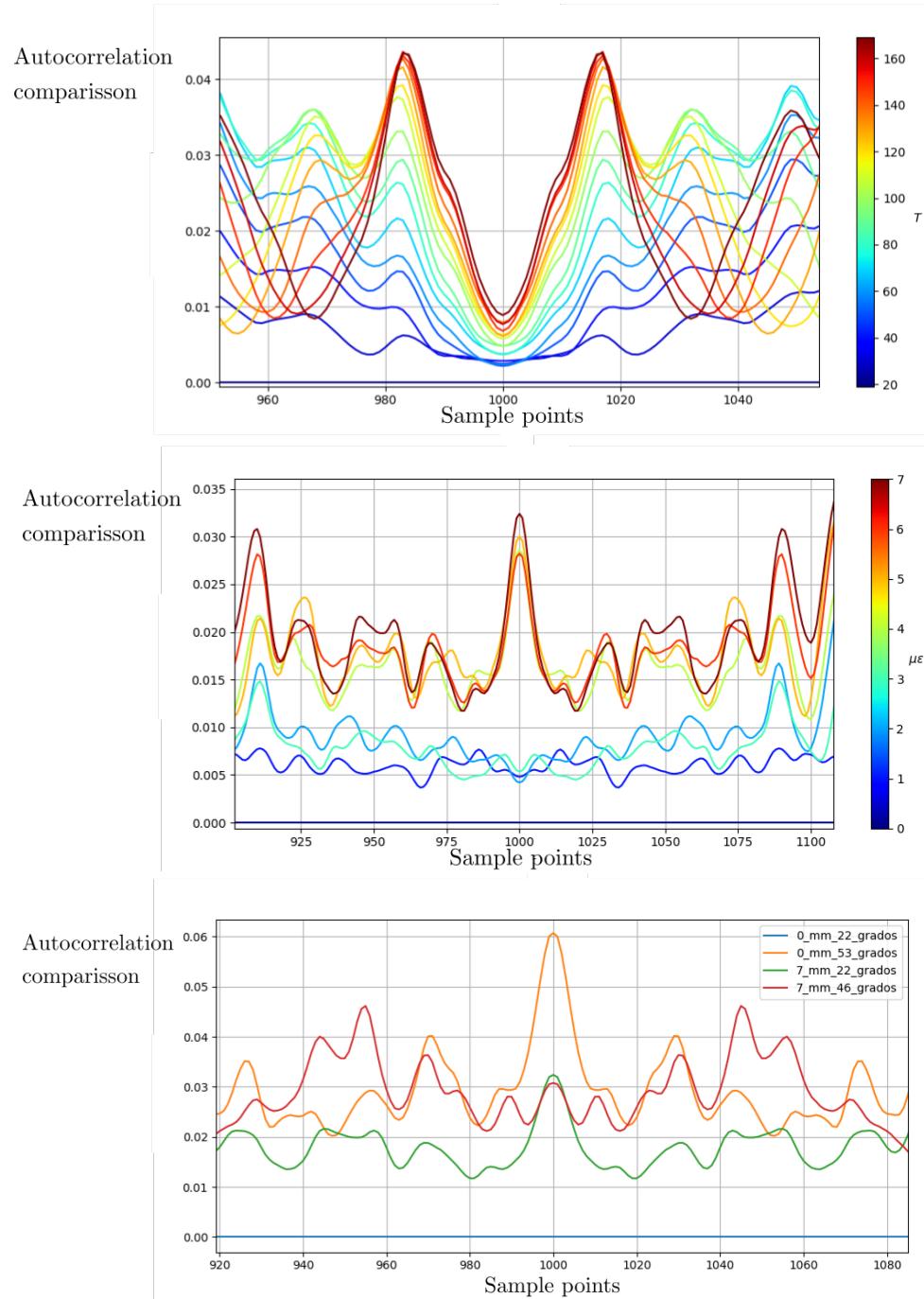


Figura 35: Comparación de autocorrelaciones para: diferentes temperaturas y el mismo estado de deformación (arriba); diferentes estados de deformación y la misma temperatura (centro); y distintos estados de la fibra óptica (abajo).

5.2. Inteligencia Artificial

Como se puede apreciar en la Figura 35, aunque sí existe un comportamiento diferente para temperatura y deformación es complicado establecer un criterio sencillo para identificar el estado local de la fibra, es por ello que se recurre a una inteligencia artificial para establecer la distinción basado en la función computada en la sección anterior. En este caso se ha construido una red neuronal haciendo uso de la librería *Pytorch*.

5.2.1. Datos de entrenamiento

Para entrenar el modelo ha sido necesario someter un segmento de fibra a varias temperaturas y estados de deformación para lo cual se ha tomado una pletina de duraluminio (con módulo elástico, longitud, momento de inercia y coeficiente de expansión térmica conocidos), se ha empotrado a un útil, se le ha adherido un segmento de fibra óptica mediante cianoacrilato y se le ha impuesto una flecha mediante un peso.

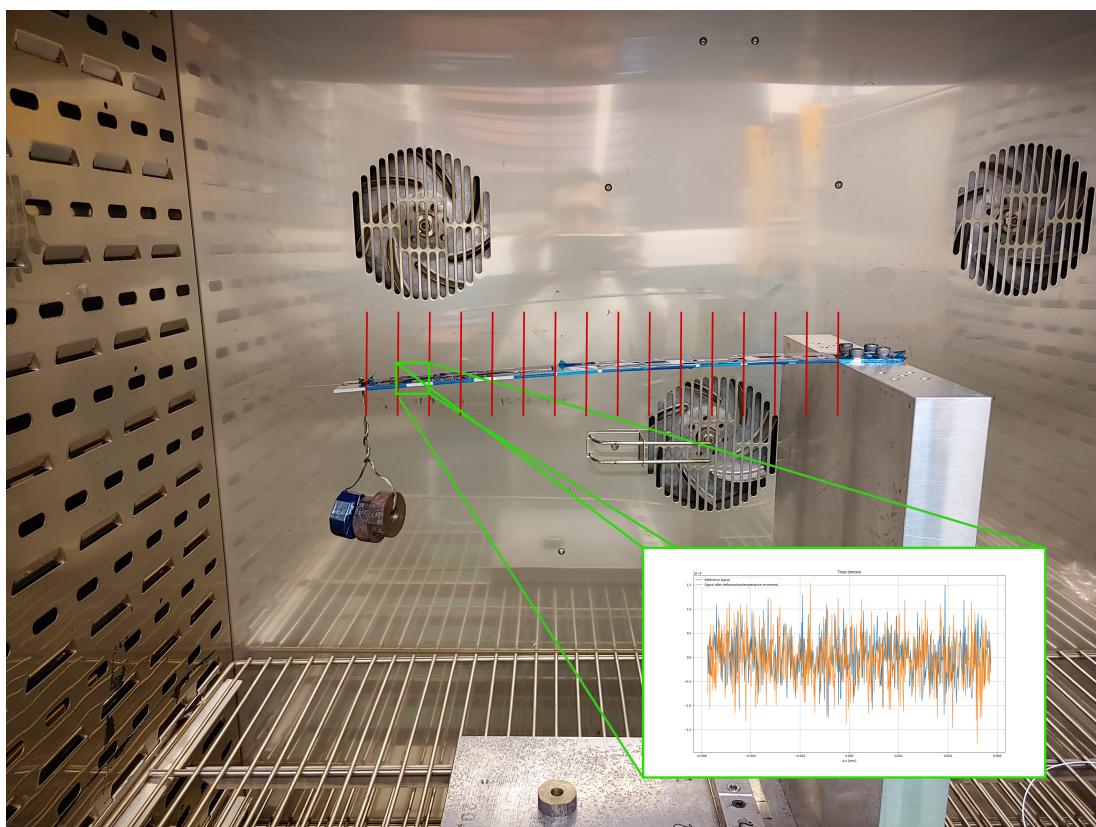


Figura 36: Configuración del ensayo: pletina de duraluminio ($E = 70.3 \text{ GPa}$, $\alpha = 24 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$) de dimensiones $300 \times 30 \times 2 \text{ mm}$. Se han añadido hasta cuatro pesas de 50 g en el extremo (ya que el peso se mantiene con la temperatura).

En la Figura 36 se muestra cómo se ha ensayado el segmento de fibra para recoger datos. Además, para evitar posibles efectos permanentes asociados a la temperatura se ha calentado la probeta hasta 200 grados antes de recoger los datos.

El proceso llevado a cabo para crear el dataset se ilustra en la Figura 37. Las lecturas obtenidas del ensayo en condiciones controladas se han etiquetado con las propias condiciones del ensayo, después se ha tomado cada una de esas señales y se han dividido en segmentos que actúan como sensor puntual, i.e. que se les puede asignar una única temperatura y un único valor de deformación. Por último se han tomado estos segmentos dos a dos y se ha computado el incremento de temperatura y de deformación correspondiente a la pareja, almacenando así las dos señales de los segmentos (P y S) y la diferencia de estados. Como a priori no se conocía el tratamiento previo más adecuado de las señales se ha optado por conservar ambas señales (P_1, S_1, P_2, S_2) al completo para luego evaluar el desempeño de las distintas transformaciones.

Del ensayo realizado se han obtenido datos a cuatro temperaturas: 20, 30, 40 y 50 °C; y cinco estados de deformación asociados a una flecha en el extremo de: 0, 3.11, 6.22, 9.33 y 12.45 mm. Estos estados combinados resultan en 20 estados diferentes que, combinados dos a dos, suponen 190 combinaciones posibles. Para una longitud de fibra de 300 mm de los cuales se han seleccionado solo medidas entre 100 y 280 mm (para evitar posibles errores) y reduciendo el número de combinaciones se ha creado un dataset de 13950 muestras de las cuales el 60 % se ha empleado para entrenamiento, el 20 % para validación y el 20 % restante para test.

El rango de temperaturas ha sido determinado por la temperatura ambiente a la hora de realizar el ensayo, (ya que la estufa no cuenta con refrigeración) y las características del adhesivo empleado, cianoacrilato, para adherir la fibra óptica a la pletina de aluminio.

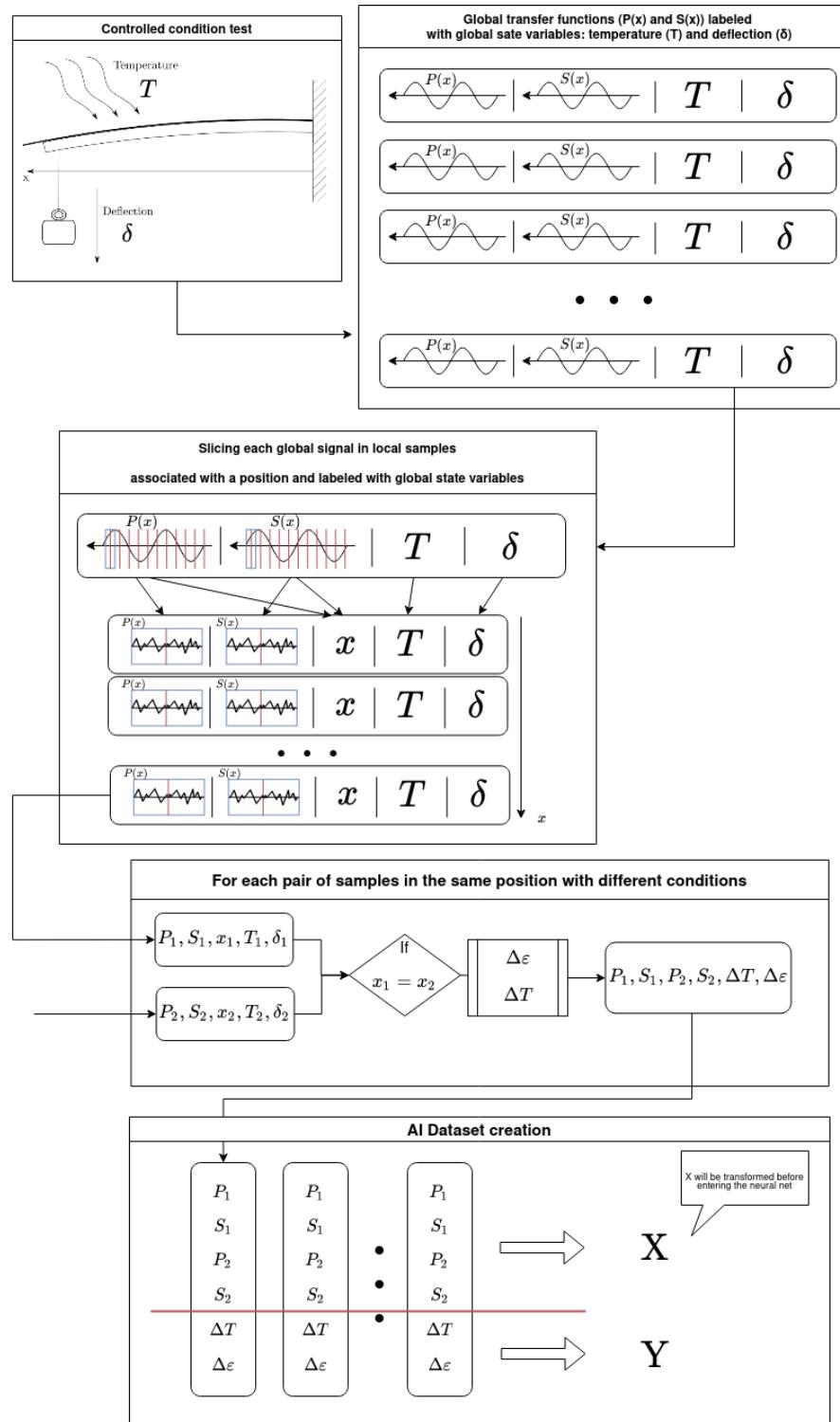


Figura 37: Proceso llevado a cabo para la obtención del dataset con el que se ha entrenado el modelo.

5.2.2. Clusterización

En primer lugar, para comprobar que los datos proporcionados al modelo son suficientes se ha recurrido a un algoritmo de clusterización denominado *TSNE*. Este algoritmo consistente en una IA con entrenamiento no supervisado permite transformar un espacio de N dimensiones (donde N es el tamaño de datos proporcionado) en un espacio de M dimensiones (donde M es el tamaño deseado, en este caso 2: incrementos de temperatura y de deformación). El modelo es alimentado con un vector compuesto de la siguiente forma:

$$x = \left[\frac{-\Delta\nu}{\bar{\nu}}, P_1 * P_2, AC(H_1, H_2)^* \right],$$

donde $\frac{-\Delta\nu}{\bar{\nu}}$ es el valor de desplazamiento espectral entre P_1 y P_2 ; el * denota que se ha tomado solo la región central de puntos (400 de los 2000 totales) y no la función entera

Los resultados del algoritmo de clusterización se muestran en la Figura 38. Como se puede apreciar, el algoritmo genera espontáneamente grupos de temperatura y ordena las deformaciones dentro de ellos lo cual quiere decir que, aunque existe cierta confusión dentro de algunos grupos, una inteligencia artificial es capaz de diferenciar ambas variables.

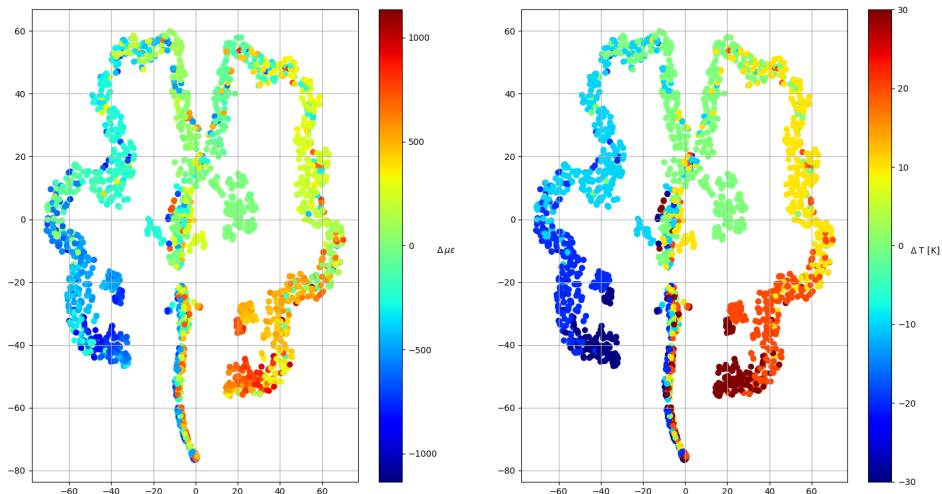


Figura 38: Resultado del algoritmo de clusterización.

5.2.3. Arquitectura de la red

Una vez realizada esta comprobación se pasa a diseñar el modelo de inteligencia artificial capaz de discernir entre incremento de temperatura y deformación a partir de las señales de las distintas polarizaciones. Tras probar varias opciones para entrenar el modelo finalmente se ha seleccionado un vector de entrada compuesto por la correlación cruzada de los ambos estados de polarización y las cuatro auto-correlaciones de las cuatro medidas disponibles. La entrada a la red finalmente es de la forma:

$$x_j = [P_1 \star P_1, P_1 \star P_2, P_2 \star P_2, S_1 \star S_1, S_1 \star S_2, S_2 \star S_2, \Delta\nu] ,$$

donde se ha añadido el incremento de frecuencia $\Delta\nu$ para añadir información de la escala (ya que el mismo equipo puede funcionar en rangos de frecuencia diferentes).

Estos vectores de entrada se han normalizado previamente ya que el entrenamiento es mucho más eficiente con valores normalizados. En este caso se ha seleccionado finalmente la normalización de cada variable por separado por ser la única con la cual el modelo ha sido capaz de ajustarse a los datos:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n_s-1} \\ x_{n_s} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{array}{l} X_{\max i} = \max (\{X_{0i}, \dots, X_{ji}, \dots X_{n_s i}\}) \\ X_{\min i} = \min (\{X_{0i}, \dots, X_{ji}, \dots X_{n_s i}\}) \end{array} \rightarrow \hat{X}_{ji} = \frac{X_{ji} - X_{\min i}}{X_{\max i} - X_{\min i}} , \quad (12)$$

donde el índice i hace referencia al índice de la columna, es decir, a cada uno de los ítems que componen el vector x_j ; por otra parte, el índice j hace referencia al número de muestra.

La arquitectura de la red es la que se muestra en la Figura 39 y es básicamente un compendio de capas densamente conexas con funciones de activación de tipo tangente hiperbólica que le añaden un cariz de no linealidad.

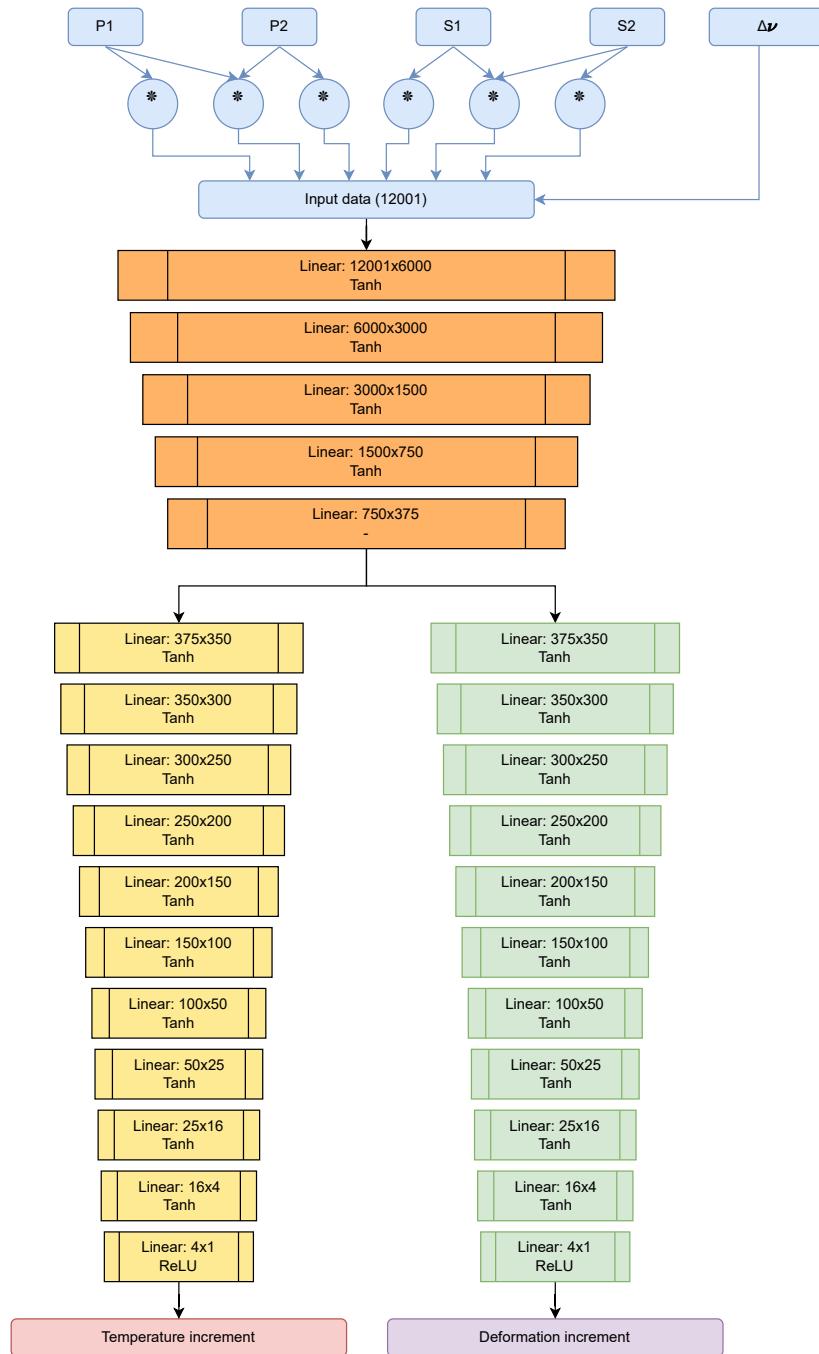


Figura 39: Esquema de la red neuronal empleada. En la parte superior, en azul, se muestra el preproceso de la señal previa a la red neuronal; la operación marcada con la * denota la correlación cruzada, en el caso en el que entran dos señales, y la autocorrelación, en el caso en el que entra solo una.

5.2.4. Entrenamiento

Los resultados del entrenamiento de la red se plasman en la Figura 40. El entrenamiento ha sido llevado a cabo con un optimizador de tipo Adam con un *learning rate* de 10^{-6} y computando el error con el criterio de error medio cuadrático (MSE).

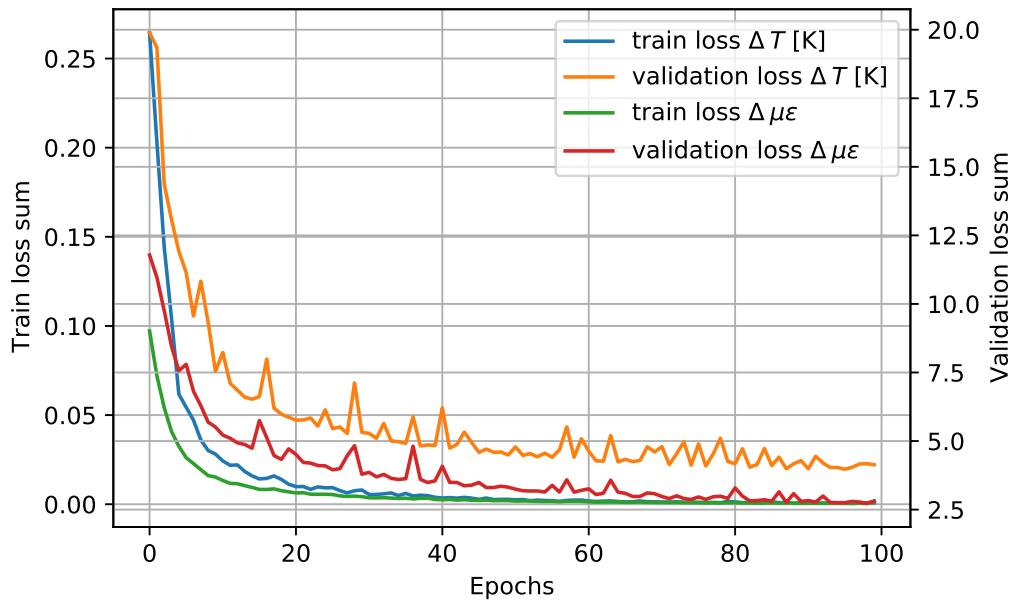


Figura 40: Entrenamiento y validación de la red para ambas variables objetivo.

Como se puede apreciar al llegar a las 100 épocas de entrenamiento el comportamiento es asintótico lo que indica que el modelo no es capaz de ajustarse más a los datos. Por otra parte, a partir del comportamiento de las curvas de validación se puede determinar que el modelo no ha sufrido *overfitting*.

5.2.5. Resultados

Una vez entrenado el modelo se pasa a evaluarlo con los datos de test. En las Figuras 41 y 42 se muestran los histogramas de error para las variables objetivo junto con una aproximación de distribución normal cuyos coeficientes son los que se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1: Coeficientes de las distribuciones normales para los errores de temperatura y deformación.

Normal distributions for error $N(\mu, \sigma^2)$		
Variable	μ	σ^2
ΔT [K]	-0.5948	2.4044
$\Delta \mu\varepsilon$	-27.2083	71.4478

Además se han computado los intervalos de confianza del 99 % y del 95 % y los límites de dichos intervalos se plasman en la Tabla 2:

Tabla 2: Intervalo de confianza de las distribuciones normales para los errores de temperatura y deformación.

	99 % confident interval	95 % confident interval
ΔT [K]	[-4.5889, 3.3994]	[-3.6339, 2.4444]
$\Delta \mu\varepsilon$	[-48.9810, -5.4357]	[-43.7753, -10.6414]

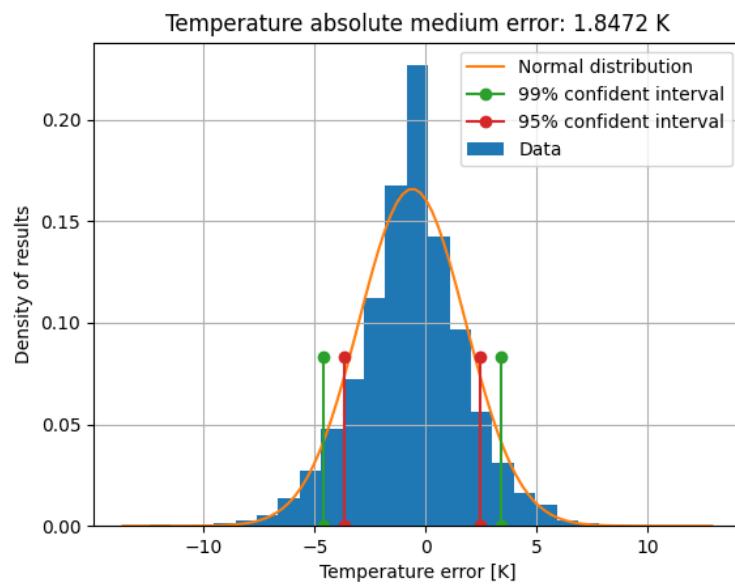


Figura 41: Histograma de errores de temperatura y distribución normal de los mismos, así como límites de intervalos de confianza de dicha distribución.

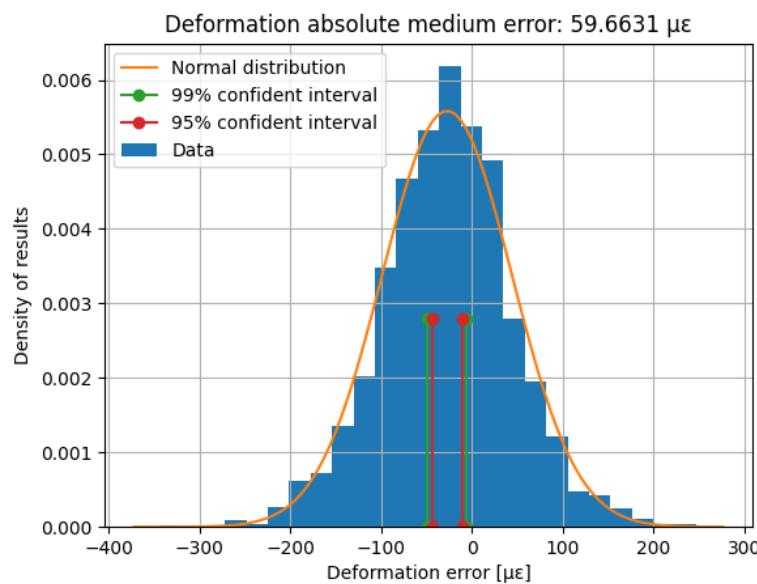


Figura 42: Histograma de errores de deformación y distribución normal de los mismos, así como límites de intervalos de confianza de dicha distribución.

También se han representado en un plano (véase Figuras 43 y 44) los valores predichos frente a los objetivo para crear el equivalente a una matriz de confusión pero con datos continuos. Si el modelo funcionase a la perfección los datos predichos y los objetivo serían iguales, trazándose así una diagonal. Es por ello que sobre los resultados se ha trazado una recta mediante mínimos cuadrados de la forma:

$$y = m x + n ,$$

donde x representa el valor objetivo e y el predicho, m la pendiente de la recta y n la ordenada en el origen.

Adicionalmente también se ha computado el valor de r^2 para determinar la dispersión de los valores. En la Tabla 3 se pueden consultar todos los valores anteriormente mencionados.

Tabla 3: Coeficientes de la regresión lineal para los valores predichos (*predict*) frente a los objetivo (*target*) para temperatura y deformación.

	m	n	r^2
ΔT [K]	0.94	-0.61	0.96
$\Delta \mu\varepsilon$	0.93	-27.39	0.94

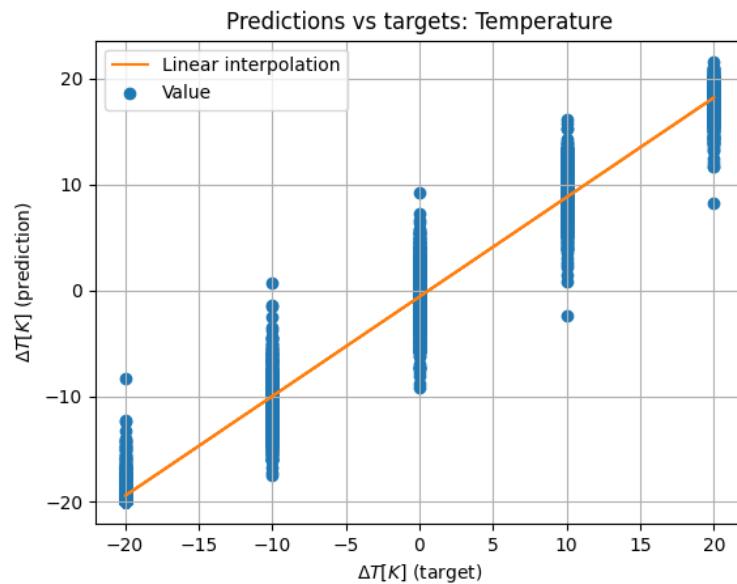


Figura 43: Representación 2D de valores predichos (*predict*) frente a objetivo (*target*) para temperatura y regresión lineal de los mismos.

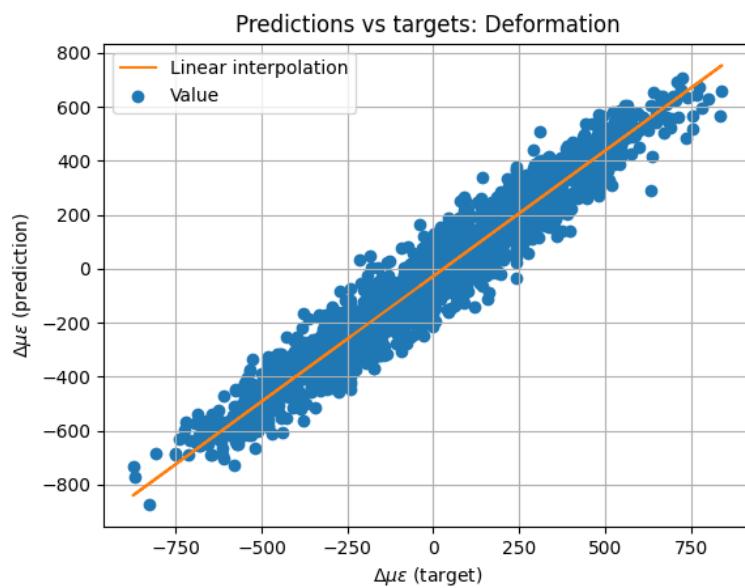


Figura 44: Representación 2D de valores predichos (*predict*) frente a objetivo (*target*) para deformación y regresión lineal de los mismos.

Ordenando las etiquetas de incrementos de temperatura y deformación empleadas para el entrenamiento de la red de menor a mayor se obtienen las gráficas de las Figuras 45 y 46, mediante estas figuras se puede visualizar la cantidad de datos con los que se ha entrenado la red. Como se puede observar, las temperaturas se distribuyen en escalones separados 10 K entre sí mientras que las deformaciones están mejor repartidas, siendo el mínimo salto entre ellas del orden de 0.222 microdeformaciones.

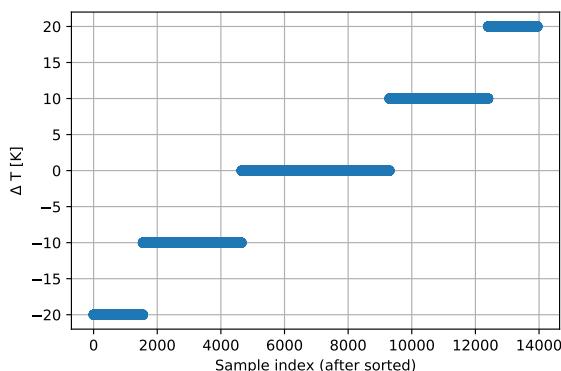


Figura 45: Distribución de etiquetas de los datos: temperatura.

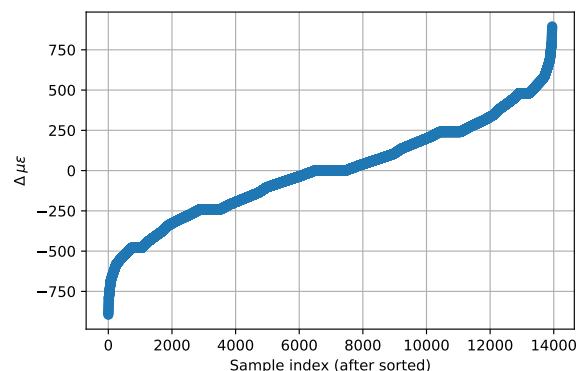


Figura 46: Distribución de etiquetas de los datos: deformación.

Teniendo en cuenta que los datos empleados son reducidos (del orden de 10000) y teniendo en cuenta esta distribución de estados de deformación y temperatura, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Existe un error bastante alto para lo que el interrogador de fibra óptica es capaz de medir, pero el modelo se ajusta sin problemas a los datos suministrados.
- La temperatura, a pesar de contar con unos datos más diferenciados se predice con más exactitud, de hecho, su intervalo de confianza del 99% tiene un ancho de 7.9883 K que está cerca del salto mínimo entre las temperaturas consideradas (10 K).
- La deformación, sin embargo, se ajusta bastante peor si se tienen en cuenta la separación pero, por otra parte, se tienen pocos datos de estados muy diversos (sobre todo en los casos extremos).
- Las conclusiones anteriores animan a pensar que con una mayor cantidad de datos se podrá entrenar el modelo más preciso. No obstante, hay que considerar que el dataset actualmente ya ocupa 1.3 GB de memoria y que un dataset 10 veces mayor, la cual sería una cantidad más apropiada para una red neuronal, precisaría de una GPU de por lo menos 13 GB de capacidad y los tiempos de entrenamiento serían mucho más largos. Una de las opciones más recomendables sería determinar qué parte de los datos de entrada es más importante y tratar de reducir así el dataset y el modelo.

5.3. Filtrado de resultados

Aunque las predicciones a nivel local del estado de temperatura y deformación de la fibra óptica mediante el modelo previamente presentado son prometedores, a la hora de presentar directamente las predicciones se pueden apreciar muchas oscilaciones que para nada son coherentes con el comportamiento típico de los materiales. Para añadir esta coherencia se han probado distintos filtros sobre una medida de ejemplo, el resultado es el que se muestra en la Figura 47.

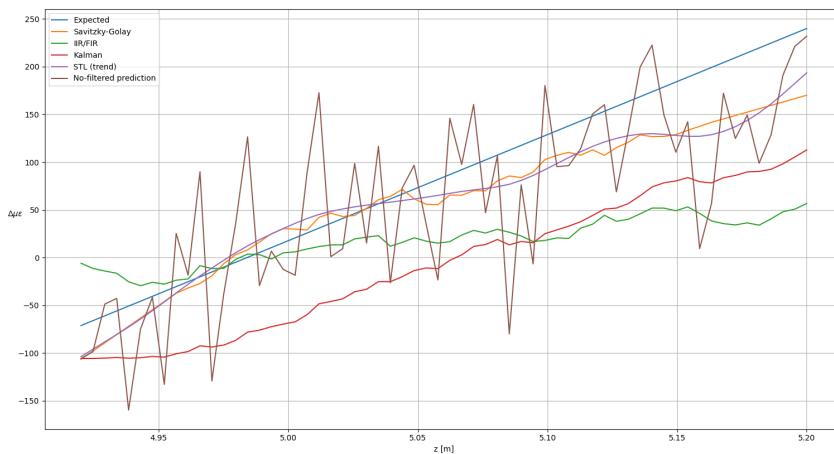


Figura 47: Valor esperado, predicción del modelo y predicción tras aplicar distintos filtros. Los filtros *Savitzky-Golay* y *IIR/FIR* se han obtenido de la librería *scipy.signal* donde figuran como *savgol_filter* y *lfilter*; por otra parte el filtro *STL(trend)* corresponde al *hpfilter* de *statsmodels.api.tsa.filters*; y por último el filtro de *Kalman* ha creado a partir del script disponible en [5].

Para obtener un estimación cuantitativa del error cometido se han computado errores medios cuadráticos de cada uno de los filtros y los resultados se muestran en la Tabla 4 así como los parámetros finales empleados en cada filtro.

Tabla 4: Parámetros empleados en cada uno de los filtros y medida del error (véase Figura 47 para más información acerca del significado de los parámetros

Filter name	Parameters used	r^2
Savitzky-Golay	window_length = 17 polyorder = 1	0.955
lfilter	b = 6 a = 3	0.876
Kalman	Q (process variance) = 0.58 R (estimate measurement variance) = 160.316	0.909
STL (trend)	Hodrick-Prescott smoothing parameter = 199	0.94

6. Curado de laminados

Una vez determinado el comportamiento de los sensores de medida puntual y distribuida se ha pasado a estudiar el curado de laminados con distintas secuencias de apilado. Este paso requiere de especial interés ya que a través de la fibra óptica se pueden determinar las tensiones residuales y los defectos de fabricación para poder identificar y eliminar errores, mejorando progresivamente el procedimiento de apilado y curado.

Para el presente trabajo se han curado probetas de preimpregnado IM7-8552 (véase [33], [34], [35] y [36]). Este material cura a 180° y 7 bar durante 2 horas, y para cumplir con estas especificaciones, dado que las probetas son planas, se ha usado una prensa de platos calientes y unas placas planas de aluminio recubiertas de film antiadherente. Dado que la resina es de flujo controlado no ha sido necesario introducir ningún elemento adicional para evitar su flujo hacia el exterior.

6.1. Desempeño de la red neuronal en la monitorización de curados

Lamentablemente, el modelo desarrollado, no arroja ningún resultado válido en materia de monitorización de curado de materiales compuesto. Si bien es cierto que, como se ha demostrado en la Sección 5 puede discernir entre temperatura y deformación, esto solo parece dar buenos resultados para el caso en el cual la fibra óptica está pegada con adhesivo a alguna superficie. Se asocia esta falta de validez a la confusión generada por otras variables físicas y condiciones que no han sido consideradas en el proceso de entrenamiento de la red. En futuros trabajos se habrá de entrenar un modelo con casos más complejos o extraer alguna propiedad de la señal que se mantenga invariable frente a estos fenómenos no considerados. En las Figura 48 se muestra cómo ha reaccionado el modelo al curado.

En las siguientes subsecciones se mostrará únicamente la evolución del valor del desplazamiento espectral en ciertos puntos escogidos. Aunque no se puede llegar a observar en concreto la temperatura y la deformación por separado, la evolución de esta variable a lo largo del proceso de curado sí que ofrece cierta información sobre cómo se ha comportado el material. Otra posibilidad que ofrece este método, aplicado a este proceso, es la asociación de los distintos fenómenos que ocurren en el proceso de curado directamente al comportamiento del desplazamiento espectral.

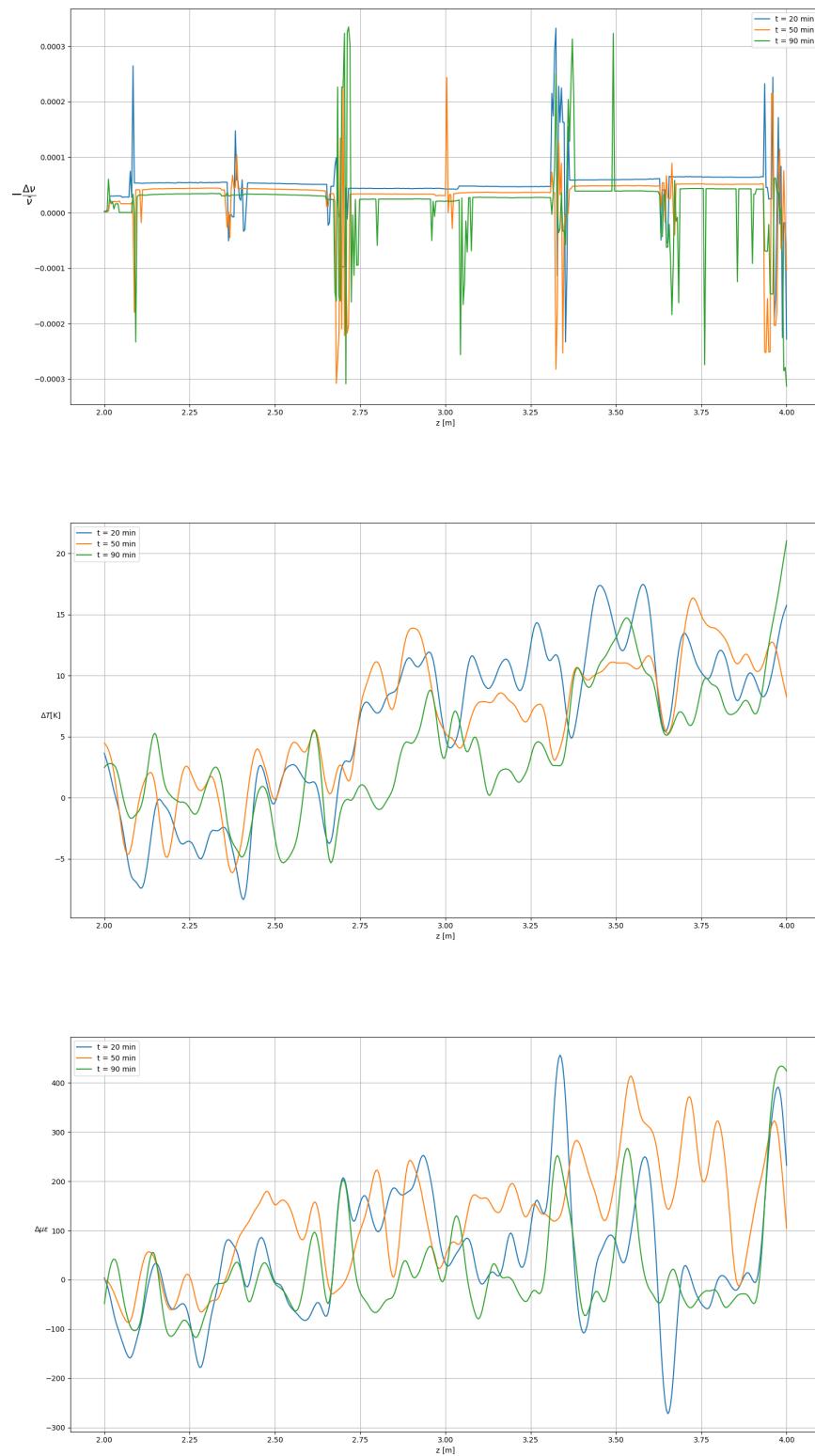


Figura 48: Procesado de las señales recogidas por el modelo de inteligencia artificial en comparación a la lectura obtenida a través del cómputo del desplazamiento espectral. 44

6.2. Laminado simétrico

Normalmente los componentes de material compuesto más sencillos tienen un laminado simétrico. Este tipo de laminado proporciona una distribución de esfuerzos residuales prácticamente nula (a excepción de los bordes) y un comportamiento más homogéneo a lo largo de las capas. Es por ello que se ha monitorizado en primer lugar este tipo de laminado para establecer una referencia. La secuencia de apilado ha sido:

$$[90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 90^\circ].$$

En las Figuras 49 a 51 se muestran imágenes del proceso de apilado e integración de fibra óptica, así como los distintos útiles empleados. Nótese que la mesa ha sido forrada con film antiadherente y el operario está cubierto con bata y guantes para evitar contaminar las láminas de preimpregnado lo menos posible dentro de no estar realizando este proceso en una sala limpia.



Figura 49: Sujeción temporal de la fibra óptica en las posiciones prefijadas mediante cinta de carrocería.



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLÍTÉCNICA
DE MADRID

Caso de Estudio 2

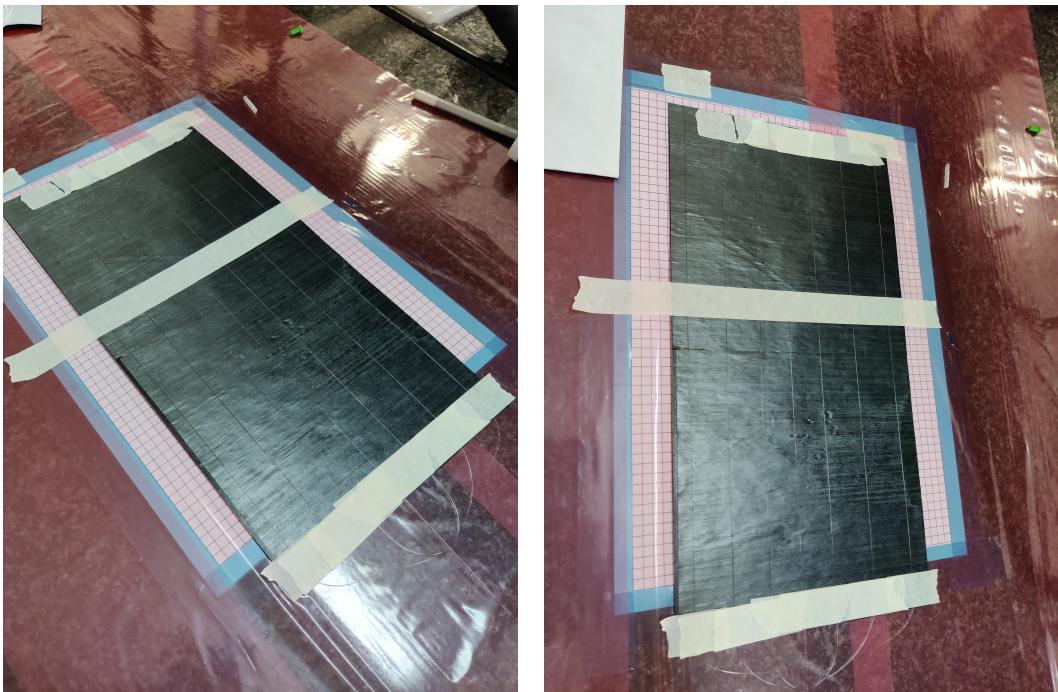


Figura 50: Fibra óptica dispuesta sobre el laminado.

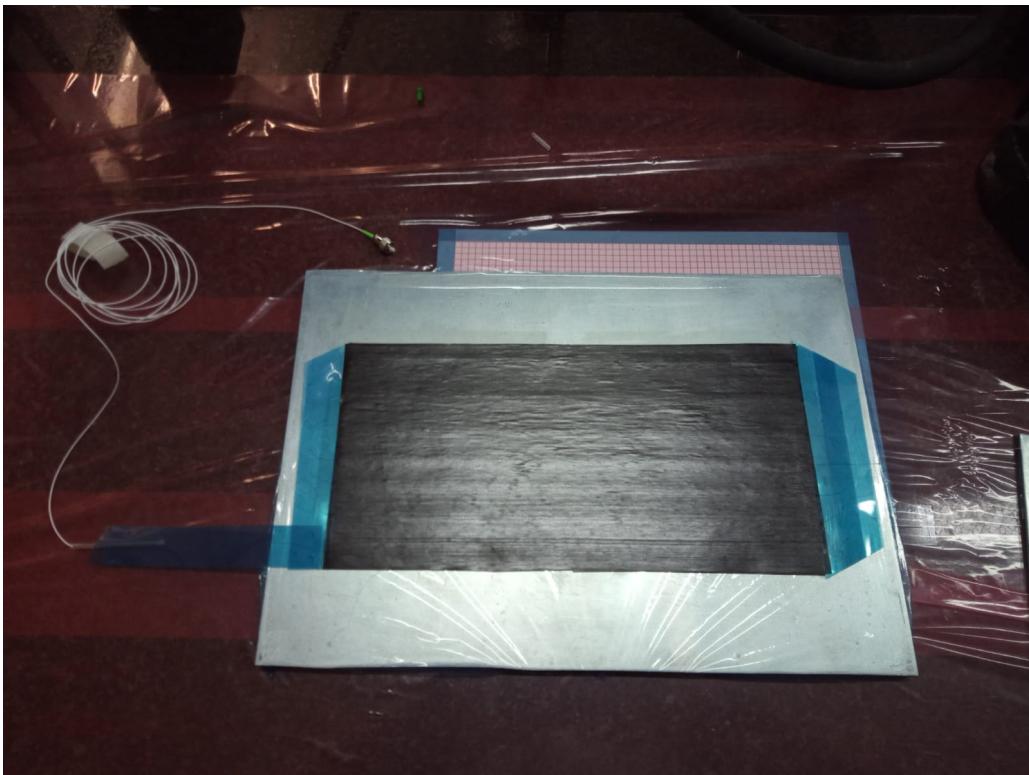


Figura 51: Laminado simétrico apilado con fibra óptica embebida.

A lo largo del curado en la prensa de platos calientes el laminado experimentó la evolución que se plasma en las Figuras 52 y 53.

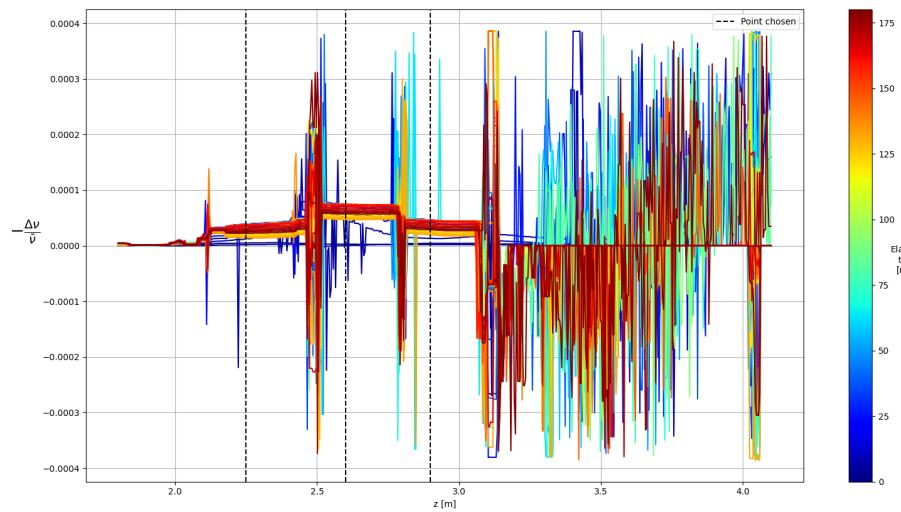


Figura 52: Distribución espacial del desplazamiento espectral para diferentes instantes de tiempo.

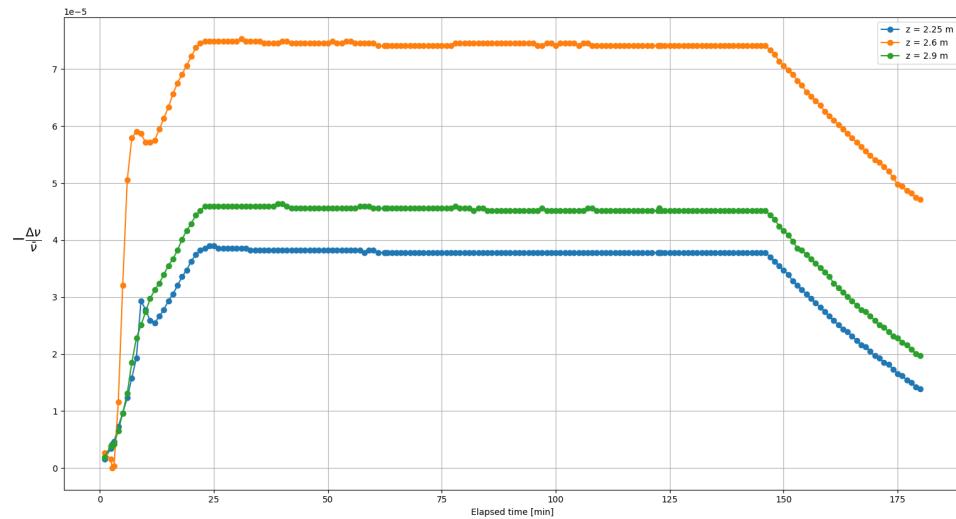


Figura 53: Evolución temporal del desplazamiento espectral para diferentes puntos de la fibra escogidos (véase Figura 52 para ubicar los puntos).

En la Figura 54 se puede ver el laminado fruto del proceso de fabricación.

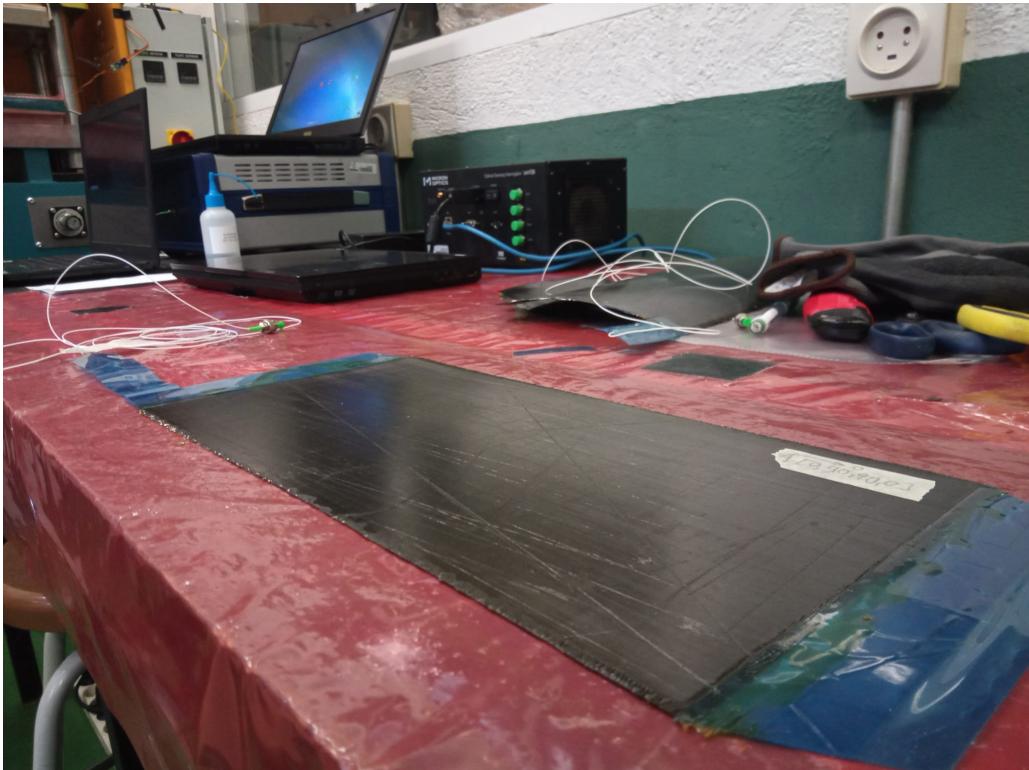


Figura 54: Laminado simétrico una vez curado.

6.3. Laminado asimétrico

En ciertas aplicaciones es interesante el uso de laminados no simétricos. Este tipo de laminados proporciona una respuesta más adecuada a las cargas y puede conducir a una optimización estructural mayor que los laminados convencionales. Sin embargo, en este caso, la distribución de esfuerzos residuales es notable y por ello que se ha monitorizado su evolución. La secuencia de apilado en este caso ha sido:

$$[90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ].$$

En la Figura 55 se muestran imágenes del proceso de apilado e integración de fibra óptica.

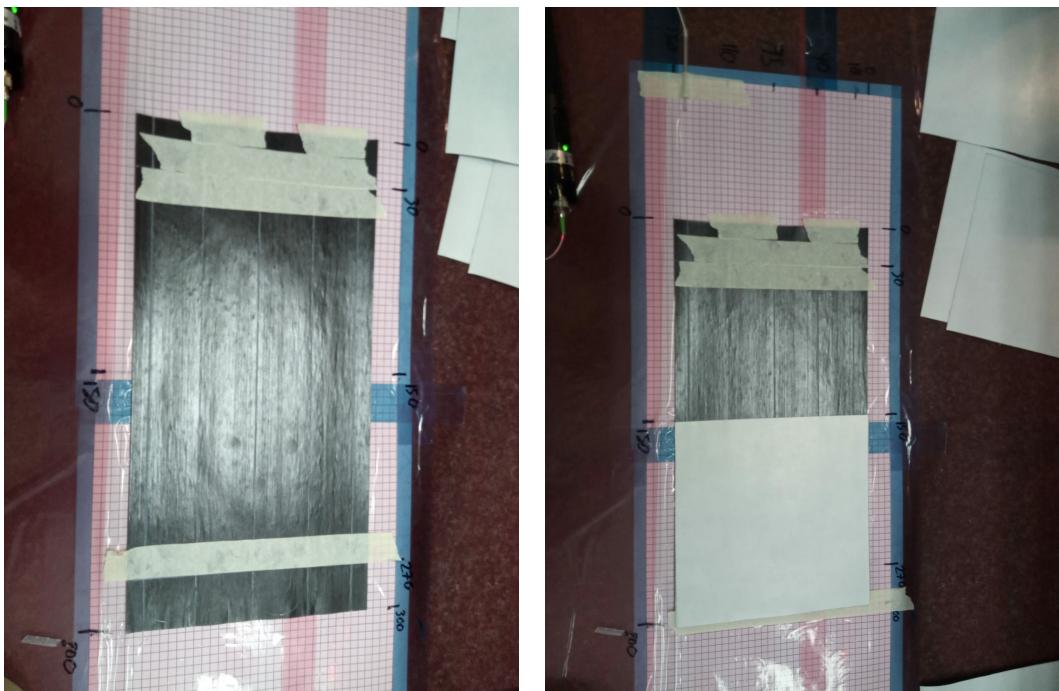


Figura 55: Sujeción temporal de la fibra óptica en las posiciones prefijadas mediante cinta de carrocería (derecha) y colocación de la tercera capa justo sobre la fibra (izquierda).

A lo largo del curado en la prensa de platos calientes el laminado experimentó la evolución que se plasma en las Figuras 56 y 57. Por otra parte, en la Figura 58, se puede ver el laminado fruto del proceso de fabricación. En este caso es apreciable la curvatura inducida por los esfuerzos residuales.

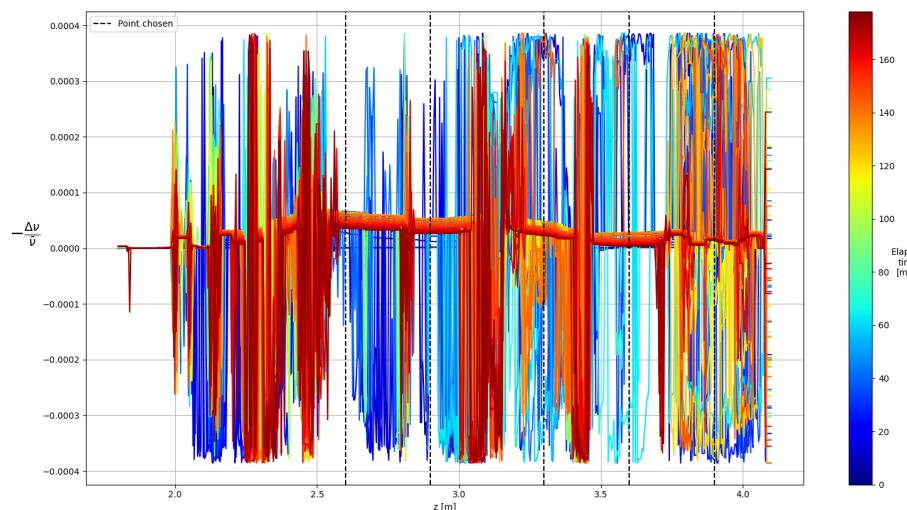


Figura 56: Distribución espacial del desplazamiento espectral para diferentes instantes de tiempo.

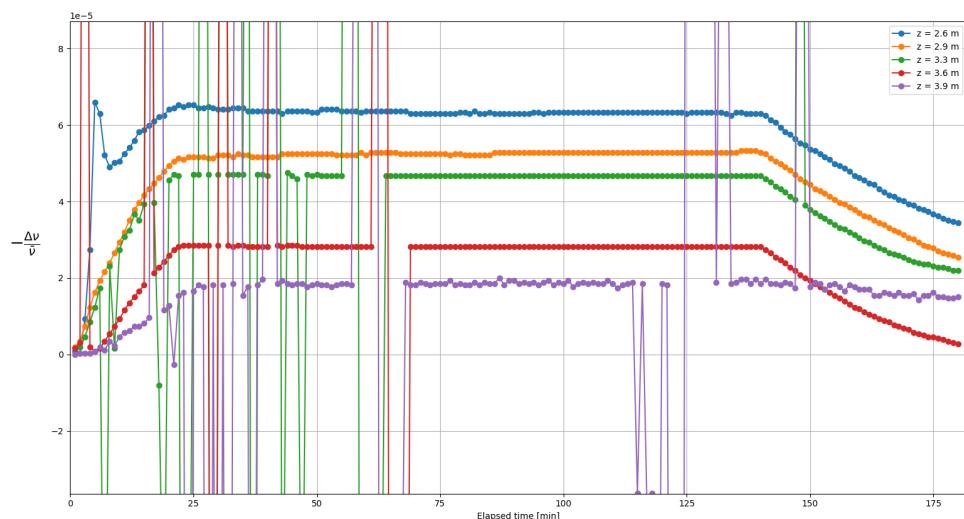


Figura 57: Evolución temporal del desplazamiento espectral para diferentes puntos de la fibra escogidos (véase Figura 56 para ubicar los puntos).

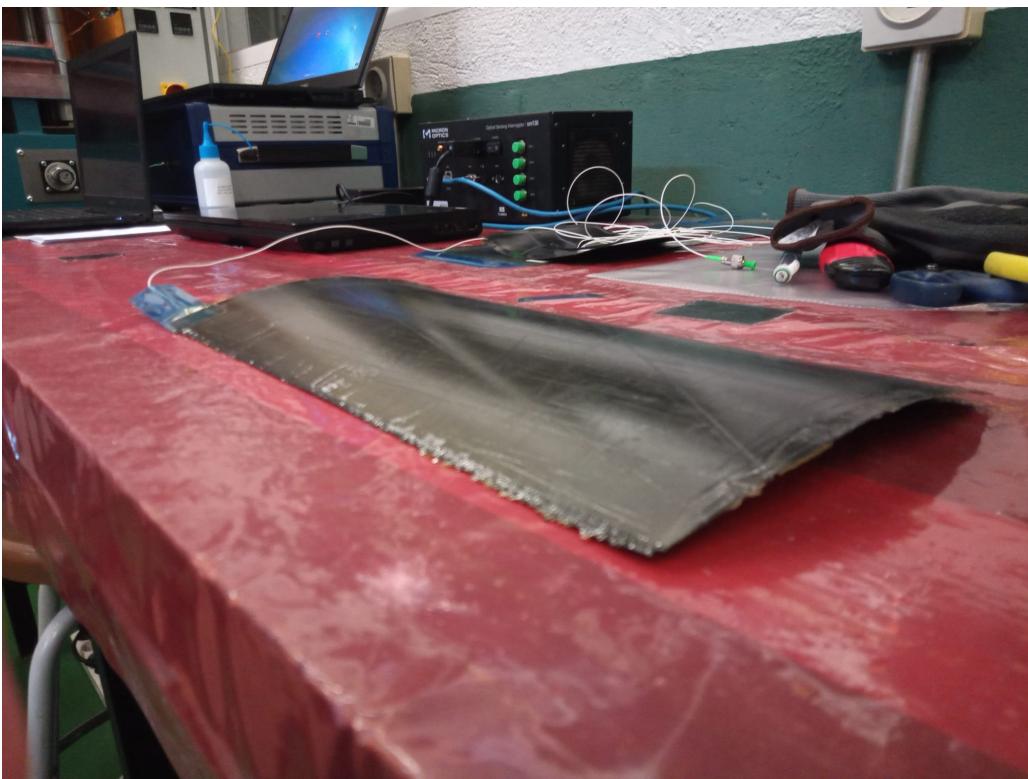


Figura 58: Laminado asimétrico una vez curado.

6.4. Compensación del laminado asimétrico

Una vez realizado el laminado asimétrico es posible añadir más capas para convertirlo en un laminado simétrico. Este paso reviste de especial interés ya que las tensiones residuales producto de este proceso de fabricación pueden ser diferentes a las que se obtendrían en el caso de curar un laminado simétrico desde un primer momento. Esta situación es típica cuando se integran estructuras complejas de material compuesto donde pueden llegar a interactuar partes curadas, semi-curadas y frescas con sus correspondientes laminados.

En este caso se ha añadido una capa más al laminado asimétrico anterior por lo que la secuencia resultante es:

$$[0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, \textcolor{red}{0^\circ}] .$$

donde la nueva capa se ha añadido en rojo.

A lo largo del curado en la prensa de platos calientes el laminado experimentó la evolución que se plasma en las Figuras 59 y 60.

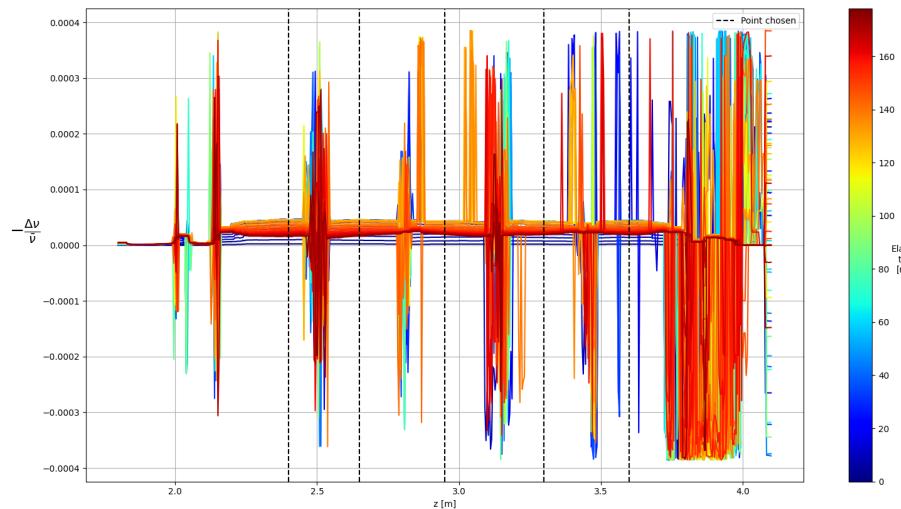


Figura 59: Distribución espacial del desplazamiento espectral para diferentes instantes de tiempo.

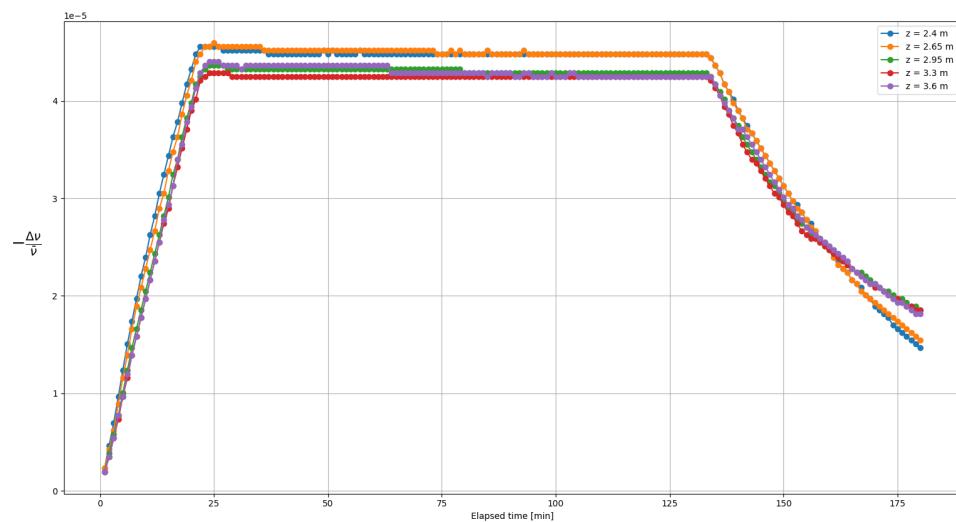


Figura 60: Evolución temporal del desplazamiento espectral para diferentes puntos de la fibra escogidos (véase Figura 59 para ubicar los puntos).

En la Figura 61 se puede ver el laminado fruto del proceso de fabricación. En este caso se observa cómo el laminado ha perdido la curvatura. La monitorización del proceso, al tratarse de una fibra embebida en capas que no sufren evolución no aporta ningún tipo de información.

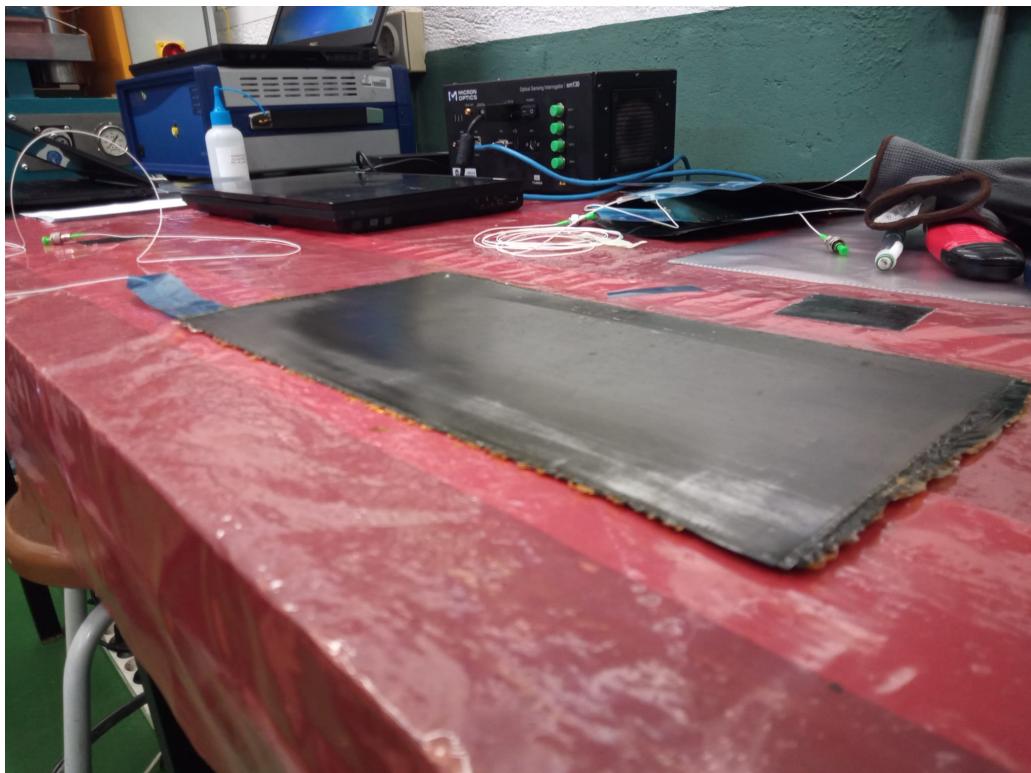


Figura 61: Laminado inicialmente asimétrico convertido en simétrico mediante adición de capas a posteriori una vez curado por segunda vez.

7. Conclusiones

Del trabajo realizado se extraen las siguientes conclusiones:

- Los sensores basados en fibra óptica revisten de especial utilidad dada su alta precisión y reducida distorsión sobre la pieza a monitorizar y por lo que resultan interesantes en procesos como el curado de materiales compuestos.
- Sin embargo, no se debe olvidar que para la implementación de esta tecnología es necesario recurrir a equipos y herramientas no comúnmente disponibles las cuales pueden no suelen ser especialmente asequibles. Además, la fibra óptica, dado su reducido grosor es muy frágil a flexión por lo que la manipulación de la misma es compleja.
- Esta tecnología se encuentra todavía en fase de desarrollo, de hecho, según los criterios de la ESA, no supera un TRL 5 en el caso de los FBGs (véase [37], que es una tecnología mucho más madura que la medida distribuida. Sin embargo, el actual desarrollo informático abre la puerta a modelos de inteligencia artificial capaces de procesar la ingente cantidad de datos recogidos por los equipos de interrogación haciendo así posible el empleo de medidas distribuidas que actúen a la vez como sensores de temperatura y de deformación. Como se puede observar en la Sección 5 queda patente esta posibilidad ya que con un dataset de unos 10000 datos se ha conseguido entrenar un modelo sencillo, capaz de predecir el estado de deformación de la fibra con un error descrito por las distribuciones que aparecen en la Tabla 5, cuyos intervalos de confianza se recogen en la Tabla 6 y que se repiten en esta misma sección.

Tabla 5: Coeficientes de las distribuciones normales para los errores de temperatura y deformación.

Normal distributions for error $N(\mu, \sigma^2)$		
Variable	μ	σ^2
ΔT [K]	-0.5948	2.4044
$\Delta \mu\varepsilon$	-27.2083	71.4478

Tabla 6: Intervalo de confianza de las distribuciones normales para los errores de temperatura y deformación.

	99 % confident interval	95 % confident interval
ΔT [K]	[-4.5889, 3.3994]	[-3.6339, 2.4444]
$\Delta \mu\varepsilon$	[-48.9810, -5.4357]	[-43.7753, -10.6414]

Además este modelo se puede emplear con cualquier fibra óptica convencional (SMF) ya que los datos de entrenamiento tienen varios estados de referencia.

- El empleo de filtros puede ser una buena herramienta para añadir algo de coherencia entre las predicciones locales.
- Esta tecnología se presenta como una opción atractiva en la monitorización del curado de materiales compuestos como queda plasmado en la Sección 6 aunque será necesario desarrollar metodología y adquirir conocimiento práctico.

8. Futuros trabajos

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

- Análisis detallado de los datos mediante transformaciones y operaciones empleadas actualmente para el análisis de señales como la transformada de wavelet, la de chriplet, creación de espectrogramas, etc.
- Análisis más detallado del modelo actual para determinar los aspectos más relevantes y reducir así el volumen de datos empleados.
- Diseño y entrenamiento de modelos más complejos de inteligencia artificial que sean más eficaces.
- Obtención de más datos de entrenamiento mediante la automatización del propio proceso de adquisición.
- Aumento de los conocimientos técnicos (*know-how*) relativos a la monitorización del curado de materiales compuestos: cómo colocar la fibra, qué partes son más sensibles, qué efectos distintos a la temperatura y deformación pueden interferir en las medidas, etc.
- Aplicación práctica del método en procesos de monitorización de curado: útiles, desmoldeantes, temperaturas, presiones y otros parámetros asociados.
- Aplicación práctica del método en la monitorización de ensayos sobre estructuras y equipos.

Referencias

- [1] LightMachinery, Ipx-800 series - 10x better | lightmachinery.
URL <https://lightmachinery.com/lasers/excimer-lasers/ipex-800/>
- [2] M. Optics, Optical sensing instrumentation & software | enlight sensing instrumentation & software | enlight.
URL www.micronoptics.com
- [3] Luna innovations | fiber optic sensing and measurement systems.
URL <https://lunainc.com/>
- [4] Amazon, Amazon max6675 módulo tipo k sensor de termopar para arduino.
URL <https://www.amazon.es/MAX6675-M%C3%B3dulo-Sensor-Termopar-Arduino/dp/B01KKBN5U0>
- [5] B. T. AndrewStraw, Kalman filtering — scipy cookbook documentation.
URL <https://scipy-cookbook.readthedocs.io/items/KalmanFiltering.html>
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] SENSURON, Fiber optic sensing fundamental.
- [9] J. Chen, J. Wang, X. Li, L. Sun, S. Li, A. Ding, Monitoring of temperature and cure-induced strain gradient in laminated composite plate with fbg sensors, Composite Structures 242 (6 2020). doi:10.1016/j.compstruct.2020.112168.
- [10] H. S. Kim, S. H. Yoo, S. H. Chang, In situ monitoring of the strain evolution and curing reaction of composite laminates to reduce the thermal residual stress using fbg sensor and dielectrometry, Composites Part B: Engineering 44 (2013) 446–452. doi:10.1016/j.compositesb.2012.04.021.
- [11] M. Mulle, F. Collombet, P. Olivier, Y. H. Grunevald, Assessment of cure residual strains through the thickness of carbon-epoxy laminates using fbgs, part i: Elementary specimen, Composites Part

- A: Applied Science and Manufacturing 40 (2009) 94–104. doi:10.1016/j.compositesa.2008.10.008.
- [12] M. Mulle, F. Collombet, P. Olivier, R. Zitoune, C. Huchette, F. Laurin, Y.-H. Grunevald, Assessment of cure-residual strains through the thickness of carbon-epoxy laminates using fbg part ii: Technological specimen doi:10.1016/j.compositesa.
- [13] S. Khadka, J. Hoffman, M. Kumosa, Fbg monitoring of curing in single fiber polymer composites, Composites Science and Technology 198 (9 2020). doi:10.1016/j.compscitech.2020.108308.
- [14] Y. Qi, D. Jiang, S. Ju, J. Zhang, Investigation of strain history in fast and conventional curing epoxy matrix composites by fbg, Composites Science and Technology 159 (2018) 18–24. doi:10.1016/j.compscitech.2018.02.019.
- [15] J. Hoffman, S. Khadka, M. Kumosa, Determination of gel point and completion of curing in a single fiber/polymer composite, Composites Science and Technology 188 (3 2020). doi:10.1016/j.compscitech.2020.107997.
- [16] H. Hu, S. Li, J. Wang, L. Zu, D. Cao, Y. Zhong, Monitoring the gelation and effective chemical shrinkage of composite curing process with a novel fbg approach, Composite Structures 176 (2017) 187–194. doi:10.1016/j.compstruct.2017.04.051.
- [17] H. Hu, D. Cao, M. Pavier, Y. Zhong, L. Zu, L. Liu, S. Li, Investigation of non-uniform gelation effects on residual stresses of thick laminates based on tailed fbg sensor, Composite Structures 202 (2018) 1361–1372. doi:10.1016/j.compstruct.2018.06.074.
- [18] S. Goossens, F. Berghmans, K. Muñoz, M. Jiménez, E. Karachalios, D. Saenz-Castillo, T. Geernaert, A global assessment of barely visible impact damage for cfrp sub-components with fbg-based sensors, Composite Structures 272 (9 2021). doi:10.1016/j.compstruct.2021.114025.
- [19] L. Moretti, P. Olivier, B. Castanié, G. Bernhart, Experimental study and in-situ fbg monitoring of process-induced strains during autoclave co-curing, co-bonding and secondary bonding of composite laminates, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 142 (3 2021). doi:10.1016/j.compositesa.2020.106224.
- [20] G. Székely, Y. Blößl, G. Hegedüs, T. Tábi, T. Czigány, R. Schledjewski, Fatigue monitoring of flax fibre reinforced epoxy composites using integrated fibre-optical fbg sensors, Composites Science and Technology 199 (10 2020). doi:10.1016/j.compscitech.2020.108317.

- [21] E. K. Boateng, P. Schubel, R. Umer, Thermal isolation of fbg optical fibre sensors for composite cure monitoring, *Sensors and Actuators, A: Physical* 287 (2019) 158–167. doi:10.1016/j.sna.2019.01.001.
- [22] D. Feng, X. Luo, Y. Liu, C. Ma, X. Qiao, Performance improvement of fbg sensors based on the pre-stressed package technique, *Optical Fiber Technology* 65 (9 2021). doi:10.1016/j.yofte.2021.102623.
- [23] J. Y. Guo, B. Shi, M. Y. Sun, C. C. Zhang, G. Q. Wei, J. Liu, Characterization of an ormocecer®-coated fbg sensor for relative humidity sensing, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 171 (2 2021). doi:10.1016/j.measurement.2020.108851.
- [24] Y. Liu, D. Yang, Y. Wang, T. Zhang, M. Shao, D. Yu, H. Fu, Z. Jia, Fabrication of dual-parameter fiber-optic sensor by cascading fbg with fpi for simultaneous measurement of temperature and gas pressure, *Optics Communications* 443 (2019) 166–171. doi:10.1016/j.optcom.2019.03.034.
- [25] D. Wang, Y. Wu, Y. Song, Y. Wang, L. Zhu, A double-mass block acceleration sensor based on fbg, *Optical Fiber Technology* 66 (10 2021). doi:10.1016/j.yofte.2021.102681.
- [26] C. Fernando, A. Bernier, S. Banerjee, G. G. Kahandawa, J. Eppaarchchi, An investigation of the use of embedded fbg sensors to measure temperature and strain inside a concrete beam during the curing period and strain measurements under operational loading, Vol. 188, Elsevier Ltd, 2017, pp. 393–399. doi:10.1016/j.proeng.2017.04.500.
- [27] B. W. Isah, H. Mohamad, N. R. Ahmad, Rock stiffness measurements fibre bragg grating sensor (fbgs) and the effect of cyanoacrylate and epoxy resin as adhesive materials, *Ain Shams Engineering Journal* 12 (2021) 1677–1691. doi:10.1016/j.asej.2020.09.007.
- [28] 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>
- [29] 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.

- [30] 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.
- [31] 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 Light-wave Technology 24 (2006) 4149–4154. doi:10.1109/JLT.2006.883607.
- [32] 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.
- [33] NIAR, As4-unitape-1.
- [34] 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).
- [35] NIAR, 8552-ncamp-material-base-specification.
- [36] 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).
- [37] ESA, Fos - fibre optic sensors for space in-flight applications.
URL <https://artes.esa.int/projects/fos>