

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO - CHILE



**“MONITOREO DE TEMPERATURA EN UNA PLACA
BIDIMENSIONAL CON SENSORES DE FIBRA
ÓPTICA BASADOS EN REJILLAS DE BRAGG”**

PABLO BENJAMÍN ARCE PINILLA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO

PROFESOR GUÍA:

DR MARCELO SOTO H.

PROFESOR CORREFERENTE:

DR HÉCTOR RAMÍREZ E.

OCTUBRE - 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Monitoreo de temperatura en una placa bidimensional con sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg

Nombre del candidato(a): Pablo Arce Pinilla

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Electrónica

Campus: Casa Central Valparaíso **Departamento:** Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Marcelo Soto, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 27.10.2025 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 27/10/2025 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que han sido importantes para mí durante mis años de estudio en la universidad. En primer lugar, a mi familia: a mi madre Ximena y a mi padre Luis, porque todo lo que soy y lo que tengo se los debo a ellos. Fueron quienes me inculcaron valores positivos, me enseñaron a actuar con rectitud y esfuerzo, y me guiaron para obrar bien en este mundo. A través de sus enseñanzas y de todo lo vivido junto a ellos, intentaré seguir construyendo un camino que refleje lo que me transmitieron.

A mis hermanos Seba y Caco, con quienes siempre hemos estado el uno para el otro en cualquier circunstancia; a mi abuela Maruja, y a mis tíos y primos por su cariño constante.

Dedico también este trabajo a la memoria de mi abuelo Paul y de mi abuela Silvia, quienes partieron durante estos años de estudio, pero de quienes guardo los mejores recuerdos y enseñanzas que me acompañarán siempre.

A mis amigos de la universidad, con quienes compartí tanto momentos alegres y de celebración como otros de cansancio o incertidumbre, y a mis amigos del colegio, con quienes mantuve el contacto a pesar del paso del tiempo y la distancia.

Agradezco sinceramente a mi profesor guía, Marcelo Soto, y a mi profesor correferente, Héctor Ramírez, por la entrega del tema, la orientación en el desarrollo del proyecto, y por los consejos y apoyo brindados durante este proceso.

Finalmente, quiero agradecer a los proyectos que hicieron posible el desarrollo de este trabajo:

- FONDECYT Regular 1241085, ANID.
- FONDEQUIP EQM180226, ANID.
- Basal AFB240002, ANID.



“Monitoreo de temperatura en una placa bidimensional con sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg”

Pablo Benjamín Arce Pinilla

Memoria para optar al título de **Ingeniero Civil Electrónico**
Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor Guía: Dr. Marcelo Soto H.
Profesor Correferente: Dr. Héctor Ramírez E.

Octubre - 2025

Resumen

Esta memoria presenta el desarrollo e implementación de un sistema experimental de monitoreo continuo de temperatura en una placa bidimensional de cobre, denominada “mesa térmica”, que utiliza sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg (FBG). Se diseña una red de seis sensores FBG distribuidos espacialmente sobre la placa y conectados a un interrogador óptico HYPERION si155, con el fin de capturar la respuesta térmica inducida por un ciclo de calefacción controlado (ciclo térmico) mediante un calefactor PTC.

El sistema de adquisición se implementa tanto en el software especializado ENLIGHT como en MATLAB, este último mediante una interfaz gráfica personalizada (DashboardFBG.m), la cual permite configurar parámetros de adquisición, visualizar en tiempo real la temperatura por sensor, almacenar datos automáticamente y generar un mapa de calor 2D con los puntos monitoreados de la placa. La calibración de los sensores constituye un proceso clave, logrando una precisión promedio de ± 0.47 °C en el rango de 20 a 60 °C y una sensibilidad térmica media de 8.3 pm/°C. Se aborda además la estimación de la incertidumbre fuera del rango calibrado, lo que permite extender el análisis a un rango operativo más amplio (13–65 °C).

Los resultados experimentales muestran que los sensores FBG permiten un monitoreo confiable, con tiempos de respuesta más rápidos en comparación con una termocupla tipo K. Se comprueba su idoneidad para sistemas con transientes térmicos rápidos y en entornos con posibles interferencias electromagnéticas. Asimismo, se logra una integración parcial del sistema con un modelo de elementos finitos (FEM) que permite interpolar la distribución térmica completa de la placa. No se recomienda trabajar con sensores FBG para monitoreo completamente distribuido, en función de los resultados obtenidos y de las características propias de la FBG, que lo hacen especialmente útil para mediciones puntuales o semi-distribuidas.

Este trabajo entrega como contribución principal la validación de una plataforma alternativa de monitoreo térmico con sensores FBG en tiempo real, más allá del entorno propietario del fabricante, así como un análisis detallado del comportamiento térmico y la sensibilidad del sistema. Se identifican limitaciones asociadas a la calibración, la compensación de strain y la extrapolación de datos de temperatura, las cuales permiten proyectar futuras líneas de investigación tanto en entornos controlados como en aplicaciones industriales reales.

UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍADEPARTAMENTO DE
ELECTRÓNICA

“Temperature Monitoring on a Two-Dimensional Plate Using Fiber Bragg Grating-Based Optical Fiber Sensors”

Pablo Benjamín Arce Pinilla

Final project report for the degree of **Civil Electronic Engineer**
Universidad Técnica Federico Santa María

Guide Professor: Marcelo Soto H., PhD.

Co-referent Professor: Héctor Ramírez E., PhD.

October - 2025

Abstract

This thesis presents the development and implementation of an experimental system for continuous temperature monitoring on a two-dimensional copper plate, referred to as the “thermal table”, using fiber optic sensors based on Fiber Bragg Gratings (FBG). A network of six FBG sensors is designed and spatially distributed over the plate, connected to a HYPERION si155 optical interrogator, in order to capture the thermal response induced by a controlled heating cycle (thermal cycle) using a PTC heater.

The data acquisition system is implemented both in the specialized software ENLIGHT and in MATLAB, the latter through a customized graphical interface (DashboardFBG.m), which allows configuration of acquisition parameters, real-time visualization of sensor temperature, automatic data storage, and generation of a 2D heat map from the monitored points on the plate. Sensor calibration constitutes a key process, achieving an average accuracy of ± 0.47 °C within the range of 20–60 °C and an average thermal sensitivity of 8.3 pm/°C. The estimation of uncertainty beyond the calibrated range is also addressed, enabling an extended analysis across a wider operational range (13–65 °C).

Experimental results show that FBG sensors enable reliable temperature monitoring, exhibiting faster response times compared to a type K thermocouple. Their suitability for systems with rapid thermal transients and in environments prone to electromagnetic interference is verified. Furthermore, a partial integration of the system with a finite element model (FEM) is achieved, allowing interpolation of the complete thermal distribution of the plate. Based on the obtained results and the intrinsic characteristics of FBG sensors, their use is not recommended for fully distributed monitoring, but rather for pointwise or semi-distributed temperature measurements.

This work provides as its main contribution the validation of an alternative real-time thermal monitoring platform using FBG sensors, beyond the manufacturer’s proprietary environment, as well as a detailed analysis of the system’s thermal behavior and sensitivity. Limitations associated with calibration, strain compensation, and temperature data extrapolation are identified, allowing the projection of future research lines in both controlled environments and real industrial applications.

Índice

1	Introducción	9
1.1	Motivación	9
1.2	Objetivos	12
1.3	Estructura	12
2	Marco Teórico	13
2.1	Conceptos generales sobre fibra óptica	13
2.2	Principios de las rejillas de Bragg	13
2.2.1	¿Qué es y cómo opera una rejilla de Bragg?	13
2.2.2	Sensores FBGs	16
2.2.3	FBGs para medir temperatura	17
2.2.4	Simulación FBG	18
2.2.5	Inscripción de una FBG	20
2.2.6	Interrogación y multiplexación de una FBG	22
2.3	Sistema de primer orden con retardo de tiempo	23
2.4	Transferencia de calor	24
2.5	Interrogador óptico HYPERION si155	25
2.6	Teoría de calibración	27
2.7	Calefactor PTC	28
3	Diseño Experimental	29
3.1	Mesa térmica y consideraciones operativas	29
3.2	Configuración del interrogador óptico HYPERION y software ENLIGHT	30
3.2.1	Ventana de adquisición del software ENLIGHT	31
3.2.2	Ventana de sensores del software ENLIGHT	32
3.2.3	Ventana de gráficos (Charts)	34
3.2.4	Ventana de imagen (Image)	35
3.2.5	Ventanas Archive y Alert	36
3.2.6	Ventana de guardado (Save)	36
3.2.7	Ventana de configuraciones (Settings)	38
3.3	Procesamiento en MATLAB	38
3.3.1	Post-procesamiento en MATLAB	38
3.3.2	Comunicación en tiempo real con HYPERION	39
3.3.3	Validación con sensores eléctricos	40
3.4	Multiplexación WDM	40
3.5	Calefactor PTC	41
3.6	Calibraciones en laboratorio	42
3.6.1	Calibración experimental	43
3.6.2	Modelo de calibración lineal	43
4	Interfaz de Monitoreo	45
4.1	Integración con modelo teórico de distribución de calor	47
5	Resultados Experimentales	53
5.1	Ciclo térmico	53
5.2	Validación del sensor FBG	53
5.3	Análisis de resultados	56
5.3.1	Modelos de planta identificados	58

5.3.2 Validación del modelo con FBG 6	58
5.4 Análisis de sensibilidad	59
5.5 Análisis de repetibilidad del sistema	64
5.6 Ensayo de 4 horas	66
6 Conclusiones	68

Índice de figuras

1	Esquema experimental de monitoreo de temperatura.	11
2	Distribución de sensores en un panel fotovoltaico.	11
3	Esquema de funcionamiento de una FBG.	14
4	Diagrama del principio de sensado con sensores FBG.	15
5	Algunos tipos de rejillas.	16
6	Efecto de la expansión térmica sobre la FBG (exagerado).	17
7	Reflectividad espectral típica de una FBG uniforme con $\lambda_B = 1565[nm]$	19
8	Reflectividad espectral de una FBG variando L para $L = 1, 2, 4[cm]$	19
9	Reflectividad espectral de una FBG variando kL para $kL = 0,5, 1, 2, 3$	20
10	Reflectividad espectral de una FBG a distintas temperaturas para 25, 50 y 75[°C].	20
11	Método de inscripción con phase mask.	21
12	Método de inscripción interferométrico.	22
13	Esquema de interrogación por barrido de luz.	22
14	Respuesta al escalón unitario de un sistema de primer orden con retardo.	24
15	Diagrama de bloques de arquitectura interna del interrogador óptico HYPERION si155.	26
16	Distribución de los sensores FBG y calefactor PTC sobre la mesa térmica de cobre.	29
17	Ventana principal del software ENLIGHT (vista de amplitud).	31
18	Ventana de sensores del software ENLIGHT.	33
19	Pestaña de edición de parámetros del sensor FBG 1.	34
20	Ventana de gráficos del software ENLIGHT.	35
21	Ventana de imagen del software ENLIGHT.	36
22	Ventana de guardado del software ENLIGHT.	37
23	Pestaña de guardado de los sensores.	38
24	Interfaz de programación del interrogador óptico HYPERION si155.	39
25	Esquema de calibración planteado.	42
26	Distinción entre precisión y exactitud.	44
27	Etapas de calentamiento.	46
28	Temperatura máxima estabilizada.	46
29	Etapas de enfriamiento.	47
30	Temperatura mínima estabilizada (Temperatura ambiente).	47
31	Distribución de temperatura sobre la placa obtenida con el modelo FEM a partir de los datos de sensores FBG.	49
32	Mapa de calor 2D simulado en escala de grises y negativo.	49
33	Imagen térmica real de la placa durante el calentamiento con el calefactor PTC.	50
34	Imagen térmica rectificadas a vista cenital.	50
35	Comparación visual entre la imagen térmica capturada con la cámara Ceres 7 640 y el mapa de calor FEM simulado, ambas ajustadas a la misma escala.	51
36	Esquema físico del montaje experimental en laboratorio para la aplicación del ciclo térmico.	53
37	Esquema de conexiones Arduino/Módulo MAX6675/Termocupla tipo K.	54
38	Medición simultánea entre sensor FBG y termocupla.	55
39	Primera comparación entre sensor FBG y termocupla tipo K.	56
40	Segunda comparación entre sensor FBG y termocupla tipo K.	56
41	Curvas de temperatura y puntos característicos para cada sensor FBG durante un ciclo térmico.	58
42	Comparación entre respuesta real de la FBG 6 y su modelo FOPDT identificado.	59
43	Curvas de temperatura con calefactor PTC ubicado en el centro de la placa.	60
44	Curvas de temperatura con calefactor PTC ubicado en la esquina inferior derecha de la placa.	61

45	Muestreo adecuado (1 Hz).	62
46	Sobremuestreo (10 Hz).	62
47	Submuestreo (0.2 Hz).	62
48	Submuestreo exagerado (0.0033 Hz).	62
49	Disposición física sensores FBG 5 (sin thermal pad) y FBG 6 (con thermal pad).	63
50	Curva de temperatura del sensor FBG 5 (sin pad térmico).	64
51	Curva de temperatura del sensor FBG 6 (con pad térmico).	64
52	Comparación de las curvas de temperatura para el sensor FBG 6 en las distintas repeticiones.	66
53	Registro de temperatura ambiente durante el ensayo continuo de 4 horas con sensores FBG.	67

1. Introducción

1.1. Motivación

La fibra óptica es un cable o medio de transmisión de datos construido a partir de vidrio o sílice formando una fibra flexible con diámetro similar al de un pelo humano. La fibra tiene un gran uso en comunicaciones o telecomunicaciones, ya que permiten la transmisión a distancia y con un ancho de banda mayor que un cable eléctrico de cobre u otro material. Sin embargo, el interés por la fibra trasciende este ámbito, destacando también en su aplicación como sensor óptico. Entre los diversos tipos de sensores basados en fibra óptica, como los que utilizan dispersión Rayleigh, Raman o Brillouin, los sensores fibra óptica basados en rejillas de Bragg (**FBG**) se han posicionado como una de las tecnologías más versátiles y confiables. Las FBGs en sus inicios se usaron para la transmisión de información a larga distancia y su uso como sensor data del año 1977, año en que esta tecnología fue empleada en la industria aeronáutica como una nueva técnica de detección de daño estructural [1]. En la actualidad, estos sensores son utilizados en la industria debido a su excelente precisión, resistencia a entornos hostiles, inmunidad al ruido o interferencias electromagnéticas, tamaño reducido, capacidad de medición en tiempo real y capacidad de multiplexación. Cabe destacar que un sensor FBG representa una medición puntual, pero que al utilizar varios en una red distribuida espacialmente, se puede obtener un sistema de medición semi-distribuido.

Las FBGs han encontrado aplicaciones en múltiples campos, desde telecomunicaciones donde se emplean como filtros ópticos, hasta aplicaciones industriales y de monitoreo estructural. En el ámbito industrial, su capacidad para medir variables como temperatura y strain (deformación) con alta resolución los hace ideales para el control de procesos críticos. Es interesante ver como en las diversas investigaciones se exploran los alcances de este sensor que posee una arquitectura única de sensado. La propiedad que define la arquitectura de una FBG, es que los cambios físicos que se ejercen sobre esta se traducen en desplazamiento de longitud de onda, por lo que se puede decir que está codificada en longitud de onda o presenta una codificación espectral. Esto sumado a su respuesta altamente lineal y su capacidad de operar a largas distancias con bajas pérdidas, convierten a esta tecnología en una herramienta versátil para sistemas de monitoreo. Esta versatilidad se aprovecha en los estudios sobre los sensores FBG, llegando más allá de las mediciones de temperatura y deformación, que son las que caracterizan la sensibilidad del sensor. Se ha estudiado su uso como acelerómetro de dos dimensiones a partir de variaciones de deformación en un cubo de aluminio [2], constituyendo una solución alternativa y más sencilla que un acelerómetro tradicional que mide con piezoeléctricos los movimientos de masa inercial para luego procesar la señal por un amplificador y convertirla a voltaje. Otra variable interesante a medir mediante sensores FBG son las vibraciones, de hecho, este era el objeto de estudio pensado en un primer momento para esta investigación, pero finalmente se optó por realizar monitoreo de temperatura. En las investigaciones [3] y [4] se desarrollan esquemas experimentales para el monitoreo de vibraciones en estructuras y en [5] se propone una ley de control para atenuar las vibraciones mecánicas, en cierto rango de frecuencias, basado en la retroalimentación positiva de la aceleración y usando parches piezoeléctricos como actuador. En [6] se desarrollan sistemas completos para el monitoreo de vibraciones y sonido destacando los tres parámetros claves a considerar al usar los sensores FBG, la resolución del equipo interrogador, el rango dinámico que presenta y la frecuencia de muestreo. Esta última investigación resulta bastante innovadora al presentar alternativas a los transductores normalmente ocupados para medir presión, sonido, vibraciones, aceleración e inclinación mediante el uso de la FBG.

En lo que a esta investigación respecta, hay muchas investigaciones sobre monitoreo de temperatura, ya sea monitoreo en tiempo real o mediciones post procesadas de temperatura en varias aplicaciones. Lo que se suele hacer es comparar las mediciones obtenidas por los sensores FBG calibrados para medir temperatura con las mediciones de un sensor eléctrico tradicional para validar su uso. En aplicaciones médicas se ha utilizado el sensor FBG para monitoreo de temperatura como una sonda diseñada para realizar procedimientos quirúrgicos, en las que el monitoreo de variables como la temperatura, juega un

rol importante en la minimización de daños o lesiones de tejidos por cauterización [7][8][9]. En el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear), se tomaron datos durante una década con sensores FBG sobre una red CMS (Compact Muon Solenoid) en el colisionador de hadrones. Se utilizaron 1000 sensores FBG para medir temperatura y strain en una red FBG nombrada como FOS4CMS. Los resultados de aquella investigación demostraron la robustez de los sensores FBG en las desafiantes condiciones del CERN [10].

En otras actividades de ingeniería, se han usado sensores FBG para monitoreo de temperatura en líneas de alto voltaje [11] para optimizar el suministro de energía eléctrica. También se ha evaluado usar estos sensores para monitoreo de temperatura de baterías de ion-litio, otra tecnología innovadora que surge como alternativa para el almacenamiento de energía [12].

Una rejilla de Bragg (FBG) consiste en una modulación periódica del índice de refracción en el núcleo de una fibra óptica, creada mediante exposición a luz ultravioleta. Esta estructura refleja selectivamente una longitud de onda específica (λ_B), conocida como longitud de onda de Bragg, que depende de la periodicidad de la modulación y del índice de refracción efectivo. Cuando la FBG se somete a cambios de temperatura o deformación, λ_B se desplaza, permitiendo cuantificar estas variaciones con gran exactitud tras llevar a cabo, un proceso de calibración.

En este trabajo, se propone el desarrollo de un sistema de monitoreo de temperatura en una placa bidimensional utilizando sensores FBG, con el fin de optimizar procesos industriales que requieren un control térmico preciso. Además, esta investigación forma parte de un trabajo colaborativo con Paula Cartagena, estudiante memorista de la UTFSM también, quien investiga y desarrolla un modelo de distribución de calor y control de temperatura en la propia placa bidimensional [13].

La implementación incluye una interfaz de visualización en tiempo real desarrollada en MATLAB, capaz de procesar los datos obtenidos mediante el uso del interrogador óptico HYPERION si155 de Luna. Los resultados obtenidos contribuyen al diseño de soluciones innovadoras para el monitoreo térmico en entornos industriales complejos, donde la fiabilidad y la resolución espacial son requisitos esenciales.

El monitoreo de temperatura es una práctica de seguimiento sobre las variaciones de temperatura en un producto, un proceso o un entorno dado. Esencialmente existe el monitoreo manual, que requiere una verificación regular del parámetro de temperatura a través de la intervención de una persona y existe el monitoreo automático, que reemplaza la intervención humana con sensores y un sistema de monitoreo continuo que registra los datos de temperatura. La temperatura es una variable presente en cualquier proceso y en algunos es crucial estar al tanto del valor de la misma, ya sea debido a que el proceso opera en un rango determinado de temperaturas o por conseguir eficiencia energética para reducir costos operativos. En la industria alimentaria, cada producto debe pasar por control de calidad y garantizar la calidad y seguridad de cada alimento bajo ciertos estándares, es por esto que es importante mantener la temperatura correcta durante estos procesos. En la industria manufacturera, hay ciertos equipos o instalaciones sensibles a los cambios de temperatura por lo que es esencial monitorear esta variable para impedir daños a los instrumentos y los materiales.

El sistema con el que se va a validar la solución de monitoreo de temperatura se basa en un setup experimental en laboratorio, presentado en la figura 1. Encerrado en líneas punteadas azules se encuentran los elementos que forman parte de esta investigación (el panel de control forma parte de la investigación de Paula ya mencionada). Este esquema contiene una placa bidimensional de cobre de medidas 50 cm \times 45 cm montado sobre ocho soportes de policarbonato y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) [14], en la que se adhiere la red de seis sensores FBG para las mediciones de temperatura en ambos ejes. Estos sensores son multiplexados en longitud de onda (WDM) y distribuidos en dos canales (CH1 y CH2) del interrogador óptico HYPERION si155 de Luna. El interrogador óptico es conectado a través de un cable Ethernet al computador, en el que a través del software ENLIGHT de Luna, el usuario es capaz de configurar y visualizar las mediciones de longitud de onda de Bragg que posteriormente son calibradas a temperatura. En la placa también se encuentra un calefactor PTC conectado en un primer momento a la red eléctrica, con el que se inyecta temperatura a la placa de cobre.

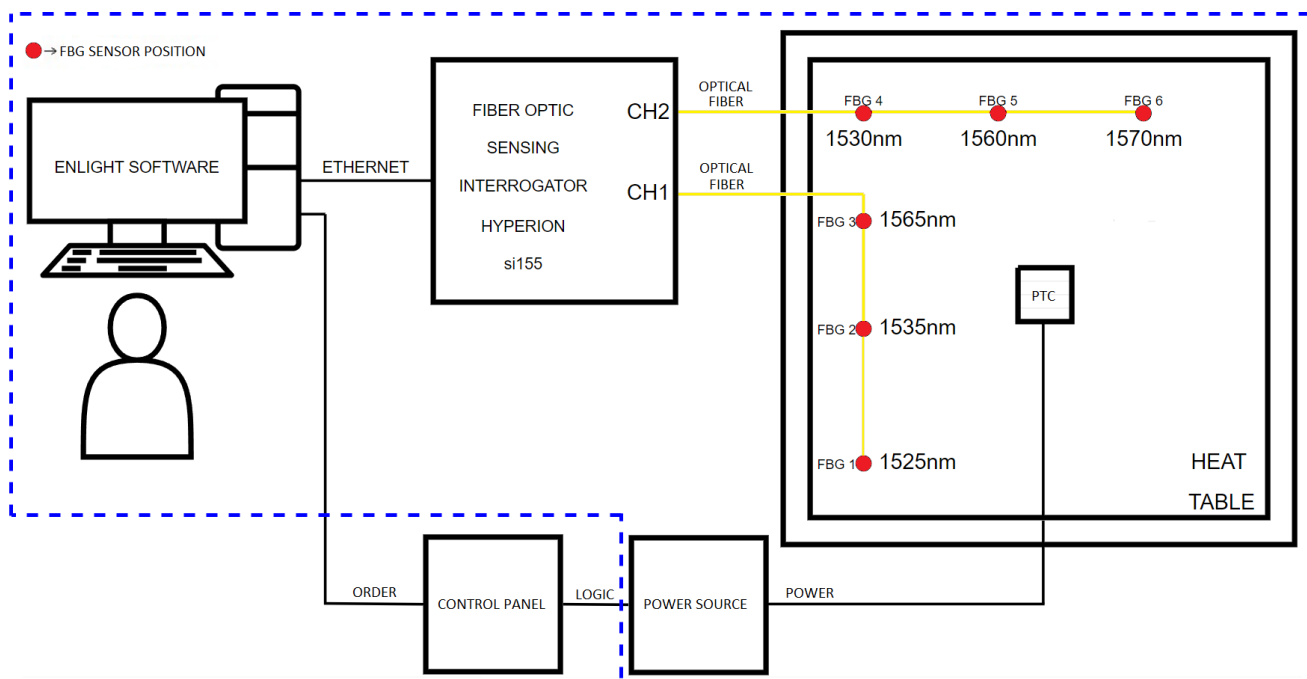


Figura 1: Esquema experimental de monitoreo de temperatura.

El sistema cuenta con una red de seis sensores FBG dispuestos en forma de L. Esto se hace para abarcar los gradientes de temperatura en ambos ejes de la medición y para su posterior validación con el modelo de distribución de calor en la placa. En otras investigaciones se realiza algo similar o se llegan a implementar incluso más sensores para tener un mapeo completo de la temperatura en el objeto estudiado. Como en la aplicación de sensores FBG detrás de un panel fotovoltaico adheridos con el adhesivo LOCTITE495 como se puede ver en la figura 2 [15].

En esta investigación se destacan las ventajas del uso de sensores FBG para medir temperatura en paneles fotovoltaicos tal como en las investigaciones [16] y [15], por sobre el empleo de sensores más tradicionales como los termo resistivos (PT100) o los termopares, ya que estos ensombrecen las celdas fotovoltaicas provocando una reducción en la producción de energía.

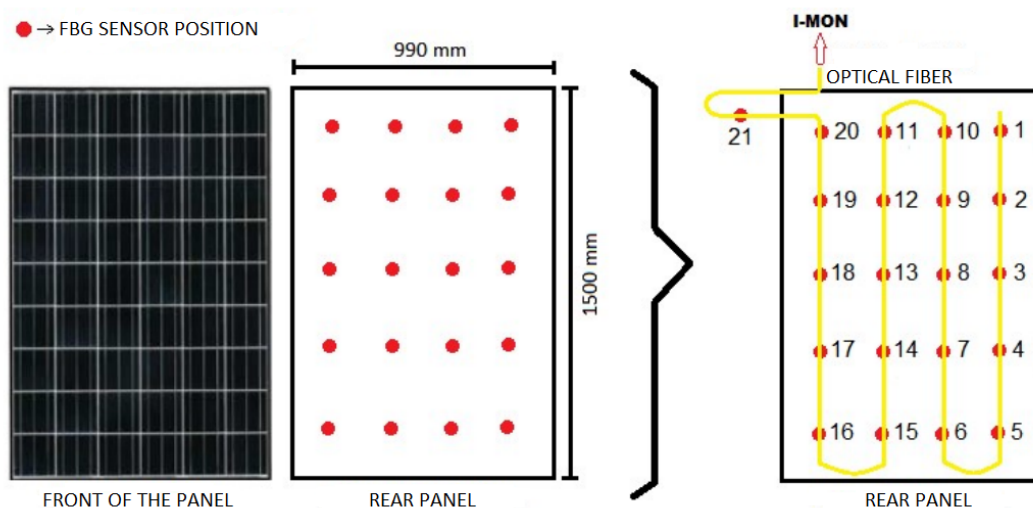


Figura 2: Distribución de sensores en un panel fotovoltaico.

1.2. Objetivos

Este trabajo de investigación o memoria experimental tiene como objetivo principal desarrollar un sistema de monitoreo o medición de temperatura utilizando una red de sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg (FBG) dispuestos en una placa bidimensional de cobre. Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Ejecución del proceso de calibración de los sensores FBG.
2. Montaje del sistema experimental con la red de sensores FBG propuesta.
3. Diseño de un protocolo que permita la adquisición, procesamiento y visualización de los datos de la temperatura medida.
4. Creación de una interfaz gráfica para la visualización de los datos.
5. Análisis de resultados al comparar con sensores tradicionales.
6. Evaluar sensibilidad del sistema a través de la ejecución de un ciclo térmico modificando parámetros del sistema.
7. Integrar interfaz gráfica con el modelo matemático de distribución de calor para el monitoreo completo de la placa.

1.3. Estructura

La estructura de este documento es la siguiente:

- **Capítulo 2 – Marco Teórico:** Se presentan todos los conceptos fundamentales para la comprensión del documento. Se ahonda en el funcionamiento de los sensores FBG, sus propiedades y los procesos necesarios, como la calibración, para la implementación de estos en un diseño experimental. También se describen los calefactores PTC utilizados para suministrar calor, con el propósito de realizar mediciones de temperatura en una placa bidimensional.
- **Capítulo 3 – Diseño Experimental:** Se detalla el diseño experimental propuesto, incluyendo el proceso de configuración, puesta en marcha del sistema y consideraciones prácticas del experimento.
- **Capítulo 4 – Interfaz de Monitoreo:** Se describe la interfaz desarrollada para el monitoreo de temperatura en la mesa térmica. Esta incluye un mapa de calor 2D, medidores digitales con los valores de temperatura puntual, y gráficos en tiempo real obtenidos mediante una plataforma programada en MATLAB.
- **Capítulo 5 – Resultados Experimentales:** Se presentan los resultados obtenidos tras la ejecución del ciclo térmico, el cual consiste en el encendido y posterior apagado de un calefactor PTC ubicado en el centro de la mesa térmica. Se caracteriza la respuesta de cada sensor FBG durante los transientes térmicos, tanto en calentamiento como en enfriamiento, evaluando tiempos de respuesta en régimen transitorio y estacionario. Se realiza una comparación con una termocupla colocada cerca del sensor FBG 6 y se incluye un análisis de sensibilidad térmica ante variaciones de condiciones experimentales.
- **Capítulo 6 – Conclusiones:** Se presentan las conclusiones generales de la investigación, incluyendo una revisión de los objetivos propuestos, las contribuciones principales de la memoria, las limitaciones encontradas durante el desarrollo y posibles líneas de trabajo futuro relacionadas con sensores FBG y monitoreo térmico distribuido.

2. Marco Teórico

2.1. Conceptos generales sobre fibra óptica

Previo a explicar los fundamentos del sensor FBG propiamente tal, es importante conocer y ubicar ciertos conceptos generales de los sistemas de fibra óptica que ocurren o que se pueden aplicar a esta investigación.

La fibra óptica es un medio de transmisión que guía señales de luz a través de un núcleo (core) dieléctrico fino (generalmente de $10\mu\text{m}$ en fibras monomodo) de un material llamado sílice, que está recubierto por un material que presenta un menor índice de refracción, el revestimiento (cladding) [17].

La transmisión por este medio funciona en base al fenómeno de reflexión interna total, que se da cuando la luz incide en el límite entre dos medios con distinto índice de refracción en un ángulo mayor al ángulo crítico. El cálculo del ángulo crítico se efectúa utilizando la ley de Snell $\sin(\theta_c) = n_2/n_1$. Donde n_2 corresponde al índice de refracción del revestimiento y n_1 al del núcleo. Este fenómeno permite que la luz quede confinada en el núcleo y se propague a lo largo de la fibra [18].

Por este motivo, es importante considerar la curvatura o el radio de curvatura presente a lo largo de la fibra óptica, puesto que si se traspasa este ángulo crítico, se modifican las propiedades de guía de onda de la fibra haciendo que no se cumpla la condición de reflexión total. Esto genera que se propague la luz fuera de la fibra y por tanto, se pierda potencia óptica. Ya que en esta investigación se trabaja con sensores FBG, se intenta obtener una señal reflejada clara y con la potencia necesaria para que un dispositivo interrogador óptico pueda demodularla. Por este motivo y por la fragilidad de la fibra, se debe controlar el radio de curvatura y también el número de curvas en toda la fibra. Hay varios modelos matemáticos que sugieren relaciones entre las pérdidas de potencia por curvaturas o llamado en inglés como “bending loss”, con el radio de curvatura. Todos estos modelos concluyen que el bending loss aumenta al decrecer el radio de curvatura y al aumentar el número de vueltas de la fibra en un radio en particular. En [19], se realizan pruebas y mediciones de potencia óptica sobre una fibra al modificar el radio de curvatura. Tras analizar las mediciones, el autor recomienda mantener un radio de curvatura igual o mayor a 20mm.

Existen diferentes tipos de fibra óptica según el perfil del índice de refracción y el número de modos de propagación que pueden transmitir (monomodo y multimodo). Para los sensores FBG se usan fibras monomodo, las que permiten la propagación de un solo modo de luz, evitando interferencias internas [20].

Otro concepto relevante es el de la reflexión o reflexiones de Fresnel, fenómeno que se genera justo en el límite entre los dos materiales, núcleo y revestimiento, con distintos índices de refracción. En sistemas de medición ópticos, estas reflexiones pueden generar errores de lectura por reflexiones indeseadas, por lo que se utilizan atenuadores ópticos al final de la fibra para minimizar estos efectos [21].

2.2. Principios de las rejillas de Bragg

2.2.1. ¿Qué es y cómo opera una rejilla de Bragg?

Una rejilla de Bragg en fibra óptica (FBG, por sus siglas en inglés: Fiber Bragg Grating) es una estructura periódica inscrita en el núcleo de una fibra óptica monomodo, que actúa como un filtro selectivo de longitud de onda. Hay varios métodos de manufactura de rejillas de Bragg, uno de estos es a través un proceso de fotolitografía o interferencia de haces láser ultravioleta, que altera o modula localmente el índice de refracción del núcleo de la fibra a lo largo de una distancia determinada [22]. Otro método de inscripción de rejillas es mediante el uso de un láser de femtosegundo [23]. Los largos comunes de las rejillas de Bragg son de 10mm y 5mm.

El principio de funcionamiento de una FBG se basa en la reflexión selectiva de la luz en estas superficies que conforman la rejilla. Cuando una onda de luz blanca (que contiene múltiples longitudes de onda) viaja a través de la fibra óptica y llega a la región donde está inscrita la rejilla, solo una longitud de onda

específica, conocida como longitud de onda de Bragg (λ_B), es reflejada, mientras que las demás continúan transmitiéndose por la fibra. Esta λ_B se puede medir con precisión utilizando un demodulador de FBG.

La longitud de onda de Bragg está dada por la siguiente ecuación [26]:

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

Donde λ_B es la longitud de onda reflejada, denominada longitud de onda de Bragg. n_{eff} es el índice de refracción efectivo del modo guiado en el núcleo y Λ es el período de la rejilla, es decir, la distancia entre las variaciones periódicas del índice.

Cualquier cambio en n_{eff} o Λ , dado ciertas variaciones en factores externos como temperatura o deformación mecánica (strain), provocará un corrimiento de λ_B [24]. Esto convierte a la FBG en un sensor altamente preciso y robusto para la medición de temperatura y deformación.

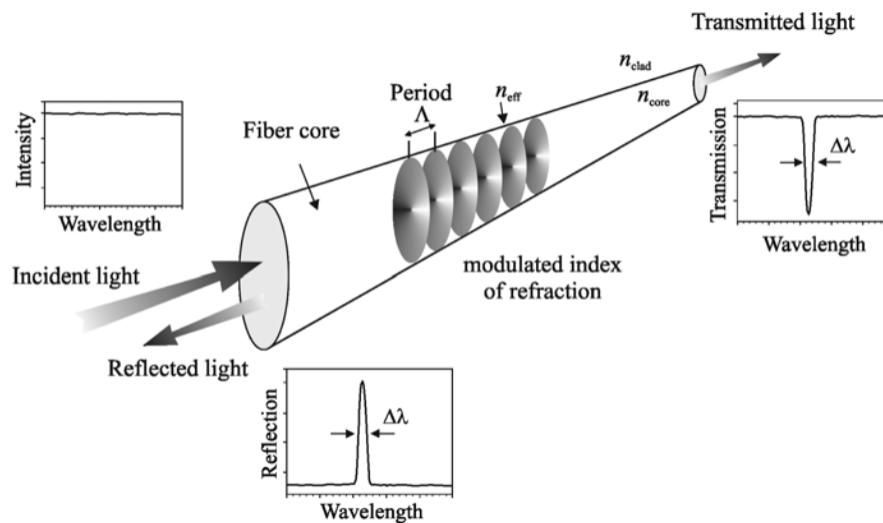


Figura 3: Esquema de funcionamiento de una FBG.

Como se puede ver en la figura 3 [25][26], un haz de luz entra por la fibra de izquierda a derecha. La mayoría de la luz es transmitida, y una pequeña parte es reflejada de vuelta. En esta luz reflejada se encuentra cierta longitud de onda, la ya mencionada longitud de onda de Bragg, que se puede apreciar en el peak del gráfico de la parte inferior de la figura 3. Si la condición de Bragg ya planteada no es satisfecha, todas esas reflexiones en los planos de la rejilla salen de fase y se cancelan, por lo que esas reflexiones no se ven.

Ahora, el hecho de que este peak sea tan notorio se debe a la combinación de los haces de luz reflejados, es decir, se genera superposición positiva de la luz reflejada en cada superficie de la rejilla, resultando en una longitud de onda particular, la longitud de onda de Bragg o λ_B . Esto se puede visualizar fácilmente en la figura 4.

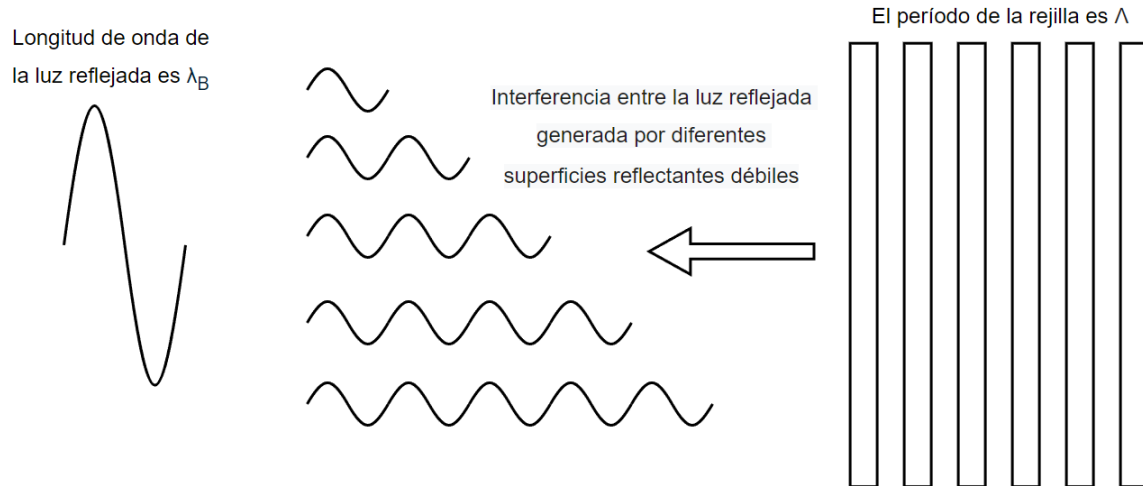


Figura 4: Diagrama del principio de sensado con sensores FBG.

La creación de la rejilla y su uso, ahorra al usuario el utilizar espejos ópticos, reflectores parciales y filtros de longitud de onda, ya que la FBG suple el trabajo de estos equipos [26].

Además, dependiendo del diseño de la rejilla, es posible distinguir entre distintos tipos de FBG, algunos de estos son presentados en la figura 5 [17]. Hay que considerar que además de las FBGs presentadas en esta figura, hay otros tipos de FBGs como las FBGs apodizadas o las π phase FBG [27]. En esta figura se puede ver la estructura de cada tipo, junto a su espectro típico. Las rejillas de Bragg uniformes tienen un período constante a lo largo del segmento modulado de la fibra, lo que permite reflejar una única longitud de onda de forma precisa. Esto es útil para esta aplicación, ya que se requiere una relación directa y estable entre el estímulo físico y la longitud de onda reflejada. Por otro lado, las rejillas chirped presentan un período que varía en el eje longitudinal, lo que provoca la reflexión de un espectro más amplio de longitudes de onda. También hay otras rejillas de Bragg de periodo largo, en las que los modos del núcleo se propagan en conjunto a los modos del revestimiento, causando resonancia en el espectro transmitido.

Dependiendo de la forma en que se fabrica la rejilla, es decir, del tipo de laser utilizado, del tipo de fibra utilizada, del método de inscripción y de su sensibilidad, las FBGs pueden ser clasificadas en cuatro tipos. Estos son del tipo I, tipo IA, tipo II y tipo IIA [28]. Lo más importante sobre estos es que tienen sensibilidades de strain similares pero sensibilidades de temperatura diferentes. Tienen mayor sensibilidad para fibras no hidrogenadas (I, IIA) y menor sensibilidad para fibras hidrogenadas (I, II, IA).

Los sensores FBG pueden ser montados superficialmente o imbuidos en estructuras. Se suele recomendar imbuir el sensor para aplicaciones en las que se quieren medir deformaciones o vibraciones, pero en este caso se mide temperatura. Es por eso que en esta investigación se opta por montar los sensores de forma superficial, además considerando que la placa de cobre utilizada es de muy bajo grosor y se considera bidimensional.

Un tema importante a considerar es que hay un compromiso entre la sensibilidad de la FBG y su diámetro, de tal forma que se intenta obtener mayor sensibilidad al reducir el diámetro del revestimiento de la fibra. Esto se puede hacer con ácido fluorhídrico. La idea es obtener una sensibilidad alta sin que la fibra se vuelva tan frágil que sea imposible de manipular [19].







Type of grating	Grating structure	Spectra
Uniform FBG		
Chirped FBG		
Long period grating		

Figura 5: Algunos tipos de rejillas.

2.2.2. Sensores FBGs

El uso de una FBG como sensor está sujeto al hecho de que la longitud de onda de Bragg depende del índice de refracción efectivo y del período de la rejilla según la relación planteada en la ecuación 1 [26].

A su vez, estas variables pueden ser alteradas principalmente por variaciones en temperatura (ΔT) y deformación mecánica ($\Delta\epsilon$). La ecuación 1 puede expresarse en términos de las sensibilidades de $\Delta\lambda_B$ de la siguiente forma [26]:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial \epsilon} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial \epsilon} \right] \Delta\epsilon + 2 \left[\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right] \Delta T \quad (2)$$

$$\Delta\lambda_B = k_\epsilon \Delta\epsilon + k_T \Delta T, \quad k_\epsilon = 2 \left[\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial \epsilon} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial \epsilon} \right], \quad k_T = 2 \left[\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right]. \quad (3)$$

En forma normalizada, esta relación se escribe como:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial \epsilon} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial \epsilon} \right) \Delta\epsilon + \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (4)$$

donde el primer término de cada paréntesis corresponde a cambios en el índice efectivo (efecto termo-óptico para T y fotoelástico para ϵ), y el segundo término corresponde a cambios en el período de la rejilla (expansión térmica o deformación mecánica directa) [26].

En la práctica, es habitual identificar:

$$\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} = \alpha, \quad \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} = \xi, \quad (5)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \Delta\epsilon + (\alpha + \xi) \Delta T, \quad (6)$$

donde α es el coeficiente de expansión térmica, ξ es el coeficiente termo-óptico y p_e es la constante fotoelástica efectiva [8]. En fibras de sílice, ξ domina el término térmico frente a α [29].

Los valores típicos de estas sensibilidades son de 10 [pm/°C] para k_T y 1 [pm/ $\mu\epsilon$] para k_ϵ [30]. Los valores exactos dependen de la fabricación propia de la FBG y con el proceso de calibración individual de cada sensor se obtiene una estimación de estos valores [31].

Las ventajas principales de los sensores FBG son su inmunidad electromagnética (al no conducir electricidad), la capacidad de multiplexación (varios sensores en una sola fibra) y su tamaño reducido, lo que los hace menos invasivos en instalaciones industriales [17][20].

2.2.3. FBGs para medir temperatura

Cuando un sensor FBG está expuesto a un cambio de temperatura, se produce:

- Expansión o contracción térmica: el material de la fibra se dilata, aumentando el período de la rejilla Λ o contrae, disminuyéndolo.
- Efecto termo-óptico: el índice de refracción efectivo n_{eff} del núcleo cambia debido a variaciones en la densidad y en las propiedades ópticas del vidrio.

Ambos efectos modifican la longitud de onda de Bragg según la ecuación (4). En sílice, el efecto termo-óptico es aproximadamente 15 veces mayor que la expansión térmica, por lo que domina la sensibilidad térmica del sensor.

En la figura 6 se ilustra el efecto de la expansión térmica: al calentar la FBG, esta se expande; al enfriarla, se contrae.

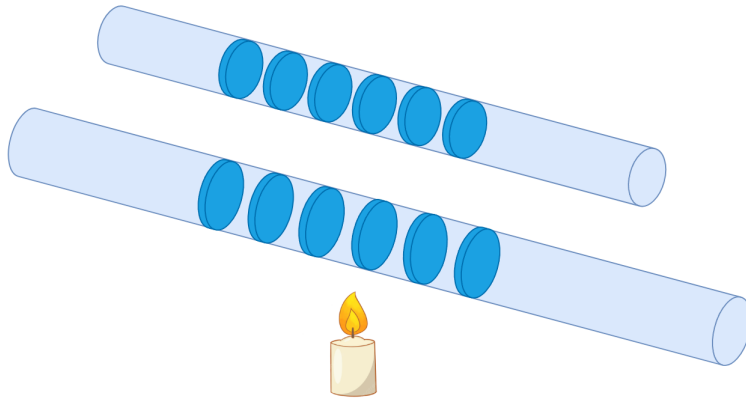


Figura 6: Efecto de la expansión térmica sobre la FBG (exagerado).

En aplicaciones donde el interés se centra en medir temperatura con la mayor precisión posible, es necesario minimizar o compensar las variaciones de strain que puedan introducir errores. Una estrategia consiste en usar una segunda FBG cercana, dedicada exclusivamente a medir strain, y restar su efecto. Esta es la solución más utilizada en otras investigaciones, en [17] se investigan técnicas de compensación según la variable a medir. Hay que recordar que la FBG no entrega valores de temperatura de forma directa, sino que es trabajo de uno o del fabricante, el otorgarle esta facultad a partir del proceso de calibración y también al compensar las sensibilidades cruzadas, en este caso, principalmente strain.

Otra opción es encapsular el sensor en una carcasa rígida (por ejemplo, de aluminio) para aislarlo de deformaciones mecánicas, como se hace en [32]. En [33] se obtiene un mal resultado al aplicar esta última opción, ya que se llega a una menor sensibilidad de temperatura al encapsular en acero inoxidable un sensor FBG. Eso sí, para sensores que miden strain, los que se aplican embebidos en estructuras, resultan más sensibles que los montados sobre superficies.

En esta investigación, se opta por ubicar los sensores en los bordes de la placa, reposando libremente pero con los extremos sujetos de forma que no generen tensión sobre la zona de la rejilla. Esta disposición reduce a valores despreciables el strain inducido por el calor, dado que la placa no se manipula durante las pruebas experimentales.

El uso de FBGs como sensores de temperatura ha mostrado ventajas significativas frente a sensores tradicionales como termocuplas o RTDs. Por ejemplo, en entornos biomédicos, [7] destaca que las termocuplas metálicas pueden absorber parte de la luz láser en tratamientos, sobrestimando hasta en un 40 %

la temperatura real. Esto reafirma la ventaja de los sensores FBG al ser inmune a interferencias electromagnéticas, lo que lo convierte en una alternativa preferible y completamente viable en tratamientos médicos como la termo terapia intersticial.

En oceanografía se necesitan obtener mediciones precisas de la temperatura del fondo del océano para aplicaciones como meteorología, pesca o navegación (en estas aplicaciones se debe compensar el efecto de la presión).

En el ámbito energético, [11] presenta un sistema de FBGs para monitorear temperatura en líneas de transmisión ACSR durante más de dos años, aprovechando su inmunidad a interferencias electromagnéticas. Asimismo, [16] demuestra su uso para monitorear paneles solares, detectando pérdidas de rendimiento asociadas a elevadas temperaturas. En [12] se propone un encapsulado metálico para aislar la FBG del strain, obteniendo alta linealidad ($R^2 \approx 0,99$) y sensibilidad (12 pm/°C) validada comparando con un Pt100.

En cuanto a aplicaciones para medir temperaturas extremas, se ha demostrado que a partir de los 1200°C las fibras de sílice se vuelven inapropiadas, por lo que se usan fibras alternativas como las de zafiro [17]. Los FBGs también pueden ser difíciles de aplicar en bajas temperaturas debido a su bajo coeficiente de expansión térmica. Esto se puede arreglar usando un recubrimiento adecuado (de zinc por ejemplo).

2.2.4. Simulación FBG

Se realiza una simulación numérica en MATLAB para ver el comportamiento espectral de una rejilla de Bragg. Esta simulación consigue una respuesta espectral típica de una FBG uniforme y refleja cómo varía ante cambios en parámetros físicos clave, tales como la longitud de la rejilla, la fuerza del acoplamiento óptico y la temperatura [30]. El comportamiento de la FBG se puede visualizar a través del valor de la magnitud del espectro reflejado por las superficies de la rejilla, y este valor es representado por una función nombrada como reflectividad ($R(\lambda)$) que se expresa tal que:

$$R(\lambda) = \frac{\sinh^2(L\sqrt{k^2 - \sigma(\lambda)^2})}{\cosh^2(L\sqrt{k^2 - \sigma(\lambda)^2}) - \frac{\sigma(\lambda)^2}{k^2}} \quad (7)$$

donde $R(\lambda)$ es la reflectividad de la FBG, λ es la longitud de onda, L es el largo de la rejilla y k es un parámetro adimensional que representa la intensidad de la FBG. El coeficiente σ está dado por:

$$\sigma(\lambda) = \frac{\pi}{\lambda} \delta_{n_{eff}} + 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (8)$$

donde $\delta_{n_{eff}}$ es la amplitud de la modulación del índice de refracción de la fibra [30].

La reflectividad de una FBG proviene de la teoría de modos acoplados de Erdogan expuesta en varias investigaciones [17][30][27].

Para la simulación se consideró una longitud de onda central de Bragg $\lambda_B = 1565[nm]$. Se modeló la reflectividad espectral $R(\lambda)$ utilizando una función tipo sinc^2 , que representa adecuadamente la respuesta en frecuencia de una FBG [30]. Además, se agregan efectos típicos de una medición real, como lo es el ruido gaussiano, para que el espectro simulado sea parecido a lo que se observaría con un interrogador óptico. Los demás parámetros utilizados para obtener el espectro de reflectividad típico de una FBG ideal de la figura 7 son $L=0.01[m]$, $k=100$, $n_{eff} = 1,45$ y $\delta_{n_{eff}} = 10^{-6}$ [30].

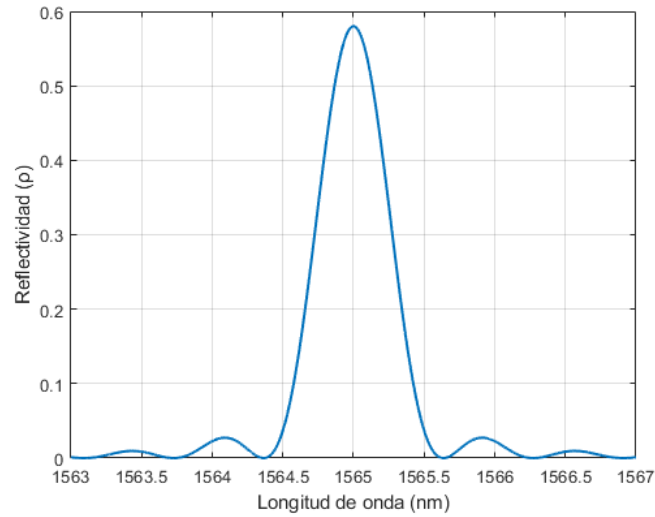


Figura 7: Reflectividad espectral típica de una FBG uniforme con $\lambda_B = 1565[nm]$.

La figura 8 ilustra cómo varía el espectro cuando se modifica la longitud física de la FBG. Al hacerse más larga la respuesta a impulso de la FBG, el peak principal se hace más estrecho y más alto [30].

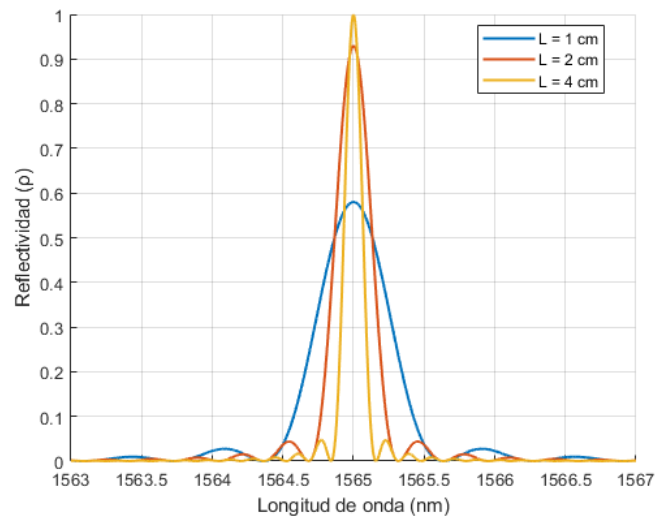


Figura 8: Reflectividad espectral de una FBG variando L para $L = 1, 2, 4[cm]$.

La Figura 9 presenta la variación del espectro al cambiar el parámetro kL , que representa la ganancia acoplada acumulada en la rejilla. Valores más altos de kL se asocian con una mayor reflectividad en el peak central, acercándose a una reflectividad unitaria en el caso ideal [30].

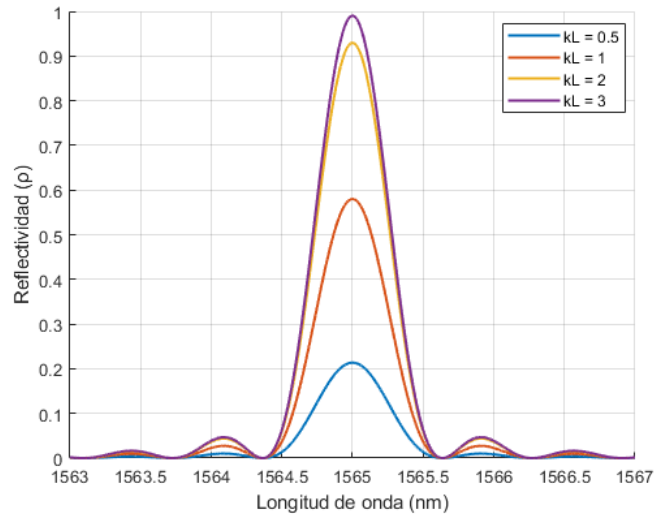


Figura 9: Reflectividad espectral de una FBG variando kL para $kL = 0,5, 1, 2, 3$.

Finalmente, la Figura 10 muestra la respuesta espectral de la misma FBG simulada a diferentes temperaturas:

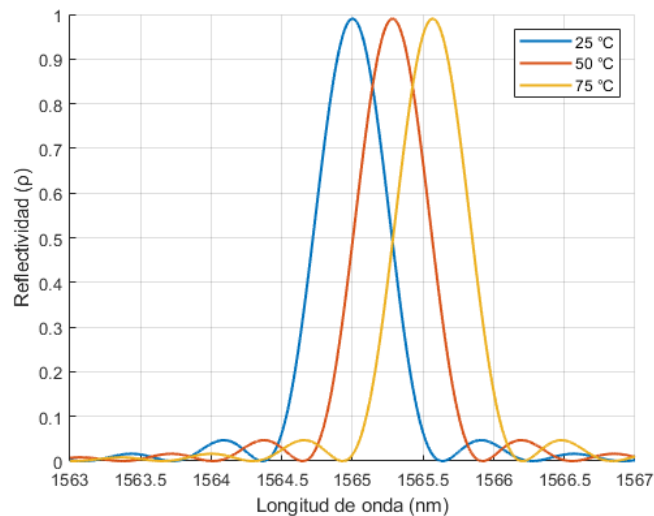


Figura 10: Reflectividad espectral de una FBG a distintas temperaturas para 25, 50 y 75[°C].

Se observa un desplazamiento progresivo hacia longitudes de onda mayores, lo cual es consecuencia del aumento tanto en el índice de refracción efectivo de la fibra (efecto termo-óptico) como del periodo de la rejilla (expansión térmica) [30][29][20].

2.2.5. Inscripción de una FBG

La inscripción de una rejilla de Bragg en una fibra óptica es el proceso de manufactura de una FBG en la propia fibra. Las primeras formas de lograr formar la rejilla se basan en la irradiación de un láser sobre el núcleo de la fibra óptica que estaba dopada con Germanio, consiguiendo así, modificar su índice de refracción [22]. Este método no era ideal, puesto que se irradiaba la fibra desde un solo extremo por lo que el espaciado entre superficies de la rejilla no era equidistante o uniforme, provocando que las reflexiones

fueran débiles y poco perceptibles [34]. Hoy, se utilizan nuevos métodos de inscripción que consiguen suplir las limitaciones del primer procedimiento. Entre estas nuevas técnicas se encuentran el método phase mask y el método interferométrico [35].

En el método phase mask, un láser UV incide sobre una estructura de sílice con un patrón difractivo, que genera automáticamente las variaciones del índice en el núcleo de la fibra [36]. Un esquema que utiliza este método se puede ver en la figura 11 [26], en la que se aprecian las corrugaciones que generan los patrones de interferencia. La intensidad de la modulación de la rejilla de Bragg está dada por la cercanía de la phase mask con la fibra, por lo que se procura mantener lo más cerca posible ambos objetos, sin llegar a dañar o romper la fibra [23].

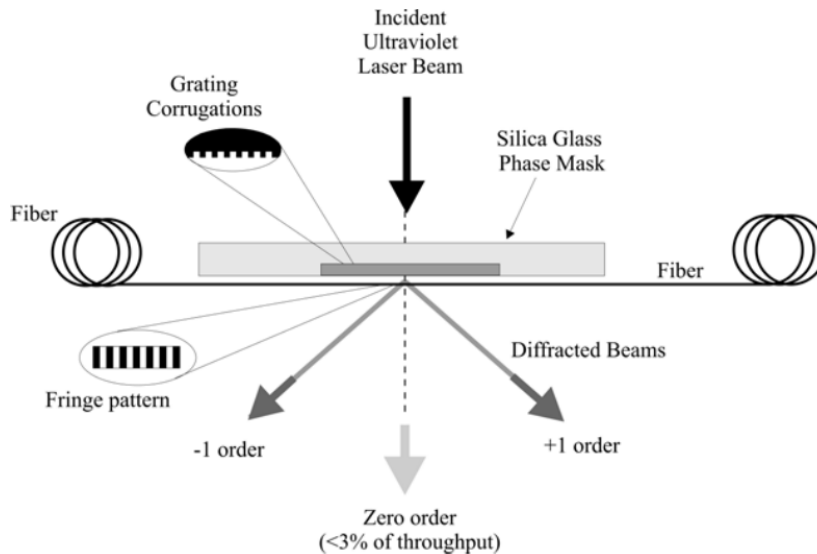


Figura 11: Método de inscripción con phase mask.

El método interferométrico permite inscribir una FBG mediante interferometría, es decir, exponer la fibra a rayos UV del rango de los 500 nm para “quemar” la fibra y formar la rejilla [34]. Esta técnica se puede llevar a cabo de varias formas, una de estas se puede ver en la figura 12 [26], donde se tiene una luz UV amplificada por un lente cilíndrico y posteriormente, separada y reflejada tal que incidan ambos haces sobre la fibra en un mismo ángulo, generando el patrón de interferencias deseado. Este método permite sintonizar fácilmente la longitud de onda de Bragg nominal deseada, simplemente variando el ángulo de incidencia ϕ [22]. El mayor inconveniente de este método es que es sensible a vibraciones o desplazamientos microscópicos en la zona de los espejos o reflectores, causando un corrimiento del patrón [35].

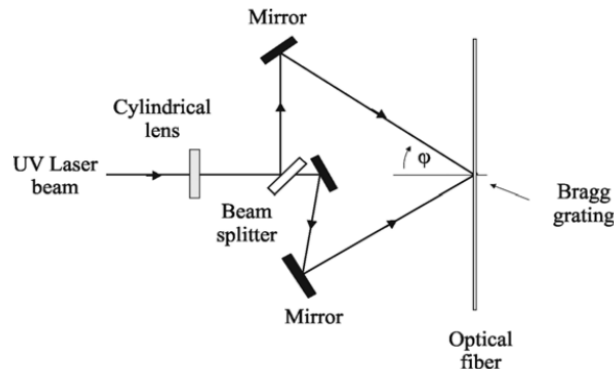


Figura 12: Método de inscripción interferométrico.

2.2.6. Interrogación y multiplexación de una FBG

Existen 2 formas de interrogar una FBG, una utiliza como fuente óptica una luz blanca ancha espectralmente para interrogar un grupo de longitudes de onda en simultáneo, y la otra técnica usa un láser que hace un barrido rápido en un rango de longitudes de onda [24].

La primera técnica, usa generalmente un diodo emisor de luz superlumínica (SLED) o ruido de emisión espontánea (ASE) de una amplificadora de fibra óptica dopada con Erblio (EDFA). Se utiliza un acoplador a la salida de la fuente de luz para enviarla y para recibir la luz reflejada por la FBG. Este esquema de interrogación posee estabilidad en la longitud de onda de Bragg y además cuenta con un buen SNR [20].

El segundo método utiliza un láser ajustable de potencia baja, con una longitud de onda controlable por una función de barrido implementada en un generador de señales. Este esquema de interrogación, presentado en la figura 13 [20], permite mayor resolución espectral que en el método anterior, ya que estaba limitado por la resolución del espectrómetro [30]. Este es el método que emplea el interrogador óptico utilizado en esta investigación, el HYPERION si155 de la empresa Luna [37].

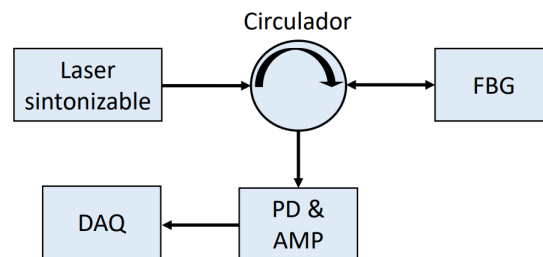


Figura 13: Esquema de interrogación por barrido de luz.

En sistemas de sensores basados en rejillas de Bragg, es fundamental implementar técnicas de multiplexación que permitan leer múltiples sensores a través de una sola línea de fibra óptica. Una de las técnicas más comunes es la multiplexación por división de longitud de onda o WDM, que consiste en inscribir múltiples rejillas de Bragg en la fibra óptica, cada una con una longitud de onda de Bragg única [24]. Esto permite que cada sensor refleje una longitud de onda diferente del espectro emitido por el interrogador óptico. Esta técnica permite multiplexar típicamente entre 10 y 30 sensores en un mismo canal, limitados por el ancho de banda del interrogador y el rango espectral disponible [17].

Por otro lado, la multiplexación por división temporal o TDM permite aumentar aún más el número de sensores mediante el uso de pulsos ópticos cortos que se propagan por una red de fibras donde los

sensores están distribuidos en posiciones espaciales distintas [8]. La señal reflejada de cada FBG llega al interrogador en instantes distintos de tiempo, dependiendo de su ubicación a lo largo de la fibra, permitiendo así diferenciar sensores que comparten la misma longitud de onda [30].

Al combinar WDM y TDM, se puede aprovechar lo mejor de ambas técnicas: WDM proporciona selectividad espectral, mientras que TDM aporta resolución espacial. Esto permite escalar la cantidad de sensores en un sistema sin necesidad de múltiples canales ópticos [24]. Por ejemplo, si se emplean 10 longitudes de onda distintas mediante WDM y cada una es replicada 5 veces en diferentes posiciones mediante TDM, se podrían integrar hasta 50 sensores FBG en una sola fibra [17].

En el contexto del presente trabajo, la técnica WDM/TDM puede ser particularmente útil si se desea expandir el sistema hacia un monitoreo distribuido de temperatura en estructuras de mayor tamaño o mayor resolución espacial, como puentes, carreteras, edificios o líneas de transmisión térmica [4][25]. Además, esta combinación permite conservar la simplicidad del sistema al evitar la instalación de múltiples fibras o interrogadores, lo cual es especialmente valioso en entornos de difícil acceso y porque un equipo interrogador es altamente costoso [30].

Sin embargo, en esta investigación, usar la técnica WDM/TDM resulta menos convenientes, al ser un sistema pequeño como lo es la mesa térmica. Por estas razones, en este diseño experimental se optó por la multiplexación WDM, distribuyendo seis sensores FBG con longitudes de onda entre 1525 nm y 1570 nm en dos canales del interrogador óptico Luna HYPERION si155, lo que permite evitar el solapamiento espectral o crosstalk [37].

2.3. Sistema de primer orden con retardo de tiempo

Para entender el comportamiento del proceso que se va a estudiar, es imprescindible identificar la dinámica del sistema o de los sistemas, en este caso, ya que cada sensor FBG presenta una dinámica particular. A través de este análisis, se puede obtener una representación matemática que permite representar el proceso térmico planteado en esta investigación en un entorno virtual.

El modelo adoptado para simular este comportamiento es un sistema de primer orden con retardo de tiempo (FOPDT, por sus siglas en inglés), el cual captura las principales características dinámicas del sistema. Algunos efectos secundarios no se consideran, ya que el objetivo de esta investigación no es alcanzar una precisión absoluta. Este enfoque se basa en lo propuesto por Brajhan Soto [38], quien desarrolla controladores PI predictivos generalizados para un sistema térmico experimental que también involucra la placa bidimensional de cobre.

En ingeniería es común encontrar sistemas con retardo de tiempo, donde este retardo o tiempo muerto (denotado como L) representa una demora entre la causa y el efecto. Es decir, la respuesta del sistema (en este caso, el sensor FBG) se manifiesta con cierto desfase temporal respecto a la acción del actuador térmico. Este fenómeno está directamente relacionado con la distancia entre el actuador (entrada) y el sensor (salida) [39].

El sistema puede describirse mediante la siguiente ecuación diferencial, que representa un modelo FOPDT [40]:

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_p \cdot u(t - L) \quad (9)$$

donde τ es la constante de tiempo del proceso, K_p la ganancia estática y L el retardo de tiempo.

Aplicando la transformada de Laplace, con condiciones iniciales iguales a cero, se obtiene la función de transferencia del sistema:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{\tau s + 1} \cdot e^{-Ls} = G(s) \cdot e^{-Ls} \quad (10)$$

Para observar el comportamiento de este modelo, se simula su respuesta ante un escalón unitario, definido como $U(s) = \frac{1}{s}$ en el dominio de Laplace. La simulación fue realizada mediante el script `respuesta_escalon_sistema_retardo.m` desarrollado en MATLAB, cuyos resultados se muestran en la figura 14.

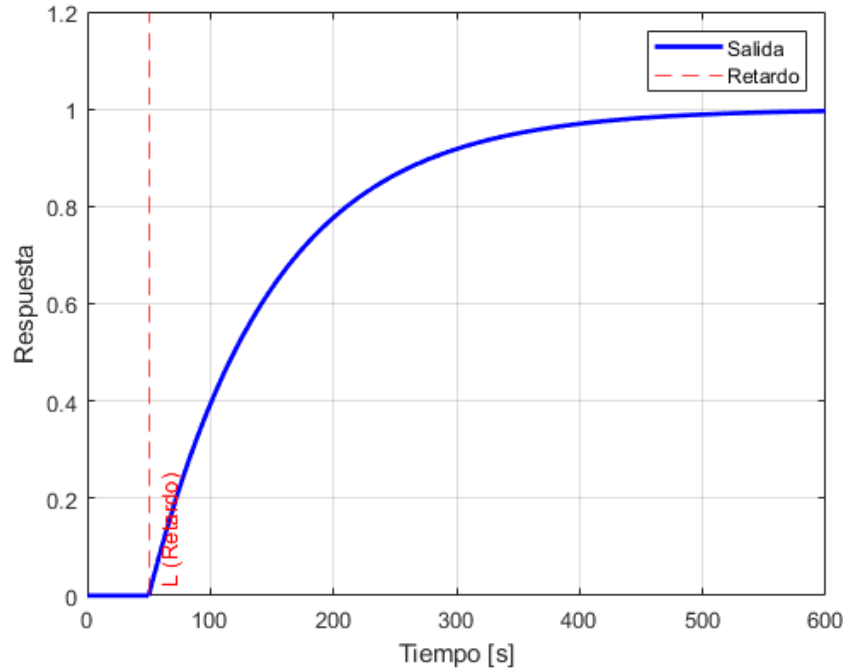


Figura 14: Respuesta al escalón unitario de un sistema de primer orden con retardo.

Como se observa en la figura 14, el sistema permanece inactivo durante el intervalo de tiempo L , luego de lo cual comienza su respuesta exponencial determinada por la constante de tiempo τ y su ganancia K_p .

La dinámica del sistema (o de cada uno de los sensores FBG) puede clasificarse en función del retardo de tiempo normalizado τ_N , propuesto por Garpinger et al. [41]. Este parámetro considera tanto el efecto del retardo como el de la constante de tiempo, y se define como:

$$\tau_N = \frac{\tau}{\tau + L} \quad (11)$$

Según este valor, los sistemas se pueden clasificar en tres tipos:

Rango de τ_N	Clasificación
$0 \leq \tau_N \leq 0,2$	Lag-dominante
$0,2 < \tau_N < 0,7$	Balanceado
$0,7 \leq \tau_N \leq 1$	Delay-dominante

Cuadro 1: Clasificación de sistemas según el valor normalizado de la constante de tiempo (τ_N).

2.4. Transferencia de calor

La transferencia de calor es el proceso mediante el cual la energía térmica se desplaza de una región a otra como consecuencia de una diferencia de temperatura [42]. En el contexto de esta investigación, en-

tender cómo se propaga el calor en una placa metálica bidimensional resulta fundamental para interpretar correctamente las respuestas obtenidas por los sensores FBG distribuidos sobre su superficie [17].

Existen tres mecanismos principales por los cuales se transfiere el calor: conducción, convección y radiación [43]. En este estudio, la conducción es el fenómeno predominante, ya que el flujo de calor ocurre principalmente a través del material sólido de la placa [14].

La conducción térmica se produce cuando el calor se propaga internamente dentro del sólido, desde las zonas de mayor temperatura hacia las de menor temperatura. Esto ocurre debido a la transferencia de energía entre partículas adyacentes [42]. En este caso, el calor generado por el calefactor PTC se transmite por conducción a través de la placa de cobre, alcanzando eventualmente las posiciones donde se encuentran los sensores FBG [14].

Por otro lado, también puede haber presencia de convección, especialmente en la superficie superior e inferior de la placa, donde el calor se disipa hacia el ambiente. Este mecanismo involucra el movimiento de aire que induce la pérdida de calor, y depende del entorno del laboratorio [43].

Finalmente, la radiación térmica también contribuye a la pérdida de calor hacia el ambiente, especialmente cuando se alcanzan temperaturas elevadas. La radiación no requiere contacto ni un medio material, y depende únicamente de la temperatura y las propiedades superficiales del material [42].

Desde un punto de vista dinámico, el comportamiento térmico del sistema puede interpretarse como una interacción entre dos efectos principales: la resistencia al flujo de calor (determinada por la geometría y el material) y la capacidad de almacenamiento térmico (relacionada con la masa y el calor específico de la placa) [44]. Esta interacción define la forma en que la temperatura varía en el tiempo, tanto al aplicar una fuente de calor como al permitir que el sistema se enfríe [40].

2.5. Interrogador óptico HYPERION si155

El interrogador óptico HYPERION si155, desarrollado por Luna Innovations, es un equipo de adquisición de espectro completo basado en un esquema de filtro óptico sintonizable, diseñado para la medición precisa de señales reflejadas por sensores de tipo rejilla de Bragg en fibra (FBG) [37]. Su arquitectura interna está compuesta por varios módulos funcionales que trabajan en conjunto para excitar los sensores ópticos y captar las señales reflejadas con alta resolución espectral y estabilidad [20]. A continuación, se detalla su funcionamiento a través de los principales bloques internos:

- **Fuente de luz de banda ancha:** Un láser de banda ancha actúa como la fuente emisora, generando luz en el rango de 1500 a 1600 nm. Esta luz se distribuye hacia los canales ópticos a través de una red de división óptica interna [37].
- **Filtro óptico sintonizable (Fabry-Pérot):** La señal emitida por la fuente es modulada espectralmente por un filtro Fabry-Pérot de cavidad sintonizable, el cual barre de forma continua y controlada el rango de longitudes de onda [24]. Este filtro permite seleccionar con alta precisión las componentes espectrales incidentes sobre los sensores [30].
- **Red de distribución óptica:** La luz barrida es dirigida hacia cuatro salidas ópticas independientes mediante una red de acoplamiento óptico. Estas salidas permiten conectar hasta cuatro fibras ópticas, cada una con múltiples sensores FBG dispuestos en configuración WDM [37].
- **Sensores FBG y reflexión:** A medida que el filtro sintonizable barre el espectro, cada rejilla de Bragg refleja una longitud de onda específica correspondiente a su condición térmica o de deformación local [17]. La luz reflejada vuelve al interrogador por la misma fibra, pasando nuevamente por la red de distribución [20].
- **Detección por fotodiodo de alta velocidad:** La señal reflejada por cada FBG es dirigida a un fotodiodo de alta sensibilidad y velocidad, capaz de registrar los pulsos reflejados en función del

tiempo de escaneo [37]. Esto permite reconstruir el espectro reflejado con resolución sub-picométrica [30].

- **Sistema de adquisición y digitalización:** Las señales analógicas del fotodiodo son convertidas mediante un sistema de adquisición de datos de alta velocidad, supervisado por un microprocesador embebido que realiza el cálculo de la longitud de onda de reflexión para cada sensor FBG presente en la red [32].
- **Módulo de control y comunicación:** Un procesador interno con sistema operativo embebido gestiona la configuración del barrido, la sincronización temporal, y la comunicación con el software ENLIGHT a través de interfaces Ethernet y comandos API [37]. También administra el almacenamiento y calibración interna [30].
- **Fuente de alimentación y gestión térmica:** El sistema cuenta con una fuente de energía con regulación de voltaje para sus módulos ópticos y electrónicos, además de sistemas de control térmico para estabilizar el filtro sintonizable y garantizar la precisión espectral en condiciones industriales [32].

Este esquema permite realizar lecturas espectrales de múltiples sensores FBG de manera simultánea, con una resolución espectral de 1 pm y frecuencia de interrogación a elección entre 100 Hz y 1 KHz [37].

La Figura 15 muestra un diagrama de bloques representativo del funcionamiento interno del interrogador óptico HYPERION si155. Esta ilustración no corresponde a un esquema oficial del fabricante, sino que ha sido elaborada a partir de la información técnica contenida en la guía de usuario del equipo [37] y en base a diagramas de otros interrogadores [32], con el fin de explicar de manera didáctica su arquitectura funcional.

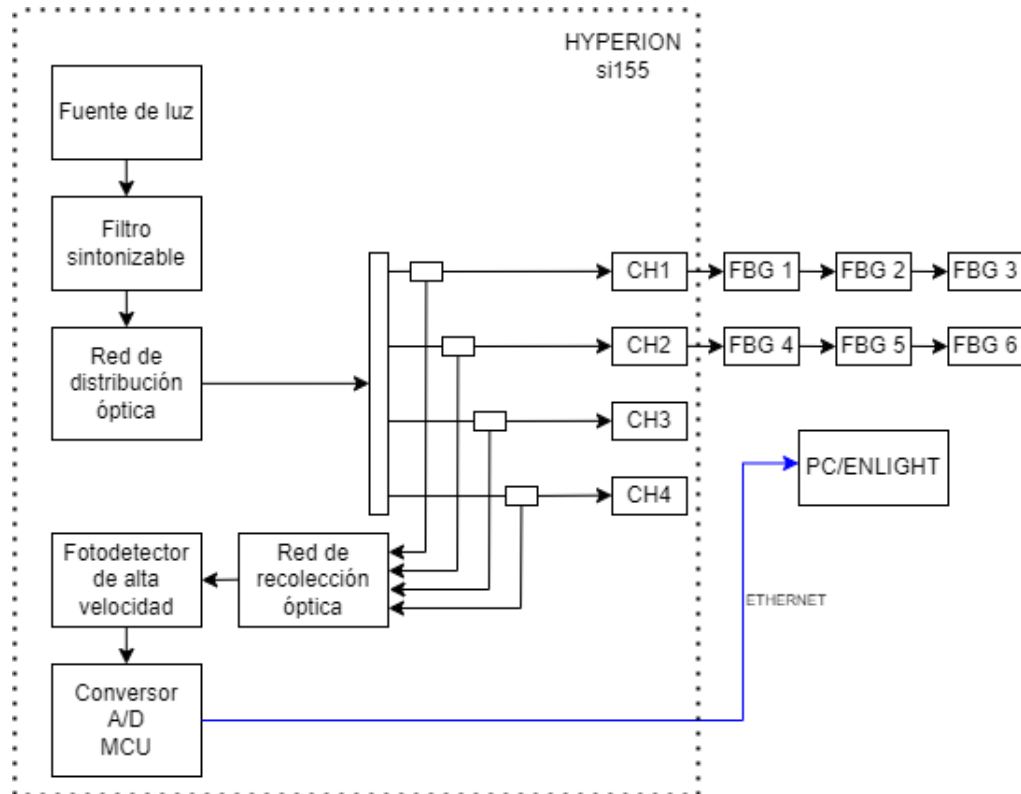


Figura 15: Diagrama de bloques de arquitectura interna del interrogador óptico HYPERION si155.

2.6. Teoría de calibración

La calibración es un proceso fundamental en los sistemas de medición, ya que permite establecer la relación entre los valores entregados por un sensor y las magnitudes físicas de referencia [29]. En el caso de los sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg, la calibración es esencial para garantizar que el corrimiento de la longitud de onda reflejada (λ_B) esté correctamente asociado con la variable física a medir, como la temperatura [31].

Desde una perspectiva estadística, la calibración se lleva a cabo a partir de un conjunto finito de mediciones experimentales, consideradas como una muestra representativa de una población más amplia [29]. A partir de esta muestra, se pueden inferir propiedades relevantes como la media, la desviación estándar y la incertidumbre asociada a las mediciones.

La media aritmética de un conjunto de datos se define como:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (12)$$

donde x_i representa cada medición y n el número total de muestras. La desviación estándar se calcula como:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

y representa el grado de dispersión de las mediciones respecto a la media.

La incertidumbre estándar combinada permite cuantificar la calidad de la calibración. Esta puede incluir dos tipos principales de contribuciones [29]:

- **Incertidumbre tipo A:** evaluada estadísticamente a partir de los datos obtenidos durante el proceso de calibración. Se estima mediante:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

- **Incertidumbre tipo B:** estimada a partir de la resolución del instrumento o información proporcionada por el fabricante. Para una distribución uniforme:

$$u_B = \frac{\delta x}{\sqrt{12}} \quad (15)$$

donde δx corresponde a la resolución del instrumento de medición [37].

Asumiendo que estas dos fuentes de incertidumbre no están correlacionadas, la incertidumbre estándar combinada se obtiene como:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (16)$$

Finalmente, esta incertidumbre puede multiplicarse por un factor de cobertura k (usualmente $k = 2$) para obtener la incertidumbre expandida, la cual representa un intervalo de confianza aproximado del 95 % [29].

2.7. Calefactor PTC

Un calefactor de coeficiente de temperatura positivo (PTC, por sus siglas en inglés) es un dispositivo semiconductor cuyo comportamiento resistivo varía con la temperatura. A bajas temperaturas, su resistencia eléctrica es relativamente baja, lo que permite el paso de corriente con facilidad y genera calor por efecto Joule. Sin embargo, a medida que la temperatura del elemento aumenta, su resistencia también se incrementa de forma no lineal. Esta propiedad lo convierte en un componente autorregulante, ya que al aumentar su resistencia, reduce el flujo de corriente y limita el calentamiento adicional.

Esta transición de comportamiento ocurre en torno a una temperatura característica del material, conocida como temperatura de Curie o temperatura de conmutación. Al alcanzarse esta temperatura, se produce un incremento abrupto en la resistividad del material cerámico PTC, lo que provoca una fuerte caída de la corriente eléctrica. Como resultado, el elemento tiende a estabilizarse térmicamente sin necesidad de un sistema de control externo.

3. Diseño Experimental

3.1. Mesa térmica y consideraciones operativas

La base del modelo físico utilizado para la realización de las mediciones térmicas es una mesa térmica construida a partir de una placa bidimensional de cobre, cuyas dimensiones son $50\text{ cm} \times 45\text{ cm}$ y su peso aproximado es de 2 kg . Esta placa actúa como superficie de conducción de calor, y sobre ella se adhieren seis sensores FBG, así como el elemento calefactor PTC descrito en la sección anterior. El PTC se adhiere mediante una pasta térmica GD450.

La estructura se encuentra montada sobre ocho soportes plásticos fabricados con policarbonato y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), los cuales a su vez descansan sobre una base de acrílico rígido [14]. Esta configuración proporciona estabilidad mecánica y facilita el transporte del sistema completo, sin comprometer su integridad estructural durante la manipulación. En la figura 16 se presenta la distribución espacial de los sensores y el calefactor PTC en la mesa térmica, se detallan las distancias entre sensores y los bordes, así como las distancias euclidianas entre el centro de cada FBG y el centro del PTC. Los sensores son esas secciones de la fibra de color rojo.

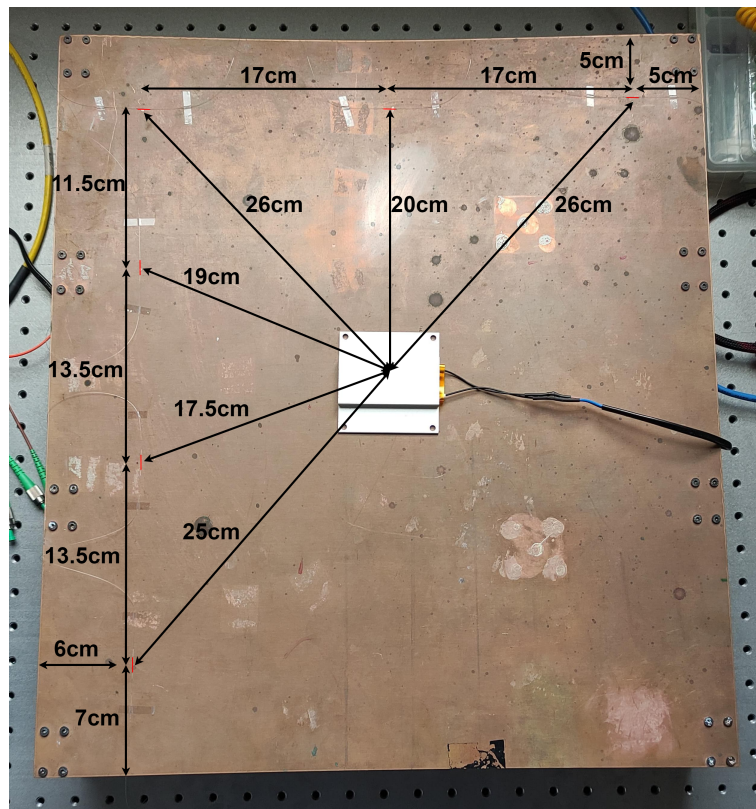


Figura 16: Distribución de los sensores FBG y calefactor PTC sobre la mesa térmica de cobre.

Durante las pruebas experimentales se ha observado que la aplicación prolongada de calor en el centro de la placa genera una deformación cóncava apreciable de la placa, especialmente en la zona cercana al calefactor. Este fenómeno puede atribuirse tanto al gradiente térmico acumulado como a la dilatación diferencial del cobre, y se ve acentuado con el paso del tiempo y el uso reiterado. Las zonas más afectadas por estas deformaciones son aquellas cercanas al centro de la placa, donde el calor es más intenso.

Dado que los sensores FBG son sensibles tanto a la temperatura como a la deformación mecánica (sensibilidad cruzada), su posicionamiento debe minimizar la influencia de esfuerzos mecánicos no deseados. Por esta razón, los sensores se disponen en forma de “L” en los bordes laterales de la placa, como

se muestra en la figura 16, donde las mediciones experimentales indican que las deformaciones inducidas son insignificantes, pero no iguales a cero. Esta ubicación permite que los desplazamientos de longitud de onda en los sensores FBG se atribuyan principalmente a variaciones de temperatura y no a deformaciones estructurales, aumentando así la confiabilidad de las mediciones.

Para la fijación de la fibra óptica a la superficie de cobre se descarta el uso del adhesivo industrial LOCTITE 495, un cianoacrilato de baja viscosidad, incoloro y de curado rápido. A pesar de que este adhesivo presenta un rango de operación térmica de -40°C a 120°C , que es adecuado para los experimentos, se opta por solamente fijar los extremos (a 5 cm del centro de la rejilla) del sensor con cinta térmica. Esto, ya que en otras investigaciones se ha visto que al fijar directamente la zona de la rejilla, se puede llegar a disminuir la sensibilidad térmica del sensor. También es deseable modificar la posición de los sensores para los distintos experimentos, por lo que no es conveniente adherirlos a la placa definitivamente. Se deja la sección central del sensor en contacto libre con la superficie de cobre, sin tensiones longitudinales ni compresiones.

Durante la manipulación y operación del sistema experimental, se deben considerar ciertas precauciones como que la placa de cobre presenta bordes filosos que pueden romper la fibra, lo que generaría la necesidad de realizar empalmes en la fibra utilizada (tipo SMF-28e con recubrimiento de acrilato). Esta se puede romper fácilmente porque no cuenta con una cubierta protectora exterior, por lo que también es frágil ante torsiones. Dado que la fibra está parcialmente desprotegida, se deben evitar contactos accidentales, rozamientos o golpes que puedan deteriorar el revestimiento de acrilato o producir microfracturas. El interrogador HYPERION si155 también debe ser manipulado cuidadosamente. Se debe evitar exponer sus puertos ópticos a polvo o suciedad y las conexiones deben realizarse únicamente con el equipo apagado.

Otra consideración importante es que no se debe abrir una conexión simultánea desde MATLAB y ENLIGHT hacia el interrogador. Esto puede causar bloqueos en la comunicación o dañar el firmware del equipo. Además, en MATLAB se debe cerrar la conexión con el interrogador al final de cada iteración para poder volver a utilizar el ENLIGHT.

3.2. Configuración del interrogador óptico HYPERION y software ENLIGHT

Se siguen estos pasos para una correcta inicialización y conexión del interrogador óptico HYPERION si155:

1. Conexión física de los sensores FBG:

- Antes de encender el interrogador, se conectan los sensores FBG a los canales ópticos correspondientes del equipo. En este caso, se utilizan los canales 1 y 2.
- Cada canal está protegido por una tapa plástica, la cual debe levantarse para introducir el conector de la fibra óptica.
- El conector debe estar limpio y libre de polvo o grasa. Se inspeccionan visualmente con un microscopio de inspección óptica y limpian con alcohol isopropílico.

2. Conexión a la red local:

- Conectar el interrogador al computador mediante un cable Ethernet.
- Una vez establecida la conexión física, encender el interrogador utilizando el interruptor.

3. Configuración de red:

- a) Abrir el menú de configuración de Windows.
- b) Navegar a la sección **Red e Internet**, y seleccionar la opción **Ethernet**.
- c) Hacer clic en **Editar** en la sección de **Asignación de IP**.

- d) Cambiar el modo de configuración de DHCP a **Manual**.
- e) Activar la opción **IPv4**.
- f) Ingresar los siguientes parámetros de red recomendados por el fabricante o establecidos previamente:
 - Dirección IP: 10.0.0.2
 - Máscara de subred: 255.255.255.0
 - Puerta de enlace: 10.0.0.1
- g) Guardar los cambios y cerrar la configuración.

4. Inicialización del software ENLIGHT:

- Abrir el software ENLIGHT.
- Presionar el botón **Connect/Disconnect** para establecer la comunicación con el interrogador.
- Si la conexión es exitosa, el software desplegará la lista de canales activos, las longitudes de onda detectadas, y permitirá configurar parámetros de adquisición como rango espectral, tasa de muestreo, y número de sensores por canal.

3.2.1. Ventana de adquisición del software ENLIGHT

La ventana de adquisición del software ENLIGHT visible en la figura 17, constituye el entorno principal para la visualización y supervisión en tiempo real de los datos provenientes del interrogador óptico. Esta interfaz está compuesta por múltiples pestañas que permiten observar, procesar y analizar las señales reflejadas por los sensores FBG conectados, en este caso, a los canales 1 y 2 del interrogador. En la imagen se aprecian los 6 picos reflejados de la red de 6 sensores propuesta en este diseño experimental.

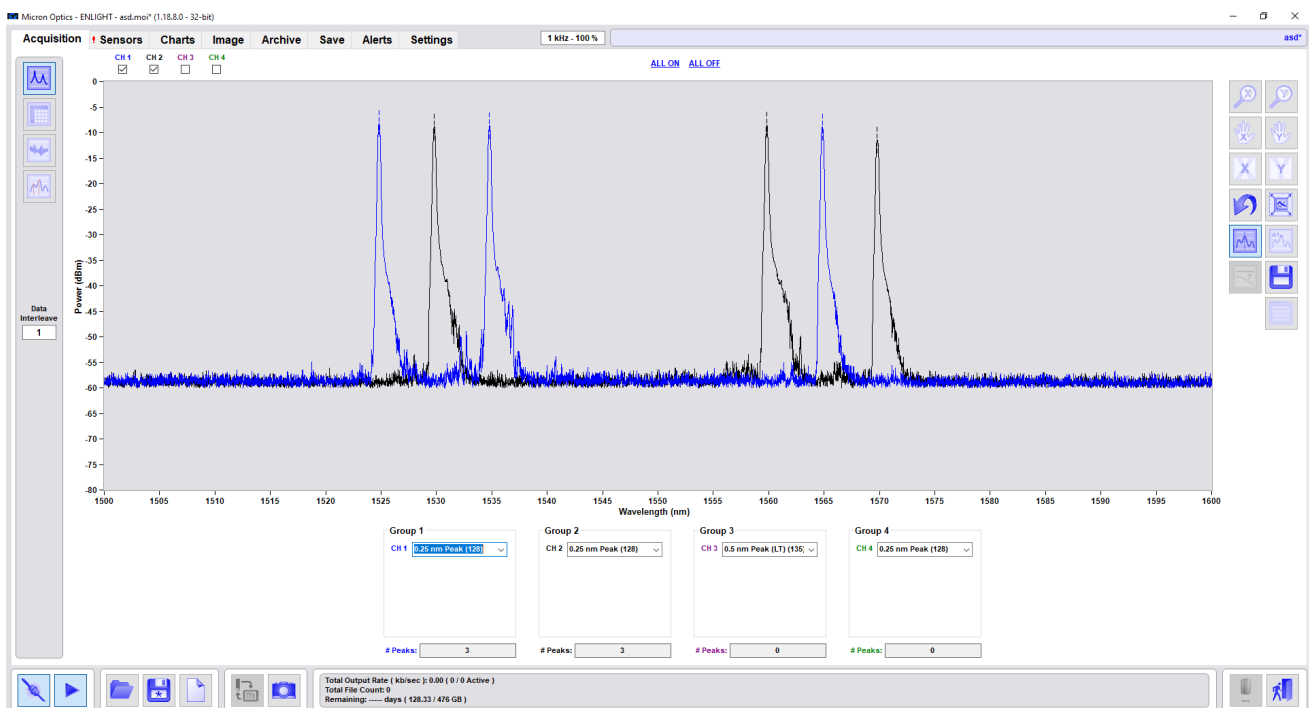


Figura 17: Ventana principal del software ENLIGHT (vista de amplitud).

3.2.1.1 Vista de amplitud

La primera pestaña corresponde a la vista de amplitud, donde se presenta una gráfica de longitud de onda (nm) en el eje horizontal y potencia óptica (en dBm) en el eje vertical. Esta visualización es análoga a la obtenida con un analizador de espectros óptico (OSA), permitiendo observar la respuesta espectral reflejada por los sensores FBG. En esta gráfica, los picos visibles corresponden a las longitudes de onda centrales reflejadas por cada sensor FBG.

En este proyecto, se utilizaron sensores FBG cuya potencia reflejada alcanza aproximadamente -5 dBm, valor que indica una señal robusta, especialmente si se considera que el nivel de ruido del sistema se sitúa cerca de -55 dB. Esta diferencia de 50 dB constituye una relación señal-ruido (SNR) elevada, lo que es altamente favorable para una detección precisa y estable de los picos reflejados. El valor de Power (dBm) representa la potencia óptica de la señal reflejada por la FBG y recibida por el fotodetector del interrogador, en una escala logarítmica en base 10 (donde 0 dBm equivale a 1 mW).

Cabe señalar que la representación de Power (dBm) no equivale exactamente a la reflectividad espectral en sentido estricto (la cual representa la fracción de luz reflejada respecto a la incidente), pero guarda una relación directa con ella. En términos prácticos, la reflectividad de una FBG se manifiesta como un peak en la potencia recibida en una longitud de onda específica.

En la parte inferior de esta misma vista, se encuentra la sección de configuración de algoritmos de detección de picos. Esta sección está dividida en cuatro grupos, en los que se puede seleccionar el algoritmo utilizado para identificar los peaks reflejados. En este trabajo, se utilizaron tres sensores FBG por canal en los canales 1 y 2, por lo que se seleccionó el algoritmo denominado “*0.25mm Peak EV*”, el cual permite la detección simultánea de múltiples picos.

3.2.1.2 Vista de tabla

La pestaña de vista de tabla presenta, para cada canal activo, una tabla con los valores medidos en tiempo real. Estos valores incluyen la longitud de onda reflejada y el nivel de potencia correspondiente para cada sensor detectado.

3.2.1.3 Respuesta temporal

La pestaña de respuesta temporal permite observar la evolución de las longitudes de onda reflejadas en función del tiempo. En este gráfico, el eje horizontal representa el tiempo transcurrido y el eje vertical la longitud de onda. Esta visualización permite observar directamente los desplazamientos de los peaks que se producen ante variaciones de temperatura o deformación en la placa monitoreada. La selección del canal de interés se realiza desde el mismo panel.

3.2.1.4 FFT

La última pestaña disponible en la ventana de adquisición corresponde a la visualización de la transformada rápida de Fourier (FFT). Esta pestaña muestra un gráfico de magnitud de FFT (dB) vs frecuencia (Hz). El propósito de esta herramienta es identificar componentes de frecuencia presentes en la señal temporal adquirida, lo que puede revelar oscilaciones periódicas, vibraciones mecánicas o interferencias ambientales que afecten a los sensores. Si bien no se utilizó en esta investigación, esta funcionalidad podría resultar útil en trabajos futuros orientados a la detección de vibraciones.

3.2.2. Ventana de sensores del software ENLIGHT

La ventana de sensores del ENLIGHT, visible en la figura 18, está destinada a la configuración de los sensores y a la aplicación de los parámetros de calibración necesarios para convertir las longitudes de onda medidas en temperatura. Es importante recordar que las mediciones de temperatura obtenidas en

este sistema corresponden a una interpretación realizada por el software a partir de las longitudes de onda reflejadas por los sensores FBG, y no a una medición directa. Por ello, en esta ventana se asignan las funciones de calibración obtenidas experimentalmente para cada sensor FBG (el proceso de calibración se detalla en una sección posterior de este informe).

Esta ventana contiene una única pestaña, organizada en dos secciones principales: FBG/Accelerometer y Sensors.

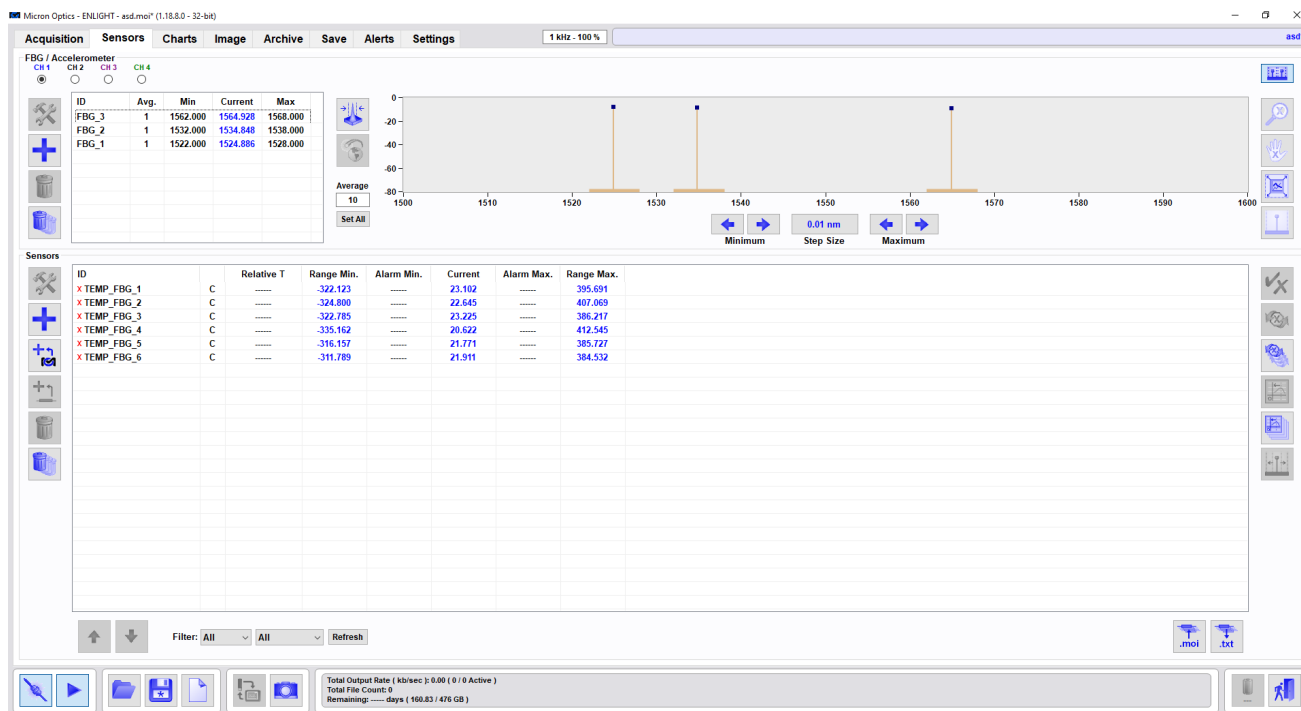


Figura 18: Ventana de sensores del software ENLIGHT.

3.2.2.1 FBG/Accelerometer

En la parte superior se encuentra la sección denominada FBG/Accelerometer, que permite configurar y registrar manual o automáticamente los sensores FBG detectados por el interrogador. Si se quiere agregar un sensor de forma manual, se asigna un identificador con el formato **FBG_n**, donde n corresponde al número del sensor (en este caso, $n = 1, \dots, 6$). Además, se debe ingresar la longitud de onda nominal del sensor y su ancho espectral.

Alternativamente, el software permite utilizar la función de auto configuración mediante el botón Auto Create Sync FBGs, que detecta automáticamente los sensores reflejados en el canal seleccionado, asigna una longitud de onda nominal basada en la medición actual y define un ancho espectral por defecto. Esta funcionalidad facilita la configuración inicial de los sensores.

3.2.2.2 Sensors

En la parte inferior de la ventana se encuentra la sección Sensors, destinada a la creación de sensores virtuales asociados a variables físicas específicas, en este caso, temperatura. Cada sensor se define manualmente utilizando un identificador del tipo **TEMP_FBG_n**, nuevamente con $n = 1, \dots, 6$.

Una vez creado el sensor, se procede a su configuración mediante los siguientes pasos:

- Se asigna el sensor a un grupo numerado del 1 al 10.

- Se selecciona el tipo de variable a medir. En este caso, se escoge temperatura, lo que define automáticamente la unidad de medida en °C.
- Se define una expresión matemática que vincula la longitud de onda reflejada (obtenida desde el identificador `FBG_n`) con la temperatura. Esta expresión corresponde a la curva característica del sensor, en este caso un modelo lineal o cuadrático ajustado durante la etapa de calibración experimental.
- Finalmente, se ingresan los parámetros del modelo de calibración.

Una vez definidos estos elementos, el software ENLIGHT es capaz de calcular en tiempo real la temperatura relativa asociada a cada sensor FBG, permitiendo su monitoreo continuo y visualización integrada en las demás secciones del software.

En la figura 19 se incluye la pestaña de edición del sensor FBG 1. En esta pestaña de edición es posible configurar sub expresiones, con las cuales por ejemplo, se puede realizar compensación por deformaciones. Recordar que el sensor está sujeto a sensibilidad cruzada entre temperatura y strain, por lo que en trabajos futuros sería interesante compensar por deformaciones o strain, esto a través de sensores calibrados en strain.

Name	Value
A	182407.6911789...
B	119.6357212772...

ID	Expression	Compensation
		None
		None
		None

Figura 19: Pestaña de edición de parámetros del sensor FBG 1.

3.2.3. Ventana de gráficos (Charts)

Una vez definidos y calibrados los sensores FBG, el software ENLIGHT permite visualizar en tiempo real la evolución de la temperatura medida por cada sensor a través de la ventana denominada Charts, como se ve en la imagen 20. Esto permite el monitoreo dinámico del sistema y validar el comportamiento térmico esperado en función del tiempo.

La interfaz gráfica de esta ventana está organizada en un panel principal con cuatro gráficos independientes, correspondientes a los canales A, B, C y D del interrogador óptico. En este trabajo, se utilizaron únicamente los canales A y B (correspondientes a los canales físicos 1 y 2 del equipo), mientras que los canales C y D permanecieron inactivos.

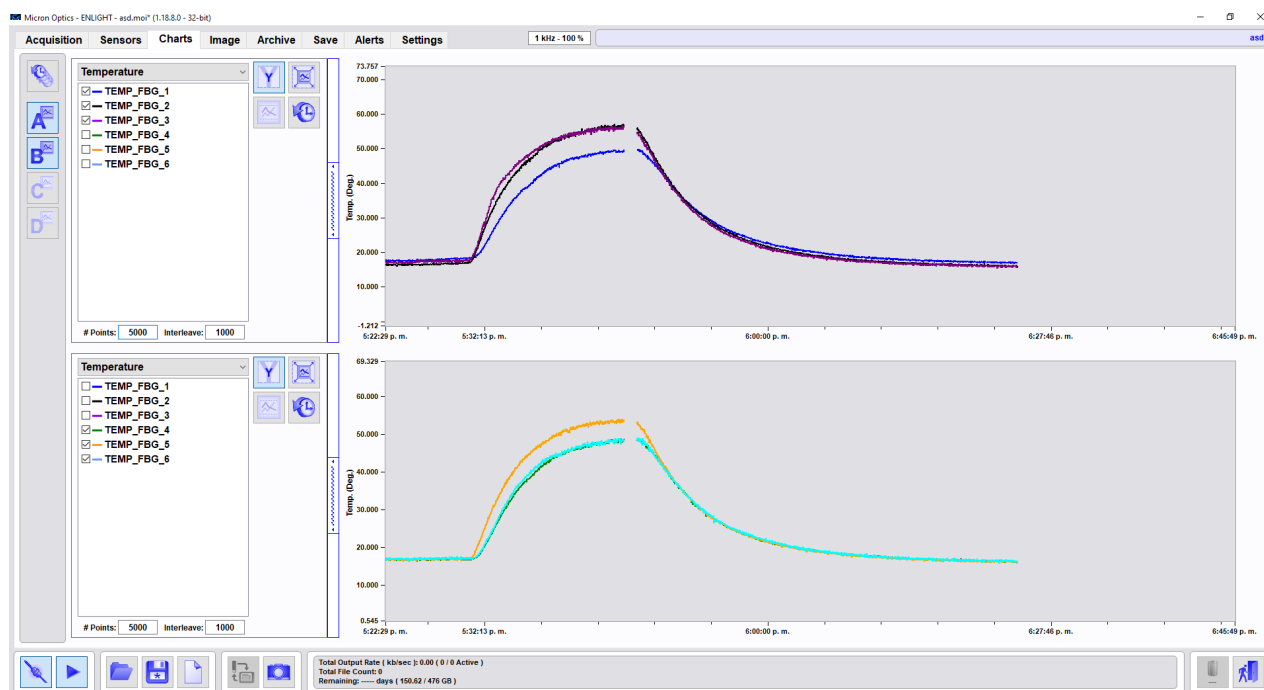


Figura 20: Ventana de gráficos del software ENLIGHT.

3.2.3.1 Panel de control izquierdo

A la izquierda de los gráficos, se encuentra un panel de control que contiene botones para reiniciar individualmente cada gráfico, lo cual permite limpiar el historial visualizado en pantalla sin detener la adquisición de datos.

3.2.3.2 Configuración individual por canal

Cada gráfico cuenta con un menú desplegable ubicado a su izquierda, que permite personalizar la visualización de los datos asociados al canal correspondiente. Las opciones configurables incluyen:

- Scale: Permite ajustar la escala del eje vertical (temperatura).
- Interleave: Controla la superposición de datos cuando hay múltiples sensores asociados a un mismo canal.
- Points: Define la cantidad de puntos de datos que se mostrarán en pantalla. Un número mayor de puntos permite una visualización más completa del historial reciente, mientras que un número reducido favorece una visualización más ágil con menor carga computacional.

3.2.4. Ventana de imagen (Image)

La ventana Image del software ENLIGHT permite integrar una visualización espacial de las mediciones de temperatura superpuestas sobre una imagen de referencia del sistema físico monitoreado.

En esta ventana es posible cargar una imagen de fondo que represente la distribución física de los sensores FBG en la placa bajo prueba. En la Figura 21 se muestra la imagen utilizada, correspondiente a una fotografía de la placa de cobre que contiene el calefactor PTC y la red de sensores FBG posicionados en puntos específicos sobre su superficie.

Una vez cargada la imagen, se pueden ubicar sobre ella distintos elementos gráficos asociados a cada sensor, que permiten visualizar en tiempo real la información adquirida. Las opciones disponibles para cada sensor incluyen:

- Medidor numérico: Muestra el valor de temperatura actual del sensor en formato digital. Esta opción permite una lectura directa del valor medido.
- Gauge de temperatura: Representa gráficamente la temperatura dentro de un rango definido previamente en la ventana de configuración de sensores. Esta opción requiere que se asignen límites mínimo y máximo de operación, y es útil para visualizar rápidamente la posición relativa de la temperatura dentro del rango esperado.
- Luz indicadora (LED): Muestra una luz verde o roja en función del estado de una alarma (threshold) configurada para ese sensor. Esta funcionalidad permite implementar un sistema de alertas visuales para detectar temperaturas fuera de rango.

Se opta por utilizar los medidores numéricos, dado que permiten una lectura clara y cuantitativa del valor de temperatura en cada uno de los sensores FBG, lo que resulta adecuado para el análisis detallado y la validación experimental del sistema.

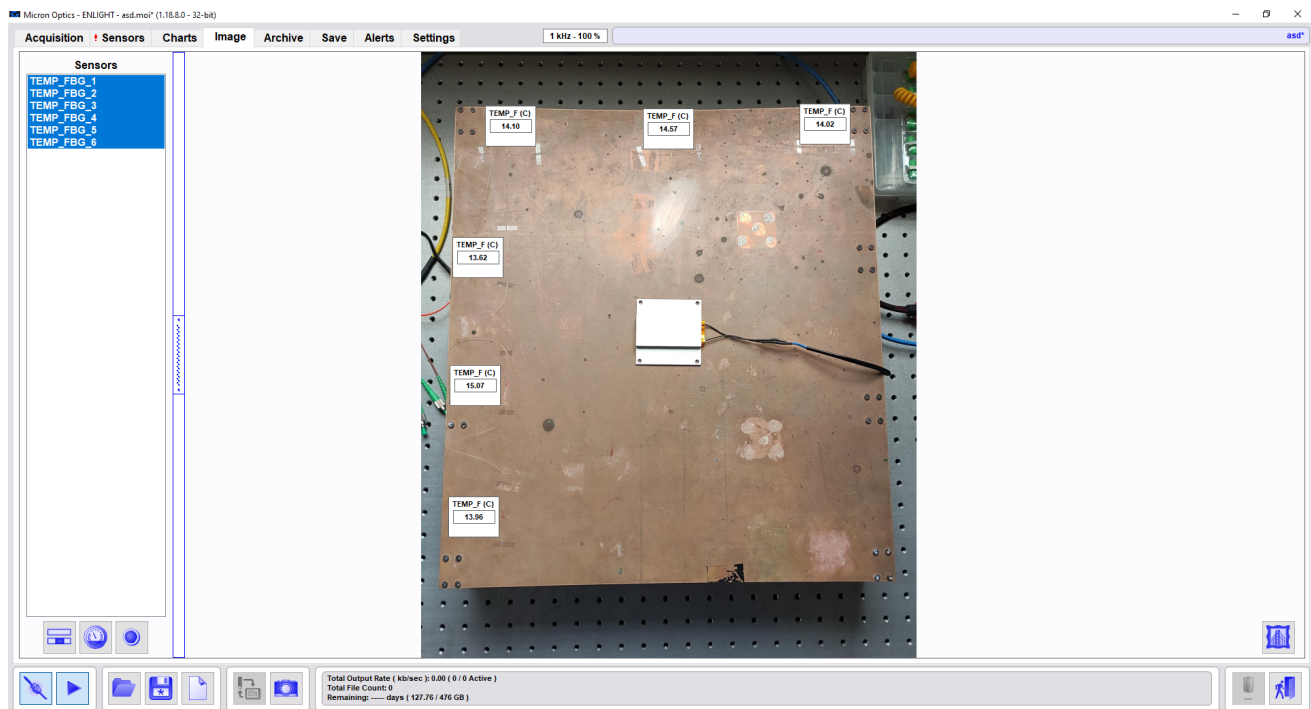


Figura 21: Ventana de imagen del software ENLIGHT.

3.2.5. Ventanas Archive y Alert

El software ENLIGHT incluye adicionalmente las ventanas Archive y Alert, destinadas respectivamente a la gestión de datos históricos almacenados y a la configuración de alertas basadas en umbrales definidos por el usuario.

3.2.6. Ventana de guardado (Save)

En la figura 22 se puede ver la pestaña en la que se configuran los parámetros relacionados con el guardado de datos local en el equipo, para su posterior procesamiento con herramientas externas a ENLIGHT.

Dentro de esta ventana se encuentra la sección denominada Local Data Saving, en la cual es posible definir el path o ruta de guardado en el sistema de archivos del computador. Además, se puede seleccionar el formato de archivo y los tipos de datos a guardar.

En esta sección, el usuario puede optar por almacenar distintas categorías de información, incluyendo:

- Datos del sensor en longitud de onda: Corresponde a la información cruda adquirida directamente desde el interrogador, codificada en unidades de longitud de onda (nm) para cada sensor FBG.
- Datos interpretados: Incluye las variables físicas resultantes de aplicar las funciones de calibración definidas en la ventana de sensores, como la temperatura en °C. Esta información resulta esencial para el análisis experimental posterior.
- Valores de peaks: Permite guardar las posiciones de los picos detectados en cada adquisición, junto con su potencia relativa.
- Respuestas espectrales: Incluye los datos completos del espectro reflejado por los sensores.
- Eventos: Permite registrar eventos declarados manualmente o generados automáticamente por el sistema, tales como cambios de estado, alertas, o acciones de usuario.

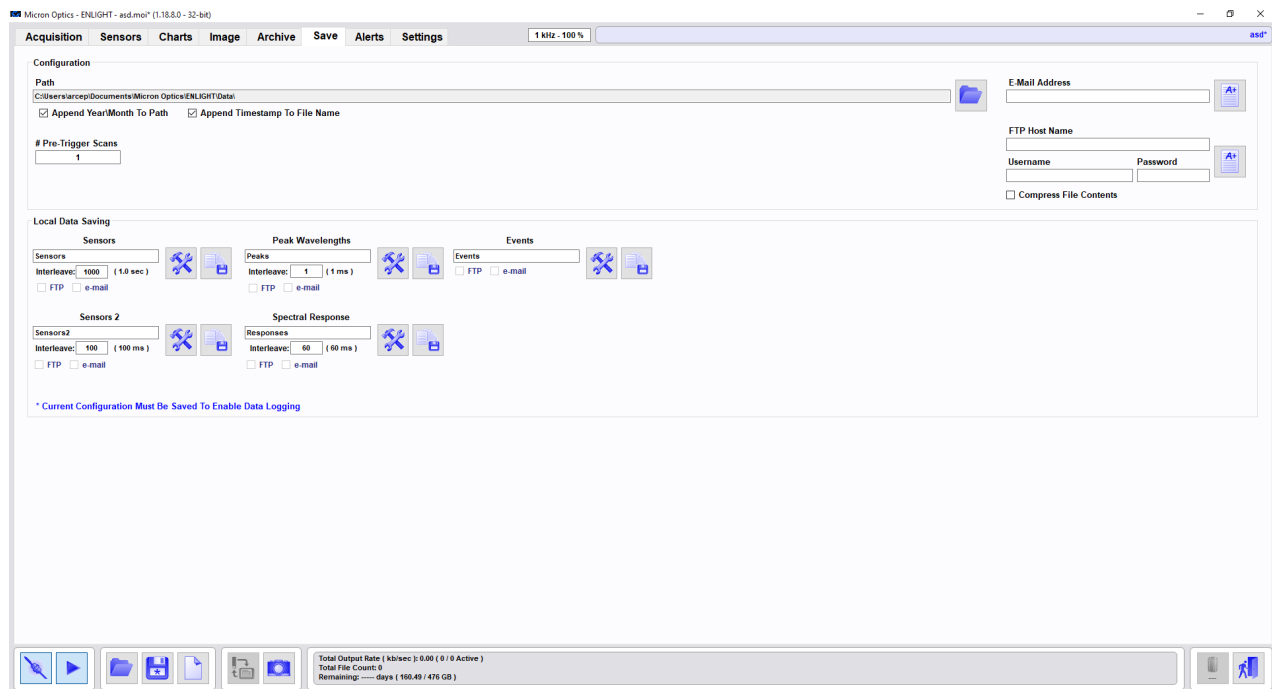


Figura 22: Ventana de guardado del software ENLIGHT.

En la figura 23 se ve la pestaña de guardado de los sensores, en la que se puede definir el tiempo total de medición, la información que se guarda en el archivo .txt y seleccionar los sensores de los que se quiere almacenar información.

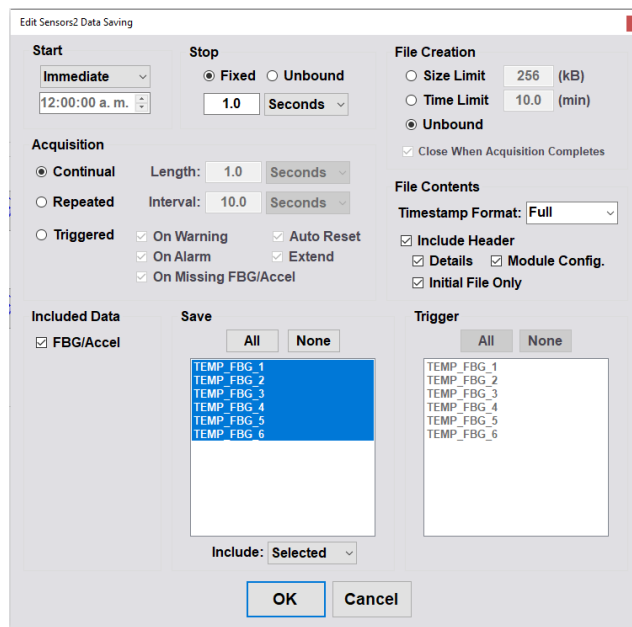


Figura 23: Pestaña de guardado de los sensores.

3.2.7. Ventana de configuraciones (Settings)

Finalmente, el software ENLIGHT incluye la ventana Settings, la cual permite acceder a configuraciones generales del sistema. Entre las opciones más relevantes para esta investigación se encuentra la posibilidad de ajustar la velocidad de interrogación, seleccionando entre 100 Hz o 1000 Hz, según los requerimientos de resolución temporal del experimento.

Adicionalmente, esta ventana incluye herramientas para realizar actualizaciones de firmware del equipo, así como opciones de configuración para la interfaz web del interrogador y otras funcionalidades asociadas a aplicaciones externas o redes industriales.

3.3. Procesamiento en MATLAB

Para complementar el análisis de datos obtenidos mediante sensores FBG, se ha desarrollado un conjunto de scripts en MATLAB que permiten tanto el análisis posterior a la adquisición como la visualización en tiempo real. Estas herramientas extienden las capacidades del software ENLIGHT y permiten un control más detallado del procesamiento de datos.

La interfaz de ENLIGHT no contempla la integración de actuadores como el calefactor PTC utilizado en este experimento, por lo que externalizar el procesamiento en MATLAB resulta una alternativa más completa para el monitoreo térmico. Además, MATLAB permite registrar mediciones en archivos `.csv`, un formato diseñado para el manejo de datos tabulares, lo cual facilita su análisis y documentación en comparación con el formato `.txt` exportado por ENLIGHT.

3.3.1. Post-procesamiento en MATLAB

El análisis posterior se realiza sobre archivos `.txt` exportados por ENLIGHT, los cuales contienen los valores de temperatura ya calibrados para cada sensor FBG. Se desarrollaron dos códigos para esto:

- ProcesarMedicionesFBG.m:** importa automáticamente los archivos, identifica las columnas de temperatura etiquetadas como `TEMP_FBG_n`, y genera gráficos individuales y en grupo de temperatura vs tiempo. Los resultados se almacenan organizadamente por la fecha y hora en que se procesan las mediciones.

- `EstimarTiemposRespuestaFBG.m`: analiza los perfiles térmicos y calcula los tiempos de respuesta t_{10} y t_{90} , determinando el retardo con el que cada sensor reacciona ante cambios térmicos.

3.3.2. Comunicación en tiempo real con HYPERION

Para permitir la adquisición en tiempo real, se utilizó la API de MATLAB del interrogador HYPERION si155, a través de la librería `hLibrary_matlab_0.9.5.0`. La Figura 24 muestra el esquema general de comunicación entre el interrogador, ENLIGHT y el cliente externo, en este caso, MATLAB.

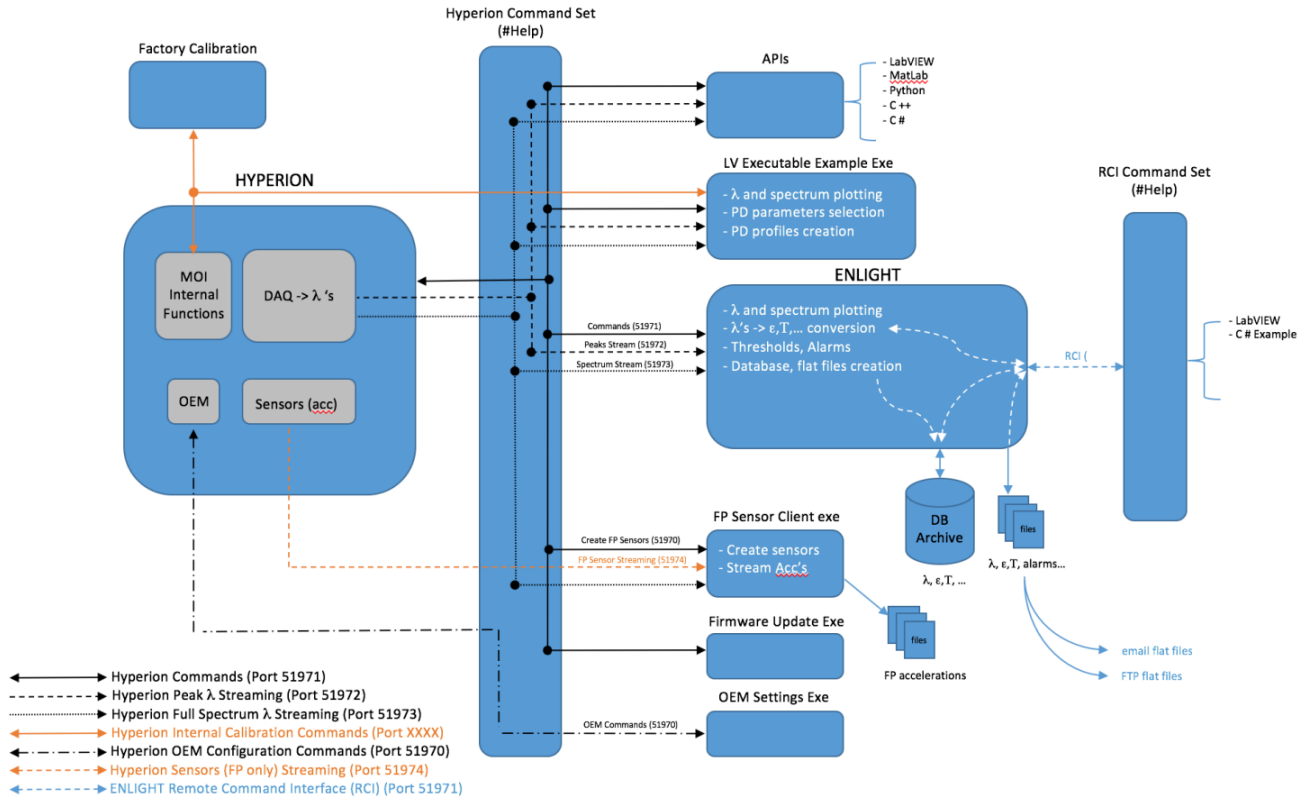


Figura 24: Interfaz de programación del interrogador óptico HYPERION si155.

El acceso a datos se realiza mediante sockets TCP sobre los puertos definidos por el fabricante:

- 51971: puerto de comandos para respuestas como `#GetPeaks` o `#GetSpectrum`.
- 51972: streaming de los picos de longitud de onda reflejados.
- 51973: streaming de los espectros completos.
- 51974: streaming de los datos procesados (calibrados) por el sistema.

En los experimentos se utiliza la función `hACQGetPeaks`, operando sobre el puerto 51971, debido a su compatibilidad con los scripts desarrollados. Esta función entrega en cada iteración una celda con vectores de longitudes de onda reflejadas por cada canal. Los datos se procesan en el script `StreamingTemperaturaFBG.m`, donde en un primer momento se aplica una transformación lineal del tipo:

$$T = a \cdot \lambda + b$$

para así, obtener la temperatura en función de la longitud de onda, utilizando los coeficientes de calibración lineales de cada sensor. Posteriormente se cambiaría a la regresión lineal porque obtiene menor error en la toma de nuevos valores de temperatura.

El sistema genera una visualización en tiempo real para los seis sensores FBG y guarda automáticamente los resultados en archivos `.csv`, `.mat` y `.png` para su posterior análisis.

3.3.3. Validación con sensores eléctricos

Con el fin de validar el comportamiento de los sensores FBG, se desarrolló un sistema paralelo de adquisición con un sensor eléctrico tradicional. Una termocupla tipo K fue conectada a un módulo MAX6675 y controlada mediante un Arduino UNO. El script `LeerTermocuplaMAX6675.m` realiza la adquisición en MATLAB vía comunicación serial por el puerto COM3 con un baudrate o tasa de baudios de 9600, guardando los datos en formato `.csv`.

La comparación con los sensores ópticos se realiza con el script `CompararFBGvsTermocupla.m`, que interpola los datos de la termocupla al mismo eje temporal de los datos ópticos (FBG6) y genera un gráfico comparativo, así como un archivo `.csv` sincronizado. Esta comparación permite:

- Verificar que forman curvaturas similares al ejecutar el ciclo térmico.
- Detectar posibles offsets térmicos.
- Evaluar la linealidad de respuesta propia de los sensores FBG.

3.4. Multiplexación WDM

La multiplexación por división en longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM) es una técnica que se utiliza, en este caso, para ampliar la capacidad de monitoreo de sistemas basados en sensores de fibra óptica. En este método, múltiples sensores FBG con diferentes longitudes de onda de Bragg nominales se “inscriben” o empalman, a lo largo de una misma fibra óptica, lo cual permite que un único canal del interrogador óptico detecte varias respuestas espectrales de manera simultánea, tal como se muestra en la interfaz de visualización de ENLIGHT. Con esto se puede maximizar el uso de los canales disponibles en el interrogador óptico, que cuenta con 4 canales.

En este proyecto, se implementó un esquema de multiplexación WDM con un total de 6 sensores FBG, organizados de la siguiente manera:

- Canal 1 del interrogador óptico:
 - Sensor FBG 1 con $\lambda_B = 1525$ nm
 - Sensor FBG 2 con $\lambda_B = 1535$ nm
 - Sensor FBG 3 con $\lambda_B = 1565$ nm
- Canal 2 del interrogador óptico:
 - Sensor FBG 4 con $\lambda_B = 1530$ nm
 - Sensor FBG 5 con $\lambda_B = 1560$ nm
 - Sensor FBG 6 con $\lambda_B = 1570$ nm

Se deja un umbral de distancia entre sensores de 10 nm mínimo. Esta disposición fue diseñada así, para evitar el solapamiento espectral entre los picos de reflexión de cada sensor. Si los picos reflejados por dos o más sensores FBG están demasiado próximos entre sí, el interrogador podría registrar un espectro solapado con el otro, impidiendo la correcta lectura de estos.

Para conectar los sensores entre sí, en cada canal del interrogador, se utilizaron adaptadores FC/APC-FC/APC single mode simplex de tipo metálico, los cuales permiten el interconectado de los sensores con baja pérdida de potencia entre segmentos de fibra óptica monomodo. Antes de realizar estas conexiones, se limpian las puntas de los conectores para minimizar las pérdidas de potencia también.

Además, al final de ambas fibras se agregaron atenuadores ópticos de 5 dB para minimizar reflexiones indeseadas que se dan cuando la fibra termina con una tapa o directamente al aire. Estas reflexiones podrían aumentar el ruido espectral por lo que se usan estos atenuadores para la señal restante que en verdad no se analiza y por tanto, se disipa.

3.5. Calefactor PTC

En esta investigación, se utiliza un único calefactor PTC para elevar la temperatura de una placa de cobre bidimensional de 50 cm × 45 cm. El calefactor utilizado es una placa PTC con disipador de aluminio integrado, de dimensiones 70 mm × 70 mm, y se encuentra adherido al centro de la cara superior de la placa de cobre, como se ve en la figura 16, mediante pasta térmica GD460, con el fin de mejorar la transferencia de calor. Esta disposición facilita el análisis de la propagación térmica radial, condición ideal para modelar la transferencia de calor en una superficie isotrópica con conducción dominante como aparenta ser la placa de cobre. Se puede inducir que la distribución de calor sobre la mesa térmica de cobre no es completamente homogénea dado ciertos factores tales como el uso reiterado de la misma, que ha provocado la ya mencionada deformación cóncava en la placa, también las trazas de pasta térmica que han quedado sobre la placa tras pruebas anteriores, e incluso la luz que le llega al sensor.

Según las especificaciones del proveedor, las características principales del calefactor PTC son:

- Potencia nominal: 300 W
- Temperatura de operación constante: 260 °C ± 10 %
- Tiempo de calentamiento: 20 s a 30 s hasta alcanzar 250 °C
- Construcción: núcleo cerámico PTC con aletas disipadoras de aluminio
- Aislamiento: Grado IP20
- Calefacción: de doble cara

Cabe señalar que los valores de temperatura indicados por el fabricante corresponden a condiciones sin carga térmica significativa. En las condiciones experimentales del laboratorio, se ha verificado que la cara superior del disipador de aluminio alcanza una temperatura aproximada de 190 °C tras 1,5 min de funcionamiento continuo, en contacto con la placa de cobre.

Durante las pruebas, se ejecutan ciclos térmicos controlados en los que el calefactor se energiza durante un periodo de tiempo hasta que los sensores FBG registran una temperatura máxima estable. Posteriormente, se interrumpe el suministro eléctrico al calefactor y se registra el proceso de enfriamiento natural de la placa hasta que los sensores alcanzan nuevamente la temperatura ambiente (que pudo haber cambiado desde el inicio hasta el final de la medición).

El control de potencia del calefactor PTC no forma parte directa de esta investigación, sino que es abordado de manera complementaria en la investigación paralela realizada por la estudiante Paula Cartagena [13]. En su estudio, se analiza el control térmico del calefactor en función de la retroalimentación obtenida desde los sensores distribuidos sobre la placa.

3.6. Calibraciones en laboratorio

El uso de una rejilla de Bragg (FBG) como sensor de temperatura requiere conocer su sensibilidad a cambios térmicos, expresada mediante el coeficiente k_T . En ausencia de deformaciones mecánicas (strain), la relación entre el cambio de longitud de onda de Bragg y el cambio de temperatura puede modelarse linealmente como:

$$\Delta\lambda = k_T \Delta T$$

Hay que tener en cuenta que el comportamiento del sensor FBG es lineal en un rango acotado de temperatura. De hecho, a partir de temperaturas superiores a 100 o 150 °C el comportamiento deja de ser lineal y comienza a curvarse. Esto no impide la calibración lineal en esta aplicación, ya que el rango utilizado no supera este umbral. Los sensores FBG utilizados en esta investigación no cuentan con una calibración de fábrica. La fibra utilizada (acrilato SMF-28e) permite operar sin degradación de la fibra, en un rango de -60°C a 85°C. Para calibrar los sensores FBG se realiza la medición de la longitud de onda de Bragg a través del propio sensor y el equipo interrogador, y en simultáneo se efectúa la medición de la temperatura en la que se encuentra el sensor.

El esquema planteado en la figura 25 para la calibración de los sensores FBG contempla el uso de una fuente de vidrio resistente a altas temperaturas, en la que se sumergen las 6 FBGs a calibrar, multiplexados en longitud de onda y conectados mediante conectores FC/APC-FC/APC. Una vez hecho esto, se llena la fuente de agua hirviendo y se intenta homogeneizar la temperatura en esta. Luego, se realizan la mediciones simultáneas de longitud de onda de Bragg y temperatura asociada registrando ambos valores.

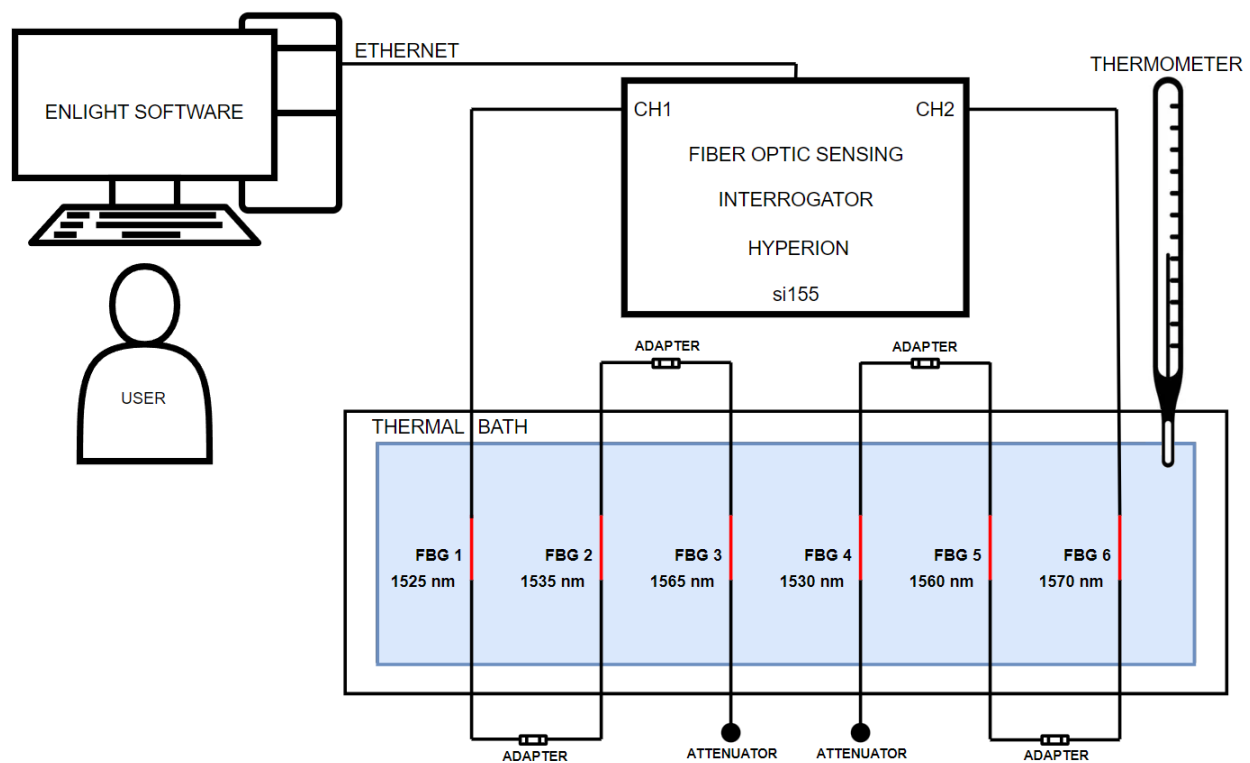


Figura 25: Esquema de calibración planteado.

Se llevaron a cabo tres experimentos de calibración en laboratorio. Solo se considera válido el tercer experimento, debido a su mayor exactitud, mejor rango obtenido y mejora en las condiciones experimentales.

3.6.1. Calibración experimental

Para la calibración, se utiliza un termómetro de sonda de alta precisión ThermoPro TP-01H ($\pm 0,5^\circ\text{C}$). Se cubre el rango de 20°C a 60°C en intervalos de 5°C . En cada punto, se adquirieron mediante el interrogador óptico, 10 muestras en un segundo de los valores de longitud de onda de Bragg para cada sensor FBG, a la par que se registran las temperaturas en el mismo instante con el termómetro de referencia.

A diferencia de las anteriores calibraciones, se redujo de 100 muestras a 10 para reducir la influencia de fluctuaciones.

Los datos son procesados en MATLAB: El primer código es `Promedios_Bragg.m`, que se utiliza para obtener los promedios de longitud de onda de Bragg por temperatura para cada sensor y guardarlos en un archivo .csv. El segundo script es `Resultados_Ajuste_FBG.m`, que procesa el archivo generado por el script anterior y es capaz de realizar el ajuste lineal de cada sensor, y también calcula los coeficientes de determinación R^2 y error cuadrático medio RMSE y genera los gráficos de temperatura vs. λ_B individuales por sensor guardándolos junto a los coeficientes en una carpeta de resultados.

3.6.2. Modelo de calibración lineal

Se aplicó un modelo de regresión lineal para relacionar la longitud de onda de Bragg con la temperatura. Este modelo, ampliamente utilizado en sensores FBG bajo condiciones de tensión constante, se basa en la ecuación:

$$T = b \cdot \lambda_B + a$$

donde:

- λ_B es la longitud de onda de Bragg medida,
- T es la temperatura en grados Celsius,
- a es el término independiente (intercepto),
- b es la pendiente del ajuste, que representa la sensibilidad térmica del sensor en $^\circ\text{C}/\text{nm}$.

El ajuste se aplicó sobre los datos promedio por punto y por sensor, en el rango calibrado de 20°C a 60°C . El cuadro 2 resume los coeficientes obtenidos para cada uno de los seis sensores FBG utilizados, junto con el coeficiente de determinación R^2 y el error cuadrático medio (RMSE) como medidas del desempeño del modelo.

FBG	Pendiente (b)	Intercepto (a)	R^2	RMSE [$^\circ\text{C}$]
1	119.64	-182407.69	0.9984	0.51
2	121.98	-187195.36	0.9976	0.62
3	118.17	-184899.66	0.9981	0.58
4	124.62	-190626.67	0.9967	0.72
5	116.98	-182454.94	0.9923	1.04
6	116.05	-182167.83	0.9990	0.37

Cuadro 2: Parámetros de calibración experimental con modelo lineal para los sensores FBG.

El alto valor de R^2 en todos los sensores indica una fuerte correlación entre la longitud de onda medida y la temperatura, lo que valida la aplicabilidad del modelo lineal dentro del rango experimental. El RMSE promedio de todos los sensores para este modelo fue de aproximadamente 0.64°C . Las pendientes obtenidas

(valores de sensibilidad térmica) se encuentran entre 116 y 125 °C/nm, lo que es coherente con valores reportados en la literatura para sensores FBG en fibra SMF-28.

Se obtiene una resolución térmica promedio de la red FBG a partir del cálculo de una sensibilidad térmica promedio de los sensores:

$$T = b \cdot \lambda_B + a \Leftrightarrow \lambda_B = \frac{1}{b}T - \frac{a}{b}$$

$$\lambda_B = a + K_T T$$

$$\Rightarrow K_T = \frac{1}{b}$$

$$\bar{b} \approx 119,573 \Rightarrow \bar{K}_T = \frac{1}{119,573} \approx 8,36 \left[\frac{pm}{^\circ C} \right]$$

$$\text{Resolución térmica promedio del sistema} = \frac{\text{Resolución del interrogador}}{\bar{K}_T} = \frac{1}{8,36} \approx 0,12 \text{ } ^\circ C$$

Dado que la sensibilidad térmica promedio de la red de sensores fue de $k_T = 8,36 \text{ pm}/^\circ C$, la resolución del sistema traducida a temperatura es de $0.12^\circ C$. Esto significa que cambios de temperatura menores a ese umbral no serán distinguibles por el sistema, aunque sí podrían estar ocurriendo.

Algo a tener en cuenta es la distinción entre precisión y exactitud, esto se puede apreciar visualmente en la figura 26 [45]. Mientras que la precisión indica qué tan repetibles son los datos, la exactitud indica qué tan cerca está el valor nuevo obtenido, del valor real.

Los valores de R^2 obtenidos indican una alta precisión, pero no garantizan exactitud. La exactitud está dada por el instrumento de referencia utilizado en el proceso de calibración.

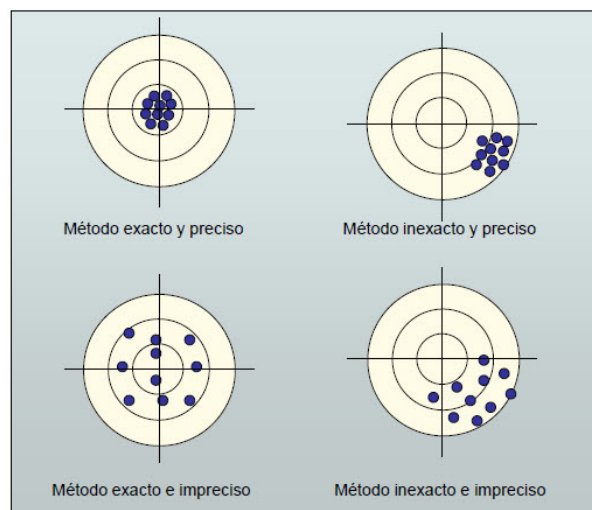


Figura 26: Distinción entre precisión y exactitud.

También hay que distinguir entre resolución y error. La resolución hace referencia al cambio más pequeño en la variable medida que el sistema de adquisición es capaz de detectar. En este caso, la resolución espectral del interrogador óptico es de 1pm, lo que implica que ese es el cambio mínimo detectable en longitud de onda.

El error es la diferencia entre el valor medido y el valor real o de referencia, e incluye tanto sesgos sistemáticos como errores aleatorios. En esta sección se obtuvo el RMSE de cada sensor lo que permite cuantificar la diferencia entre el valor real obtenido en la calibración con el valor que predice el modelo ajustado a la curva de calibración general.

4. Interfaz de Monitoreo

Se desarrolla una interfaz gráfica interactiva en MATLAB para el monitoreo en tiempo real de la temperatura de la placa bidimensional mediante sensores FBG. Esta herramienta, denominada `DashboardFBG.m`, ofrece una visualización más completa, centralizada y comprensible en comparación con el software comercial ENLIGHT, permitiendo al usuario final observar toda la información relevante desde una única ventana.

La interfaz cuenta con los siguientes elementos para cada uno de los seis sensores FBG:

- Un gauge tipo termómetro que muestra el valor instantáneo de temperatura.
- Un valor numérico actualizado en tiempo real.
- Un gráfico histórico de temperatura vs. tiempo.

Además, se incluye un mapa de calor en 2D ubicado en el costado derecho de la interfaz. Este gráfico representa la distribución espacial de los sensores sobre la placa, representando las ubicaciones físicas reales. Cada sensor es representado como un punto que varía de color según su temperatura, siguiendo una escala que va desde azul (10°C) a rojo (70°C), lo que corresponde al rango de temperaturas que alcanzan los sensores FBG durante el ciclo térmico. Cabe recordar que la fibra óptica utilizada tiene un límite máximo de operación de 85°C .

El panel de control superior permite al usuario iniciar o detener la adquisición de datos mediante botones claramente identificados (verde para iniciar y rojo para detener). Adicionalmente, se incorporan las siguientes funcionalidades:

- Un selector de duración para definir el tiempo total de adquisición en minutos.
- Una etiqueta de cuenta regresiva que indica el tiempo restante durante la adquisición en curso.

Una vez finalizada la adquisición, la interfaz guarda automáticamente los siguientes archivos:

- Un archivo `.png` con todos los gráficos de temperatura vs. tiempo de los seis sensores.
- Un archivo `.csv` y un archivo `.mat` que contienen los valores de temperatura histórica registrados durante la sesión.

La adquisición se realiza mediante la función `hACQGetPeaks`, conectándose al interrogador óptico HYPERION si155. Los sensores están distribuidos en dos canales: FBG 1–3 en el canal 1 y FBG 4–6 en el canal 2. La conversión de longitud de onda a temperatura se realiza en tiempo real mediante una matriz de calibración en el propio script.

Actualmente, los datos se almacenan localmente en la misma carpeta donde reside el archivo `DashboardFBG.m`. El tiempo de adquisición puede ser ajustado por el usuario.

A continuación, se presenta una secuencia de capturas de pantalla del dashboard durante una sesión de monitoreo real. Estas ilustran la evolución temporal de la temperatura en cada sensor y los cambios de color en el mapa de calor a medida que se desarrolla el ciclo térmico:

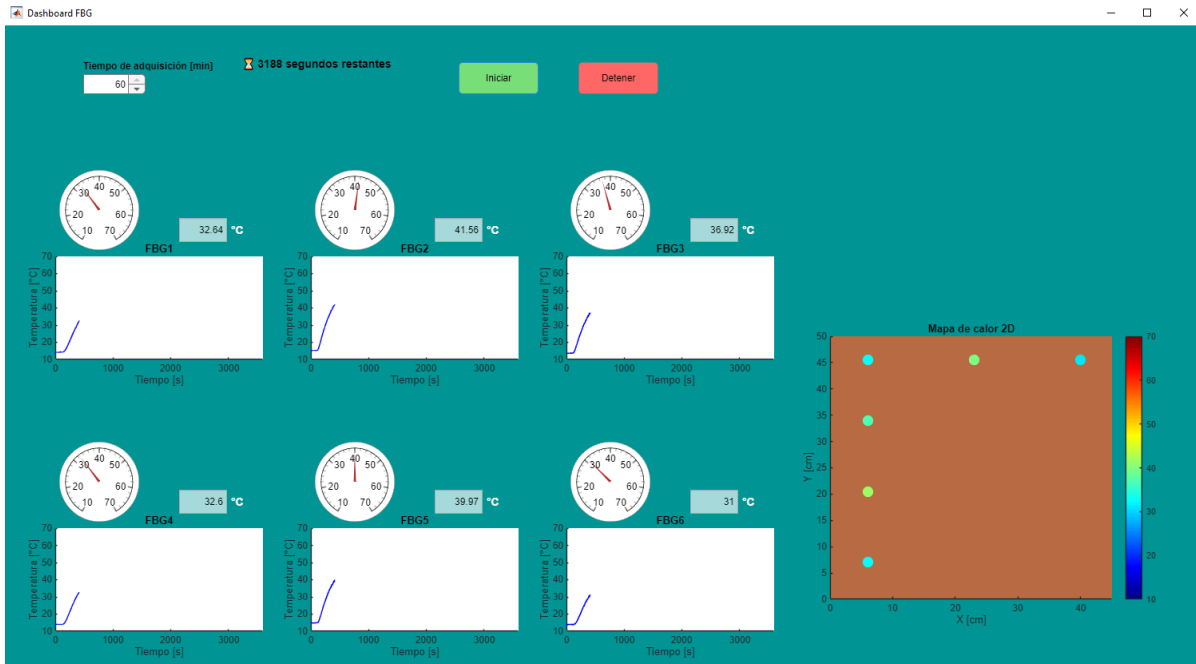


Figura 27: Etapa de calentamiento.

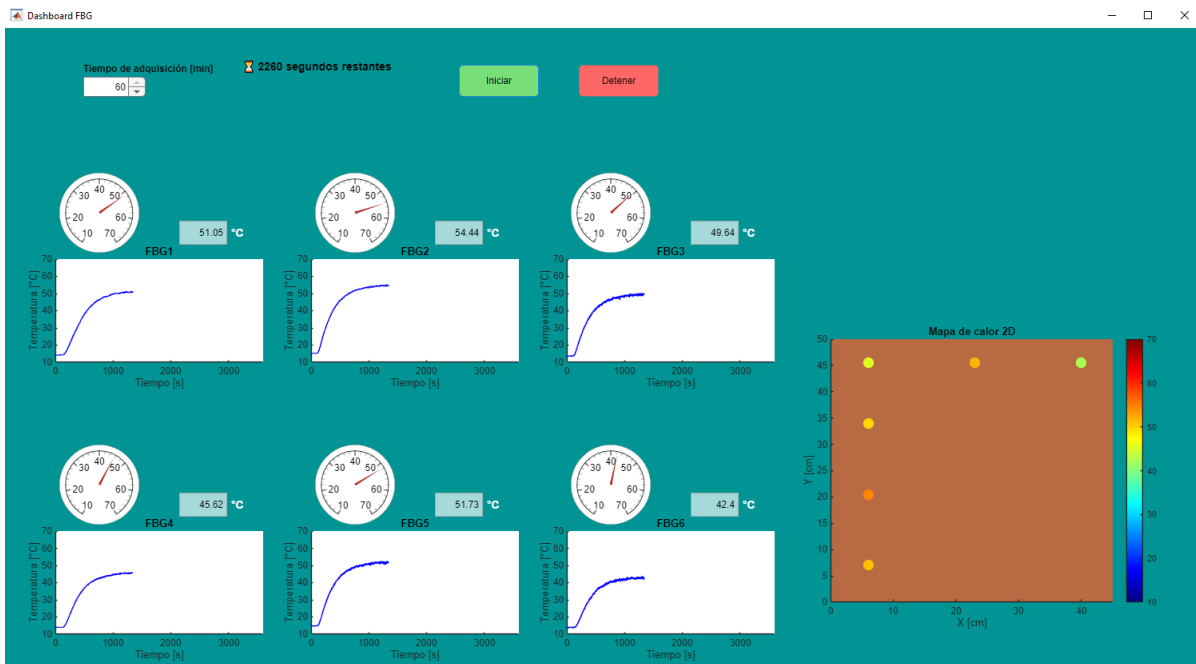


Figura 28: Temperatura máxima estabilizada.

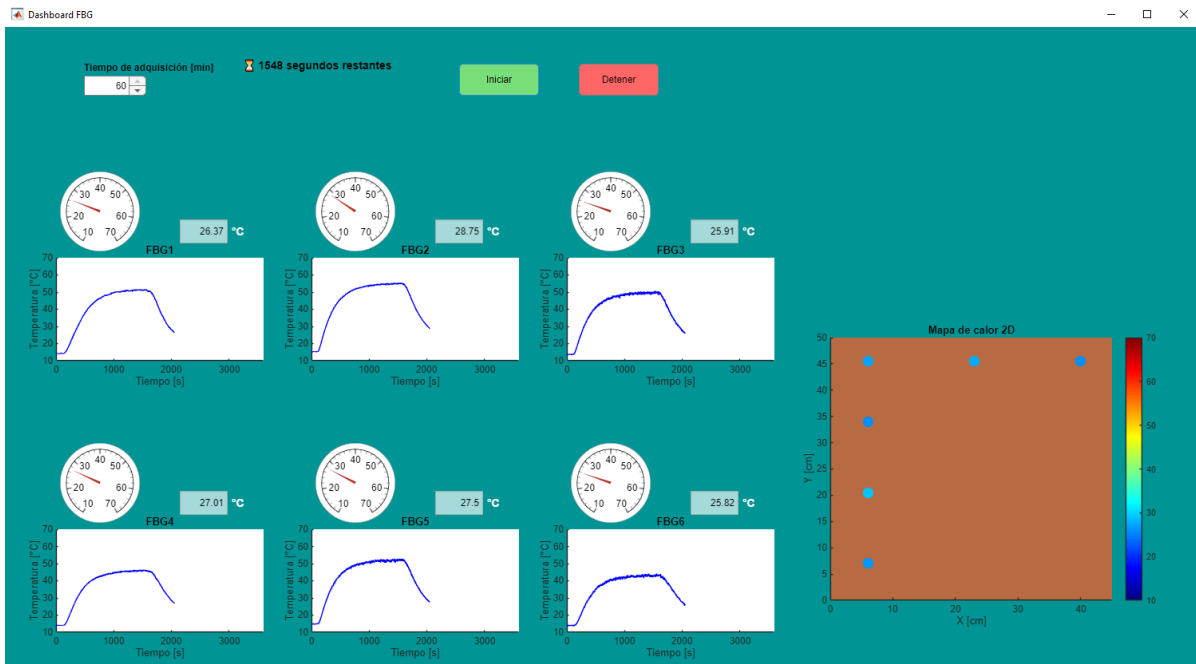


Figura 29: Etapa de enfriamiento.

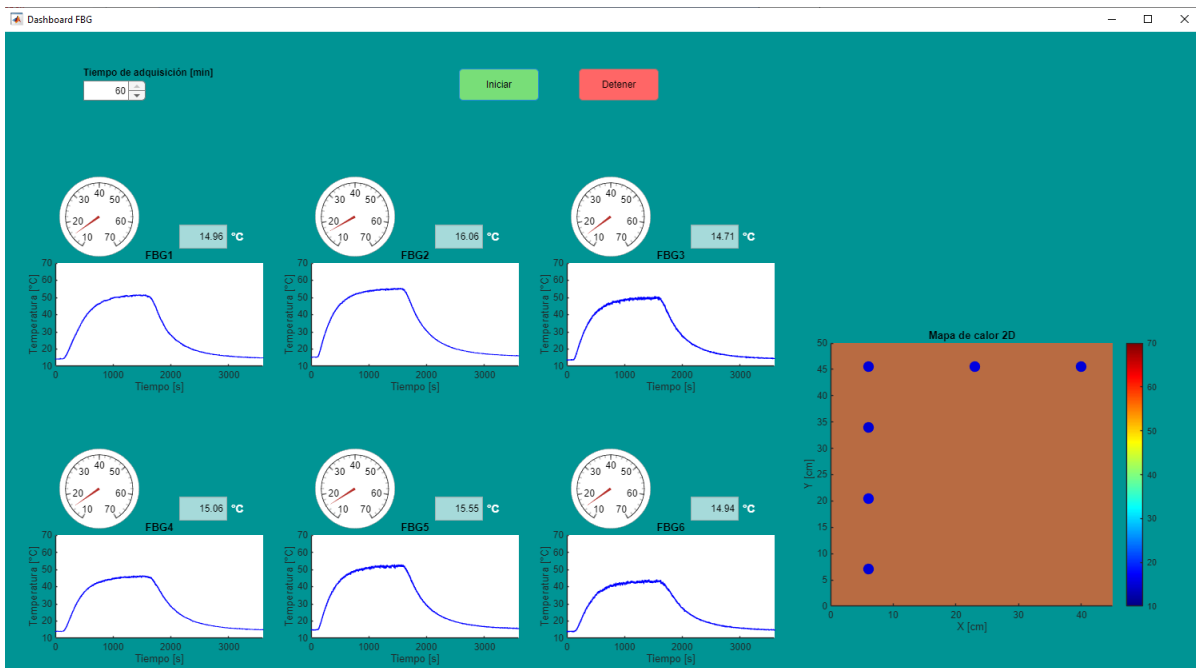


Figura 30: Temperatura mínima estabilizada (Temperatura ambiente).

4.1. Integración con modelo teórico de distribución de calor

Las mediciones puntuales de temperatura obtenidas mediante los sensores FBG instalados permiten conocer el comportamiento térmico local en regiones específicas de la placa. Sin embargo, estas mediciones por sí solas no proporcionan un mapa térmico completo de la superficie, sino que conforman una red semi-distribuida capaz de registrar temperaturas en puntos discretos. Este carácter semi-distribuido constituye

una de las principales limitaciones y, a la vez, una motivación para integrar los datos experimentales con un modelo teórico que permita extrapolar la información térmica hacia toda la superficie de la placa.

Con este propósito, se implementó la integración del sistema de adquisición en tiempo real con un modelo de distribución de calor desarrollado en la investigación paralela [13]. Dicho modelo, basado en la formulación del Método de Elementos Finitos (FEM), permite estimar la distribución de temperatura sobre la placa a partir de un conjunto reducido de sensores, obteniendo un mapa térmico continuo cuya precisión depende de la fidelidad del modelo físico. Esta integración persigue demostrar que, si bien los sensores FBG no son adecuados para mediciones completamente distribuidas, su disposición estratégica en puntos seleccionados permite conformar una red semi-distribuida complementada por un modelo de difusión de calor capaz de estimar el comportamiento térmico global.

El modelo FEM considera la ecuación de difusión de calor transitoria en dos dimensiones, resolviéndose numéricamente en MATLAB mediante funciones lineales sobre una malla triangular. Este enfoque permite representar la evolución temporal y espacial de la temperatura en la placa, considerando tanto la fuente térmica generada por el calefactor PTC como las pérdidas por convección al ambiente. A partir de las mediciones de los sensores FBG en posiciones discretas, el modelo ajusta un campo de temperatura continuo que representa la distribución estimada sobre toda la superficie de cobre.

Además del desarrollo teórico descrito en [13], en esta memoria se llevó a cabo la integración práctica entre el modelo FEM y el sistema de adquisición óptica, a través de una interfaz gráfica desarrollada en MATLAB denominada `DashboardFBG2.m`. Esta herramienta permite visualizar en tiempo real las temperaturas medidas por los sensores FBG y, simultáneamente, estimar la distribución térmica completa de la placa, combinando las mediciones experimentales con la simulación teórica.

Para realizar dicha estimación, se desarrolló el script `simularDistribucionFBG.m`, el cual toma como entrada las temperaturas actuales registradas por los seis sensores FBG y aplica una interpolación combinada: un ajuste de plano general y una superposición de un perfil térmico localizado que simula el efecto del calefactor PTC. Este perfil se modeló como una gaussiana bidimensional centrada en la posición del calefactor (ubicado en el centro geométrico de la placa), con una extensión activa de $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ y un crecimiento térmico lineal hasta una temperatura máxima de $190\text{ }^\circ\text{C}$ durante los primeros 90 segundos de adquisición.

La malla triangular utilizada fue generada previamente mediante el script `mesh_triang.m`, y se mantiene fija durante la simulación en línea para optimizar el rendimiento computacional. La visualización del mapa térmico estimado se actualiza con cada adquisición proveniente del interrogador óptico Luna HYPERION si155, empleando como entrada las longitudes de onda convertidas a temperatura mediante la matriz de calibración correspondiente.

Esta implementación permite representar dinámicamente el campo térmico de la placa, integrando las capacidades de adquisición puntual de los sensores FBG con el poder predictivo del modelo de difusión de calor. De este modo, el sistema no solo muestra las mediciones locales de temperatura, sino también los patrones de propagación térmica y acumulación de calor en regiones sin sensores físicos, ampliando la cobertura espacial del monitoreo y evidenciando el carácter semi-distribuido del sistema.

En la figura 31 se presenta un ejemplo del resultado de esta interpolación utilizando datos experimentales obtenidos de los sensores FBG. Se observa que el modelo captura adecuadamente la región de mayor concentración térmica alrededor del calefactor PTC.

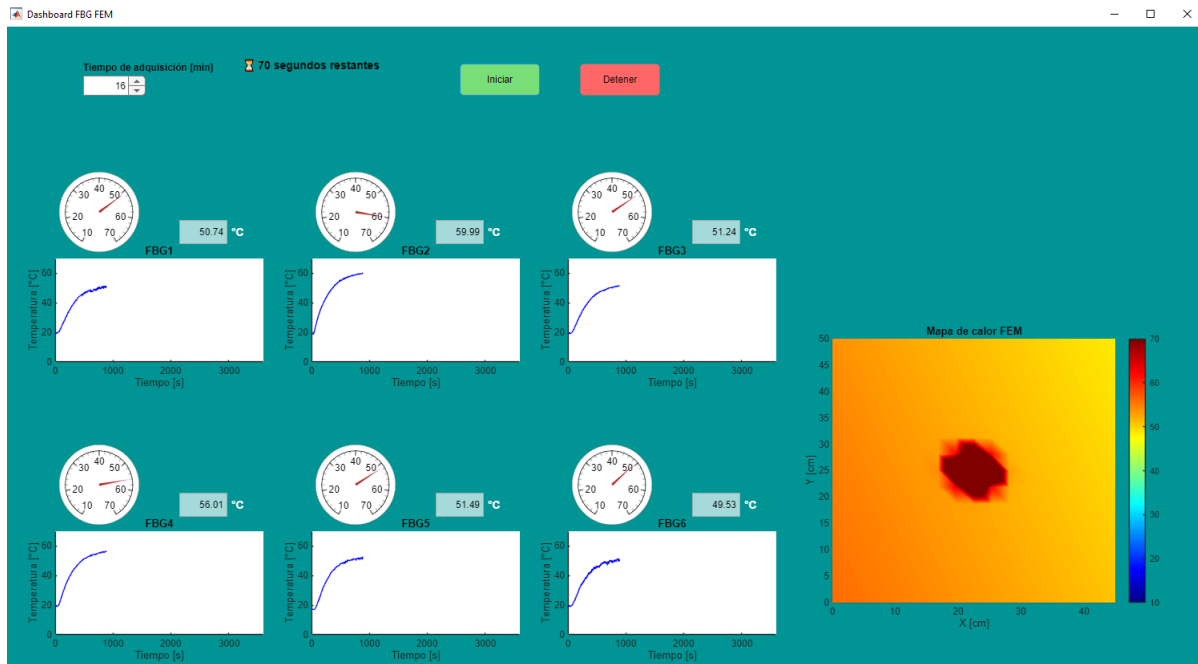


Figura 31: Distribución de temperatura sobre la placa obtenida con el modelo FEM a partir de los datos de sensores FBG.

A partir del mapa térmico 2D generado, se aplica un procesamiento de imagen que consiste en la conversión de la escala de colores a escala de grises y la inversión del contraste, obteniendo una imagen negativa. Este procedimiento facilita la comparación visual con la imagen real de la placa capturada mediante una cámara térmica.

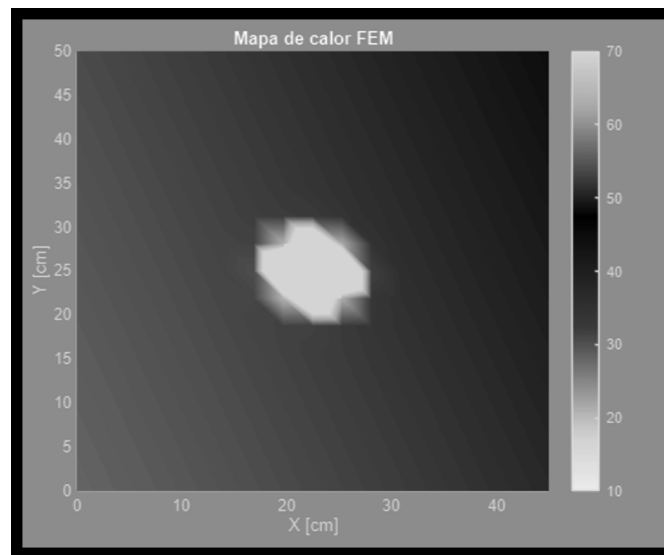


Figura 32: Mapa de calor 2D simulado en escala de grises y negativo.

Para validar visualmente el comportamiento del modelo, la figura 33 muestra una imagen obtenida con una cámara térmica Ceres T 640 durante el ensayo con el calefactor encendido. La comparación entre ambas representaciones evidencia que el modelo reproduce adecuadamente las zonas de mayor temperatura observadas experimentalmente, especialmente en la región central de la placa. En [16] se reporta que el

uso de cámaras térmicas permite ampliar el área de medición, aunque con menor resolución y exactitud respecto a los sensores FBG.

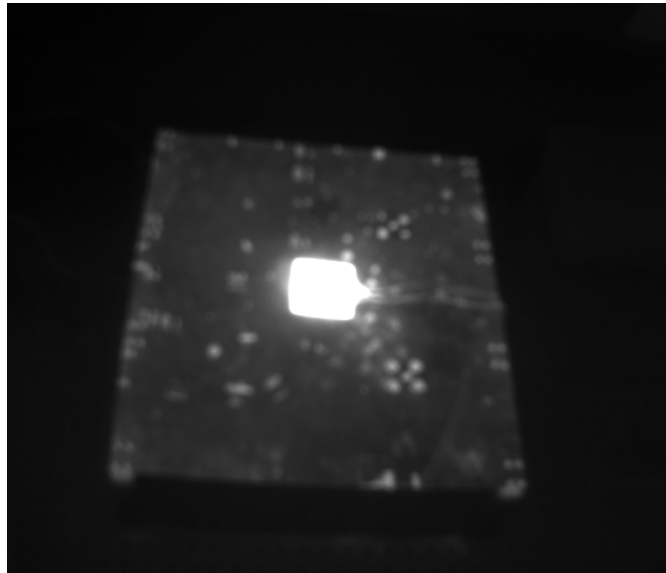


Figura 33: Imagen térmica real de la placa durante el calentamiento con el calefactor PTC.

La imagen térmica fue sometida a un proceso de rectificación de perspectiva para obtener una vista cenital que facilite la comparación con el modelo simulado, además de ser reescalada para mantener la proporcionalidad espacial.

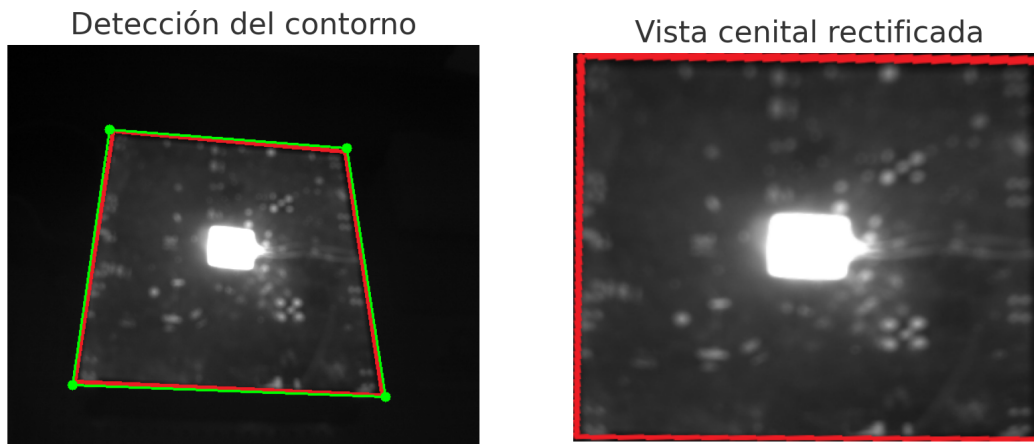
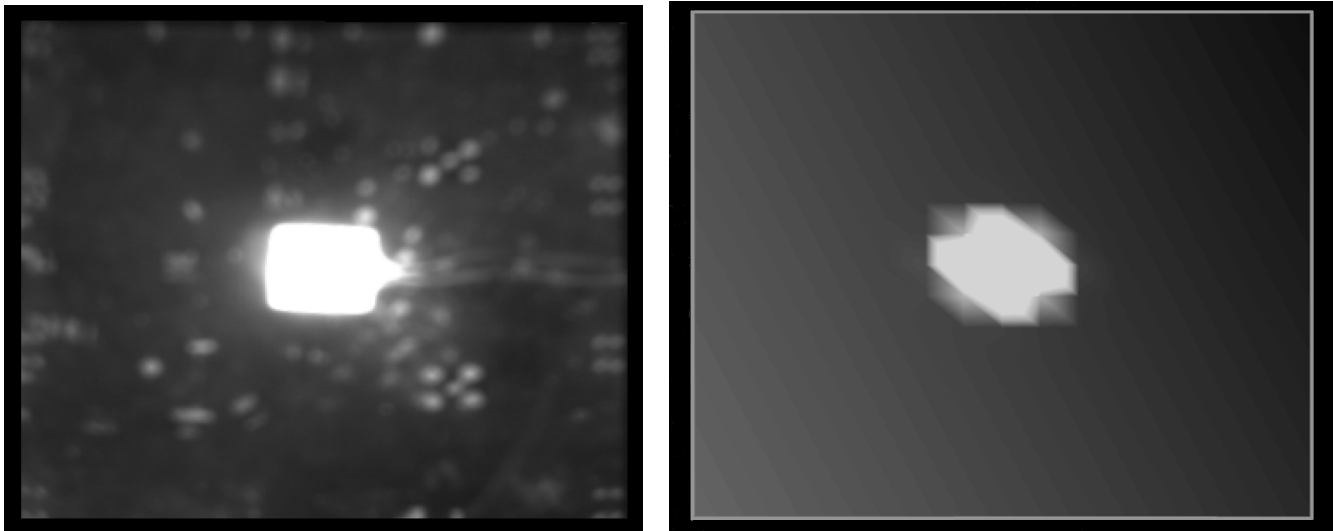


Figura 34: Imagen térmica rectificada a vista cenital.



(a) Imagen térmica Ceres 7 640 (vista cenital)

(b) Mapa de calor FEM en negativo

Figura 35: Comparación visual entre la imagen térmica capturada con la cámara Ceres 7 640 y el mapa de calor FEM simulado, ambas ajustadas a la misma escala.

La figura 35 permite apreciar las similitudes y diferencias entre la imagen térmica real y la simulación. Aunque el modelo reproduce las principales características térmicas del sistema, se identifican factores que limitan la precisión de la estimación al utilizar únicamente la malla triangular para interpolar los datos:

- **Forma del calefactor PTC:** La forma cuadrada del elemento calefactor, claramente observable en la imagen térmica, no se representa con igual fidelidad en el modelo FEM, que tiende a reflejar una simetría asociada a la malla triangular empleada.
- **Desperfectos de la superficie de la placa:** En la imagen térmica se observan puntos de mayor concentración de calor asociados a restos de pasta térmica o adhesivos utilizados en experimentos previos, no considerados en el modelo.
- **Orientación del gradiente térmico:** La interpolación tiende a orientar los gradientes de temperatura hacia la ubicación de los sensores, particularmente hacia el FBG2, que se encuentra más cercano al calefactor, lo que sugiere una dependencia espacial del modelo hacia la distribución de sensores.

Estos resultados confirman que los sensores FBG no están diseñados para mediciones distribuidas, sino para mediciones puntuales de alta precisión que pueden conformar una red semi-distribuida, tal como la implementada en esta investigación. Si bien es posible aproximar una medición distribuida mediante FBG, ello implica un aumento considerable en la complejidad experimental y en el número de sensores requeridos.

Para alcanzar una cobertura más completa, podrían considerarse las siguientes estrategias:

- **Incrementar la cantidad de sensores:** Una red pseudo-distribuida podría lograrse mediante una alta densidad de sensores FBG, ubicados estratégicamente en cada nodo de la malla del modelo FEM, empleando multiplexación WDM o TDM para ampliar el número de canales utilizables.
- **Desarrollo de modelos más precisos:** Una alternativa consiste en mejorar el modelo de simulación, incorporando detalles específicos del sistema físico, como imperfecciones de la superficie o

distribuciones de material no homogéneas. Sin embargo, esto requeriría un conocimiento exhaustivo del sistema, lo que rara vez es factible en aplicaciones reales.

En consecuencia, para aplicaciones que demandan medición distribuida, resulta más apropiado el uso de sensores de fibra óptica del tipo DTS (*Distributed Temperature Sensors*). Estos sensores se basan en la medición de la retrodispersión de la luz láser a lo largo de toda la fibra, aprovechando fenómenos como la dispersión Raman o Brillouin, lo que permite obtener un perfil continuo de temperatura con resoluciones espaciales del orden de metros y rangos de hasta decenas de kilómetros. Aunque su resolución espacial es inferior a la de los FBG, su carácter verdaderamente distribuido los hace especialmente adecuados para el monitoreo térmico de grandes infraestructuras, como oleoductos, cables de potencia o estructuras civiles de gran escala.

5. Resultados Experimentales

5.1. Ciclo térmico

Para la obtención de resultados experimentales, se ejecuta un ciclo térmico controlado sobre la placa térmica que contiene los sensores FBG. Con esto se busca exponer al sistema a los eventos de calentamiento y enfriamiento de la placa, formando dos etapas:

1. Etapa de calentamiento: Después de 3 minutos de iniciar la adquisición de datos, se enciende el calefactor PTC ubicado en el centro de la placa. Este elemento alcanza una temperatura de aproximadamente 190°C en un tiempo estimado de 1 minuto y medio. El calefactor se mantiene encendido durante 25 minutos, tiempo suficiente para que todos los sensores alcancen su temperatura máxima en condiciones de equilibrio térmico.
2. Etapa de enfriamiento: Transcurridos los 25 minutos, se apaga el calefactor PTC. El sistema se empieza a enfriar de forma natural, regresando progresivamente a la temperatura ambiente. Esta etapa se diseña con una duración de 32 minutos, al cabo de los cuales todos los sensores alcanzan su temperatura mínima dentro del diseño experimental.

Este ciclo térmico dura en total 1 hora y genera las condiciones a las que se ve expuesto el sistema bajo estudio, permitiendo analizar su estabilidad y su dinámica térmica.

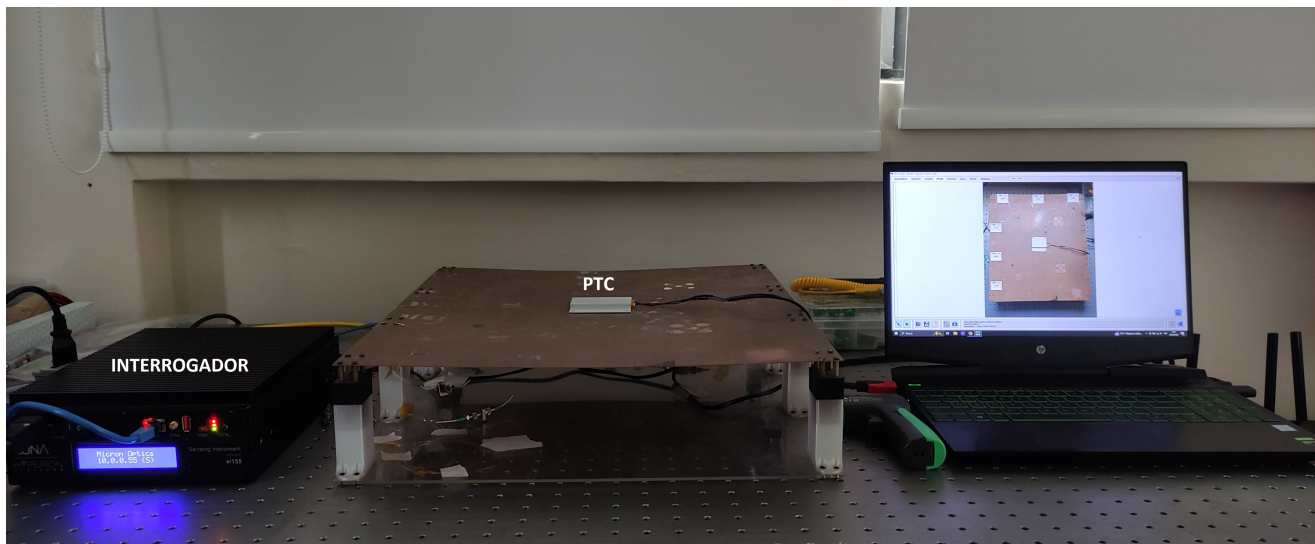


Figura 36: Esquema físico del montaje experimental en laboratorio para la aplicación del ciclo térmico.

5.2. Validación del sensor FBG

Para validar el sensor FBG como sensor de temperatura confiable, se aplicó su curva de calibración junto con el análisis de incertidumbre asociado. Sin embargo, la validación final requiere comparar el comportamiento del sensor FBG frente a un sensor de referencia tradicional.

En otras investigaciones se suelen comparar los resultados obtenidos mediante el sensor FBG, con sensores eléctricos usados comúnmente para medir temperatura. Estos pueden ser termocuplas, termistores o RTDs como el Pt100. En [46], se realizan mediciones de temperatura con sensores FBG sobre una nave espacial y se utiliza un termistor para realizar la comparación de la medición obtenida. El investigador obtiene una gran similitud entre ambas mediciones, pero destaca un fenómeno que denomina como “saltos” de temperatura, que presenta la medición del termistor, llegando a fluctuaciones de amplitud de

$\pm 5.92^{\circ}\text{C}$. En la misma investigación, esto se asocia a cambios instantáneos de voltaje causados por la fuente de alimentación de los paneles solares presentes en la nave, cuando cambia la orientación de estos. El termistor no es inmune a interferencias electromagnéticas, lo que causa picos/cambios abruptos en la señal eléctrica a medir. Esto a su vez, puede generar un error de arrastre hacia el sistema de control de temperatura, afectando a la operación adecuada de la nave. El autor destaca esta gran ventaja del sensor FBG (inmunidad a interferencias electromagnéticas o por sus siglas en inglés, EMI), pero a su vez, comenta que el equipo interrogador óptico tiene un peso excesivo para aplicaciones espaciales.

En esta investigación, se utilizó una termocupla tipo K diseñada específicamente para contacto con superficies planas (modelo F4260017), la cual presenta una capacidad de medición de hasta 400°C , más que suficiente para los requerimientos del experimento en cuestión.

Para adquirir los datos de la termocupla tipo K, se utiliza un sistema de lectura compuesto por los siguientes elementos:

- Arduino UNO: actúa como plataforma de adquisición digital, recibiendo las mediciones del módulo de control térmico y enviándolas al computador mediante comunicación serial por el puerto COM3.
- Módulo MAX6675: un convertidor análogo-digital específico para termocuplas tipo K. Tiene una resolución de 0.25°C y la precisión es aceptable para validaciones experimentales. La comunicación con Arduino se realiza vía protocolo SPI.

En cuanto a la resolución del MAX6675, resulta inferior a la del equipo interrogador que tiene una resolución espectral de 1 pm y como el coeficiente de temperatura o sensibilidad térmica (k_T) promedio obtenida en la red de seis sensores fue de $8.3\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, se traduce en una resolución en temperatura de 0.12°C aproximadamente. Es decir, las mediciones obtenidas con los sensores FBG calibrados, tienen el doble de resolución que las conseguidas con la termocupla. Esto hace que los sensores FBG sean mejores para detectar variaciones rápidas de temperatura o en rangos cortos. De cualquier manera, una menor resolución no va a afectar a la validación, ya que se está observando el comportamiento general de ambos sensores al ejecutar el ciclo térmico.

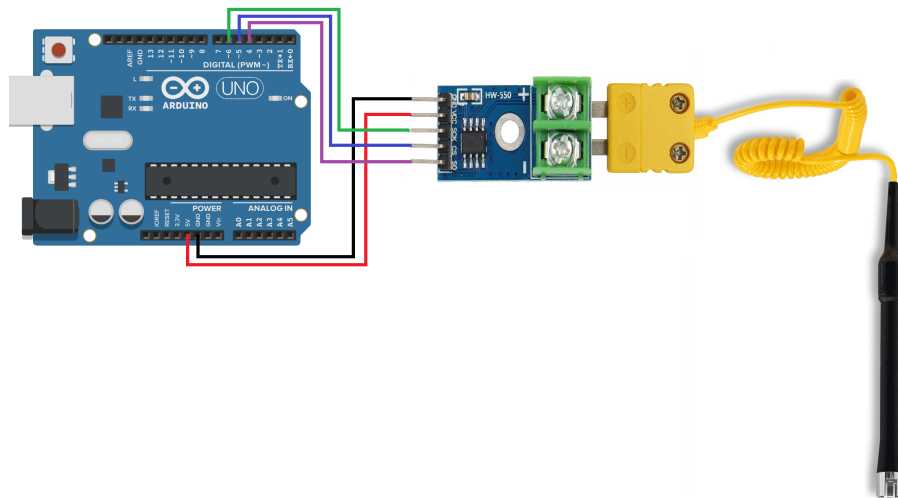


Figura 37: Esquema de conexiones Arduino/Módulo MAX6675/Termocupla tipo K.

En la figura 37, se detallan las conexiones empleadas: el módulo MAX6675 se alimenta desde el pin 5V del Arduino (VCC) y se conecta a tierra (GND). La comunicación SPI se establece mediante los pines digitales 6 (SCK), 5 (CS) y 4 (SO) del Arduino. Por otro lado, la termocupla se conecta directamente al módulo MAX6675 mediante sus dos terminales: el terminal positivo al pin marcado como +, y el negativo al pin marcado como -.

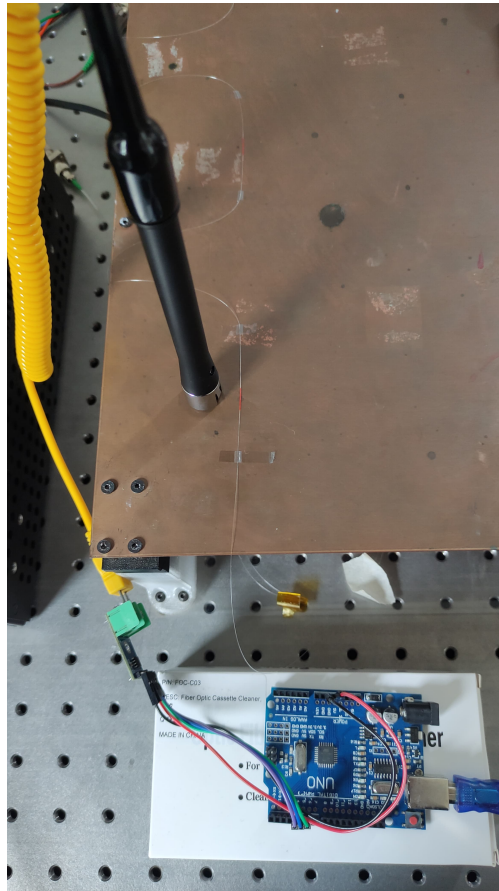


Figura 38: Medición simultánea entre sensor FBG y termocupla.

Durante el experimento, la adquisición de datos se realiza de forma sincronizada para ambos sensores:

- El interrogador óptico Luna HYPERION si155 recoge las longitudes de onda reflejadas por el sensor FBG. Estos datos son almacenados directamente desde el software ENLIGHT en un archivo `.txt`.
- En paralelo, se ejecuta el script `LeerTermocuplaMAX6675.m` en MATLAB, que lee los datos transmitidos por el Arduino a través del puerto serie, almacena las mediciones de temperatura en tiempo real, y registra la hora asociada a cada muestra.

Posteriormente, se ejecuta el script `CompararFBGvsTermocupla.m`, el cual:

1. Carga ambos archivos de datos (FBG y termocupla).
2. Sincroniza los ejes temporales.
3. Interpola y alinea las curvas para su comparación.
4. Genera gráficos de temperatura en función del tiempo.

Se realizan dos ejecuciones del ciclo térmico descrito anteriormente. Las figuras 39 y 40 presentan las curvas obtenidas con el sensor FBG 6 y la termocupla tipo K.

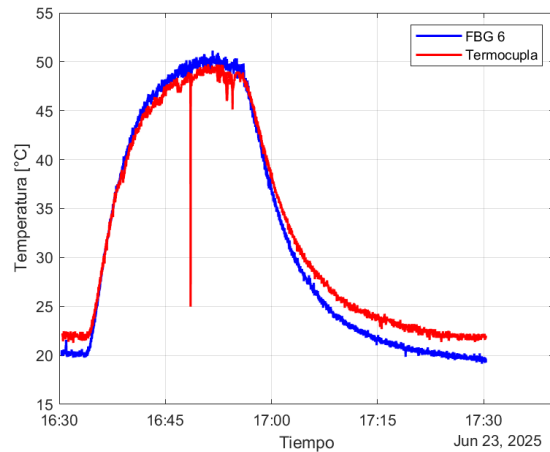


Figura 39: Primera comparación entre sensor FBG y termocupla tipo K.

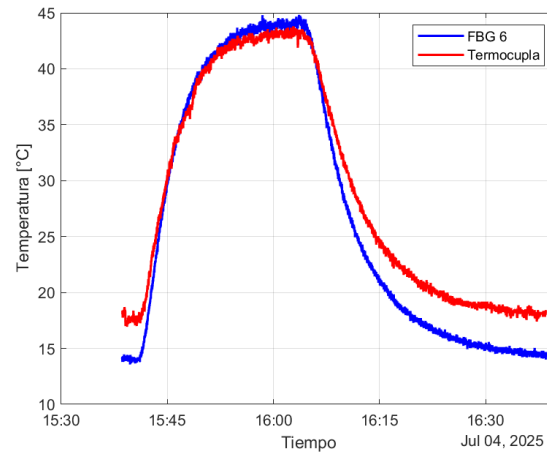


Figura 40: Segunda comparación entre sensor FBG y termocupla tipo K.

En la primera comparación se puede ver que hay un dato completamente anómalo siendo un outlier producido por que la termocupla estuvo fuera de contacto con la placa en ese momento.

Se observa una concordancia general en la forma de las curvas en las fases de calentamiento y enfriamiento. La temperatura máxima alcanzada es similar en ambos sensores. La principal diferencia radica en la temperatura mínima alcanzada tanto al inicio como al final del proceso de enfriamiento: la termocupla muestra un valor entre 3–4°C superior al otorgado por el sensor FBG.

Además de estas diferencias, se destacan los siguientes puntos:

- Tiempos de respuesta: ambos sensores responden de forma rápida ante los cambios térmicos, pero el sensor FBG tiende a reflejar los cambios más abruptamente durante el enfriamiento.
- Linealidad del sensor: las termocuplas tienen un comportamiento no lineal a lo largo de todo su rango, mientras que los sensores FBG presentan una mayor linealidad en el rango reducido de medición.

En base en los resultados experimentales, se valida el uso del sensor FBG 6 como sensor de temperatura en el rango de operación empleado. Su comportamiento es consistente con el de la termocupla tipo K, y además presenta ventajas adicionales como mayor linealidad, posibilidad de multiplexación y compatibilidad con aplicaciones de alta resolución espacial.

5.3. Análisis de resultados

Tras validar el uso de los sensores FBG como instrumentos confiables de medición de temperatura, se caracteriza su dinámica térmica individual durante la ejecución del ciclo térmico. Esta caracterización se realiza mediante el script `EstimarDinamicaSensoresFBG.m` desarrollado en MATLAB, el cual procesa los datos de temperatura almacenados en archivos `.txt` exportados desde el software ENLIGHT.

Para el análisis, se estudia la curva de temperatura correspondiente a cada sensor y se determinan los tiempos asociados a los umbrales del 10 % (t_{10}) y 90 % (t_{90}) del cambio total de temperatura. A partir de estos puntos se calculan los siguientes parámetros:

- El tiempo de subida $T_r = t_{90} - t_{10}$
- La constante de tiempo $\tau = \frac{T_r}{2,2}$

- El retardo de tiempo $L = t_{10}$

Dado que cada sensor FBG se ubica a distinta distancia del calefactor PTC central, se espera una dinámica distinta en cada uno, por lo que se identifica un modelo de planta único para cada sensor.

El cuadro 3 presenta los valores de los tiempos característicos, constante de tiempo, retardo, tiempo normalizado τ_N y clasificación dinámica por sensor según la métrica propuesta en el marco teórico.

Sensor	t_{10} [s]	t_{90} [s]	T_r [s]	τ [s]	L [s]	τ_N	Clasificación
FBG1	301.4	879.4	578.0	262.7	121.4	0.684	Balanceado
FBG2	251.1	774.2	523.2	237.8	71.1	0.770	Delay-dominante
FBG3	253.2	823.6	570.5	259.3	73.2	0.780	Delay-dominante
FBG4	288.5	848.3	559.8	254.5	108.5	0.701	Balanceado
FBG5	254.3	814.0	559.7	254.4	74.3	0.774	Delay-dominante
FBG6	286.4	860.1	573.8	260.8	106.4	0.710	Balanceado

Cuadro 3: Parámetros dinámicos y clasificación de los sensores FBG.

Como se observa, los sensores FBG2, FBG3 y FBG5 presentan una dinámica de tipo delay-dominante, con una constante de tiempo menor en proporción al retardo. En cambio, los sensores FBG1, FBG4 y FBG6 muestran un comportamiento más balanceado. Esta diferencia está fuertemente relacionada con la ubicación física de cada sensor en la placa de cobre y su cercanía relativa al calefactor.

La figura 41 muestra las curvas de temperatura de todos los sensores durante un ciclo térmico completo, incluyendo las referencias horizontales para t_{10} , t_{50} y t_{90} .

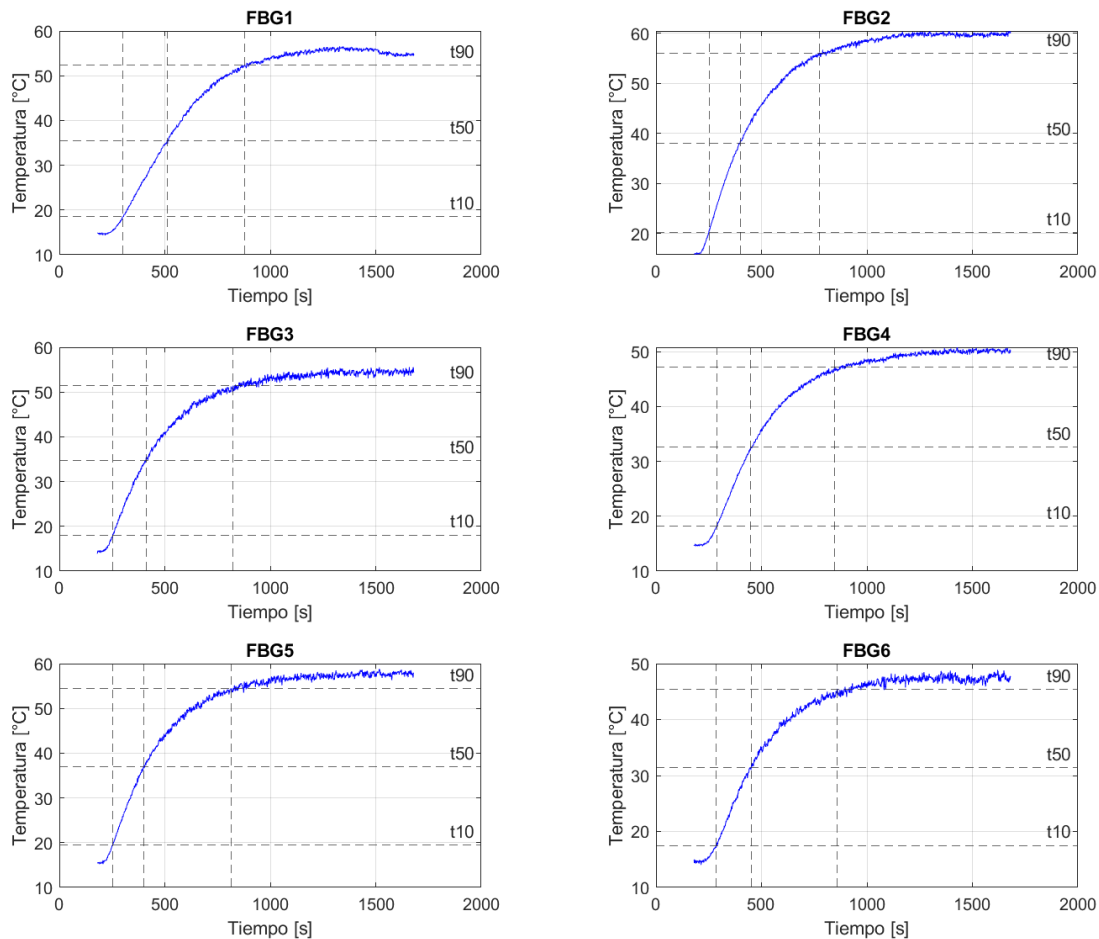


Figura 41: Curvas de temperatura y puntos característicos para cada sensor FBG durante un ciclo térmico.

5.3.1. Modelos de planta identificados

A partir de los parámetros obtenidos, se identifican los modelos de planta (funciones de transferencia) para cada sensor FBG, siguiendo la estructura FOPDT:

$$G_i(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1} \cdot e^{-L_i s} \quad (17)$$

Donde los parámetros τ_i y L_i para cada sensor están especificados en la tabla anterior. Para efectos de modelado se considera una ganancia unitaria, ya que el enfoque es únicamente dinámico.

5.3.2. Validación del modelo con FBG 6

Para verificar que el modelo FOPDT se ajusta correctamente a la realidad, se desarrolla el script `comparacion_fopdt_fbg.m`, el cual compara la respuesta real del sensor FBG 6 con la respuesta simulada de su modelo identificado. Este script toma en cuenta el retardo L mediante una función de desplazamiento temporal (delay), y utiliza los parámetros extraídos anteriormente.

El resultado se muestra en la figura 42, donde se puede observar la similitud entre ambas respuestas.

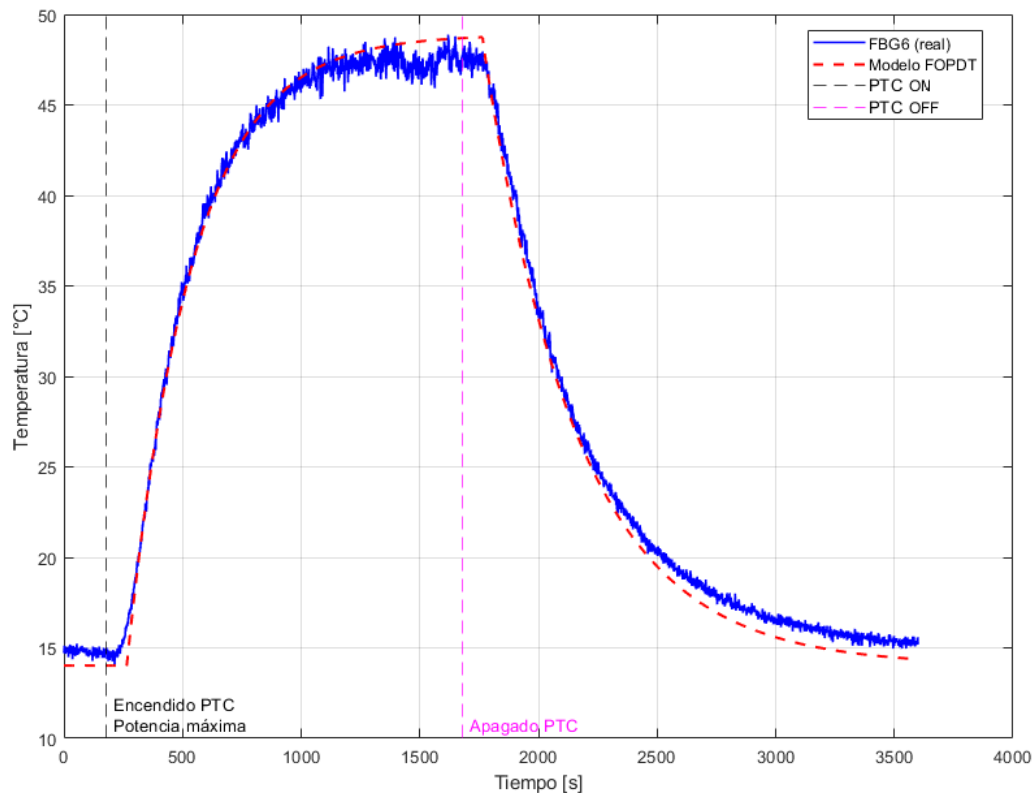


Figura 42: Comparación entre respuesta real de la FBG 6 y su modelo FOPDT identificado.

La respuesta simulada sigue con bastante fidelidad la tendencia de la curva real, lo que permite afirmar que el modelo propuesto representa adecuadamente el comportamiento térmico del sistema. Esta representación es útil tanto para propósitos de simulación como para el diseño posterior de controladores o análisis predictivo del sistema.

5.4. Análisis de sensibilidad

Para evaluar la robustez del sistema de monitoreo térmico basado en sensores FBG, se realiza un análisis de sensibilidad frente a variaciones de parámetros fundamentales. En particular, se estudian los efectos de:

- La distancia euclidiana entre el calefactor PTC y los sensores FBG.
- La frecuencia de muestreo utilizada para adquirir los datos.
- Interponer pads o almohadilla térmicas entre placa y FBG.

1. Variación de la posición del calefactor PTC

En el primer experimento, se modifica la posición del calefactor PTC, alejándolo del centro geométrico de la placa hacia la esquina inferior derecha. Esta modificación aumenta la distancia euclidiana entre el calefactor y cada uno de los sensores FBG, generando un nuevo perfil térmico de calentamiento.

Las tablas 4 y 5 presentan las distancias euclidianas entre el PTC y cada sensor en ambas disposiciones.

Sensor	Distancia al PTC [cm]
FBG 1	25.0
FBG 2	17.5
FBG 3	19.0
FBG 4	26.0
FBG 5	20.0
FBG 6	26.0

Cuadro 4: Distancia euclidiana entre cada sensor FBG y el calefactor PTC ubicado en el **centro** de la placa térmica.

Sensor	Distancia al PTC [cm]
FBG 1	33.0
FBG 2	31.0
FBG 3	35.0
FBG 4	42.0
FBG 5	31.0
FBG 6	28.5

Cuadro 5: Distancia euclidiana entre cada sensor FBG y el calefactor PTC ubicado en la esquina inferior derecha de la placa térmica.

A continuación, se presentan los resultados experimentales del ciclo térmico completo en ambas configuraciones: con el calefactor en el centro, en la figura 43 y con el calefactor desplazado, en la figura 44.

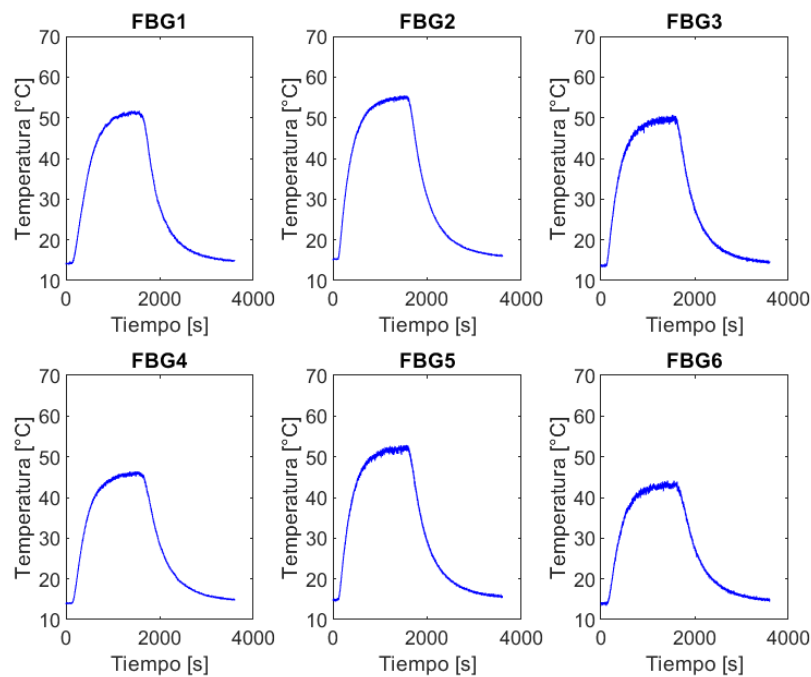


Figura 43: Curvas de temperatura con calefactor PTC ubicado en el centro de la placa.

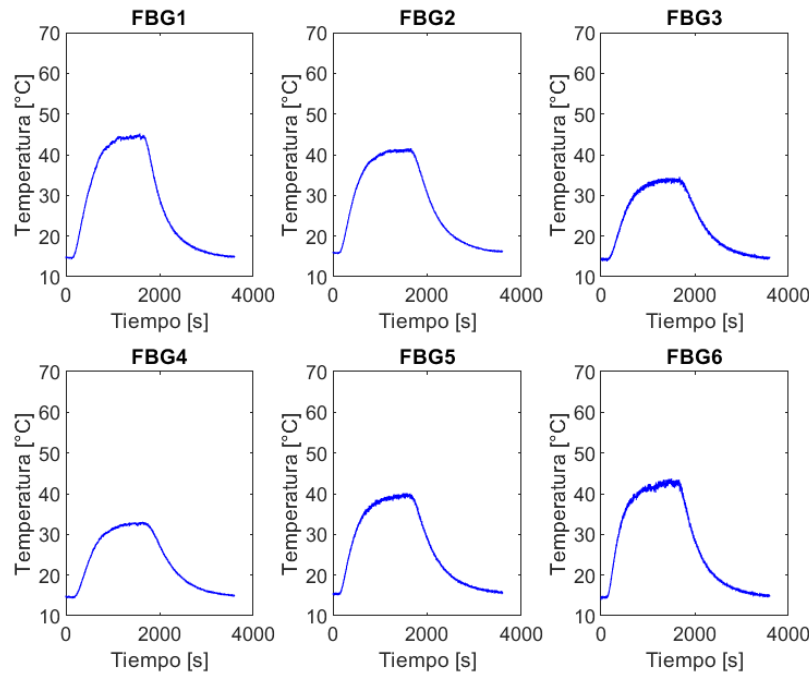


Figura 44: Curvas de temperatura con calefactor PTC ubicado en la esquina inferior derecha de la placa.

Como se observa, al alejar el calefactor de los sensores se produce una disminución generalizada en las temperaturas máximas alcanzadas por las FBGs, lo cual es coherente con una mayor disipación térmica y mayor distancia del foco de calor. Además, el tiempo de respuesta se incrementa para todos los sensores, mostrando retardos más pronunciados, lo que evidencia una dinámica térmica más lenta debido al aumento del trayecto de conducción térmica.

2. Variación de la frecuencia de muestreo

En el segundo experimento, se analiza la influencia de la frecuencia de muestreo sobre la calidad de la señal adquirida. De acuerdo con el teorema de Nyquist-Shannon, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima presente en el fenómeno a observar. En este contexto, dado que la variación térmica del sistema es relativamente lenta (respuestas del orden de minutos), una frecuencia de muestreo de 1 Hz (1 dato por segundo) resulta adecuada.

Se consideraron cuatro escenarios:

- **Sobremuestreo:** 10 Hz (Periodo = 0.1 s)
- **Muestreo adecuado:** 1 Hz (Periodo = 1 s)
- **Submuestreo:** 0.2 Hz (Periodo = 5 s)
- **Submuestreo exagerado:** 0.0033 Hz (Periodo = 5 min)

Las siguientes figuras muestran las curvas de temperatura para el sensor FBG 6 en los cuatro casos:

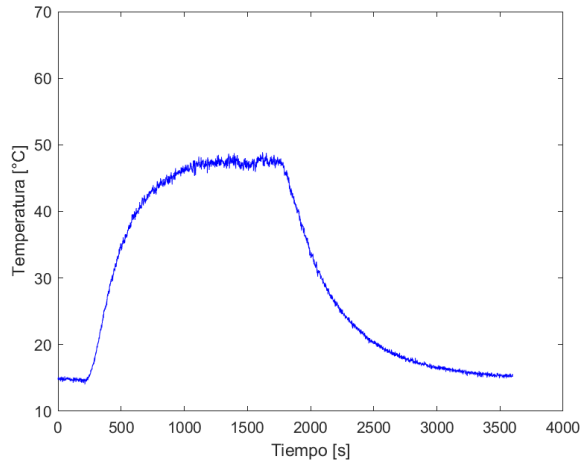


Figura 45: Muestreo adecuado (1 Hz).

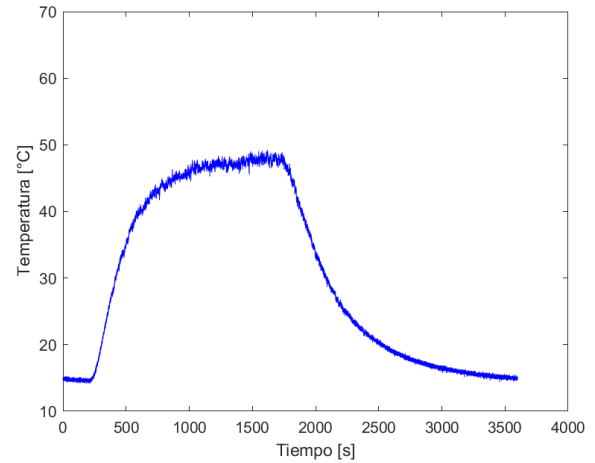


Figura 46: Sobremuestreo (10 Hz).

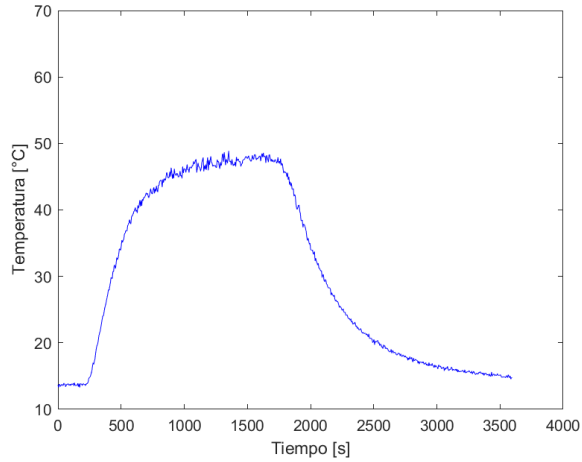


Figura 47: Submuestreo (0.2 Hz).

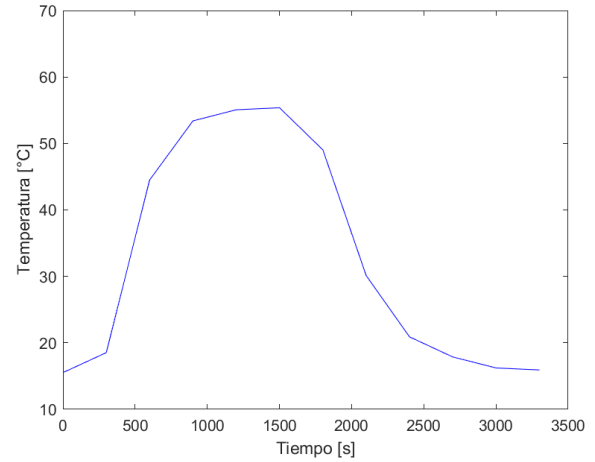


Figura 48: Submuestreo exagerado (0.0033 Hz).

Los resultados muestran que:

- En el caso del muestreo adecuado, se obtiene una señal limpia, suficiente para capturar correctamente la dinámica del proceso sin sobrecargar el sistema con datos innecesarios.
- Con sobremuestreo, se obtiene una resolución temporal mucho mayor, lo cual permite observar pequeñas fluctuaciones.
- En el caso de submuestreo, la señal presenta una pérdida evidente de información, aunque la señal aún se reconstruye bien. Esto, en caso de submuestrear aún más, haría más difícil estimar correctamente parámetros dinámicos como τ o T_r , y podría generar aliasing si existen variaciones abruptas.
- Al submuestrear de una forma exagerada, por ejemplo al tomar muestras cada 5 minutos, la reconstrucción de la curva de temperatura es deficiente y no se pueden distinguir las curvas de calentamiento y enfriamiento características del ciclo térmico empleado.

3. Interposición de pads térmicos entre placa y sensor FBG

En el tercer experimento para evaluar la sensibilidad del sistema, se interpone una lámina de silicona con alta conductividad térmica (thermal pad DR-03) de medidas $12 \times 12 \times 1.5$ mm, entre la superficie de la placa térmica y el sensor FBG 6. El objetivo de este experimento es estudiar si la adición de este material mejora o no el acoplamiento térmico entre el sensor y la superficie metálica, lo cual se reflejaría en una reducción del retardo térmico y/o de la constante de tiempo. Para ello, se comparan los parámetros dinámicos de sensores similares con y sin la aplicación de este material.

Debido a requerimientos logísticos asociados al trabajo en paralelo de Paula Cartagena (quien desarrolla un observador y un controlador de temperatura basado en los mismos sensores), fue necesario modificar la distribución física de las FBGs sobre la placa para esta prueba.

La siguiente tabla muestra las nuevas distancias euclidianas entre cada sensor FBG y el calefactor PTC, el cual se mantuvo en el centro de la placa térmica:

Sensor	Distancia al PTC (cm)
FBG 1	27.0
FBG 2	14.5
FBG 3	26.0
FBG 4	22.5
FBG 5	25.5
FBG 6	25.5

Cuadro 6: Distancias euclidianas entre cada FBG y el calefactor en la nueva disposición.

En esta nueva configuración, los sensores FBG 5 y FBG 6 se encuentran a la misma distancia euclidiana respecto al calefactor, por lo que se consideran óptimos para comparar el efecto del thermal pad. En este experimento, se aplicó un pad térmico únicamente sobre el sensor FBG 6, mientras que el sensor FBG 5 se mantuvo descansando sobre la placa.

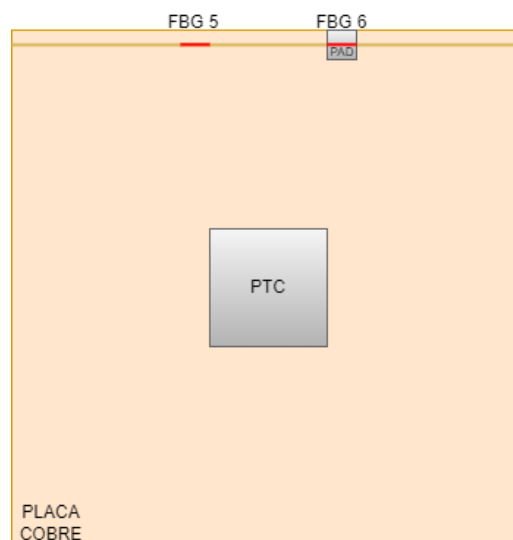


Figura 49: Disposición física sensores FBG 5 (sin thermal pad) y FBG 6 (con thermal pad).

En la figura 49 se puede ver como fue adherido el thermal pad a la placa de cobre, con el sensor FBG 6 descansando sobre el pad. A priori, este elemento le aporta una mayor estabilidad al sensor ante deformaciones y al ser altamente conductivo debería medir una temperatura similar a la que está la placa

bajo el pad.

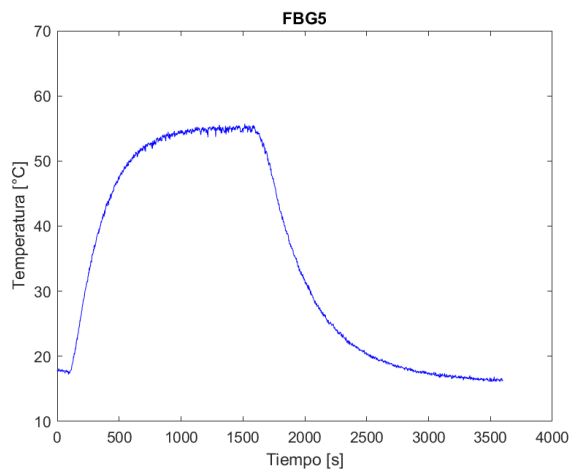


Figura 50: Curva de temperatura del sensor FBG 5 (sin pad térmico).

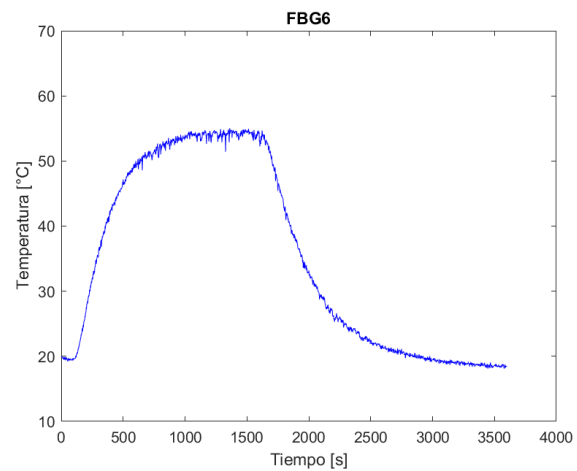


Figura 51: Curva de temperatura del sensor FBG 6 (con pad térmico).

A simple vista, las figuras 50 y 51 sugieren que la curva de la FBG 6 (la cual posee pad térmico) presenta mayor ruido, sobre todo en estado estacionario, por lo que quizás el acoplamiento mediante el pad termal resulta perjudicial para la medición del efecto termo óptico. También se puede ver que las curvas son bastante similares llegando a una temperatura máxima casi idéntica, lo que tiene sentido considerando que están equidistantes respecto al centro del PTC. No obstante, es necesario cuantificar esta diferencia a través de los parámetros dinámicos.

A continuación se presenta la comparación de los tiempos de retardo térmico (L), las constantes de tiempo (τ) y el error relativo en la temperatura máxima alcanzada por ambos sensores:

Sensor	L (s)	τ (s)	Error T_{\max} (%)
FBG 5 (sin pad)	66.26	271.13	0.00
FBG 6 (con pad)	84.36	290.14	1.22

Cuadro 7: Comparación de parámetros dinámicos entre sensores FBG con y sin thermal pad.

Los valores anteriores indican que la adición de un pad térmico provoca un aumento tanto en el tiempo de retardo (L), como en la constante de tiempo (τ), además de una leve disminución en la temperatura máxima alcanzada, con un error relativo del 1.22%. Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones experimentales de esta investigación, la inclusión del thermal pad no mejora la respuesta térmica del sensor, sino que introduce una ligera penalización dinámica.

5.5. Análisis de repetibilidad del sistema

Uno de los aspectos fundamentales en la validación de un sistema de medición es su capacidad para entregar resultados consistentes ante condiciones repetidas. En este caso, se evalúa la repetibilidad del sistema completo de monitoreo térmico basado en sensores FBG, considerando la misma configuración física, las mismas condiciones iniciales y la ejecución del mismo ciclo térmico en múltiples ocasiones.

De acuerdo con la norma internacional ISO 5725-2, que trata sobre la exactitud (veracidad y fidelidad) de los métodos de medición y los resultados, se considera que un análisis básico de repetibilidad requiere de al menos cinco repeticiones para obtener estimaciones confiables de la variabilidad del sistema. En

esta investigación se han realizado esas cinco repeticiones del ciclo térmico completo, cada una con una duración de 60 minutos, bajo las mismas condiciones experimentales.

Para cada repetición se analizan los siguientes parámetros en los seis sensores FBG:

- Temperatura máxima alcanzada (T_{\max}).
- Tiempo de retardo térmico (L).
- Constante de tiempo (τ).
- Error relativo respecto a la media.
- Desviación estándar y coeficiente de variación.

A continuación se presenta la tabla con los resultados obtenidos para el sensor FBG 6 a modo de ejemplo:

Repetición	T_{\max} (°C)	L (s)	τ (s)
1	55.6	98.5	302.7
2	56.6	105.3	280.3
3	58.2	97.2	285.7
4	58.3	92.1	271.5
5	60.8	101.7	285.7
Media	57.9	98.96	285.18
Desv. estándar	1.86	4.54	10.15
Coef. variación (%)	3.22 %	4.59 %	3.56 %

Cuadro 8: Resultados de repetibilidad para el sensor FBG 6.

Los resultados obtenidos muestran una baja dispersión en los parámetros dinámicos estimados para el sensor FBG 6. La temperatura máxima presenta un coeficiente de variación del 3.22 %, mientras que los valores para el tiempo de retardo (L) y la constante de tiempo (τ) son de 4.59 % y 3.56 % respectivamente. Estos valores indican una buena consistencia entre repeticiones, sin fluctuaciones importantes que comprometan la estabilidad del sistema. De hecho, se puede apreciar que la temperatura máxima va en aumento al realizar las mediciones y esto se debe a que hay un factor difícil de controlar en el laboratorio: la temperatura ambiente. Las cinco mediciones se hicieron el mismo día en una mañana desde las 08 am hasta las 02 pm, y la temperatura ambiente fue en aumento en ese intervalo de tiempo, por lo que si este factor fuese controlado la variación en los datos obtenidos sería aún menor.

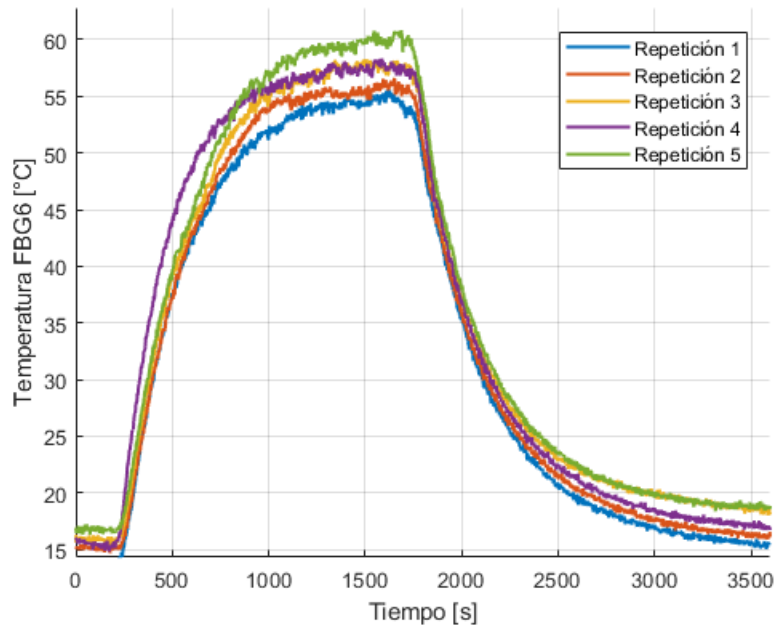


Figura 52: Comparación de las curvas de temperatura para el sensor FBG 6 en las distintas repeticiones.

En la figura 52 se observa una superposición visual entre las curvas de temperatura obtenidas para cada ciclo térmico para el sensor FBG 6. Se puede observar que el sistema es capaz de reproducir respuestas térmicas de forma estable y las diferencias al iniciar cada medición, se deben principalmente al aumento en la temperatura ambiente al ejecutar las mediciones. Luego, también hay diferencias de temperatura en las temperaturas máximas por cada repetición. Estas se pueden explicar por diferentes motivos y principalmente se asocian al actuador, en este caso, el calefactor PTC. Este equipo, al conectarse directamente a 220V, no presenta una curva de potencia-temperatura igual para cada repetición. Esto sumado a que las repeticiones se llevaron a cabo en una misma mañana una tras otra, con lo que se puede inferir un efecto acumulativo de la temperatura en el punto de medición de la FBG 6 (dado que no alcanza a enfriarse por completo).

5.6. Ensayo de 4 horas

Con el objetivo de validar la estabilidad y confiabilidad del sistema de monitoreo térmico basado en sensores FBG, se realiza un ensayo de larga duración con una duración total de 4 horas. Este tipo de prueba es fundamental para evaluar el comportamiento del sistema en condiciones prolongadas de operación, especialmente considerando que muchas aplicaciones industriales y científicas requieren monitoreo continuo y sostenido en el tiempo.

El ensayo comenzó a las 09:45 horas y se extendió hasta las 13:45 horas del mismo día. Durante este período no se aplicó ningún ciclo térmico forzado mediante el calefactor PTC; en cambio, se dejó que el sistema monitoreara exclusivamente las variaciones de temperatura ambiental presentes en el entorno de laboratorio. Esta configuración permite evaluar la capacidad del sistema para capturar cambios naturales y graduales en la temperatura ambiente, así como también verificar que no existan desviaciones significativas ni pérdidas de referencia en los sensores ni en el interrogador óptico HYPERION si155.

Uno de los aspectos más relevantes observados durante este ensayo fue un aumento progresivo de la temperatura ambiente en el laboratorio. Esta variación fue registrada con precisión por los sensores FBG, lo cual refuerza la sensibilidad y resolución del sistema. A su vez, se comprueba que los datos se adquirieron sin interrupciones, errores de lectura ni pérdidas de conexión, lo que demuestra una adecuada

estabilidad del interrogador óptico y de toda la cadena de adquisición y procesamiento.

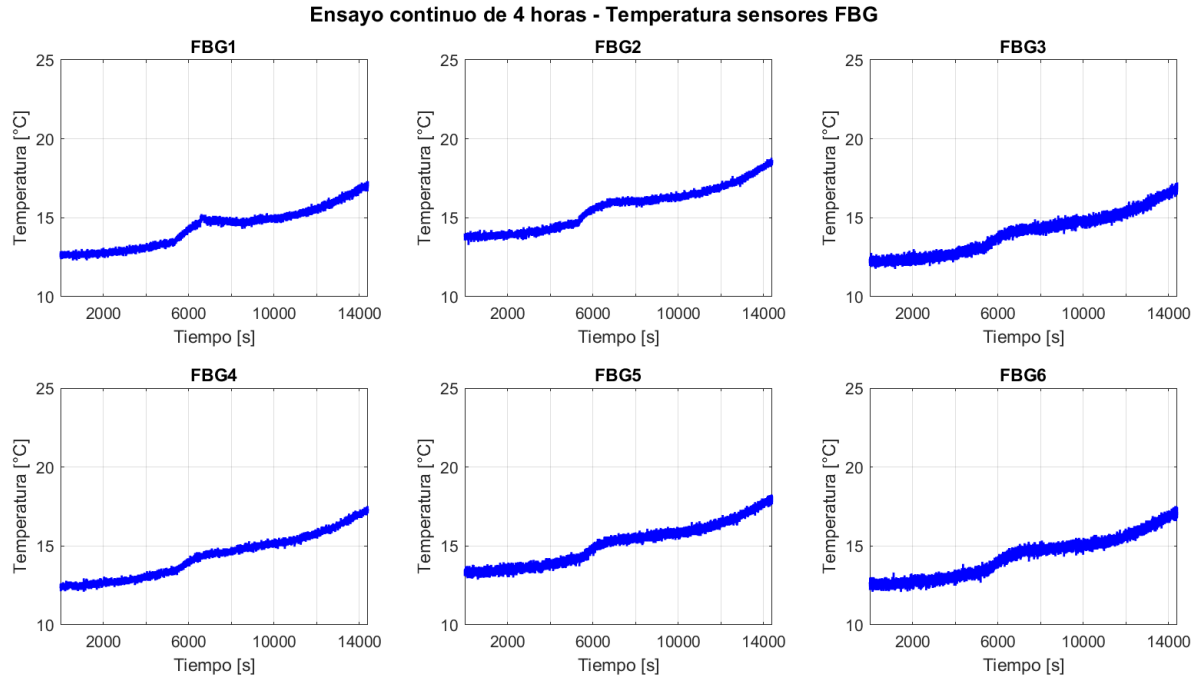


Figura 53: Registro de temperatura ambiente durante el ensayo continuo de 4 horas con sensores FBG.

Como se aprecia en la figura 53, los sensores presentan un comportamiento coherente entre sí y no se observan fluctuaciones anómalas ni señales de deriva térmica significativa. Esto confirma que el sistema puede ser empleado en escenarios de monitoreo continuo con resultados confiables en el largo plazo.

6. Conclusiones

En este trabajo de carácter experimental se desarrolló un sistema de adquisición de datos en tiempo real, o de monitoreo continuo, de la variable temperatura sobre un esquema basado en una placa bidimensional de cobre denominada “mesa térmica”. El sistema se implementó utilizando sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg (FBG), los cuales permiten medir las variaciones de temperatura en la placa durante la ejecución de un ciclo térmico controlado mediante el encendido y apagado de un calefactor PTC. En términos generales, se implementaron dos sistemas de monitoreo equivalentes, o bien, un mismo sistema en dos interfaces. El primero corresponde a la adquisición y procesamiento semiautomático realizado por el software *ENLIGHT*, encargado de procesar los datos adquiridos por el interrogador óptico HYPERION si155. Este software ofrece una visualización completa de los datos, incluyendo lectura espectral, gráficos temporales y la posibilidad de superponer medidores digitales sobre una imagen del sistema.

Para extender las capacidades de monitoreo, se desarrolló un sistema de adquisición de datos equivalente en un entorno de programación genérico, utilizando *MATLAB*. A través de la instalación de la API del interrogador óptico y el desarrollo de códigos específicos, fue posible obtener las longitudes de onda medidas por cada sensor y procesarlas en tiempo real.

Se cumplieron todos los objetivos específicos planteados para esta memoria de titulación. El proceso de calibración de los sensores FBG resultó fundamental para garantizar la fiabilidad del sistema de monitoreo. Se obtuvo una calibración de alta calidad, que asegura precisión y exactitud en las mediciones de temperatura registradas en el rango de 20°C a 60°C, con una precisión promedio de $\pm 0.64^\circ\text{C}$ aplicando un modelo de ajuste lineal. El sistema opera en un rango de 13°C a 65°C. La sensibilidad térmica promedio (k_T) de los sensores fue de 8.3 pm/°C, valor coherente con investigaciones previas, como la reportada en [9], donde se obtuvo una k_T promedio de 9.9 pm/°C.

El sistema experimental desarrollado permitió la ejecución de las pruebas propuestas y la transferencia del protocolo de adquisición, procesamiento y visualización de datos a *MATLAB*, lo que facilitó el análisis y posibilitó la creación de la interfaz *DashboardFBG.m*. Esta interfaz permite definir el tiempo de adquisición, iniciar o detener el registro en cualquier momento y guardar tanto los datos como los gráficos de evolución temporal de cada FBG. Además, integra gráficos en tiempo real, indicadores digitales de temperatura y un mapa de calor bidimensional que muestra la distribución espacial de los sensores sobre la placa.

Los resultados experimentales demuestran la factibilidad de implementar una red de sensores FBG para el monitoreo continuo, en tiempo real y semidistribuido de un sistema físico, como la mesa térmica. Dado que el ciclo térmico aplicado consiste en una secuencia de encendido y apagado del calefactor, la investigación se centró en el análisis del desempeño de los sensores ópticos frente a transientes térmicos rápidos, comparándolos con un sensor eléctrico tradicional de tipo K. Los sensores FBG exhibieron alta sensibilidad y tiempos de respuesta más cortos que la termocupla, lo que confirma su superioridad para aplicaciones de medición térmica precisa.

Durante el desarrollo experimental se evaluó la posibilidad de incorporar carcasas de aluminio para reducir el *strain* inducido sobre los sensores, ya que el calentamiento de la placa produce leves deformaciones. Sin embargo, esta idea fue descartada, dado que existen sensores FBG comerciales con encapsulados y recubrimientos adecuados, y las deformaciones en los bordes de la placa, donde se ubicaron los sensores, se consideran insignificantes para las mediciones realizadas.

En términos generales, los sensores FBG demostraron ser superiores a las alternativas eléctricas tradicionales por su alta precisión y carácter no invasivo. Esta superioridad se manifiesta especialmente en aplicaciones que requieren mediciones puntuales de alta exactitud o en configuraciones que involucran redes semidistribuidas, como la implementada en este estudio.

Entre las principales contribuciones de esta investigación se destaca la construcción de un sistema de monitoreo térmico en tiempo real sobre una placa bidimensional mediante una red de seis sensores FBG con multiplexación en longitud de onda, ampliando las capacidades del software *ENLIGHT*. Asimismo,

se desarrolló un análisis de sensibilidad térmica y una guía práctica de operación del interrogador óptico y del software, útiles para futuras investigaciones. Este trabajo integra avances previos sobre la mesa térmica, incluyendo los aportes de Sanhueza [14], y entrega una red de sensores calibrados que servirán como base para los trabajos de Cartagena [13], orientados a validar un modelo térmico de distribución y aplicar control de temperatura en la placa.

Las limitaciones del estudio pueden clasificarse en dos categorías:

- **Limitaciones del propio sensor FBG y/o condiciones de trabajo:** Se destaca principalmente el rango de calibración alcanzado, de 20°C a 60°C. Si bien sería posible extenderlo hasta aproximadamente 85°C, la temperatura máxima de operación del sensor, ello requeriría una metodología experimental más compleja y el uso de un baño termorregulado para asegurar uniformidad y precisión en la calibración. Adicionalmente, los sensores FBG empleados presentan una fibra SMF-28 sin recubrimiento protector, lo que incrementa su fragilidad durante la manipulación. En una de las etapas experimentales se produjo una rotura de la fibra a la salida del canal 1 del interrogador óptico, generando un *single point failure* que interrumpió la lectura de los sensores en serie. El problema fue solucionado mediante un empalme con una fusionadora de fibra óptica, sin pérdidas significativas de señal, aunque implicó un retraso en el proceso experimental. En este sentido, el uso de fibras con protección resulta más adecuado para trabajos futuros.
- **Limitaciones del estudio:** Estas limitaciones se relacionan con aspectos no abordados completamente. Entre ellas, destaca la ausencia de compensación de *strain*, por lo que las mediciones de temperatura no corrigen completamente los efectos de deformación sobre la rejilla de Bragg. Se propuso como alternativa la incorporación de un sensor dedicado a medir *strain* junto al de temperatura, compensando sus sensibilidades respectivas. Asimismo, la integración de la interfaz de monitoreo desarrollada con el modelo de elementos finitos (FEM) no se completó totalmente. Se utilizó la malla triangular del dominio 2D para interpolar los valores de temperatura, logrando una estimación global de la placa más que una representación completamente fiel del sistema, principalmente debido a limitaciones de tiempo, ya que el modelo FEM validado estuvo disponible hacia el final del trabajo.

Considerando las limitaciones y las proyecciones identificadas, se proponen las siguientes líneas de trabajo futuro:

- Implementar el uso completo del modelo FEM para obtener temperaturas en regiones no instrumentadas, permitiendo una extrapolación más robusta de los datos.
- Desarrollar y comparar estrategias de compensación cruzada de *strain*.
- Realizar calibraciones de sensores FBG de alta precisión y amplio rango mediante baño termorregulado.
- Analizar y diseñar redes de monitoreo de larga distancia utilizando sensores FBG con técnicas de multiplexación WDM/TDM.
- Comparar el comportamiento térmico de placas fabricadas en distintos materiales bajo el sistema experimental propuesto.
- Aplicar el sistema de monitoreo térmico desarrollado en escenarios reales, tales como paneles fotovoltaicos, transformadores de potencia o intercambiadores de calor industriales.

Bibliografía

Referencias

- [1] B. Tahir. “Strain Measurements Using Fibre Bragg Grating Sensor”. *American Journal of Applied Science*, January 2005.
- [2] S. Umesh. “Fiber Bragg Grating based two-dimensional Accelerometer”. IEEE, December 2015.
- [3] K. K. Chau. “Experimental demonstration of fiber Bragg grating strain sensors for structural vibration control”. In *Smart Structures and Materials 2004: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, July 2004.
- [4] J. Wang. “Using Fiber Bragg Grating Sensors to Monitor Pavement Structures”. *SAGE Publications*, January 2005.
- [5] M. Rios. “Active Vibration Control in Building-Like Structures Using Piezoelectric Actuators and Positive Acceleration Feedback”. *CINVESTAV-IPN*, May 2013.
- [6] D. M. Karabacak. “High-speed system for FBG-based measurements of vibration and sound”. In *Fiber Optic Sensors and Applications XIII*, May 2016.
- [7] N. T. Pham. “Temperature monitoring with FBG sensor during diffuser-assisted laser-induced interstitial thermotherapy”. In *Therapeutics and Diagnostics in Urology: Lasers, Robotics, Minimally Invasive, and Advanced Biomedical Devices*, April 2017.
- [8] Y. J. Rao. “In-Fiber Bragg-Grating Temperature Sensor System for Medical Applications”. *Journal of Lightwave Technology*, May 1997.
- [9] Y. J. Rao. “Optical in-fiber Bragg grating sensor systems for medical applications”. *Journal of Biomedical Optics*, January 1998.
- [10] A. Saccomanno. “Log-Term Temperature Monitoring in CMS Using Fiber Optic Sensors”. In *EU-ROSENSORS XXXVI*. AMA Service GmbH, December 2024.
- [11] T. K. Gangopadhyay. “Fiber-optic sensor for real-time monitoring of temperature on high voltage (400KV) power transmission lines”. In *20th International Conference on Optical Fibre Sensors*, October 2009.
- [12] J. Peng. “Design and experiment of FBG sensors for temperature monitoring on external electrode of lithium ion batteries”. *IEEE Sensors Journal*, February 2021.
- [13] P. Cartagena. “Modelado y Control Térmico de una Tabla de Calor mediante sensores de fibra óptica”, October 2025.
- [14] F. Sanhueza. “Heat table sensing with optic fiber”. Technical report, Universidad Técnica Federico Santa María, March 2023.
- [15] C. H. Palma Kotinda. “Monitoreo térmico de panel fotovoltaico utilizando redes de Bragg en fibra óptica”. April 2018.
- [16] S. Dhanalakshmi. “Thermal management of solar photovoltaic panels using a fibre Bragg grating sensor based temperature monitoring”. *Elsevier*, January 2022.

- [17] J. K. Sahota. “Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review”. *Optical Engineering (SPIE)*, June 2020.
- [18] G. P. Agrawal. “*Fiber-Optic Communication Systems*”. Wiley, 5th edition, 2019.
- [19] X. Wang. “Fiber Bragg Grating-Based Smart Garment for Monitoring Human Body Temperature”. *MDPI*, June 2022.
- [20] D. Tosi. “Review and analysis of peak tracking techniques for fiber Bragg grating sensors”. *Sensors (MDPI)*, October 2017.
- [21] Sinaran. “Optical Power Loss (Attenuation) - Part 2”, 2016.
- [22] K. O. Hill. “Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview”. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1263–1276, August 1997.
- [23] S. J. Mihailov. “Fiber Bragg Grating Sensors Written with a Femtosecond Laser”. *Proceedings of SPIE*, 5004:104–114, 2003.
- [24] A. D. Kersey. “Fiber Grating Sensors”. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1442–1463, August 1997.
- [25] L. Vandi. “Structural Health Monitoring for Prefabricated Building Envelope under Stress Tests”. *Applied Sciences (MDPI)*, April 2024.
- [26] A. Othonos. “Fibre Bragg Gratings”. Technical report, September 2006.
- [27] T. Erdogan. “Fiber Grating Spectra”. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1277–1294, August 1997.
- [28] J. Canning. “Fibre Gratings and Devices for Sensors and Lasers”. *Lasers and Photonics Reviews*, 2(4):275–289, July 2008.
- [29] K. Sousa. “Packaging, characterization and calibration of fiber Bragg grating temperature sensors”. August 2012.
- [30] S. E. San Martín Almonacid. “Diseño y análisis de métodos de interrogación de un sensor de fibra óptica basado en rejillas de Bragg”, July 2022.
- [31] M. Shou. “On-line monitoring system for downhole temperature and pressure”. *Optical Engineering*, 53(8):087102, August 2014.
- [32] S. Abad. “Fiber optic sensing subsystem for temperature monitoring in space in-flight applications”. In *Proceedings of SPIE*, November 2017.
- [33] A. Fernández. “Embedded Fiber Bragg Grating Sensors for Monitoring Temperature and Thermo-Elastic Deformations in a Carbon Fiber Optical Bench”. *Sensors (MDPI)*, July 2023.
- [34] G. Meltz. “Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method”. *Optics Letters*, 14(15):823–825, August 1989.
- [35] R. Kashyap. “*Fiber Bragg Gratings*”. Academic Press, 1999.
- [36] D. Z. Anderson. “Production of In-Fiber Gratings Using a Diffractive Optical Element”. *Electronics Letters*, 29(6):566–568, March 1993.

-
- [37] Luna Innovations. “*Optical Sensing Instrumentation and Software – User Guide*”. Luna Innovations Incorporated, September 2017.
- [38] B. Soto. “Diseño de controladores PI predictivos generalizados para proceso térmico experimental”, September 2024.
- [39] Q. C. Zhong. “*Robust Control of Time-delay Systems*”. Springer, March 2006.
- [40] G. Fedele. “A new method to estimate a first-order plus time delay model from step response”. *Journal of the Franklin Institute*, February 2009.
- [41] O. Garpinger. “Performance and robustness trade-offs in PID control”. *Journal of Process Control (Elsevier)*, May 2014.
- [42] F. P. Incropera. “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*”. Wiley, 7th edition, 2011.
- [43] Y. A. Cengel. “*Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*”. McGraw-Hill, 5th edition, 2015.
- [44] K. Ogata. “*Modern Control Engineering*”. Prentice Hall, 5th edition, 2010.
- [45] G. Fernández. “Exactitud y Precisión”, November 2010.
- [46] C. Wang. “Research on a fiber Bragg grating temperature measurement method for inter-satellite laser link”. *Review of Scientific Instruments (AIP)*, January 2020.