

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA  
VALPARAÍSO - CHILE



**“Medición de temperatura en actuadores piezoeléctricos con  
sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg”**

**BORIS ANTONIO VILLALOBOS BARAHONA**

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO EJECUCIÓN  
ELECTRÓNICO

PROFESOR GUÍA : MARCELO SOTO  
PROFESOR CORREFERENTE : HÉCTOR RAMÍREZ

Agosto - 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:

Medición de temperatura en actuadores piezoeléctricos con sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg

Nombre del candidato(a):

Boris Antonio Villalobos Barahona

Carrera / Grado:

Ingeniería en ejecución electrónica, mención telecomunicaciones

Campus: Casa Central Departamento: Electrónica

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Marcelo A. Soto Hernández, 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):

---

---

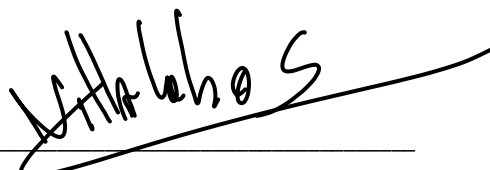
---

### 4.- FIRMAS

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

Fecha: 24.10.2025 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 22-10-2025 Firma: 

---

## Agradecimientos

Dedico este logro a la memoria de mi padre, quien ya no está con nosotros. Su ejemplo y su cariño me acompañaron en cada página de esta memoria y en cada decisión del camino.

A mis hermanas, Barbra y Guissella por estar siempre cerca aunque la distancia sea grande, gracias por las llamadas y mensajes cuando más los necesitaba durante la carrera. A mi madre, por su preocupación incansable y esas preguntas cotidianas “¿ya comiste?” que, sin parecerlo, me sostuvieron en los días largos de estudio.

Principalmente, a mi pareja Rocio, que fue mi mayor amiga, compañera en esta etapa y a mis amigos sin ustedes no habría llegado hasta aquí. Su apoyo, paciencia y empuje fueron el motor que me permitió dar el último paso para cerrar esta etapa de mi vida.

A mis profesores guías, Marcelo Soto y Héctor Ramírez, por la confianza depositada en este proyecto, por enseñarme a mirar más allá de lo evidente.

Agradezco también el apoyo de los siguientes fondos, sin los cuales este trabajo no habría sido posible:

FONDECYT Regular 1241085, ANID

FONDEQUIP EQM180226, ANID

Basal AFB240002, ANID

A todas las personas que, de una u otra forma, se cruzaron en el camino y me tendieron una mano este logro también es de ustedes. Gracias.

## **“Medición de temperatura en actuadores piezoeléctricos con sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg”**

**Boris Antonio Villalobos Barahona**

Memoria para optar al Título de Ingeniero ejecución Electrónico

**Universidad Técnica Federico Santa María**

Profesor Guía: Marcelo Soto

Profesor Corefente: Héctor Ramírez

Julio - 2025

### **Resumen**

## **Resumen**

Esta memoria presenta un estudio experimental orientado a la caracterización térmica de sensores de fibra óptica con rejilla de Bragg (FBG) acoplados con actuadores piezoeléctricos. Para ello, se evaluaron y diseñaron dos configuraciones de montaje: una con soporte para la fibra y otra sin soporte, ambas fabricadas mediante impresión 3D.

Se realizaron procesos de calibración térmica utilizando termómetros certificados y no certificados, con el objetivo de lograr medir la temperatura con respecto al cambio de la longitud de onda en el sensor. Posteriormente, se aplicaron diferentes frecuencias de excitación al actuador piezoeléctrico, registrando la correspondiente variación de temperatura en función del tiempo.

Los resultados experimentales permitieron establecer una relación entre la frecuencia de operación y el aumento térmico del actuador, validando el comportamiento esperado según datos del fabricante. Se concluye que los sensores FBG ofrecen un desempeño confiable en aplicaciones térmicas, especialmente cuando se encuentran adecuadamente soportados.

# **“Temperature measurement in piezoelectric actuators with fiber optic sensors based on Bragggratings”**

**Boris Antonio Villalobos Barahona**

Final Project Report towards the fulfillment of the Ingeniero ejecución Electrónico.

**Universidad Técnica Federico Santa María**

Advisor: Marcelo Soto

Co-Advisor: Héctor Ramírez

March - 2025

## **Abstract**

This work addresses the implementation of fiber optic sensors based on Fiber Bragg Gratings (FBG) for temperature measurement in piezoelectric actuators. The thermal response of these actuators was analyzed under excitation frequencies ranging from 1 Hz to 150 Hz, using FBG sensors as a non-contact monitoring method. To enhance measurement stability and accuracy, a 3D-printed support was designed and fabricated to secure the sensors without adhesives, minimizing potential thermal interferences.

The study included sensor calibration using a laser thermometer and validation of the obtained data by comparing them with the manufacturer’s actuator specifications. Different sensor mounting methods were tested to evaluate their impact on measurement quality. The results show a correlation between the actuator’s operating frequency and the temperature increase, while also demonstrating that the support-mounted sensor improves measurement stability and repeatability. Finally, improvements and recommendations for future research in optical sensors applied to thermal monitoring and control systems are discussed.

# Índice general

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción .....</b>                                | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivación.....                                         | 2         |
| <b>2. Marco teórico .....</b>                               | <b>5</b>  |
| 2.1 Fundamentos sensores fibra óptica .....                 | 5         |
| 2.2 Sensores de rejilla de Bragg en fibra óptica (FBG)..... | 6         |
| 2.2.1 FBG como sensores ópticos.....                        | 7         |
| 2.2.2 Tipos de sensores FBG .....                           | 8         |
| 2.2.3 Tipos de inscripción de una FBG .....                 | 8         |
| 2.2.4 Efecto de temperaturas y deformaciones en FBG.....    | 12        |
| 2.3 Métodos de detección de peaks en sensores FBG .....     | 12        |
| 2.4 Multiplexaciones e interrogaciones de FBG .....         | 14        |
| 2.4.1 Multiplexación en el dominio del tiempo (TDM).....    | 15        |
| 2.4.2 Multiplexación por longitud de onda (WDM) .....       | 16        |
| 2.5 Fundamentos de actuadores piezoeléctricos .....         | 17        |
| <b>3. Diseño e implementación .....</b>                     | <b>20</b> |
| 3.1 Descripción general del sistema .....                   | 20        |
| 3.2 Diseño mecánico y soporte impreso en 3D .....           | 21        |
| 3.2.1 Base general .....                                    | 22        |
| 3.2.2 Base sin soporte .....                                | 24        |
| 3.2.3 Base con soporte.....                                 | 25        |
| 3.3 Calibración de sensores FBG.....                        | 26        |
| 3.3.1 Calibración inicial .....                             | 26        |
| 3.3.2 Re-calibración con termómetro certificado.....        | 29        |
| 3.4 Sistema de control y generación de señal .....          | 31        |
| 3.4.1 Modelo de señal en Simulink .....                     | 32        |
| 3.4.2 Configuración de la tarjeta dSPACE RTI1202 .....      | 33        |

|           |                                                       |           |
|-----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.3     | Interfaz de usuario en tiempo real .....              | 34        |
| 3.5       | Integración del sensor FBG al sistema .....           | 34        |
| 3.5.1     | Principio de funcionamiento y variable objetivo ..... | 34        |
| 3.5.2     | Orientación y montaje del sensor .....                | 35        |
| 3.5.3     | Sensores utilizados y disposición experimental .....  | 36        |
| <b>4.</b> | <b>Metodología de medición .....</b>                  | <b>38</b> |
| 4.1       | Condiciones de operación .....                        | 38        |
| 4.2       | Procedimiento experimental .....                      | 38        |
| 4.3       | Condiciones ambientales .....                         | 39        |
| 4.4       | Montaje físico y decisión de cambio de base .....     | 39        |
| 4.5       | Adquisición de datos .....                            | 40        |
| 4.6       | Flujo de trabajo del ensayo .....                     | 40        |
| 4.7       | Observaciones finales .....                           | 41        |
| <b>5.</b> | <b>Resultados y discusión .....</b>                   | <b>42</b> |
| 5.1       | Descripción general de las pruebas realizadas .....   | 42        |
| 5.2       | Resultados de la medición de temperatura .....        | 42        |
| 5.2.1     | Base sin soporte .....                                | 42        |
| 5.2.2     | Base con soporte .....                                | 43        |
| 5.2.3     | Base sin soporte (sensor re-calibrado) .....          | 44        |
| 5.2.4     | Base con soporte (sensor re-calibrado) .....          | 45        |
| 5.3       | Comparación con curva del fabricante .....            | 46        |
| 5.4       | Análisis de desempeño de cada configuración .....     | 48        |
| <b>6.</b> | <b>Conclusiones .....</b>                             | <b>52</b> |

# Índice de figuras

|      |                                                                |    |
|------|----------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Sensor FBG en núcleo de fibra óptica[8] .....                  | 7  |
| 2.2  | Inscripción interferométrica[8] .....                          | 10 |
| 2.3  | Inscripción phase mask[8] .....                                | 11 |
| 2.4  | Inscripción punto a punto[8].....                              | 12 |
| 2.5  | Detección por centroide[14] .....                              | 14 |
| 2.6  | Interrogador por barrido de luz [14].....                      | 15 |
| 2.7  | Configuración serial con multiplexación WDM [8] .....          | 16 |
| 2.8  | Tipo de movimiento según voltaje aplicado .....                | 18 |
| 3.1  | Componentes principales del sistema experimental .....         | 21 |
| 3.2  | Medida actuador piezoeléctrico .....                           | 22 |
| 3.3  | Modelo 3D original proporcionado por el fabricante.....        | 23 |
| 3.4  | Base inferior .....                                            | 23 |
| 3.5  | Base impresa en 3D sin soporte mecánico para la fibra .....    | 24 |
| 3.6  | Ranura de alojamiento de fibra en base sin soporte .....       | 24 |
| 3.7  | Diseño de soporte superior para sujeción del sensor FBG .....  | 25 |
| 3.8  | Ranura con soporte mecánico para fibra óptica.....             | 26 |
| 3.9  | Esquema medición termómetro MP780003 .....                     | 27 |
| 3.10 | Obtención de parámetros para sensor centrado en 1540 nm .....  | 27 |
| 3.11 | Obtención de parámetros para sensor centrado en 1545 nm .....  | 28 |
| 3.12 | Parámetros a utilizar .....                                    | 29 |
| 3.13 | Esquema medición termómetro calibrado .....                    | 30 |
| 3.14 | Curva de calibración obtenida con termómetro certificado ..... | 30 |
| 3.15 | Parámetros con re-calibración .....                            | 31 |
| 3.16 | Sistema de generación, amplificación y control de señal.....   | 32 |
| 3.17 | Modelo en Simulink para control del actuador .....             | 32 |
| 3.18 | Amplificador A400.....                                         | 33 |
| 3.19 | Interfaz gráfica para el control de señal sinusoidal .....     | 34 |

|      |                                                                                    |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.20 | Reflexión de una FBG .....                                                         | 35 |
| 3.21 | Montaje del sensor FBG perpendicular al actuador piezoeléctrico .....              | 35 |
| 3.22 | Área inactiva del actuador piezoeléctrico .....                                    | 36 |
| 3.23 | Longitud de onda central de los sensores FBG .....                                 | 37 |
| 4.1  | Flujo de trabajo .....                                                             | 41 |
| 5.1  | Temperatura medida por el sensor FBG montado sin soporte.....                      | 43 |
| 5.2  | Temperatura medida por el sensor FBG montado con soporte (sensor original). ...    | 43 |
| 5.3  | Temperatura medida por el sensor FBG montado con soporte (sensor re-calibrado). 45 |    |
| 5.4  | Temperatura medida por el sensor FBG montado con soporte (sensor re-calibrado). 46 |    |
| 5.5  | Temperatura entregada por el fabricante .....                                      | 47 |
| 5.6  | Comparativa entre las mediciones .....                                             | 47 |
| 5.7  | Aumento de temperatura del fabricante .....                                        | 49 |
| 5.8  | Aumento de temperatura .....                                                       | 50 |
| 6.1  | Certificación termómetro .....                                                     | 57 |
| 6.2  | Certificación termómetro .....                                                     | 58 |
| 6.3  | Impresión 3D con sensor FBG y piezoeléctrico .....                                 | 59 |
| 6.4  | Montaje del sistema .....                                                          | 60 |
| 6.5  | Termómetro certificado utilizado .....                                             | 61 |

# Índice de tablas

|     |                                                        |    |
|-----|--------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Relación entre Frecuencia y Temperatura.....           | 19 |
| 3.1 | Valores parámetros de calibración.....                 | 28 |
| 3.2 | Valores parámetros de calibración con error de 0 ..... | 30 |
| 3.3 | Opciones de conexión del actuador piezoeléctrico ..... | 33 |
| 4.1 | Secuencia de frecuencia y tiempo de aplicación.....    | 39 |

# 1 Introducción

La evolución tecnológica en el ámbito del sensado y control ha impulsado el desarrollo de sistemas cada vez más precisos, compactos y adaptables a diversas condiciones de operación. En este contexto, los sensores de fibra óptica con rejilla de Bragg (FBG, por sus siglas en inglés) han cobrado especial relevancia debido a su alta sensibilidad, inmunidad electromagnética, reducido tamaño y capacidad de integración en estructuras complejas. Estas características los posicionan como una solución atractiva para el monitoreo de variables físicas como temperatura, deformación y presión, especialmente en entornos donde los sensores convencionales presentan limitaciones.

Por otro lado, los actuadores piezoeléctricos han demostrado una alta eficiencia en aplicaciones que requieren microposicionamiento, generación de vibraciones controladas y respuesta rápida a estímulos eléctricos. Su capacidad para transformar señales eléctricas en movimientos mecánicos los convierte en herramientas clave para la calibración y evaluación de sensores, particularmente en estudios experimentales de respuesta térmica y dinámica.

Esta memoria se enmarca en el estudio de la respuesta térmica de sensores FBG sometidos a excitaciones mecánicas generadas por un actuador piezoeléctrico. Para ello, se diseñó e implementó un sistema experimental que permite someter a los sensores a condiciones controladas de vibración, con el objetivo de evaluar su desempeño térmico bajo distintos montajes estructurales. En particular, se estudió el efecto del tipo de fijación sobre la precisión de las mediciones, comparando una base con soporte para la fibra óptica y otra sin soporte, ambas fabricadas mediante impresión 3D.

A lo largo de este trabajo se documenta el proceso completo: desde el diseño y fabricación de los soportes, la configuración del sistema de control y medición, la calibración térmica de los sensores, hasta la validación de los resultados obtenidos frente a las curvas de comportamiento proporcionadas por el fabricante del actuador piezoeléctrico.

El objetivo final de esta investigación es determinar la confiabilidad de los sensores FBG como herramienta de medición térmica en sistemas activos, proponiendo una metodología experimental reproducible y validada que sirva como base para futuras aplicaciones en sensado de precisión.

### 1.1 Motivación

El desarrollo y aplicación de sensores de fibra óptica han revolucionado la industria del monitoreo estructural y la medición de parámetros físicos. Su uso se ha visto impulsado por ventajas como su alta sensibilidad, inmunidad a interferencias electromagnéticas y capacidad de multiplexación, lo que los convierte en herramientas ideales para entornos exigentes [1]. En este contexto, las rejillas de Bragg en fibra (FBG) se han consolidado como una de las tecnologías más eficientes para la detección de temperatura, deformaciones mecánicas y presión en aplicaciones industriales y científicas [2].

La fibra óptica está compuesta por un núcleo y un revestimiento, y utiliza el principio de reflexión interna total para transmitir señales ópticas a lo largo de grandes distancias con atenuación mínima. Su aplicación en sensores se basa en la capacidad de la fibra para modificar el comportamiento de la señal óptica ante cambios en su entorno físico. En particular, las FBG son estructuras periódicas inscritas en el núcleo de la fibra que reflejan una longitud de onda específica mientras transmiten el resto, propiedad que permite su uso como sensores de temperatura y deformación [3].

Una rejilla de Bragg se genera mediante la modulación periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra [4]. Esta modulación produce reflexiones que, al estar en fase con determinadas longitudes de onda de la luz incidente, permiten detectar variaciones en el entorno físico. Las FBGs deben ser inscritas mediante exposición a luz ultravioleta de alta intensidad, lo que genera la estructura periódica necesaria para su funcionamiento.

Las variaciones de temperatura o deformación en la zona de la FBG afectan dicha periodicidad o el índice efectivo de refracción, lo que a su vez provoca un desplazamiento en la longitud de onda reflejada. Este cambio espectral permite determinar la magnitud de la perturbación física mediante relaciones matemáticas obtenidas por calibración. La correcta detección de este desplazamiento puede verse afectada por ruido o distorsión espectral, lo que puede comprometer la precisión del sensor [4].

Por otro lado, los actuadores piezoeléctricos convierten señales eléctricas en movimiento mecánico a través del efecto piezoeléctrico, donde ciertos materiales generan una carga eléctrica al ser sometidos a estrés mecánico. Estos dispositivos se emplean ampliamente en control de vibraciones, nanotecnología e instrumentación de precisión [5]. Sin embargo, su comportamiento térmico bajo excitación dinámica continúa siendo un área relevante de estudio, dado que las variaciones de temperatura afectan directamente su rendimiento y durabilidad.

En esta investigación se propone utilizar sensores FBG para la medición de temperatura en actuadores piezoeléctricos modelo PB4NB2W, los cuales operan en el rango de 1 Hz a 150 Hz. Un aspecto innovador de este trabajo es el método de fijación, basado en estructuras impresas en

3D en lugar de adhesivos. Este enfoque busca minimizar interferencias térmicas y facilitar una instalación estable y reproducible.

Además, se considera el impacto del método de detección de peaks en la precisión de las mediciones. Entre los algoritmos más utilizados se encuentran el ajuste de curva, el método **centroide** y el basado en correlación espectral [6]. También se destacan posibles fuentes de error en los sensores FBG, como discontinuidades, empalmes defectuosos o interferencias externas [7], lo que resalta la importancia de una correcta instalación y calibración.

## Objetivos

### Objetivo General

Diseñar, implementar y validar un sistema experimental para la caracterización térmica de sensores de fibra óptica con rejilla de Bragg (FBG) acoplados a actuadores piezoeléctricos, evaluando su comportamiento ante diferentes condiciones de montaje y frecuencias de excitación.

### Objetivos Específicos

- Diseñar soportes estructurales impresos en 3D para fijar sensores FBG sobre actuadores piezoeléctricos, considerando distintas configuraciones mecánicas.
- Calibrar térmicamente los sensores FBG utilizando termómetros certificados, estableciendo una relación confiable entre la longitud de onda reflejada y la temperatura.
- Implementar un sistema de control y excitación basado en actuadores piezoeléctricos que permita variar la frecuencia de operación de forma precisa y segura.
- Realizar campañas de medición para evaluar la respuesta térmica de los sensores FBG en función de la frecuencia de excitación y el tipo de soporte utilizado.
- Validar los resultados experimentales mediante comparación con los datos proporcionados por el fabricante del actuador.

### Estructura del documento

Este documento se encuentra estructurado en cinco capítulos, descritos a continuación:

- **Capítulo 1: marco teórico**

Presenta los fundamentos de sensores FBG, modelos de sensibilidad térmica, descripción de actuadores piezoeléctricos y trabajos previos relevantes.

- **Capítulo 2: metodología experimental**

Detalla el procedimiento general del estudio, planificación de pruebas, y criterios de validación de resultados.

- **Capítulo 3: diseño e implementación**

Describe el desarrollo del sistema experimental, desde la fabricación de bases hasta la configuración del sistema de control y adquisición de datos.

- **Capítulo 4: metodología de medición**

Expone el proceso experimental de caracterización térmica, incluyendo calibración, configuración del entorno y criterios metodológicos adoptados.

- **Capítulo 5: resultados y discusión**

Presenta y analiza los resultados obtenidos, validando el sistema frente a referencias del fabricante y evaluando el desempeño de los sensores.

Finalmente, se incluyen las conclusiones, sugerencias para trabajos futuros y anexos con material complementario como certificados de calibración y datos experimentales.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Fundamentos sensores fibra óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión basado en la propagación de luz a través de un núcleo dieléctrico, el cual está rodeado por un revestimiento con un índice de refracción menor para permitir la conducción eficiente de la luz mediante **reflexión interna total**. Este fenómeno óptico ocurre cuando un rayo de luz que viaja en un medio de mayor índice de refracción ( $n_1$ ) se encuentra con una interfaz de un medio de menor índice de refracción ( $n_2$ ) con un ángulo mayor al ángulo crítico ( $\theta_c$ ), definido por la ecuación:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) [8] \quad (2.1)$$

Donde  $\theta_c$  es el ángulo crítico de incidencia,  $n_1$  es el índice de refracción del núcleo y  $n_2$  es el índice de refracción del revestimiento [1].

La capacidad de transmisión de información en una fibra óptica se mide en función de su ancho de banda y atenuación. La atenuación en la fibra óptica, causada principalmente por dispersión de Rayleigh, absorción intrínseca del material y pérdidas por curvatura, puede expresarse como:

$$A(\lambda) = A_{intrinsic} + A_{Rayleigh} + A_{bending} \quad (2.2)$$

Donde  $A(\lambda)$  representa la atenuación total en función de la longitud de onda  $\lambda$ ,  $A_{intrinsic}$  es la absorción intrínseca del material,  $A_{Rayleigh}$  es la dispersión causada por imperfecciones en el material y  $A_{bending}$  son las pérdidas debidas a curvaturas en la fibra óptica [[9]].

Las fibras ópticas pueden clasificarse en:

- **Fibras multimodo:** poseen un núcleo con un diámetro mayor a 50  $\mu\text{m}$ , permitiendo la propagación de múltiples modos de luz simultáneamente. Sin embargo, presentan mayor dispersión modal, lo que limita su alcance en comparación con las fibras monomodo.
- **Fibras monomodo:** tienen un núcleo con un diámetro en el rango de 8-10  $\mu\text{m}$ , permitiendo

solo un modo de propagación, lo que minimiza la dispersión y permite transmisiones a largas distancias con menor pérdida de señal.

### 2.2 Sensores de rejilla de Bragg en fibra óptica (FBG)

En esta sección se describen los principios fundamentales de las rejillas de Bragg en fibra óptica (FBG), junto con una breve descripción de sus distintos tipos, funcionalidades y procesos de fabricación. Como se mencionó previamente, una FBG es una estructura periódica del índice de refracción inscrita en el núcleo de una fibra óptica [8]. Esta modulación periódica actúa como un filtro selectivo de longitud de onda, reflejando una parte específica del espectro de luz incidente y transmitiendo el resto.

El principio de funcionamiento de una FBG se basa en la condición de Bragg, que determina qué longitudes de onda serán reflejadas. Esta condición obedece a los principios de conservación de la energía y el momento. La conservación de la energía establece que la frecuencia de la onda reflejada es igual a la de la onda incidente, mientras que la conservación del momento impone que la suma del vector de onda de la luz incidente y el vector de onda asociado a la FBG sea igual al vector de onda de la luz reflejada. Matemáticamente, esta ecuación se representa de la siguiente manera: [8]:

$$K_i + K = K_f \quad (2.3)$$

Con lo que el vector de onda de la FBG  $\mathbf{K}$  tiene una dirección normal a los planos de la modulación del índice de refracción y una magnitud igual a  $2\pi/\Lambda$ , mientras que los vectores de onda de las ondas incidente  $K_i$  y reflejada  $K_f$  tienen igual magnitud pero dirección contraria, lo que permite transformar la expresión anterior en [8], [10]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.4)$$

Donde:

- $\lambda_B$  es la longitud de onda de Bragg, es decir, la longitud de onda reflejada.
- $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra.
- $\Lambda$  es el periodo de la modulación del índice de refracción [3].

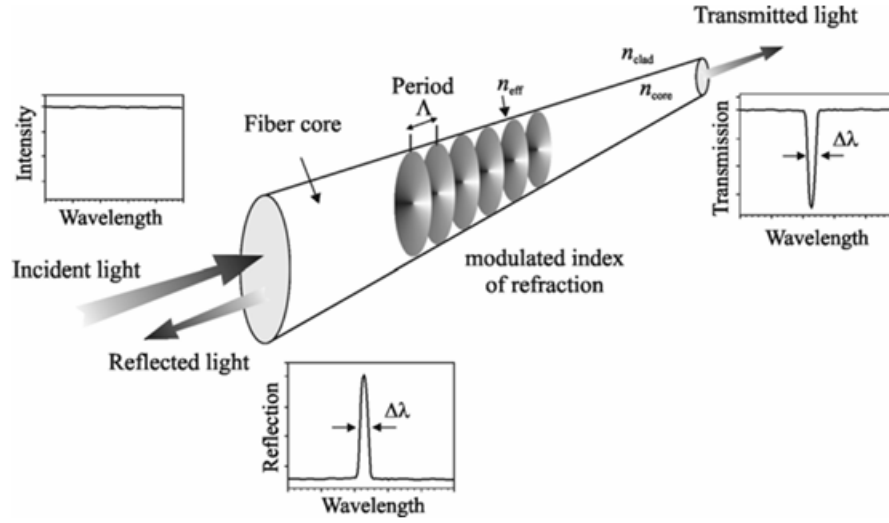


Fig. 2.1: Sensor FBG en núcleo de fibra óptica[8]

### 2.2.1 FBG como sensores ópticos

El uso de las FBG como sensores se ejecuta ya que la longitud de onda de Bragg depende del índice de refracción efectivo y de la periodicidad de la rejilla, con lo que el strain y la temperatura son los que se modifican debido a eso. A partir de la ecuación 2.4, el cambio en la longitud de onda reflejada por la rejilla de Bragg ( $\Delta\lambda_B$ ) se puede demostrar como [11]:

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

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon \Delta\epsilon + K_T \Delta T \quad (2.5)$$

En esta expresión,  $k_\epsilon$  y  $k_T$  denotan la sensibilidad de  $\lambda_B$  a los cambios de strain ( $\lambda\epsilon$ ) y temperatura ( $\Delta T$ ), los que tienen valores típicos cercanos a  $1 \frac{pm}{\mu\epsilon}$  y  $10 \frac{pm}{C}$ , respectivamente. En aplicaciones prácticas estos valores deben obtenerse a través de un proceso de calibración.

Es importante destacar que cualquier variación en la longitud de onda de Bragg puede ser producto de variaciones tanto de temperatura como de strain, por lo que, en aplicaciones donde solo una de estas cantidades es de interés se deben tomar precauciones, para que así la otra cantidad no afecte las mediciones.

### 2.2.2 Tipos de sensores FBG

Las rejillas de Bragg en fibra óptica (FBG) pueden clasificarse en cuatro categorías principales, dependiendo de las condiciones bajo las cuales son inscritas, como la intensidad y el tiempo de exposición a la luz ultravioleta (UV). Estas diferencias afectan su funcionamiento, durabilidad y estabilidad térmica. Además, el tipo de láser y la fibra óptica utilizada también influyen en sus propiedades ópticas y mecánicas.

- **FBG tipo I:** es la variante más común y utilizada en aplicaciones prácticas debido a su sencillo proceso de inscripción, que emplea fibras ópticas convencionales y baja intensidad de luz UV. Sin embargo, su principal desventaja es su limitada estabilidad térmica, ya que las rejillas pueden degradarse a temperaturas cercanas a los 200 °C. A pesar de esto, operan eficientemente en un rango de -40 °C a 80 °C, lo que las hace adecuadas para telecomunicaciones y sensores de temperatura y deformación [12].
- **FBG tipo IA:** presentan una menor sensibilidad térmica en comparación con las de tipo I. Su proceso de inscripción requiere tiempos de exposición a UV más prolongados y fibras ópticas con características especiales, lo que las hace más complejas de fabricar. Su estabilidad térmica es similar a la de las FBG tipo I, pero con una mayor estabilidad mecánica [8] [7].
- **FBG tipo IIA:** requieren de un periodo de exposición a UV más largo que las anteriores, lo que las hace más resistentes a temperaturas elevadas. Su temperatura de eliminación se encuentra alrededor de los 500 °C, lo que las hace más adecuadas para aplicaciones en entornos de alta temperatura [13].
- **FBG tipo II:** se generan con alta intensidad de luz UV, lo que produce un cambio significativo en el índice de refracción del núcleo de la fibra. Además, son altamente resistentes a temperaturas extremas, soportando hasta 800 °C durante periodos prolongados. Gracias a esta estabilidad térmica, se utilizan en entornos industriales hostiles y sensores de alta temperatura [13].

### 2.2.3 Tipos de inscripción de una FBG

El proceso de inscripción de una rejilla de Bragg en fibra óptica (FBG) se refiere a la técnica utilizada para modificar el índice de refracción del núcleo de la fibra, generando una estructura periódica que permite la reflexión selectiva de ciertas longitudes de onda. Inicialmente, se utilizó el método de inscripción interna [2], que consistía en irradiar el núcleo de una fibra óptica dopada con germanio mediante un láser de alta intensidad. Este procedimiento generaba un ligero

cambio en el índice de refracción, pero debido a que la irradiación se realizaba desde un solo extremo de la fibra, la modulación del índice no era completamente uniforme. Además, para alcanzar niveles de reflectividad apreciables, era necesario inscribir rejillas de gran longitud.

Debido a estas limitaciones, esta técnica ha sido reemplazada por métodos externos de inscripción, entre los que destacan la inscripción por interferometría, el método phase-mask y el método point-by-point, los cuales se describen a continuación.

**1. Inscripción de FBG por interferometría:** el método de inscripción mediante interferometría se basa en la exposición de la fibra fotosensible a luz ultravioleta (UV) con una longitud de onda cercana a 500 nm, lo que induce modificaciones permanentes en su índice de refracción. El método más común es el interferómetro divisor de amplitud [8] , [11], en el cual una fuente de luz UV es colimada mediante un lente cilíndrico y dividida en dos haces reflejados, que inciden sobre la fibra óptica con un ángulo específico, generando un patrón de interferencia.

En este sistema, el periodo de la modulación del índice de refracción de la FBG está determinado por la longitud de onda de la luz UV y el ángulo de incidencia, cumpliendo la siguiente relación:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{\mu v}}{2 \sin \theta} \rightarrow \lambda_B = \frac{eff \lambda_{\mu v}}{\sin \theta} [2] \quad (2.6)$$

Donde:

- $\Delta$  es el periodo de la rejilla
- $\lambda_{\mu v}$  es la longitud de onda de luz ultravioleta utilizada
- $\theta$  corresponde a la mitad del ángulo de incidencia de la luz con respecto a la fibra.

Una de las principales ventajas de este método es la capacidad de seleccionar la longitud de onda de Bragg de la FBG simplemente variando el ángulo de incidencia de la luz. Además, permite ajustar la longitud de la rejilla, modificando así la respuesta espectral del sensor.

No obstante, su principal desventaja es su alta sensibilidad a vibraciones mecánicas y desplazamientos microscópicos, lo que puede causar alteraciones en el patrón de interferencia y afectar la calidad de la inscripción. Asimismo, debido a que la luz debe propagarse en espacio libre antes de incidir sobre la fibra, fluctuaciones en la temperatura o en el aire

pueden influir en la estabilidad del proceso. Además, la fuente de luz utilizada debe poseer alta coherencia espacial y temporal, junto con una gran estabilidad en longitud de onda y potencia de salida.

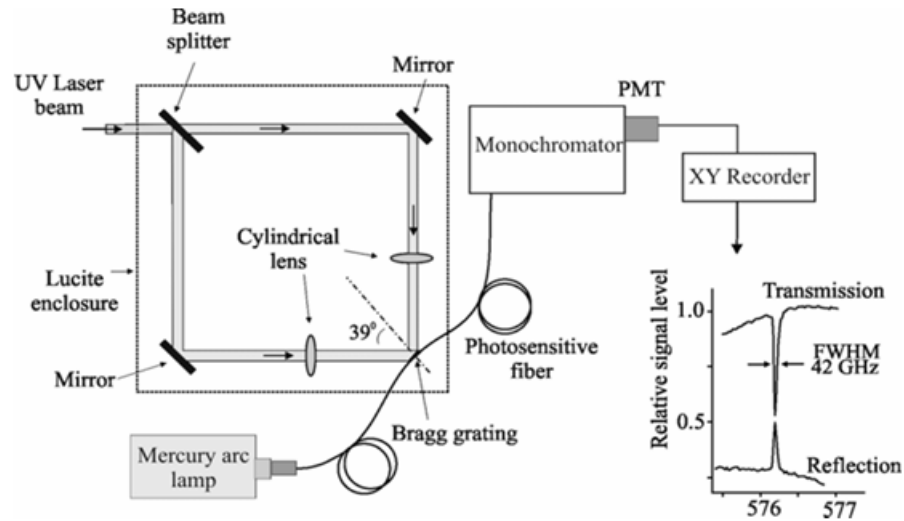


Fig. 2.2: Inscripción interferométrica[8]

2. **Inscripción de FBG mediante el método phase-mask:** este método consiste en utilizar una estructura de vidrio de sílice con un patrón de difracción grabado en su superficie, conocido como phase-mask, que es iluminado con luz UV para generar un patrón de interferencia que luego modula el índice de refracción de la fibra óptica fotosensible [6].

Este proceso es más robusto que la inscripción interferométrica, ya que minimiza los errores inducidos por vibraciones o variaciones ambientales, al eliminar la necesidad de dividir la luz en espacio libre, permitiendo además la fabricación de rejillas con un alto grado de repetibilidad.

Sin embargo, su principal limitación es que la intensidad de modulación del índice de refracción disminuye a medida que aumenta la distancia entre la fibra y el phase-mask. Por esta razón, es necesario colocar la fibra lo más cerca posible del phase-mask, aunque esto implica el riesgo de daños debido a la alta intensidad de la radiación UV.

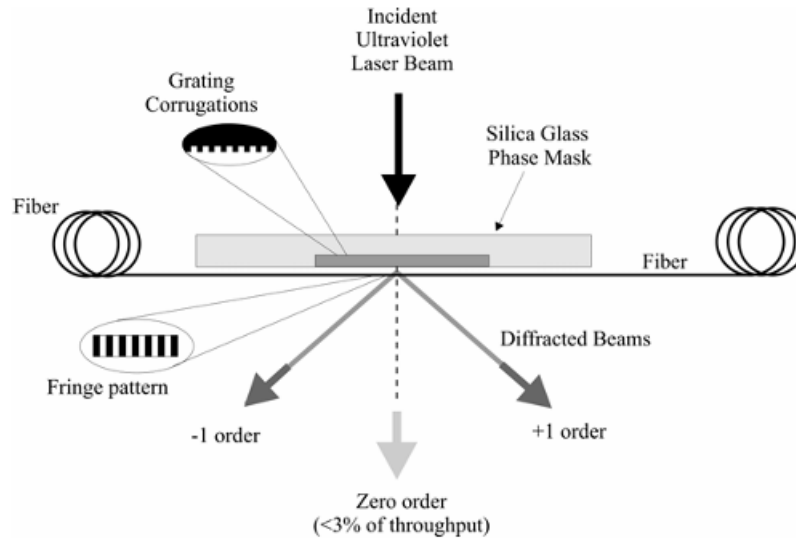


Fig. 2.3: Inscripción phase mask[8]

3. **Inscripción de FBG mediante el método point-by-point:** es una técnica de inscripción que consiste en irradiar directamente la fibra óptica con un láser UV de alta precisión para inscribir cada punto de la rejilla de forma individual [6]. Esto permite generar estructuras con cualquier tipo de modulación del índice de refracción, incluyendo rejillas apodizadas, las cuales pueden mejorar el rendimiento óptico del sensor al reducir efectos indeseados como los lóbulos secundarios en el espectro reflejado.

A pesar de su flexibilidad, esta técnica presenta desafíos importantes en su implementación, ya que requiere desplazamientos microscópicos de la fibra con gran precisión para inscribir cada punto de la rejilla con la separación adecuada. Además, el proceso es altamente susceptible a perturbaciones mecánicas y térmicas, lo que puede comprometer la calidad y estabilidad de la FBG fabricada.

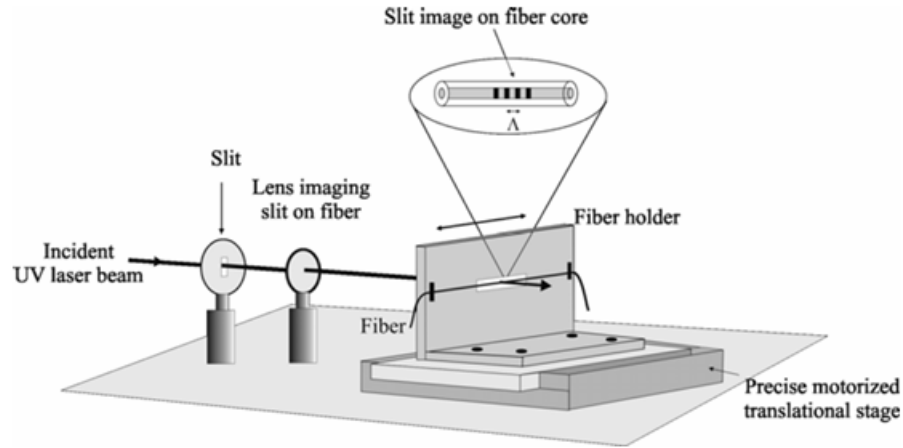


Fig. 2.4: Inscripci3n punto a punto[8]

### 2.2.4 Efecto de temperaturas y deformaciones en FBG

El desplazamiento de la longitud de onda reflejada por la rejilla de Bragg puede modelarse como:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon + \lambda_B\alpha\Delta T \quad (2.7)$$

Donde:

- $p_e$  es el coeficiente fotoelástico del material de la fibra.
- $\varepsilon$  es la deformaci3n axial aplicada a la fibra.
- $\alpha$  es el coeficiente de expansi3n t3rmica.
- $\Delta T$  es el cambio de temperatura.

## 2.3 Métodos de detecci3n de peaks en sensores FBG

El an3lisis espectral de los sensores FBG requiere t3cnicas precisas para detectar la longitud de onda de Bragg. Algunos m3todos incluyen:

1. **M3todo ajuste de curva:** en el ajuste polinomial se ajustan los puntos muestreados del espectro con una expresi3n polinomial a trav3s de alg3n tipo de regresi3n [16]. El ajuste de segundo orden es el m3s utilizado por su sencillez y fiabilidad. El primer paso es aproximar la parte central del espectro de la FBG como una expresi3n polinomial cuadr3tica como en la ecuaci3n 2.8 con alg3n tipo de regresi3n:

$$R(\lambda) \approx a_2 \lambda_B^2 + a_1 \lambda_B + a_0 \quad (2.8)$$

Por lo que, al tener 3 constantes del polinomio se puede estimar los parámetros de la ecuación cuadrática. Luego se procede a calcular el valor máximo de la longitud de onda de Bragg igualando al derivada de la ecuación 2.8 con respecto a  $\lambda = 0$ .

$$\frac{\partial R}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow \lambda_B = -\frac{a_1}{2a_2} \quad (2.9)$$

Sin embargo, para trabajar con polinomios de mayor orden se deberá trabajar con máximos locales y globales, discriminando entre ellos, por lo que no resultara como un método directo en comparación al descrito anteriormente. Pese a esto, este método presenta mucha similitud al método del centroide, dependiendo del ruido y de la cantidad de puntos del espectro.

2. **Método del centroide:** calcula el centro de masa de la señal reflejada, proporcionando una estimación robusta en presencia de ruido [8].

Se realiza un recorrido de todas las longitudes de onda muestreadas, a diferencia del método X-BW, ya que este método es muy sensible a la cantidad de ruido como a la tasa de muestreo espectral a diferencia del centroide.

$$\lambda_B = \frac{\sum_N \lambda_n R(\lambda_n)}{\sum_N R(\lambda_n)} \quad (2.10)$$

Donde:

- $N$  recorre todas las longitudes de onda muestreadas.
- $R(\lambda_n)$  es la magnitud del espectro.

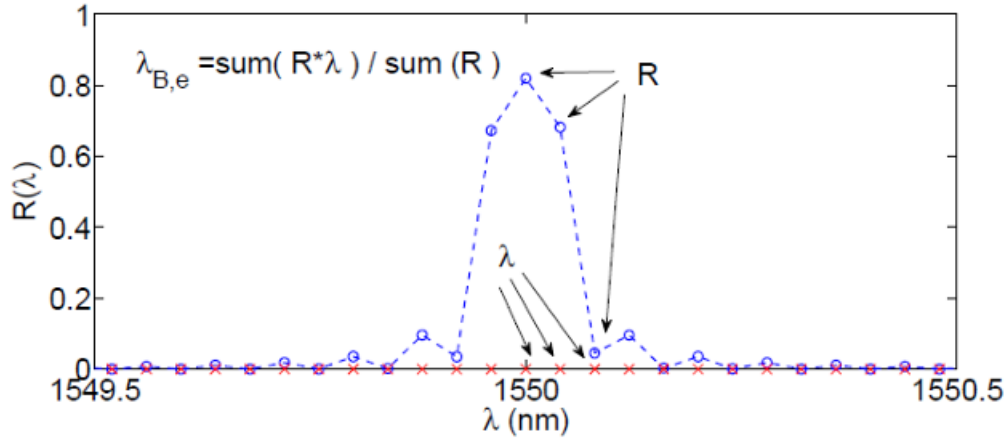


Fig. 2.5: Detección por centroide[14]

## 2.4 Multiplexaciones e interrogaciones de FBG

La interrogación de una rejilla de Bragg en fibra óptica (FBG) puede realizarse mediante dos enfoques principales, dependiendo del tipo de fuente óptica utilizada.

El primer enfoque emplea una fuente de luz blanca de espectro ancho para interrogar simultáneamente un rango de longitudes de onda. Esto se logra comúnmente utilizando un diodo emisor de luz superluminiscente (SLED) o el ruido de emisión espontánea amplificada (ASE) generado por un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) [14]. En este sistema, la luz se dirige hacia la FBG a través de un acoplador óptico, que también permite redirigir la luz reflejada por la rejilla de Bragg hacia un espectrómetro, el cual mide la intensidad espectral de la señal reflejada.

Este método es especialmente útil en aplicaciones de sensado cuasi-distribuido, donde múltiples sensores pueden ser interrogados utilizando un switch óptico para direccionar la luz hacia diferentes FBG dentro de una red de sensores. Para mejorar la capacidad de detección y aumentar la cantidad de sensores sin comprometer la precisión de la medición, se pueden emplear técnicas de multiplexación en el dominio del tiempo (TDM) y en longitud de onda (WDM).

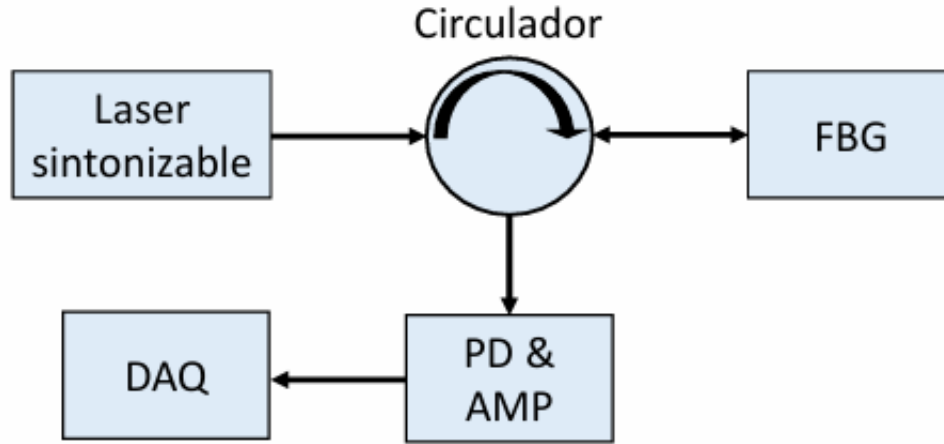


Fig. 2.6: Interrogador por barrido de luz [14]

### 2.4.1 Multiplexación en el dominio del tiempo (TDM)

La multiplexación en el dominio del tiempo (TDM) es una técnica que permite la interrogación secuencial de múltiples sensores FBG en una misma fibra óptica mediante la emisión de pulsos ópticos de corta duración. Cada sensor refleja la señal en un instante específico según su posición dentro de la fibra, permitiendo su identificación basada en el tiempo de propagación [15].

La principal ventaja de este método es su alta eficiencia espectral, ya que permite utilizar la misma longitud de onda para múltiples sensores sin interferencia. Sin embargo, su implementación requiere fuentes láser pulsadas y detectores de alta velocidad para procesar la información temporal.

La ecuación que describe el tiempo de llegada de la señal reflejada por cada sensor en un sistema TDM es:

$$t_i = \frac{2L_i}{V_g} \quad (2.11)$$

Donde:

- $t_i$  es el tiempo de llegada de la señal reflejada por el sensor  $i$ .
- $L_i$  es la posición del sensor a lo largo de la fibra.
- $V_g$  es la velocidad de grupo de la fibra.

### 2.4.2 Multiplexación por longitud de onda (WDM)

En la multiplexación mediante dominio de la longitud de onda (WDM), cada sensor FBG está diseñado para reflejar una longitud de onda específica dentro de un espectro de luz más amplio, permitiendo la interrogación simultánea de múltiples sensores en una misma fibra óptica [16].

Para ello, se emplea una fuente de luz de espectro amplio y un espectrómetro de alta resolución que puede detectar las longitudes de onda reflejadas por cada FBG.

La ecuación que rige la asignación de longitudes de onda en un sistema WDM es:

$$\lambda_i = \lambda_0 + \Delta\lambda(i - 1) \quad (2.12)$$

Donde:

- $\lambda_i$  es la longitud de onda central reflejada por el sensor  $i$ .
- $\lambda_0$  es la longitud de onda de referencia.
- $\Delta\lambda$  es el espaciado entre los sensores en términos de longitud de onda.

El principal beneficio de WDM es su simplicidad y escalabilidad, ya que permite la interrogación simultánea de numerosos sensores sin la necesidad de procesamiento temporal. Sin embargo, la resolución espectral del interrogador óptico es un factor crítico para evitar la superposición de las señales reflejadas.

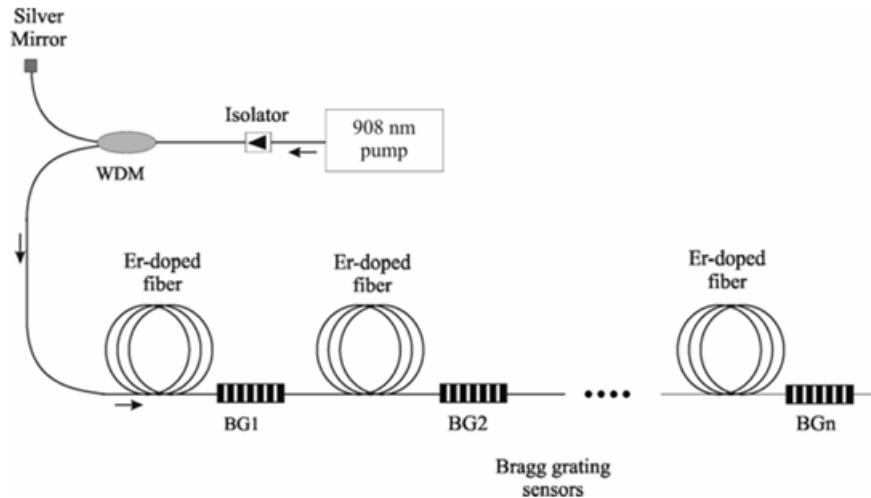


Fig. 2.7: Configuración serial con multiplexación WDM [8]

### 2.5 Fundamentos de actuadores piezoeléctricos

Los actuadores piezoeléctricos son dispositivos que convierten señales eléctricas en movimientos mecánicos de alta precisión, basándose en el efecto piezoeléctrico inverso. Este fenómeno, descubierto por los hermanos Curie en 1880, se manifiesta en ciertos materiales cristalinos que, al ser sometidos a un campo eléctrico, experimentan una deformación mecánica.

El principio operativo de los actuadores piezoeléctricos se basa en el efecto piezoeléctrico inverso, donde la aplicación de un voltaje provoca una deformación en el material. Esta característica permite movimientos extremadamente precisos y rápidos, con resoluciones en el rango nanométrico, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren alta exactitud y respuesta veloz.

Los materiales comúnmente utilizados en estos actuadores incluyen cristales naturales como el cuarzo y materiales cerámicos como el titanato de plomo y circonio (PZT). Las cerámicas piezoeléctricas, en particular, son populares debido a su facilidad de fabricación y adaptabilidad a diversas formas y tamaños.

Bajo esto podemos referir que se pueden modelar de la siguiente manera:

$$d_{ij} = \frac{S_i}{E_j} \quad (2.13)$$

Donde  $d_{ij}$  es el coeficiente piezoeléctrico,  $S_i$  es la deformación inducida y  $E_j$  es el campo eléctrico aplicado [17].

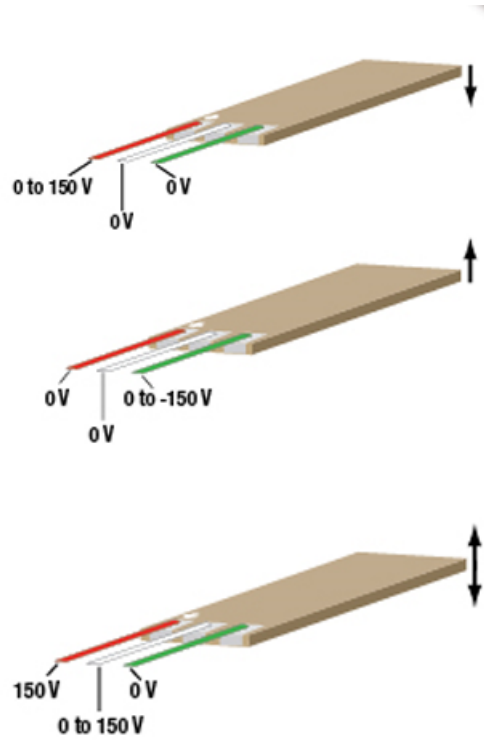


*Fig. 2.8:* Tipo de movimiento según voltaje aplicado

El piezoeléctrico tiene varios tipos de aplicaciones, sin embargo el tipo de actuación que utiliza es similar en varios modelos, con el cual la figura 3.1e se muestra que al aplicar un voltaje entre 0 a 150 [V] podemos obtener un movimiento bidireccional de manera vertical. Este tipo de movimiento según la frecuencia que se aplique actuará y se irá calentando. Con esto, el modelo **PB4NB2W** posee una tabla de uso 3.3, la que servirá de referencia para más adelante.

*Tab. 2.1:* Relación entre Frecuencia y Temperatura

| <b>Frequency (Hz)</b> | <b>Temperature (°C)</b> | <b>Temperature Rise (°C)</b> |
|-----------------------|-------------------------|------------------------------|
| 0                     | 25.00                   | 0.00                         |
| 1                     | 27.00                   | 2.00                         |
| 10                    | 29.95                   | 4.95                         |
| 20                    | 30.75                   | 5.75                         |
| 50                    | 32.72                   | 7.72                         |
| 80                    | 34.41                   | 9.41                         |
| 100                   | 35.50                   | 10.50                        |
| 150                   | 38.30                   | 13.30                        |
| 180                   | 40.45                   | 15.45                        |
| 200                   | 41.50                   | 16.50                        |
| 250                   | 42.00                   | 19.00                        |
| 300                   | 47.27                   | 22.27                        |
| 350                   | 50.00                   | 25.00                        |

Esta tabla es la base para medir el cambio en la temperatura del actuador piezoeléctrico, considerando el valor ambiental, tiempo de uso y diferencia de temperatura.

## 3 Diseño e implementación

### 3.1 Descripción general del sistema

El sistema de medición desarrollado tiene como objetivo evaluar el comportamiento térmico de actuadores piezoeléctricos mediante el uso de sensores FBG. Para ello, se diseñó una solución experimental compuesta por: bases mecánicas impresas en 3D para la sujeción del sensor, un sistema de control para generar señales eléctricas hacia el actuador, sensores FBG calibrados para registrar temperatura, un interrogador óptico para adquirir las señales reflejadas, y un software especializado (Enlight) para la visualización y procesamiento de datos.

Cada uno de estos componentes cumple un rol específico dentro del sistema, siendo la precisión de la lectura térmica y la estabilidad del montaje factores críticos para asegurar la confiabilidad de las mediciones. En las siguientes secciones se detalla el diseño, implementación e integración de cada subsistema, así como los criterios utilizados para su selección y configuración.

Se trabajó con dos configuraciones mecánicas: una con soporte para la fibra óptica, refiriéndose a un sistema capaz de sostener la fibra directamente en la base del actuador, así logrando el contacto constante y la firmeza del sensor. Por otro lado, el sistema sin base es todo lo contrario, ya que también se estará observando si al tener presión constante el sensor obtendrá mediciones falsas. En ambas configuraciones se utilizaron los mismos cinco componentes principales, los cuales se muestran en la figura 3.12:

- Un amplificador de alto voltaje modelo A400, encargado de llevar la señal de excitación hasta 150 V.
- Un interrogador óptico Hyperion si155, encargado de la adquisición de datos desde el sensor FBG.
- Un sensor FBG con longitud de onda central de 1540 nm, empleado para el registro de temperatura.
- Un controlador dSPACE RTI1202, junto con su interfaz de expansión, para generar señales analógicas hacia el actuador.

- Un actuador piezoeléctrico PB4NB2W, responsable de generar movimiento mecánico controlado en el sistema.

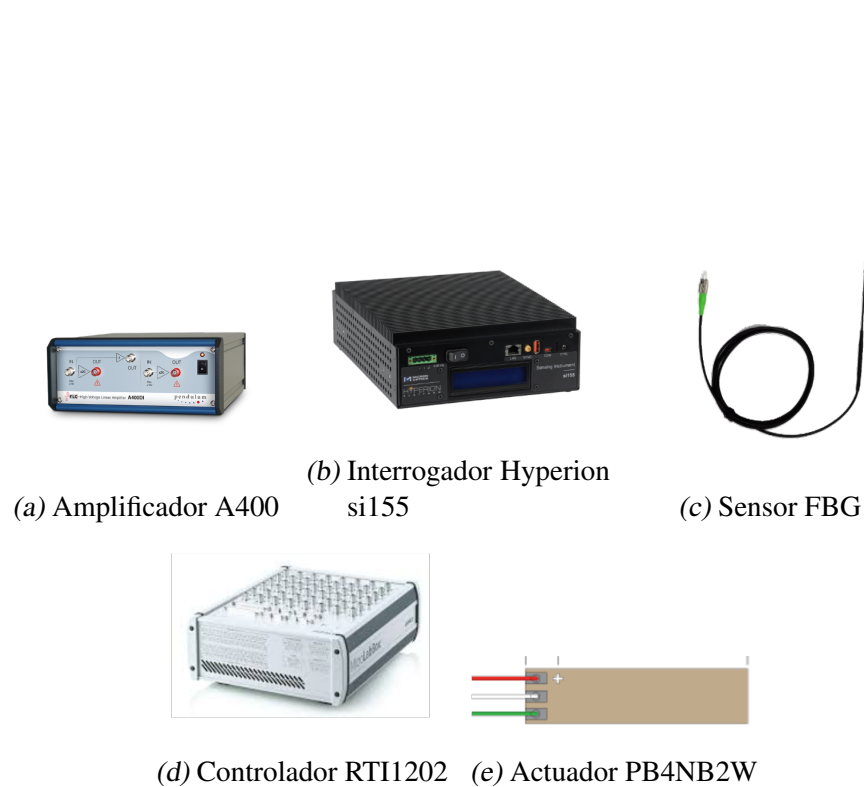


*Fig. 3.1: Componentes principales del sistema experimental*

En conjunto, estos elementos permitieron construir un sistema de medición preciso, versátil y replicable, adecuado para caracterizar la respuesta térmica del actuador bajo distintas condiciones de operación y montaje del sensor.

## 3.2 Diseño mecánico y soporte impreso en 3D

El montaje del sistema experimental contempló el diseño y fabricación de bases impresas en 3D para sostener tanto el actuador piezoeléctrico como el sensor FBG. Se evitó el uso de adhesivos, debido a que podrían dañar la fibra óptica o dejar residuos difíciles de remover, lo cual afectaría la repetibilidad del montaje y la integridad del sistema. En su lugar, se optó por una fijación mecánica reutilizable, compatible con las dimensiones físicas de los componentes y adecuada para una instalación precisa.

Para evaluar la influencia del soporte mecánico sobre las mediciones térmicas, se diseñaron dos versiones de base: una sin soporte directo para la fibra y otra con un soporte mecánico integrado. Ambas versiones fueron fabricadas con impresoras 3D FDM de 0.2 mm de resolución, utilizando recursos disponibles en la empresa TecnoROV. Esta resolución permitió alcanzar tolerancias adecuadas para trabajar con fibras ópticas de 250  $\mu\text{m}$  de diámetro.

#### 3.2.1 Base general

Se realizó una base genérica para ambos casos, ya que la parte superior es la que sostendrá la fibra, la inferior es la encargada de sostener el piezoeléctrico.

Como primer punto se tomó en consideración las medidas generales de la figura 3.2.

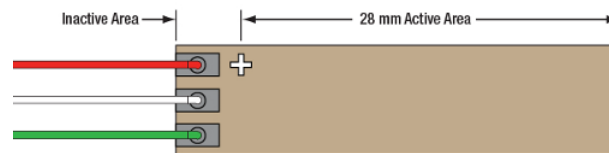
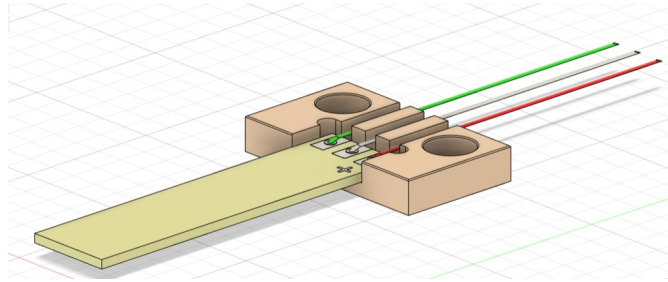
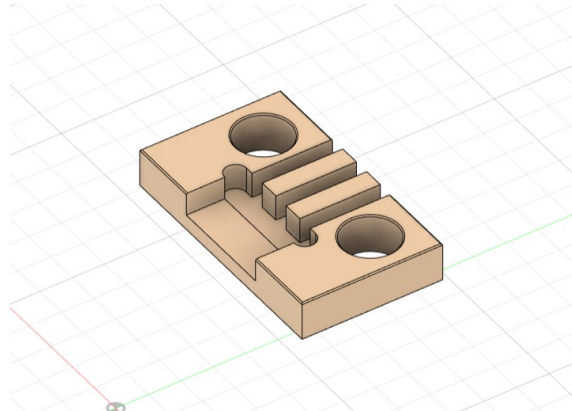


*Fig. 3.2: Medida actuador piezoeléctrico*

Inicialmente se consideró diseñar una base completamente nueva. No obstante, por motivos de compatibilidad dimensional con el actuador PB4NB2W y para optimizar el uso de material, se tomó como punto de partida el diseño de referencia provisto por el fabricante, mostrado en la figura 3.3.



(a) Base original con actuador



(b) Modelo base original

Fig. 3.3: Modelo 3D original proporcionado por el fabricante

Ya teniendo la base principal surgió otro problema, el cual era que el modelo original no estaba diseñado para incorporar sensores ópticos ni para prescindir de adhesivos. Por esta razón, se modificó el diseño, incorporando una ranura longitudinal de 0.3 mm de ancho y profundidad suficiente para alojar la fibra óptica sin generar presión. Además, se añadió una tapa desmontable para mantener la fibra en posición. La figura 3.5 presenta el diseño final.

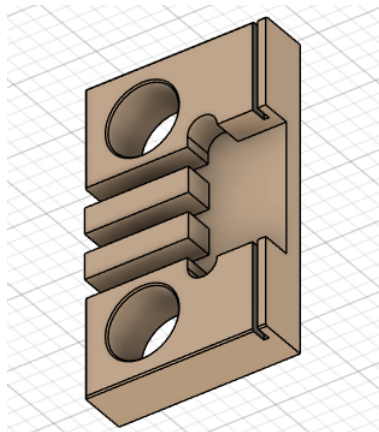


Fig. 3.4: Base inferior

#### 3.2.2 Base sin soporte

Ahora se inicio con el primer soporte diseñado, con el que luego de tener la parte inferior, se procede a diseñar la superior para la sujeción de la fibra óptica directamente.

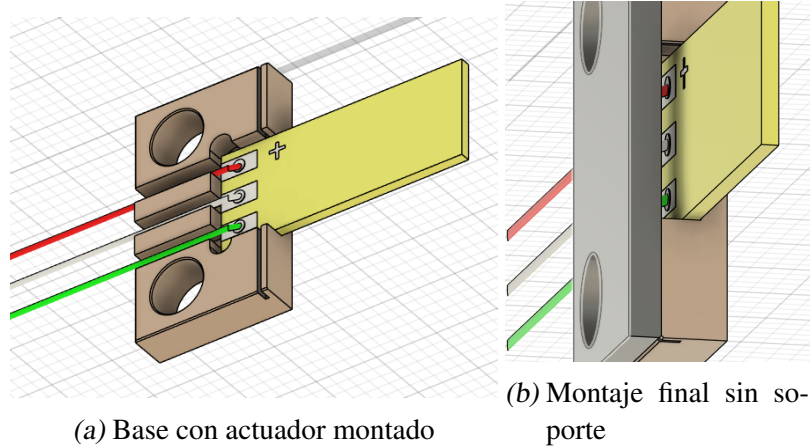


Fig. 3.5: Base impresa en 3D sin soporte mecánico para la fibra

La tapa superior fue diseñada con una separación de 1 mm respecto al actuador, permitiendo dejar un margen libre de aproximadamente 0.75 mm para evitar contacto físico con el sensor. Esta holgura considera posibles desviaciones angulares en el tendido de la fibra, reduciendo la probabilidad de lecturas erróneas por curvatura.

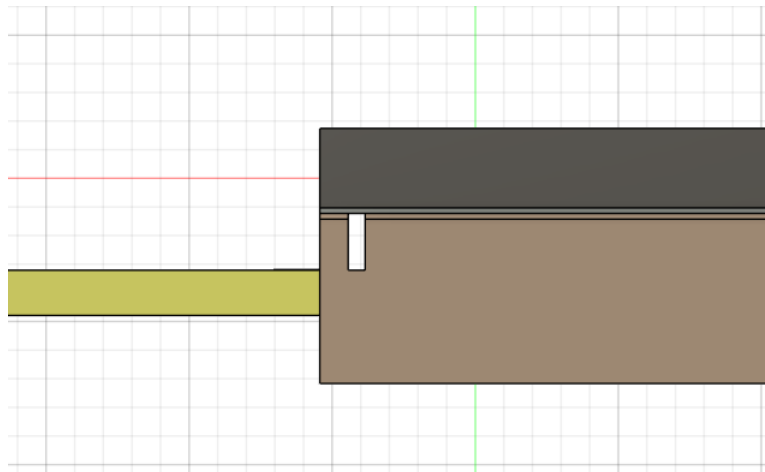


Fig. 3.6: Ranura de alojamiento de fibra en base sin soporte

Cabe destacar que en la hoja de anexo se adjuntan fotos reales de la impresión 3D junto al sensor de fibra óptica. 6.4

#### 3.2.3 Base con soporte

Para mejorar la estabilidad del sensor y reducir desplazamientos mecánicos indeseados, se diseñó una variante con soporte integrado. Esta versión reutilizó la geometría de la base anterior, pero incorporó una protuberancia redondeada de 0.8 mm de altura sobre la tapa superior, como se aprecia en la figura 3.7.

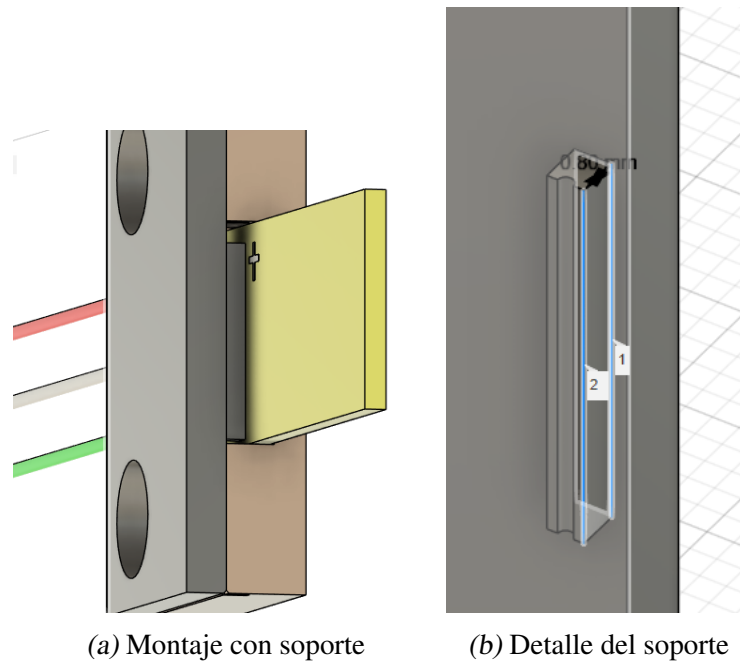


Fig. 3.7: Diseño de soporte superior para sujeción del sensor FBG

La geometría del soporte fue cuidadosamente adaptada al contorno del revestimiento de la fibra óptica, con el fin de evitar daños físicos y asegurar un contacto homogéneo. Esta disposición buscó minimizar errores por presión puntual o deformaciones locales en el núcleo.

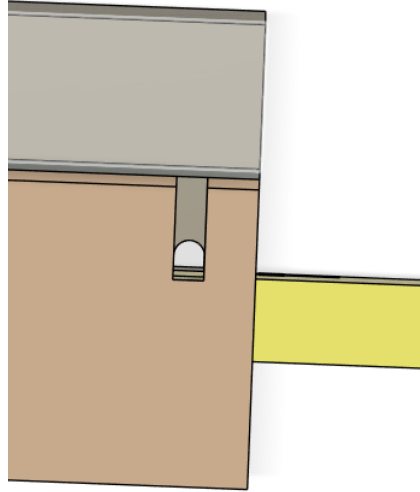


*Fig. 3.8: Ranura con soporte mecánico para fibra óptica*

Ambas versiones de base fueron fijadas mediante pernos al sistema de control, garantizando estabilidad durante las pruebas experimentales.

Al igual que la parte anterior, en la hoja de anexos se adjuntan fotos reales de la impresión en 3D junto al sensor FBG. 6.3

## 3.3 Calibración de sensores FBG

### 3.3.1 Calibración inicial

Antes de iniciar las pruebas comparativas, ambos sensores FBG fueron calibrados con un termómetro de laboratorio no certificado. Se aplicaron temperaturas conocidas y se registró la longitud de onda reflejada, obteniendo así una relación de tipo:

$$T = a\lambda^2 + b\lambda + c \quad (3.1)$$

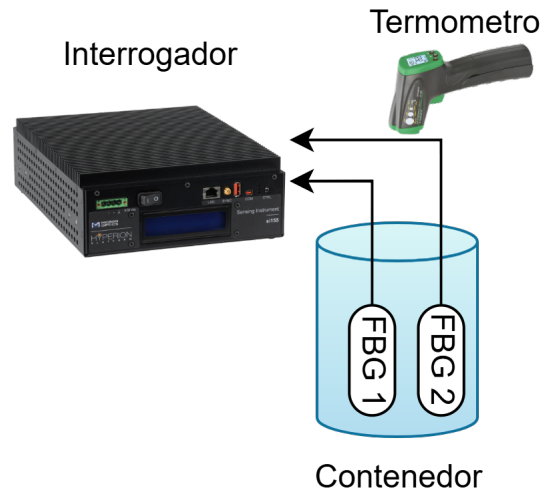


Fig. 3.9: Esquema medición termómetro MP780003

Esto permitió la recopilación de datos para la obtención de los parámetros según el esquema mostrado. Luego de anotar cada valor se utilizó la ecuación 3.1 para tener la ecuación polinómica de cada figura que se muestra a continuación.

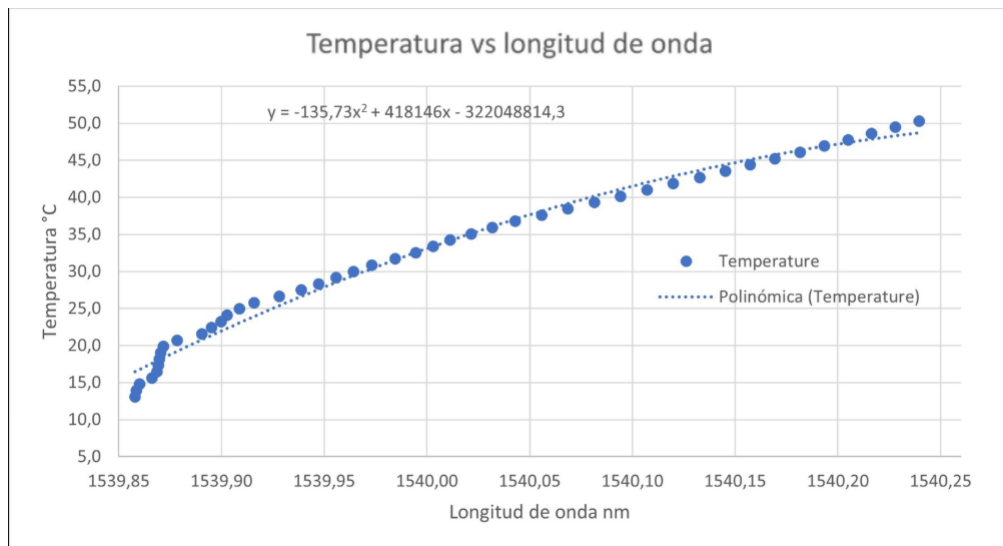


Fig. 3.10: Obtención de parámetros para sensor centrado en 1540 nm

### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

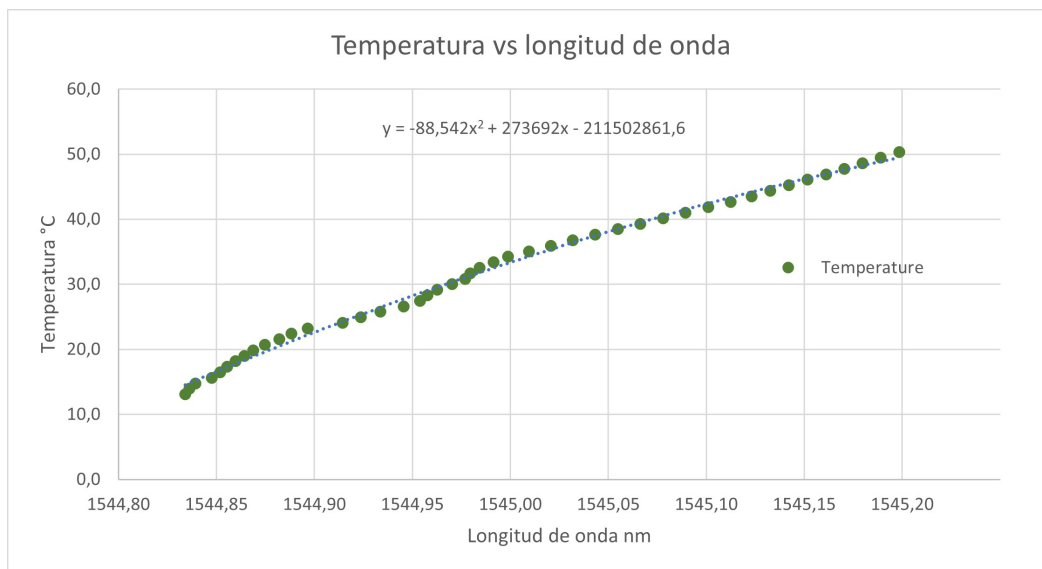


Fig. 3.11: Obtención de parámetros para sensor centrado en 1545 nm

Estos parámetros fueron cargados en Enlight, permitiendo visualizar la temperatura estimada durante las primeras mediciones. Esta calibración se usó temporalmente para evaluar ambos montajes.

| Valor parámetros |         |        |              |
|------------------|---------|--------|--------------|
| Longitud FBG     | A       | B      | C            |
| 1540             | -135,73 | 418146 | -322048814,3 |
| 1545             | -88,542 | 273692 | -211502861,6 |

Tab. 3.1: Valores parámetros de calibración

**Parameters**

☒ Active ☒ Visible ☐ Rate Of Change

ID:

Group:

Type:

# Averages:

Minimum:

Maximum:

Warn Thresh.:  ( 0.0 - 1.0 )

Expression:

Expression is valid

**Constants**

| Name | Value        |
|------|--------------|
| C1   | -135,73      |
| C2   | 418146       |
| C3   | -322048814,3 |

(a) Parámetros S1

**Parameters**

☒ Active ☒ Visible ☐ Rate Of Change

ID:

Group:

Type:

# Averages:

Minimum:

Maximum:

Warn Thresh.:  ( 0.0 - 1.0 )

Expression:

Expression is valid

**Constants**

| Name | Value        |
|------|--------------|
| C1   | -88,542      |
| C2   | 273692       |
| C3   | -211502861,6 |

(b) Parámetros S2

Fig. 3.12: Parámetros a utilizar

### 3.3.2 Re-calibración con termómetro certificado

Al constatar errores en las mediciones, ya que en variadas ocasiones cuando se hacían cambios abruptos en la frecuencia se notaban peaks indeseados, se optó por utilizar el Sensor 2 y realizar una nueva calibración, esta vez con un **termómetro certificado por CESMEC**, cuyo certificado se adjunta en el Anexo 1.

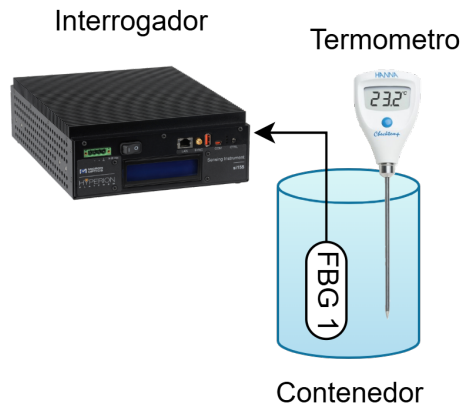


Fig. 3.13: Esquema medición termómetro calibrado

A partir de la nueva curva obtenida (ver figura 3.15), se extrajeron los coeficientes definitivos, los cuales se ingresaron nuevamente en Enlight. Esta curva fue utilizada para todas las mediciones presentadas en los resultados del capítulo siguiente.

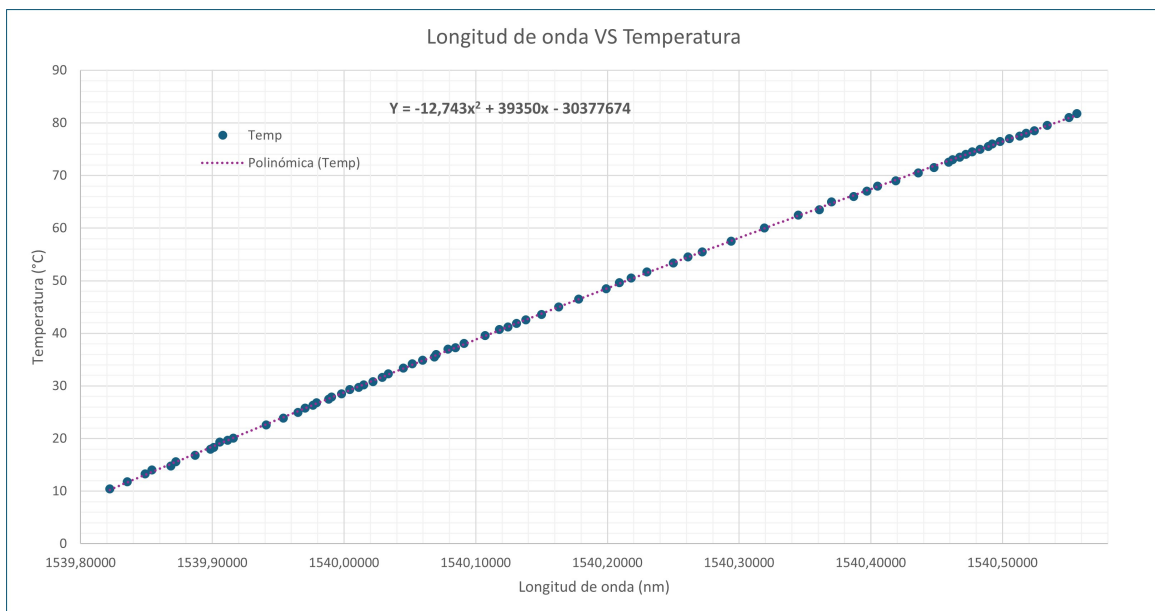


Fig. 3.14: Curva de calibración obtenida con termómetro certificado

| Valor parámetros |         |       |           |
|------------------|---------|-------|-----------|
| Longitud FBG     | A       | B     | C         |
| 1540             | -12,743 | 39350 | -30377674 |

Tab. 3.2: Valores parámetros de calibración con error de 0

Setup Reference Info

Range

Min: -4,415 Max: 56,521 Current: 23,378

Parameters

☒ Active ☒ Visible ☐ Rate Of Change

ID: SENSOR

Group: Group 1

Type: Temperature

# Averages: 1

Minimum:

Maximum:

Warn Thresh.: 0,80 (0.0 - 1.0)

Expression:  $FBG\_A1 \cdot FBG\_A1 \cdot A + FBG\_A1 \cdot B + C$

Expression is valid

Constants

| Name | Value     |
|------|-----------|
| A    | -12,743   |
| B    | 39350     |
| C    | -30377674 |

Update Delete

Fig. 3.15: Parámetros con re-calibración

## 3.4 Sistema de control y generación de señal

El sistema de control fue diseñado para excitar el actuador piezoeléctrico mediante señales sinusoidales de voltaje variable, generadas desde un modelo en Simulink y amplificadas hasta los niveles requeridos para su funcionamiento. El sistema completo incluye un computador con software Simulink, una tarjeta de adquisición dSPACE RTI1202, un amplificador A400 de alta tensión, y el actuador piezoeléctrico PB4NB2W.

La figura 3.16 muestra el esquema general del sistema, donde la señal se genera en el PC, se transmite a la tarjeta dSPACE, se amplifica mediante el A400 y finalmente se aplica al actuador.

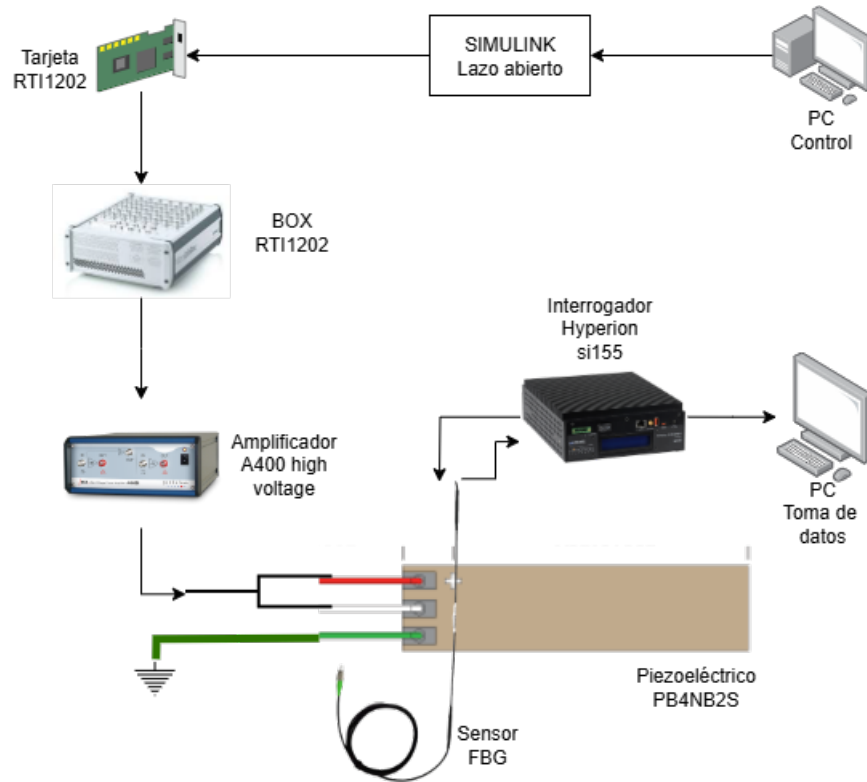


Fig. 3.16: Sistema de generación, amplificación y control de señal

#### 3.4.1 Modelo de señal en Simulink

Se desarrolló un modelo en Simulink para generar una señal alterna (AC) tipo seno con frecuencia y amplitud ajustables en tiempo real. El modelo opera en lazo abierto y permite controlar el movimiento del actuador piezoeléctrico mediante entradas analógicas desde la tarjeta dSPACE RTI1202.

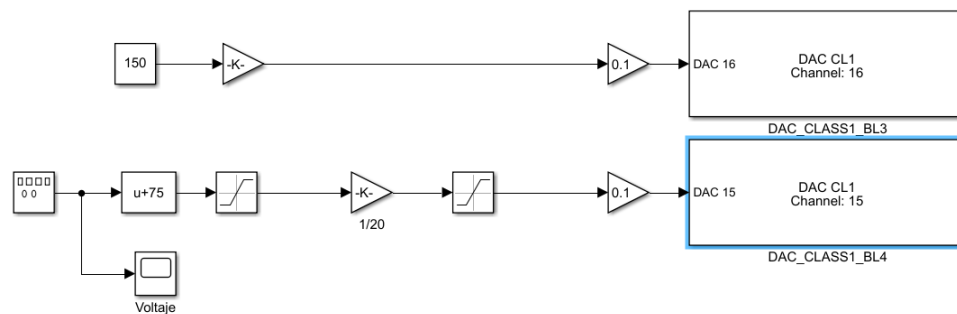


Fig. 3.17: Modelo en Simulink para control del actuador

El diseño del modelo considera una ganancia de  $\frac{1}{20}$  en la salida, dado que el amplificador

A400 posee una ganancia interna fija de 20. Esta relación permite alcanzar una salida máxima de 150 V cuando se entrega una señal de 7.5 V al amplificador.

#### 3.4.2 Configuración de la tarjeta dSPACE RTI1202

La tarjeta dSPACE RTI1202 fue configurada para entregar dos señales analógicas por sus canales 15 y 16:

- **Canal 15:** entrega la señal sinusoidal modulada entre 0 y 7.5 V.
- **Canal 16:** entrega una señal constante de 7.5 V para fijar el terminal positivo del actuador.

Esta configuración se basó en el esquema de conexión del actuador definido por el fabricante, tal como se resume en la tabla 3.3.

Tab. 3.3: Opciones de conexión del actuador piezoeléctrico

| Opción | Rojo       | Blanco           | Verde |
|--------|------------|------------------|-------|
| 1      | 150 V fijo | 0–150 V variable | GND   |
| 2      | 75 V fijo  | –75 V a +75 V    | –75 V |

Para este trabajo se utilizó la opción 1, que permite un control más simple con componentes disponibles. El canal blanco fue excitado con una señal variable (salida del canal 15), mientras que el canal rojo se mantuvo en voltaje fijo (canal 16).



Fig. 3.18: Amplificador A400

#### 3.4.3 Interfaz de usuario en tiempo real

Para permitir ajustes dinámicos durante las pruebas, se implementó una interfaz gráfica mediante Simulink real-time. Esta interfaz facilitó la modificación de frecuencia y amplitud en tiempo real, permitiendo un control preciso del comportamiento del actuador sin detener la ejecución del modelo.

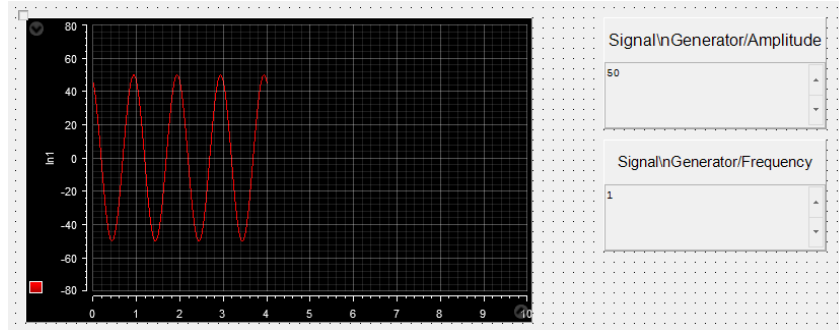


Fig. 3.19: Interfaz gráfica para el control de señal sinusoidal

El panel incluye controles deslizantes, botones incrementales y campos de texto para ingresar valores exactos. También se incorporó un gráfico de tiempo real que muestra la forma de onda aplicada al actuador. Esta herramienta resultó fundamental para garantizar que la señal aplicada cumpliera con los requisitos de cada ensayo experimental.

### 3.5 Integración del sensor FBG al sistema

Los sensores de rejilla de Bragg (FBG) fueron empleados para registrar la temperatura alcanzada por el actuador piezoeléctrico durante su operación. Dado que las FBG responden tanto a temperatura como a deformación, fue necesario optimizar su orientación y montaje para que el sistema midiera únicamente la variable deseada.

#### 3.5.1 Principio de funcionamiento y variable objetivo

La longitud de onda reflejada por una FBG varía en función de su temperatura, lo cual puede modelarse con la ecuación:

$$\Delta\lambda = k_t \Delta T \quad (3.2)$$

donde  $\Delta\lambda$  representa el cambio en la longitud de onda central,  $k_t$  es la sensibilidad térmica del sensor, y  $\Delta T$  el cambio de temperatura [8]. En este estudio, se consideró únicamente la variación térmica, descartando los efectos de deformación mecánica sobre la fibra.

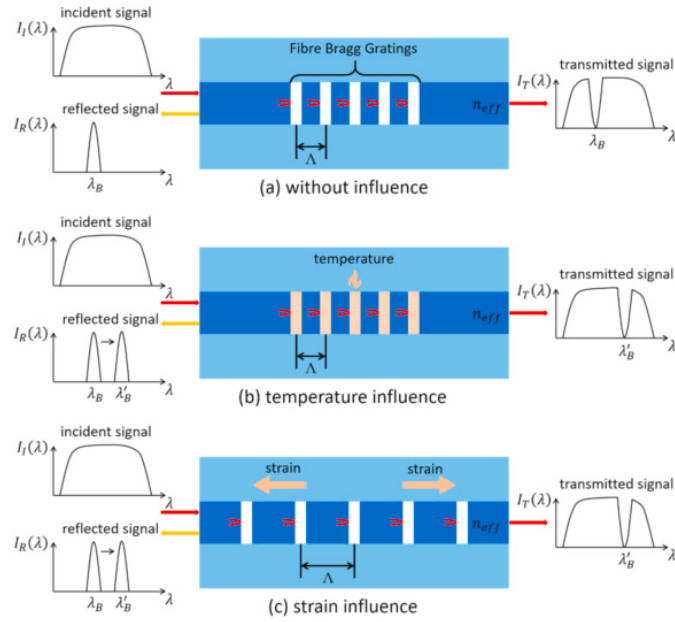


Fig. 3.20: Reflexión de una FBG

Como se explicó en el capítulo 2, el análisis se centró en la onda reflejada. Este componente es monitoreado por el interrogador óptico y utilizado para estimar la temperatura, mediante los parámetros de calibración previamente definidos.

#### 3.5.2 Orientación y montaje del sensor

Con el objetivo de minimizar la interferencia por vibraciones, el sensor FBG fue montado de forma perpendicular al eje de desplazamiento del actuador piezoeléctrico. Esta orientación asegura que la deformación inducida por la vibración no actúe directamente sobre el eje sensible del sensor.

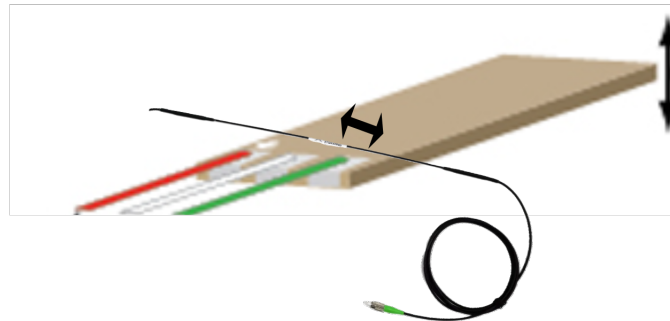


Fig. 3.21: Montaje del sensor FBG perpendicular al actuador piezoeléctrico

Esta decisión se basa en el comportamiento físico de la fibra, ya que, como se observa en la figura 3.20, un aumento en el espaciado de la rejilla genera una variación de la longitud de onda reflejada. Si el sensor estuviera alineado con la vibración, podrían introducirse errores no atribuibles al efecto térmico.

Todo esto considerando el área que es utilizable en el actuador, según lo informado por el proveedor, donde nos indica que se tiene 4 mm de punto inactivo.

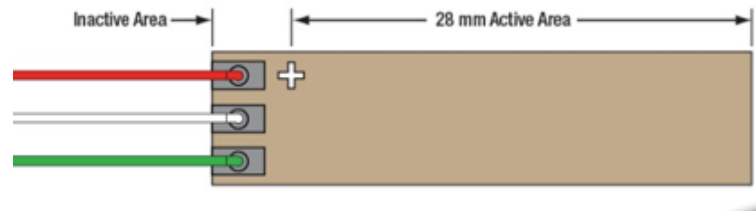


*Fig. 3.22: Área inactiva del actuador piezoeléctrico*

#### 3.5.3 Sensores utilizados y disposición experimental

Durante el desarrollo del sistema se utilizaron dos sensores FBG, cada uno con una longitud de onda central distinta (ver figura 3.23). Inicialmente, se utilizó un sensor calibrado con el termómetro infrarrojo. Sin embargo, debido a problemas de estabilidad y lecturas inconsistentes, se re-calibró el otro sensor con un termómetro certificado para validar datos y así obteniendo mediciones confiables.

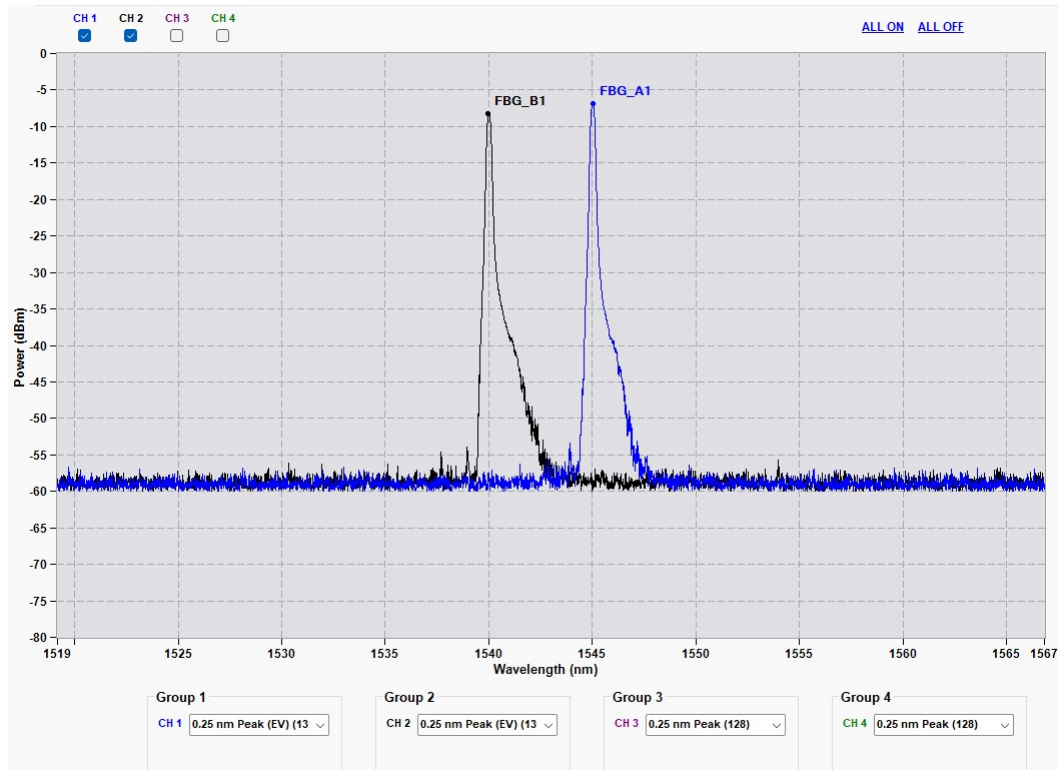


Fig. 3.23: Longitud de onda central de los sensores FBG

Ambos sensores fueron fijados mecánicamente en la base impresa en 3D, sin uso de adhesivos, como se describe en la sección 3. La temperatura máxima admisible por la fibra fue de 80 °C, aunque la calibración se realizó hasta 50 °C por limitaciones del termómetro disponible. Cabe destacar que el proveedor del actuador piezoeléctrico recomienda no trabajar con temperaturas mayores a 80°C, a lo que los límites establecidos se limitan tanto por el actuador, como el sensor FBG.

## 4 Metodología de medición

Este capítulo describe el procedimiento seguido para la medición de temperatura mediante sensores FBG integrados a un sistema de control con actuadores piezoeléctricos. Se detalla el ciclo experimental, las condiciones térmicas, el montaje, la calibración de sensores y el flujo de adquisición de datos.

### 4.1 Condiciones de operación

El objetivo fue evaluar el comportamiento térmico del actuador piezoeléctrico PB4NB2W cuando es sometido a vibraciones controladas, utilizando sensores FBG para registrar la temperatura alcanzada. Como los sensores FBG responden tanto a temperatura como a deformación mecánica, se orientaron perpendicularmente al eje de movimiento del actuador, minimizando así interferencias mecánicas.

Se establecieron dos límites críticos durante el ensayo:

- **Temperatura máxima:** no superar los 50°C, ya que ese era el límite del termómetro utilizado en calibración y del rango validado del sensor.
- **Frecuencia máxima:** no superar los 150Hz, lo que corresponde al 40 % del límite de 370Hz establecido por el fabricante del actuador.

### 4.2 Procedimiento experimental

Cada ensayo consistió en someter el actuador a una secuencia programada de frecuencias durante 11 minutos. El patrón fue el siguiente:

Este patrón permitía observar tanto el aumento térmico por acumulación de energía como el efecto del cambio brusco de frecuencia (por ejemplo, de 150Hz a 1Hz) en la estabilidad del sistema.

Tab. 4.1: Secuencia de frecuencia y tiempo de aplicación

| Frecuencia (Hz) | Tiempo (min) | Aumento de temperatura esperado (°C) |
|-----------------|--------------|--------------------------------------|
| 1               | 11           | 2                                    |
| 10              | 11           | 4.95                                 |
| 25              | 11           | 6.25                                 |
| 50              | 11           | 7.72                                 |
| 75              | 11           | 8.8                                  |
| 100             | 11           | 10.50                                |
| 125             | 11           | 12.5                                 |
| 150             | 11           | 13.3                                 |
| 110             | 11           | 11.8                                 |
| 80              | 11           | 9.41                                 |
| 40              | 11           | 7.3                                  |
| 1               | 11           | 2                                    |
| 120             | 11           | 12                                   |

### 4.3 Condiciones ambientales

Las pruebas se realizaron en horario nocturno por dos razones:

1. Durante el día, el laboratorio se calienta debido a la luz solar directa, afectando las mediciones térmicas incluso sin excitación del actuador.
2. Al trabajar con temperatura ambiente más baja (15–16°C), fue posible controlar el entorno térmico más fácilmente. Incluso se realizaron pruebas con calefactor encendido (interior a 24°C) para comparar escenarios.

Esta estrategia ayudó a mantener condiciones repetibles y controladas.

### 4.4 Montaje físico y decisión de cambio de base

Inicialmente se construyeron dos bases impresas en 3D para alojar los sensores FBG:

- Una **sin soporte**, donde la fibra reposaba libremente en una ranura.
- Otra **con soporte**, donde la fibra quedaba firme pero sin presión directa.

Durante las primeras pruebas con la base sin soporte, se observó desplazamiento del sensor al bajar bruscamente la frecuencia, además de no lograr medir de manera correcta la temperatura, lo que causó lecturas erróneas. Como resultado, se descartó esa base, y se decidió trabajar únicamente con el montaje con soporte.

### 4.5 Adquisición de datos

El software Enlight se utilizó como sistema de adquisición, entregando temperatura directamente gracias a la curva de calibración cargada previamente.

Durante cada ensayo se adquirieron bloques de **10.000 muestras**, organizados en grupos de **1.000**, aplicando un promedio interno para suavizar perturbaciones. Este método garantizó estabilidad en la medición y reducción de errores puntuales debidos a vibración residual o interferencias menores.

### 4.6 Flujo de trabajo del ensayo

La figura 4.1 muestra el flujo seguido durante cada medición, desde la instalación del sensor hasta la obtención del registro completo de temperatura.

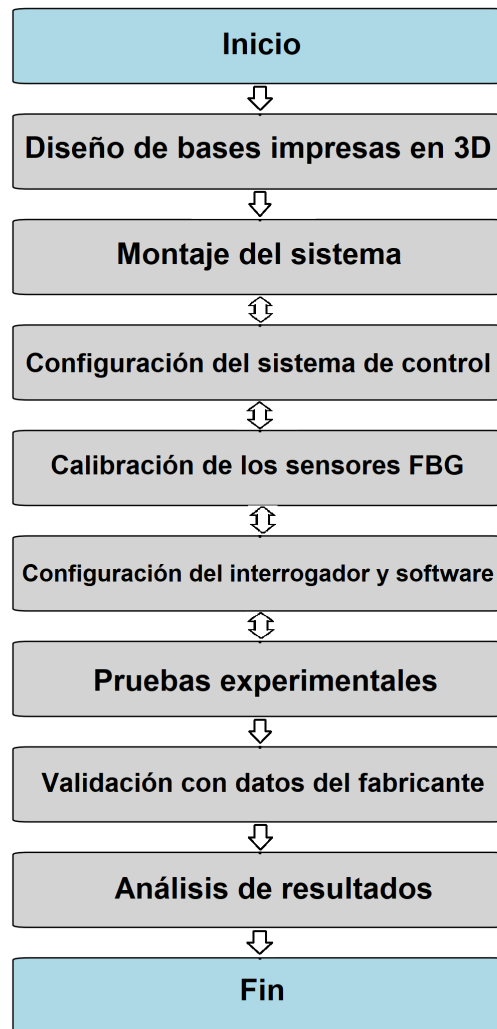


*Fig. 4.1:* Flujo de trabajo

## 4.7 Observaciones finales

El diseño de la metodología se ajustó a partir de la experiencia obtenida en pruebas preliminares. La decisión de reemplazar el sensor mal fijado, el uso del termómetro certificado, la adopción de frecuencias seguras y la adquisición con filtrado permitieron obtener un procedimiento de medición confiable, replicable y técnicamente válido.

Los datos obtenidos permiten evaluar el comportamiento térmico del actuador en función de su frecuencia de operación, tal como será analizado en el Capítulo 5.

## **5 Resultados y discusión**

### **5.1 Descripción general de las pruebas realizadas**

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas con los sensores FBG, considerando las distintas configuraciones de montaje: sin soporte, con soporte y con soporte tras recalibración. Además, se compara el comportamiento térmico del sistema experimental con las curvas entregadas por el fabricante del actuador piezoeléctrico, analizando su validez y precisión.

### **5.2 Resultados de la medición de temperatura**

#### **5.2.1 Base sin soporte**

En esta primera configuración, el sensor FBG fue instalado en una base sin soporte mecánico. Esto significó que la fibra óptica no contaba con un sistema de sujeción adicional más allá de la tapa superior, lo que generó cierta inestabilidad durante la medición.

En la figura 5.1, se presenta el comportamiento térmico obtenido. Se observa que, al incrementar la frecuencia del actuador, la temperatura registrada por el sensor no sigue un patrón claro ni progresivo. Existen oscilaciones que dificultan la obtención de una curva representativa del sistema.

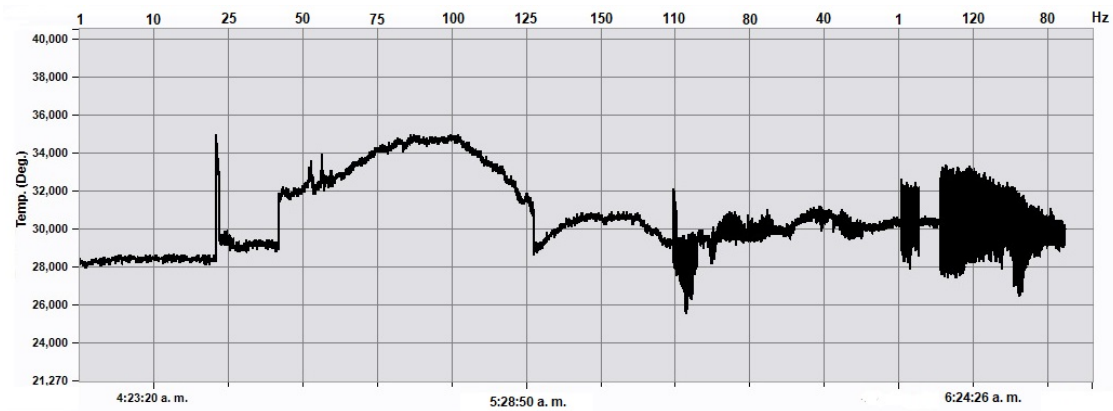


Fig. 5.1: Temperatura medida por el sensor FBG montado sin soporte.

En la figura 5.1 se observa el primer dato incongruente, el cual llega entre los 10 y 25 Hz, donde se debió a una vibración errante en el sensor, provocando así un aumento de  $6^{\circ}\text{C}$  en un lapso de tiempo pequeño y regresando así a su temperatura anterior.

Esto se puede explicar por el hecho de que, al no contar con una fijación firme, el sensor FBG estuvo más expuesto a las vibraciones mecánicas, generando deformaciones no térmicas que alteraron la longitud de onda reflejada. Esta interferencia provocó registros erráticos e incoherentes, lo que motivó el descarte de esta configuración para mediciones confiables.

### 5.2.2 Base con soporte

Posteriormente, se instaló el sensor FBG en una base con soporte mecánico, lo que permitió una fijación más firme y estable. En la figura 5.2, se presentan los resultados obtenidos en esta configuración.

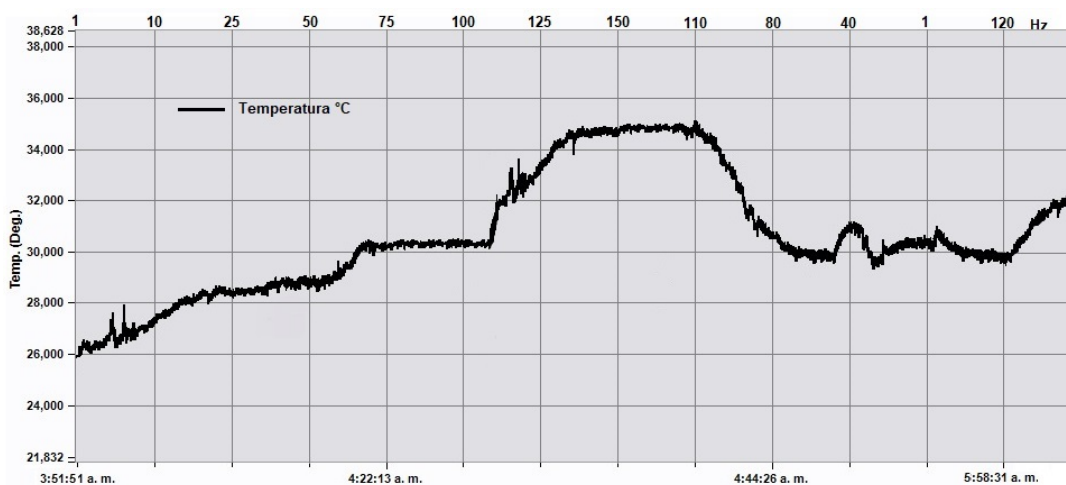


Fig. 5.2: Temperatura medida por el sensor FBG montado con soporte (sensor original).

A diferencia del caso anterior, se observa una tendencia creciente en la temperatura medida a medida que aumenta la frecuencia del actuador. Sin embargo, aún existen desviaciones respecto a la curva esperada. Esto puede deberse a una calibración inicial del sensor no óptima.

Si bien el soporte redujo las perturbaciones mecánicas, los valores absolutos obtenidos no permitieron validar correctamente el modelo térmico del actuador.

Entre los 75 y 100 Hz no se observó un aumento de temperatura, con lo que se puede inferir que fue debido al termómetro, lo que anteriormente se mencionó. No es el único caso, ya que cuando se aumentó la frecuencia hasta los 125 no fue sino hasta la mitad del tiempo, que hubo un aumento brusco de temperatura.

Todo esto confirma que al tener un error del 2 % en el termómetro con el cual se calibró este sensor, afecta directamente a la medición.

### **5.2.3 Base sin soporte (sensor re-calibrado)**

Iniciando las mediciones con el sensor re-calibrado se obtuvieron datos bastante similares con respecto al punto anterior, dado que la toma de muestras fue errática, sin embargo ahora podemos notar las variaciones abruptas. Teniendo la misma secuencia de frecuencia usada anteriormente vemos en la figura 5.3 que no hubo un aumento de temperatura mayor a 2 °C.

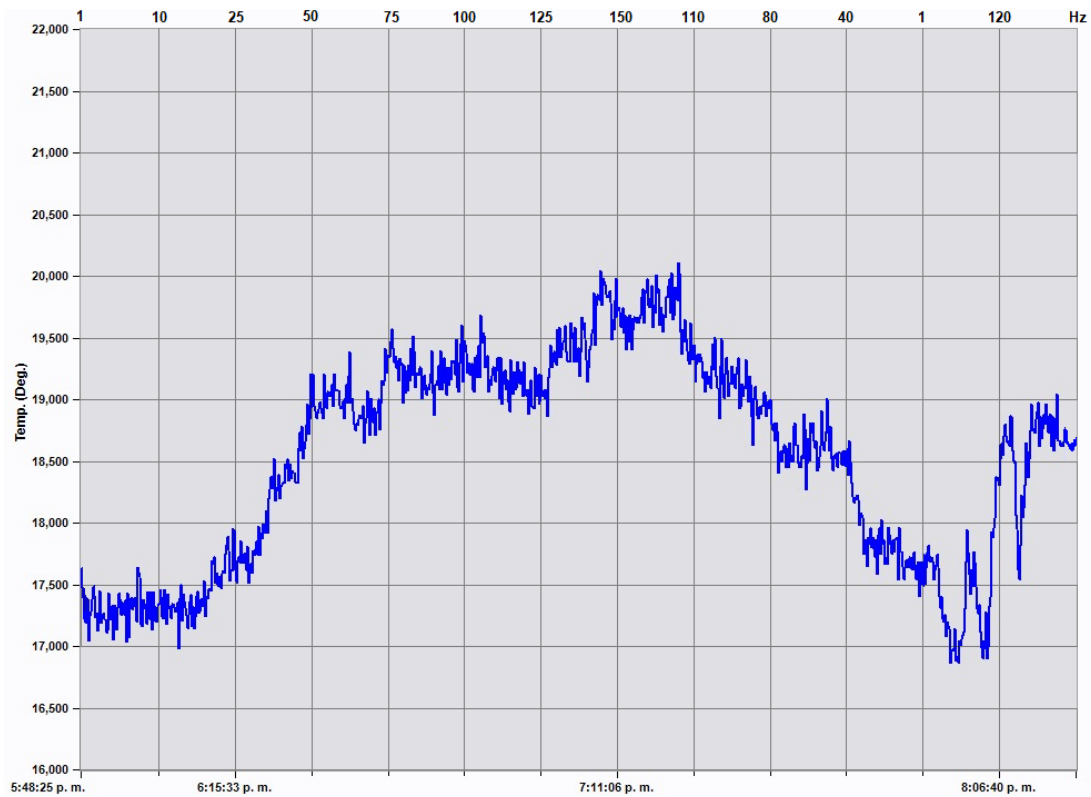


Fig. 5.3: Temperatura medida por el sensor FBG montado con soporte (sensor re-calibrado).

En el sistema calibrado originalmente en la figura 5.1 se tuvo un comportamiento inexacto cuando se realizaron cambios bruscos de temperatura. Al igual que este sistema podemos ver que en el cambio de 1 Hz a 120 Hz no se detectaba la temperatura correcta, debido al movimiento que poseía el actuador piezoeléctrico. Se observa que en la temperatura en ese momento fue de 17,6 °C aproximadamente y cuando se realizó el aumento de frecuencia disminuyó la temperatura en 0.6 °C dos veces en el mismo bloque de tiempo.

### 5.2.4 Base con soporte (sensor re-calibrado)

La última medición fue realizada nuevamente en la base con soporte, pero con un termómetro calibrado y certificado, a lo que las temperaturas que se deberían registrar serían muy similares en forma al anterior, pero con el pequeño detalle que esta vez, los cambios mínimos de temperatura sean detectados.

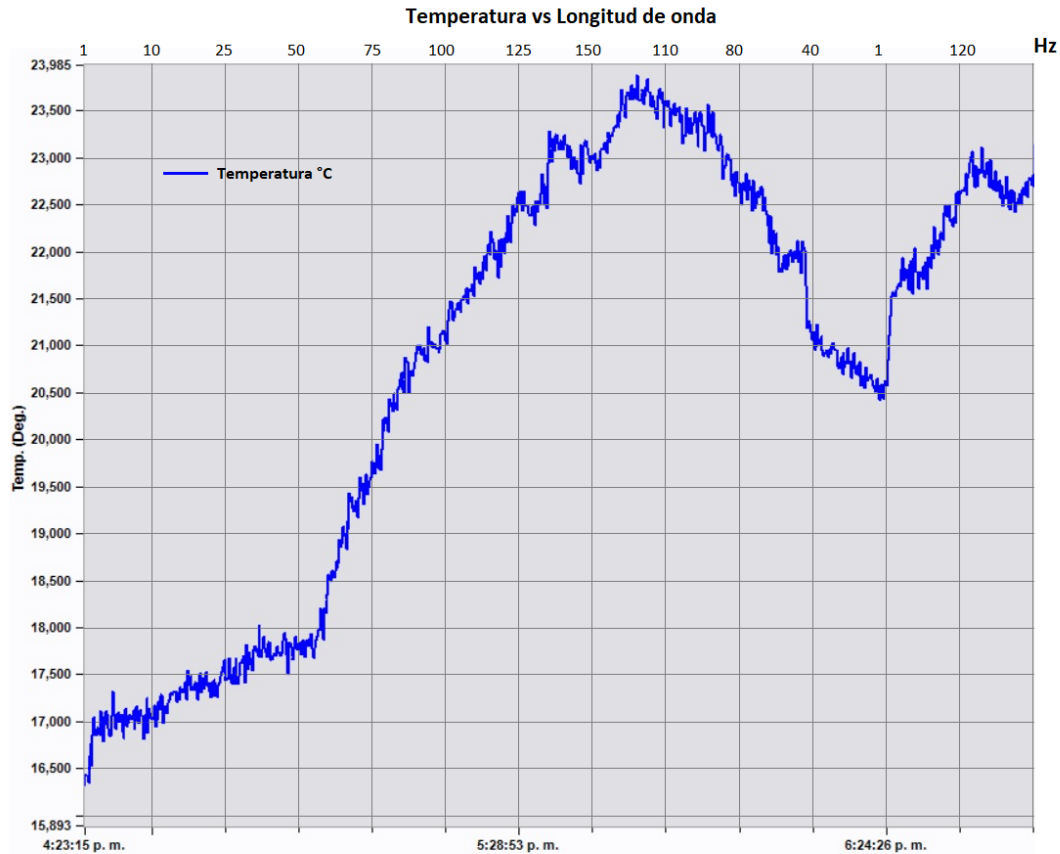


Fig. 5.4: Temperatura medida por el sensor FBG montado con soporte (sensor re-calibrado).

La una mejora con respecto a los datos anteriores, por como podemos ver hasta los 50 Hz es casi lineal creciente y tomando además la línea de temperatura, a medida que aumenta la frecuencia, aumenta la temperatura y los pequeños cambios, ya sean de 0,1 °C, son detectados.

Cabe destacar que no se observan puntos donde se mantenga la temperatura estable, ya que la definición del sensor mejoró significativamente. No existieron movimientos del sensor en su base ni datos erróneos en las mediciones; solo existe ruido, pero esto en trabajos futuros se puede filtrar.

### 5.3 Comparación con curva del fabricante

Para lograr establecer si las mediciones fueron lo esperado, se baso en la temperatura indicada por el fabricante, lo cual vemos a continuación:

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

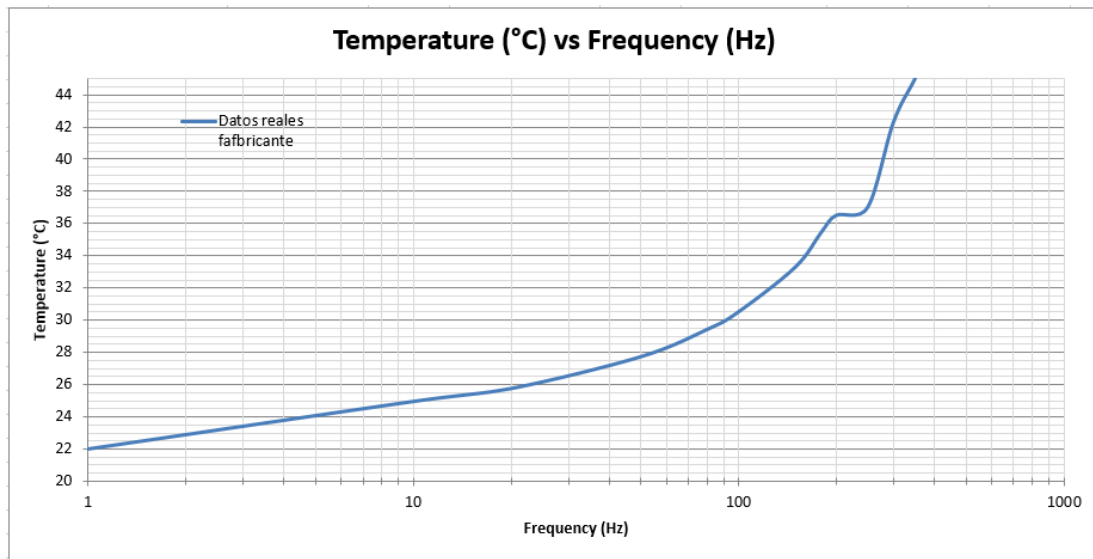


Fig. 5.5: Temperatura entregada por el fabricante

El fabricante nos indica que la temperatura aumentará por un uso de 10 minutos en la frecuencia deseada, además de que la temperatura ambiente establecida es de 20°C, trabajando hasta los 370 Hz según la figura 5.5, con lo que las mediciones serán comparativas con respecto al aumento de esto.

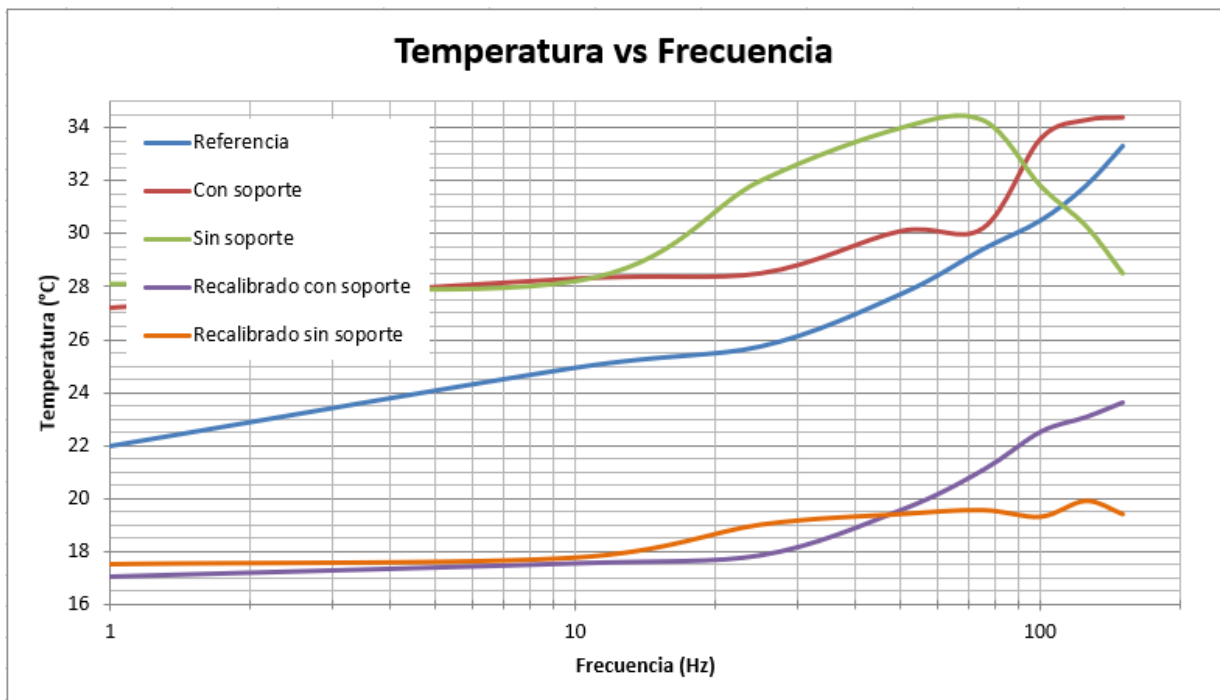


Fig. 5.6: Comparativa entre las mediciones

Si observamos el gráfico 5.6 tenemos línea referencial, la cual es [Referencia](#), con la que se

tiene la temperatura inicial y continua de manera exponencial hasta los 150 Hz que fue el punto máximo que se trabajo. Teniendo las otras 3 líneas, las cuales corresponden a los valores obtenidos según como fue medido. Si se observa el **Re-calibrado con soporte** es la que mas se asemeja a la referencial, puesto que se tiene una mejor calibración, siendo además que no posee puntos que sean llanos o que se mantengan durante el periodo de trabajo. Ahora bien, las mediciones de la primera calibración, se tiene **con soporte** y **sin soporte**.

La toma de datos con soporte si bien se tiene la forma del gráfico bastante similar a la referencial, se tiene un detalle el cual fue que al no tener una precisión tan detallada para cambios de temperatura pequeños, se estanca en variaciones muy bajas, hasta que detecta una diferencia mayor, que fue lo que ocurrió entre los 75 Hz y 100 Hz, pero al pasar a los 125 Hz logra detectar esa temperatura. Si bien no fue el único momento donde sucedió eso, ya que al finalizar la prueba en la parte creciente, es decir, a los 150 Hz se percata observar lo mismo que lo mencionado anteriormente.

Por otra parte, cabe destacar que el sistema re-calibrado posee un recorrido muy similar al sistema de referencia, solo varía la temperatura ambiente, la cual es menor en comparación. Esto puede interferir en el aumento que se esperaria.

### 5.4 Análisis de desempeño de cada configuración

El análisis comparativo se baso en la curva con respecto a la temperatura referencial, es decir si mantiene la forma exponencial que se deseaba. El que no estén en la misma ubicación no implica que no cumpla el criterio establecido por el fabricante, puesto que la temperatura ambiental no son la misma, pero si son comparables las diferencias de temperaturas.

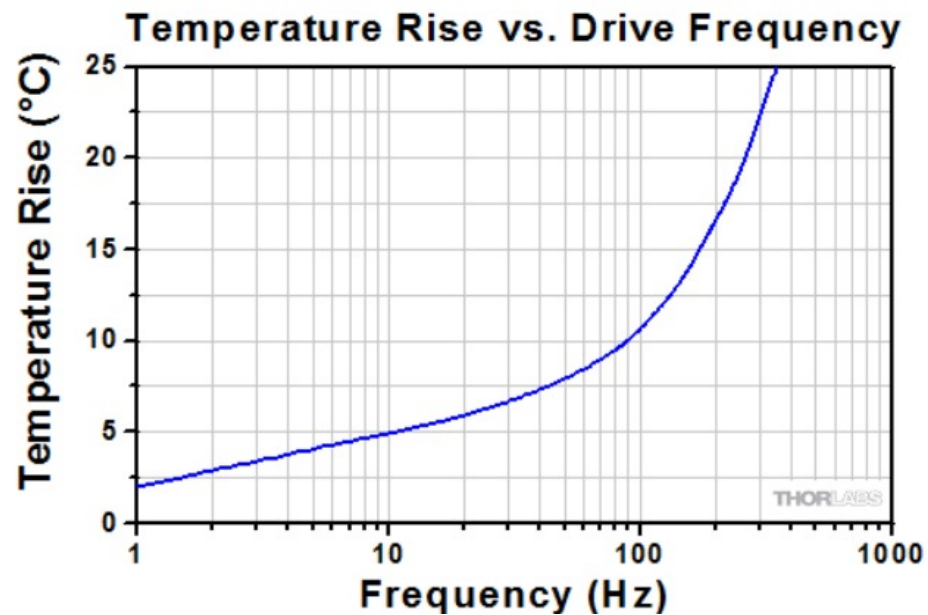


*Fig. 5.7: Aumento de temperatura del fabricante*

Se tiene que el sistema re-calibrado es el único que sigue una tendencia similar a la referencia, donde al inicio no tuvo una subida tan notoria; sin embargo, aunque después de los 25 Hz comenzó el aumento más significativo.

El sistema con soporte el cual se utilizó al inicio tiene puntos donde no tiene una subida sino más bien mantiene una temperatura estática, el cual fue mencionado anteriormente, donde es un factor de la calibración, ya que el termómetro utilizado no detectaba cambios tan pequeños de temperatura.

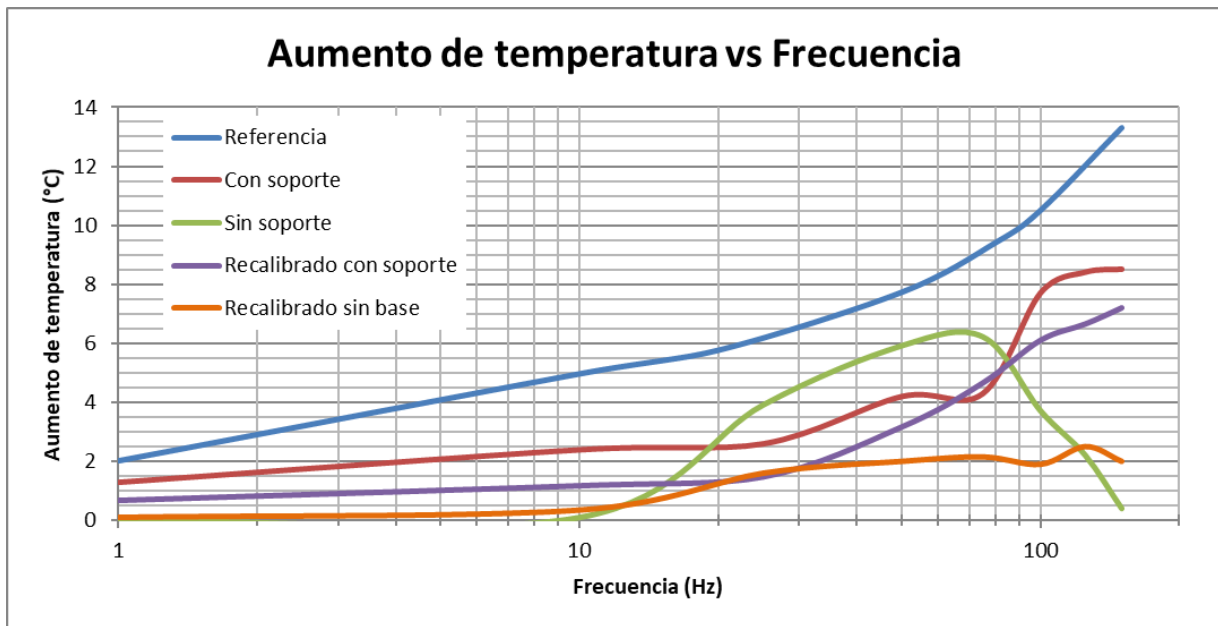


Fig. 5.8: Aumento de temperatura

El sistema sin soporte se descarta directamente, con lo que no tiene un aumento de temperatura hasta después de los 10 Hz, donde, llegando a los 75 Hz, desciende, a lo que finalmente puede dar a entender que no fue por temperatura, sino por el movimiento relacionado a la frecuencia del piezoeléctrico.

Como se mostró en la figura 5.1 el sistema descendió después y se mantuvo a la misma temperatura, dando un aumento nulo de este, ya que como fue referido, la detección de datos es por movimiento y no temperatura.

Dejando a entender que el análisis de los resultados permite establecer varias conclusiones preliminares:

- La presencia de un soporte para el sensor FBG es esencial para obtener mediciones térmicas confiables. Su ausencia genera errores por deformación mecánica no deseada.
- La calibración con termómetros no certificados puede introducir errores sistemáticos, afectando la interpretación de los datos. La re-calibración permitió ajustar correctamente la sensibilidad térmica del sensor.
- Existe una relación creciente entre la frecuencia de excitación del actuador piezoeléctrico y la temperatura generada. Este comportamiento fue validado tanto por el fabricante como por los resultados experimentales.

- La curva experimental final coincide con la curva teórica dentro de un margen aceptable, lo que demuestra la efectividad del sistema propuesto para la caracterización térmica de actuadores piezoeléctricos mediante sensores FBG.

## 6 Conclusiones

### Conclusiones generales

Este trabajo logró desarrollar, implementar y validar un sistema experimental capaz de caracterizar térmicamente actuadores piezoeléctricos mediante el uso de sensores de fibra óptica con rejilla de Bragg (FBG), integrados en un entorno controlado y modular. A través del diseño de soportes impresos en 3D, el uso de un sistema de control programable y la implementación de una metodología de medición sistemática, se cumplieron los objetivos trazados en esta memoria.

Una de las principales contribuciones de este estudio fue demostrar que, al emplear una base con soporte mecánico adecuadamente diseñado, junto con una calibración precisa de los sensores FBG mediante termómetros certificados, es posible prescindir completamente del uso de adhesivos. Este enfoque no solo evita los efectos negativos asociados a la variabilidad térmica y mecánica de los adhesivos, sino que además facilita el montaje, desmontaje y reutilización del sistema, incrementando la reproducibilidad de las mediciones. Esta afirmación es especialmente válida para el modelo PB4NB2W utilizado, cuya geometría plana y compacta resulta compatible con la base desarrollada.

Asimismo, los resultados experimentales confirmaron que el encapsulamiento mecánico del sensor FBG no interfiere negativamente con el desempeño del sistema, ni introduce errores atribuibles a desplazamientos mecánicos indeseados. Esto representa un avance importante, ya que al inicio de la memoria se planteaban dudas respecto a si el sistema de soporte podía inducir perturbaciones por presión o movimiento, comprometiendo la lectura térmica.

La curva de temperatura obtenida como función de la frecuencia de excitación del actuador fue consistente con los datos teóricos proporcionados por el fabricante, lo cual valida no solo el correcto funcionamiento del sensor FBG, sino también la efectividad del sistema completo, desde el control hasta la adquisición óptica. Además, la implementación de una interfaz gráfica en tiempo real facilitó la exploración de múltiples configuraciones, asegurando flexibilidad y adaptabilidad del sistema experimental.

## 6. CONCLUSIONES

---

En resumen, se logró construir una metodología robusta, económica y reproducible para evaluar el comportamiento térmico de actuadores piezoeléctricos mediante sensado óptico. Esta metodología da respuesta satisfactoria a las interrogantes planteadas al inicio del trabajo, tales como:

- ¿Puede reemplazarse el uso de adhesivo mediante sistemas mecánicos impresos en 3D?
- ¿Es viable medir con precisión la temperatura del actuador sin interferencias mecánicas?
- ¿Puede una FBG correctamente calibrada reflejar con fidelidad el comportamiento térmico dinámico de un actuador piezoeléctrico?

En todos los casos, la respuesta fue afirmativa, siempre que se implementen las condiciones de diseño, calibración y montaje validadas en este estudio.

## Limitaciones del estudio

Pese a los avances logrados, se identifican algunas limitaciones que restringen la generalización de los resultados:

- El estudio fue realizado con un único modelo de actuador piezoeléctrico (PB4NB2W) y sensores FBG con características específicas. No se ha validado esta solución en otros formatos ni bajo otras condiciones de montaje.
- La calibración térmica se restringió al rango 25 °C–50 °C, debido a limitaciones del equipamiento disponible. No se evaluaron comportamientos térmicos cercanos al umbral de 80 °C impuesto por el fabricante.
- La evaluación se centró exclusivamente en la variable temperatura, sin considerar interacciones con deformaciones dinámicas más intensas o prolongadas, ni fenómenos como histéresis o ciclos térmicos extensos.
- No se incorporó una cuantificación explícita de la incertidumbre del sistema, ni un modelo de error que caracterice los márgenes de exactitud esperados en aplicaciones reales.

## Trabajos futuros

A partir de los resultados obtenidos, se proponen las siguientes líneas de trabajo para ampliar y profundizar la investigación:

## 6. CONCLUSIONES

---

- Extender el rango de temperaturas evaluado mediante el uso de cámaras térmicas o resistencias calefactoras controladas, para explorar el comportamiento del sistema cercano a los límites operacionales.
- Validar el soporte impreso en 3D con distintos modelos de actuadores, incluyendo geometrías curvas, mayor volumen o distintos materiales.
- Incorporar sensores FBG con multiplexación, que permitan medir simultáneamente temperatura y deformación, evaluando algoritmos de compensación cruzada.
- Realizar un análisis estadístico de repetibilidad e incertidumbre, incorporando más ciclos de prueba y comparaciones intersensoriales.
- Aplicar esta tecnología en escenarios reales como monitoreo de motores, brazos robóticos o dispositivos biomédicos, evaluando el desempeño en condiciones no controladas.

## Bibliografía

- [1] G. Keiser. *Optical Fiber Communications*. 4th. McGraw-Hill, 2008.
- [2] K. O. Hill et al. "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication". En: *Applied Physics Letters* 32 (1978), págs. 647-649.
- [3] K. O. Hill et al. "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure thorough a phase-mask". En: *Applied Physics Letters* 62 (1993), págs. 1035-1037.
- [4] J. L. Archambault, L. Reekie y P. St. J. Russell. "High reflectivity and narrow bandwidth fibre gratings written by single excimer pulse". En: *Electronics Letters* 29 (1993), págs. 28-29.
- [5] T. Bodendorfer et al. "Comparison of different peak detection algorithms with regards to spectrometric fiber Bragg grating interrogation systems". En: *Proceedings of International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT)*. Istanbul, Turkey, 2009, págs. 21-23.
- [6] B. Malo et al. "Point-by-point fabrication of micro-Bragg gratings in photosensitive fiber using single excimer pulse refractive index modification techniques". En: *Electronics Letters* 29 (1993), págs. 1668-1669.
- [7] Y. Liu et al. "Abnormal spectral evolution of fibre Bragg gratings in hydrogenated fibres". En: *Optics Letters* 27 (2002), págs. 586-588.
- [8] A. Othonos y K. Kalli. *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House, 1999.
- [9] J. M. Senior. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. 3rd. Pearson, 2009.
- [10] T. Erdogan. "Fiber Grating Spectra". En: *Journal of Lightwave Technology* 15.8 (1997), págs. 1277-1294.
- [11] G. Meltz y W. W. Morey. "Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity". En: *International Workshop on Photoinduced Self-Organization Effects in Optical Fiber*. 1991.

- [12] D. J. Webb y K. Kalli. “Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advances and Applications”. En: *Optical Fiber Technology* 9.2 (2003), págs. 75-99.
- [13] Y. J. Rao. “In-fibre Bragg grating sensors”. En: *Measurement Science and Technology* 8 (1997), págs. 355-375.
- [14] D. Tosi. “Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors”. En: *Sensors* 17.10 (2017), pág. 2368.
- [15] R. W. Fallon et al. “Identical broadband chirped grating-interrogation technique for temperature and strain sensing”. En: *Electronics Letters* 33.8 (1997), págs. 705-707.
- [16] M. A. Davis y A. D. Kersey. “Matched-filter interrogation technique for fibre Bragg grating arrays”. En: *Electronics Letters* 31.10 (1995), págs. 822-823.
- [17] Kenji Uchino. *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*. Springer, 1997. ISBN: 978-1-4612-8638-7. DOI: 10.1007/978-1-4615-6375-1.

Anexo (PAG 1 Calibración)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                    |                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| CESMEC S.A. - Una Empresa Bureau Veritas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                    |  |
| <b>CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN</b><br>Laboratorio de Calibración Acreditado en la Magnitud<br>Temperatura                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                    |                                                                                     |
| Certificado de Calibración: SMD- 78073      Fecha de Emisión: 2024-12-10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                    | Orden de Trabajo: 558577                                                            |
| <b>DATOS DEL CLIENTE Y DEL INSTRUMENTO</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |
| Cliente                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | : BIODIVERSA S.A.                                                                  |                                                                                     |
| Dirección                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | : Arturo Prat 199, Piso 12 Torre B, Of 1202, Concepción                            |                                                                                     |
| Descripción del Item                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | : Termómetro Digital                                                               |                                                                                     |
| Marca                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | : HANNA                                                                            |                                                                                     |
| Modelo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | : HI98501                                                                          |                                                                                     |
| Serie y/o código Interno                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | : S/N                                                                              | INFQ-201                                                                            |
| Sello de Calibración                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | : B-132922                                                                         |                                                                                     |
| <b>DATOS DE TRAZABILIDAD</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                    |                                                                                     |
| Patrón Utilizado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | : Sist. Termométrico Digital                                                       | Sist. Termométrico Digital                                                          |
| Número Identificación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | : TR-32_TR-20                                                                      | TR-33_TR-20                                                                         |
| Marca                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | : ASL                                                                              | ASL                                                                                 |
| Modelo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | : F150                                                                             | F150                                                                                |
| Certificado de Calibración                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | : LNT-047                                                                          | LNT-047                                                                             |
| Próx. Calibración del Patrón                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | : 2025-06                                                                          | 2025-06                                                                             |
| Emitido por                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | : LCPN - Temperatura, Chile                                                        | LCPN - Temperatura, Chile                                                           |
| Trazabilidad Inmediata                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | : LCPN - Temperatura, Chile                                                        | LCPN - Temperatura, Chile                                                           |
| <b>DATOS DE CALIBRACIÓN</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
| Lugar de la Calibración                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | : Laboratorio de Calibración Magnitud Temperatura - División Metrología - Santiago |                                                                                     |
| Condiciones Ambientales                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | : ( 20,6 ± 0,5 ) °C ( 33,6 ± 5 ) %HR                                               |                                                                                     |
| Método / Procedimiento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | : Comparación Directa con Patrón Trazable / PCE 131/700-303 Rev.11                 |                                                                                     |
| Fecha de Calibración                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | : 2024-11-28                                                                       |                                                                                     |
| <p>Los patrones utilizados en la calibración cuentan con trazabilidad a patrones nacionales y/o Internacionales los que a su vez están referidos a patrones primarios de acuerdo al Sistema Internacional (SI).</p> <p>El Laboratorio de Calibración posee la competencia técnica y cumple con las exigencias de la Norma NCh-ISO 17025:2017 "Requisitos generales para la competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración".</p> <p>Los resultados de la calibración están referidos al momento y condiciones en las cuales fueron efectuadas las mediciones.</p> <p>Los resultados obtenidos sólo están relacionados a los ítems calibrados.</p> <p>Este Certificado de Calibración no puede ser reproducido total o parcialmente, excepto con el permiso del Laboratorio emisor.</p> <p>El Laboratorio no asume responsabilidad por daños posteriores a la calibración, ocasionados por el mal empleo del instrumento o patrón.</p> |                                                                                    |                                                                                     |
| <div>Luis Morales Cea<br/>Supervisor de Laboratorio</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                    |                                                                                     |

Código Verificación: c306c26133 - Verificar en <https://firmador.bureauverita.cl/verificacion>

Notas generales asociadas al alcance de los certificados: <https://firmador.bureauveritas.cl/NotasGenerales> Este documento se encuentra autorizado con firma electrónica avanzada. La validez de este documento está dada por la Ley N°19.799.

Página 1 de 3

Fig. 6.1: Certificación termómetro

## Anexo (PAG 2 Calibración)

| CESMEC S.A. - Una Empresa Bureau Veritas                                                                                                                                                                                                                           |        |       |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-----------|
| <b>CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN</b>                                                                                                                                                                                                                                  |        |       |           |
| Laboratorio de Calibración Acreditado en la Magnitud Temperatura                                                                                                                                                                                                   |        |       |           |
| Certificado de Calibración: SMD- 78073                                                                                                                                                                                                                             |        |       |           |
| Descripción del Item : Termómetro Digital<br>Rango de Calibración : 4 °C a 80 °C<br>Graduación / Resolución : 0,1 °C<br>Inmersión : 10 cm<br>Sellos de Calibración : B-132922<br>Ubicación : VIÑA MAR                                                              |        |       |           |
| <b>RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN</b>                                                                                                                                                                                                                                |        |       |           |
| <b>RESULTADOS (°C)</b>                                                                                                                                                                                                                                             |        |       |           |
| Calibrando                                                                                                                                                                                                                                                         | Patrón | Error | U (k = 2) |
| 4,1                                                                                                                                                                                                                                                                | 4,0    | 0,1   | 0,2       |
| 10,0                                                                                                                                                                                                                                                               | 10,0   | 0,0   | 0,2       |
| 15,0                                                                                                                                                                                                                                                               | 15,0   | 0,0   | 0,2       |
| 20,0                                                                                                                                                                                                                                                               | 20,0   | 0,0   | 0,2       |
| 25,0                                                                                                                                                                                                                                                               | 25,0   | 0,0   | 0,2       |
| 30,0                                                                                                                                                                                                                                                               | 30,0   | 0,0   | 0,2       |
| 40,0                                                                                                                                                                                                                                                               | 40,0   | 0,0   | 0,2       |
| 50,0                                                                                                                                                                                                                                                               | 50,0   | 0,0   | 0,2       |
| 60,0                                                                                                                                                                                                                                                               | 60,0   | 0,0   | 0,2       |
| 70,0                                                                                                                                                                                                                                                               | 70,0   | 0,0   | 0,2       |
| 80,0                                                                                                                                                                                                                                                               | 80,0   | 0,1   | 0,2       |
| --                                                                                                                                                                                                                                                                 | --     | --    | --        |
| --                                                                                                                                                                                                                                                                 | --     | --    | --        |
| --                                                                                                                                                                                                                                                                 | --     | --    | --        |
| --                                                                                                                                                                                                                                                                 | --     | --    | --        |
| La incertidumbre expandida ha sido estimada multiplicando la incertidumbre estándar por un factor de cobertura k = 2.<br>El valor del calibrando se encuentra razonablemente dentro del intervalo indicado de valores, con una probabilidad de aproximadamente 95% |        |       |           |
| Observaciones: N/A                                                                                                                                                                                                                                                 |        |       |           |

Fig. 6.2: Certificación termómetro

## Anexo (Sistema con base armado)

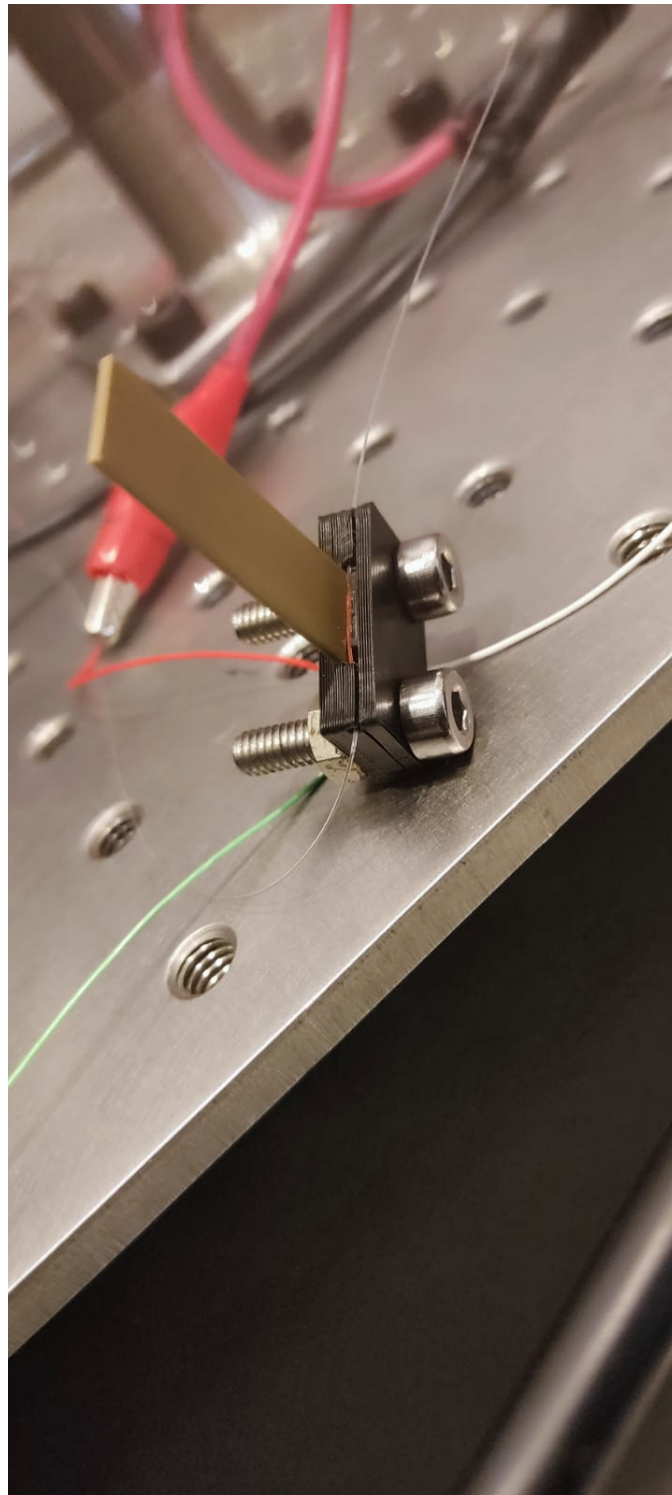


*Fig. 6.3: Impresión 3D con sensor FBG y piezoeléctrico*

## Anexos (Base montada en sistema de control con su FBG)

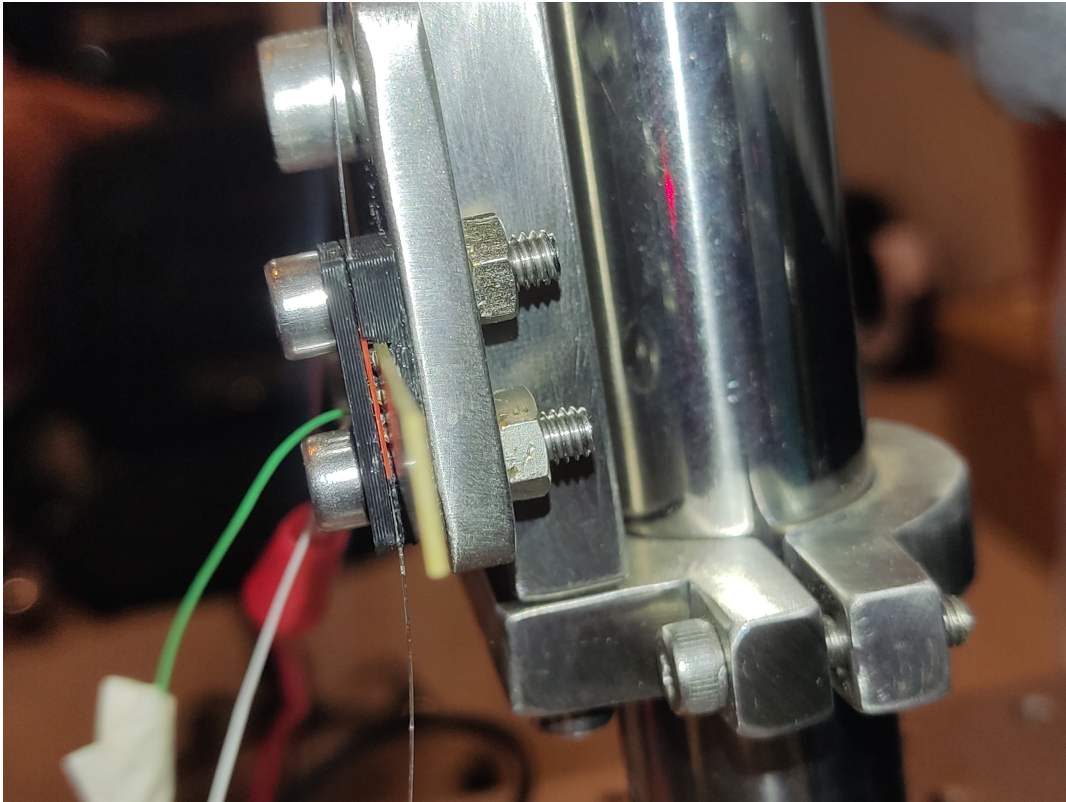


*Fig. 6.4: Montaje del sistema*

## Anexos (Termómetro certificado)



*Fig. 6.5:* Termómetro certificado utilizado