



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Comunicaciones

Desarrollo de un sensor óptico para detección de fugas

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Tecnologías, Sistemas y Redes de  
Comunicaciones

AUTOR/A: Samaniego Chamba, Daniel

Tutor/a: Sales Maicas, Salvador

Cotutor/a: Defez Garcia, Beatriz

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

## Agradecimiento

El proceso llevado a cabo para la realización del presente Trabajo de Fin de Máster durante el tiempo de duración del máster, ha sido una experiencia enriquecedora que me ha permitido conocer personas realmente invaluable que han aportado al desarrollo educativo, profesional, de investigación y esencialmente humano, les estaré eternamente agradecido.

Agradecer en primera instancia a Salva y su grupo de investigación en el ITEAM por todas las oportunidades, su apoyo ha sido siempre incondicional tanto como profesor y tutor, todos los consejos, la paciencia y el tiempo dedicado durante la estancia de prácticas fue fundamental para obtener los conocimientos teóricos y prácticos en los laboratorios, además de la confianza depositada, ha sido un cúmulo de valores adquiridos que me han ayudado en la culminación de este trabajo.

A Beatriz y Javi por el tiempo dedicado, gracias a sus conocimientos, consejos y experiencia han permitido que pueda desarrollar el presente Trabajo de Fin de Máster, sin su ayuda la consecución del mismo no habría sido posible.

Agradezco también a la Academia representada por la Universidad Politécnica de Valencia, al director del máster, a los profesores, amigos, compañeros y a todos los que de manera directa e indirecta fueron parte del proceso, a quienes he estado encantado de conocerlos y compartir momentos amenos durante la duración del Máster.

Finalmente nada de esto hubiera tenido cabida sin el apoyo constante y el cariño de mi familia, mis padres Eduardo y Haydee, hermanos, sobrinos que han sido un cable a tierra a todo momento y que a la distancia han contribuido como soporte en los momentos difíciles, estando siempre como objetivo la superación y el anhelo de un mejor futuro. Para ustedes siempre será mi dedicación.

## Resumen

En el presente Trabajo Final de Máster se ha realizado el estudio, diseño, fabricación y caracterización de un sensor óptico enfocado en obtener una mayor sensibilidad ante las vibraciones, en este caso específico se ha utilizado el sensor para la detección de fugas en una tubería dispuesta en un sistema compuesto por los elementos eléctricos, ópticos, acústicos y mecánicos pertenecientes al laboratorio de señal del ITEAM; para este propósito se han realizado investigaciones previas de piezas mecánicas que permitan aumentar la sensibilidad de los sensores, obteniendo diversos bocetos que a través de un análisis de las frecuencias de resonancia se ha logrado determinar la configuración final de las piezas.

Una vez obtenido el tipo de pieza a diseñar y el material, se ha procedido a realizar simulaciones en el software Ansys para la obtención de las respuestas en frecuencia ante los diferentes escenarios que se han planteado bajo los diferentes tipos de análisis tanto modal como paramétrico obteniendo las frecuencias naturales de la tubería, como del conjunto compuesto por las piezas mecánicas en forma de cantilever y la tubería; las dimensiones establecidas se basaron en el rango de frecuencias de detección necesarios para el propósito de detección de fugas en tuberías.

Posteriormente se realizaron los bocetos de diseños de piezas para su fabricación, una vez con las piezas, se procedió a la fabricación de los sensores FBG con la ayuda del grupo de investigación ITEAM, luego de esto se ha realizado el armado del sistema en los laboratorios para la realización de las pruebas y el procesado de datos en Matlab para la obtención de resultados y comparación con lo establecido en las simulaciones.

El proyecto pretende establecer una línea de investigación en sensores ópticos con el uso de herramientas de modelado y simulación que permiten tener una idea clara antes de la fabricación de piezas mecánicas para cualquier ámbito de detección con sensores de fibra óptica, permitiendo disminuir gastos y mejorando el tiempo en la obtención de resultados considerablemente.

**Palabras Clave:** Sensor Óptico, ANSYS, Modelado, Rejilla de Bragg de Fibra, Piezas Mecánicas.

## Abstract

In this Master's Final Project, the study, design, manufacture and characterization of an optical sensor focused on obtaining a greater sensitivity to vibrations has been carried out. In this specific case, the sensor has been used for the detection of leaks in a pipe arranged in a system composed of electrical, optical, acoustic and mechanical elements belonging to the ITEAM signal laboratory; For this purpose, previous investigations of mechanical parts have been carried out to increase the sensitivity of the sensors, obtaining several sketches that through an analysis of the resonance frequencies have been able to determine the final configuration of the parts.

Once obtained the type of part to design and the material, simulations were performed in Ansys software to obtain the frequency responses to the different scenarios that have been proposed under the different types of analysis, both modal and parametric, obtaining the natural frequencies of the pipe, as well as the set composed by the mechanical parts in the form of cantilever and the pipe; the dimensions established were based on the range of detection frequencies necessary for the purpose of leak detection in pipelines.

Subsequently, the sketches of part designs were made for their manufacture, once the parts were ready, the FBG sensors were manufactured with the help of the ITEAM research group, after which the system was assembled in the laboratories for testing and data processing in Matlab to obtain results and compare them with those established in the simulations.

The project aims to establish a line of research in optical sensors with the use of modeling and simulation tools that allow to have a clear idea before the manufacture of mechanical parts for any field of detection with fiber optic sensors, allowing to reduce costs and improving the time in obtaining results considerably.

**Key words:** Optical Sensor, ANSYS, Modelling, Fiber Bragg Grating, Mechanical parts.

## Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>5</b>
1.1. Objetivos	6
<b>2. Teoría</b>	<b>7</b>
2.1. Sensores Ópticos	7
2.1.1. Principio de detección del sensor de vibración basado en FBG	7
2.1.2. Modelo de vibración basado en FBG	8
2.1.3. Modelo teórico del modelo de vibración basado en FBG adherido	9
2.1.4. Aplicaciones del sensor de vibración basado en FBG adherido	11
2.2. Sistema de láser femtosegundo	11
2.2.1. Equipo femtosegundo UPV-iTEAM-PRL	11
2.2.2. Inscripción de Redes de Dispersión de Bragg	13
2.3. Ansys	14
2.3.1. Tipos de análisis	14
2.3.2. Capacidades ópticas	15
<b>3. Modelado y Análisis de componentes</b>	<b>16</b>
3.1. Modelos 3D de los componentes: tubería, cantilever y conjunto	16
3.1.1. Diseño para simulación	16
3.1.2. Materiales	16
3.2. Análisis modal: tubería, cantilever y conjunto	17
3.3. Análisis paramétrico	19
<b>4. Fabricación de sensor, piezas y montaje de sistema de medida</b>	<b>20</b>
4.1. Fabricación de sensor	20
4.2. Diseño y fabricación de piezas mecánicas	21
4.3. Pegado de sensores en piezas mecánicas	23
4.4. Descripción de elementos del sistema	23
<b>5. Resultados</b>	<b>26</b>
5.1. Frecuencias naturales: tubería, cantilever y conjunto	26
5.1.1. Tubería	26
5.1.2. Soporte superior	26
5.1.3. Conjunto	27
5.2. Correlación entre parámetros de entrada y salida del cantilever	29
5.3. Resultados experimentales de cada elemento y del conjunto	30
5.3.1. Piezas mecánicas (solas)	30
5.3.2. Tubería	30
5.3.3. Conjunto	33
<b>6. Conclusiones</b>	<b>35</b>

## 1. Introducción

La principal vulnerabilidad que enfrentan las tuberías encargadas de transportar líquidos y gases de gran valor a largas distancias se origina en el movimiento del terreno y los peligros geológicos, así como en los procesos de erosión y deformación ocasionados por la socavación. Además, las tuberías experimentan fugas resultantes del envejecimiento, el deterioro estructural o la aplicación de presiones excepcionales debido a errores operativos o variaciones bruscas en las condiciones de las válvulas. La vasta extensión de las tuberías en muchas ocasiones propicia que las fugas pasen inadvertidas. A pesar de que el porcentaje de pérdida sea mínimo, sus consecuencias económicas y el riesgo asociado para la salud pública pueden ser sumamente significativos [1]. En este contexto, la tecnología de las redes de rejilla de Bragg (FBG, por sus siglas en inglés) no solo se presenta como una herramienta para identificar fugas de manera precisa, sino que también ofrece la capacidad de prever su aparición antes de que efectivamente ocurran, e incluso de determinar con exactitud la ubicación en la que se ha manifestado la fuga. Esta capacidad se traduce en la eliminación de la necesidad de invertir tiempo y recursos considerables en la localización de posibles fallas en casos de eventos catastróficos de origen natural [9].

El desarrollo de sensores ópticos para la detección de fugas se ha convertido en un campo de investigación importante debido a su alta sensibilidad y capacidad para detectar fugas en una amplia gama de aplicaciones. Estos sensores utilizan principios ópticos para medir cambios en las propiedades ópticas de un material o medio, lo que les permite detectar fugas con alta precisión. Uno de los enfoques comunes para el desarrollo de sensores ópticos de fugas es el uso de fibras ópticas. Estas fibras pueden actuar como sensores al transmitir la luz a través de ellas y medir cambios en la intensidad, fase o longitud de onda de la luz que se refleja o se transmite a través del medio que se está monitoreando. Algunos ejemplos de sensores ópticos basados en fibras ópticas para la detección de fugas incluyen sensores de refracción, sensores de absorción y sensores de dispersión [11].

Se han descrito diversos modelos de sensores de vibración basados en FBG, entre ellos se dispone una amplia variedad de formas como viga en flexión, viga en voladizo en forma de L, placas cónicas, en todos ellos se ha intentado encontrar una mayor sensibilidad de detección medido, entre los citados se tienen valores entre 40 y 300  $pm/g$ , estableciendo para cada una de ellas frecuencias de resonancia características cuyos valores varían entre 50 y 150 Hz. Posteriormente se han ido presentando métodos para mejorar la sensibilidad del sensor por ejemplo mediante la alteración de la distancia entre el eje del sensor FBG al eje neutro del voladizo, llegando a valores de sensibilidad de 1062  $pm/g$ . En diversas fuentes se encuentran propuestas de acelerómetros FBG basados en diafragmas con frecuencias entre 50 y 800 Hz, y con diferentes sensibilidades entre los ejes transversales y principal inferior [6].

Los sensores anteriores se utilizan principalmente para medir la vibración única; no pueden emplear la medición multidimensional de la vibración. Por lo tanto, algunos investigadores han propuesto sensores de vibración multidimensionales, entre estos se encuentran diseños basados en vigas de flexión con masas fijadas entre las vigas, acelerómetros ópticos biaxiales y triaxiales obteniendo frecuencias de resonancia mayores hasta los 850 Hz. Se han clasificado tres tipos de sensores de vibración basados en FBG en función de la diferencia del modo de acoplamiento vibración-deformación a FBG, que son los basados en FBG adheridos, los basados en FBG de propiedad axial y los basados en FBG de propiedad transversal, respectivamente, en el presente trabajo de investigación se enfocan los principios y diseños de los sensores de vibración basados en FBG adheridos.

En la búsqueda de una mayor sensibilidad de los sensores de fibra óptica FBG (Fiber Bragg Grating) se ha establecido el uso de piezas mecánicas como cantilever que pretenden obtener una mayor respuesta a las vibraciones en función de la variación de longitudes de onda para estructuras como tuberías, y como aplicación específica la detección de fugas. Para la consecución de los sensores de fibra óptica se ha seguido el proceso de inscripción de FBG mediante láser de femtosegundo.

El trabajo establece una parte teórica enfocada en FBG adheridos, el sistema utilizado para la ins-

cripción de las FBG, además de un apartado dedicado al software de simulación Ansys, posteriormente se detalla el modelado que se realiza al sistema realizando un análisis modal y paramétrico de la tubería y las piezas mecánicas utilizadas, conjuntamente con lo simulado se implementa un escenario para pruebas de laboratorio, donde se realizan mediciones correspondientes a frecuencias de resonancia y se analiza las ganancias obtenidas en cuanto a potencia tanto para la tubería sola como con el conjunto, para finalizar se revisan los resultados obtenidos y se comparan con los simulados, derivando de ello las conclusiones pertinentes.

### 1.1. Objetivos

- Investigar los trabajos previos relacionados a sensores de fibra óptica basados en FBG para medir vibraciones y el uso de piezas mecánicas para la amplificación de la sensibilidad.
- Investigar el marco conceptual de las tecnologías correspondientes a la inscripción de redes de dispersión de Bragg y modelos de vibración basados en FBG adheridos.
- Establecer un sistema de modelado conjunto entre sensor y piezas mecánicas que permita implementar un análisis modal y paramétrico por medio de simulaciones utilizando la herramienta Ansys.
- Diseñar sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg para ser acoplados en estructuras mecánicas mediante el método de adhesión.
- Diseñar las piezas mecánicas que permitan obtener una mayor amplificación de ganancia correspondiente a sensibilidad en sensores de fibra óptica adheridos.
- Implementar un sistema de prueba de los sensores y piezas fabricadas para el análisis experimental de las fugas en tuberías.
- Evaluar los resultados obtenidos mediante gráficas de relación bajo los distintos casos ejecutados del sistema medido, así como la comparación con lo obtenido en las simulaciones.

## 2. Teoría

### 2.1. Sensores Ópticos

Los dispositivos ópticos sensoriales basados en las redes de fibra de Bragg (FBG), han experimentado una notable adopción en el mercado, en virtud de una serie de atributos favorables: su formato compacto, su liviandad, la eliminación de requerimientos de conexiones eléctricas y su conformidad con metodologías de teledetección no invasiva. Dentro de las particularidades inherentes a las FBG, se distingue su elevada sensibilidad, resolución destacada y amplio espectro de operación dinámica. Asimismo, se resalta su resistencia intrínseca ante interferencias de radiofrecuencia (RFI) y electromagnéticas (EMI), junto con su aptitud para la integración en sistemas de transmisión de datos. Estas características en conjunto han impulsado su aplicación generalizada en diversas esferas de detección. Debido a la alta sensibilidad de las FBG ante múltiples parámetros ambientales, que abarcan aspectos físicos, químicos, biomédicos y eléctricos, estas se emplean con propósitos de supervisión del estado estructural en ámbitos que incluyen infraestructuras civiles, aeroespaciales, energéticas y marítimas. En estas áreas, la información derivada de las mediciones se suele codificar mediante ajustes en la longitud de onda de Bragg de las FBG, permitiendo así una caracterización precisa del entorno [3].

La deformación constituye una medida adimensional que cuantifica el desplazamiento relativo entre partículas componentes de la sustancia en relación con una longitud de referencia predeterminada. Esta magnitud deformacional guarda estrecha relación con los desplazamientos inherentes a un cuerpo rígido, abarcando tanto las translaciones como las rotaciones, y con las alteraciones manifiestas en la forma o dimensiones del material. Desde una perspectiva física, la deformación es descrita mediante una entidad tensorial, susceptible de ser desglosada en dos componentes fundamentales: la componente normal y la componente de cizalladura. La componente de índole normal conlleva la consideración de elongación o compresión a lo largo de los elementos lineales o fibras que conforman la estructura del material en cuestión. En contraste, la componente de cizalladura se encuentra intrínsecamente ligada al deslizamiento interlaminar que acontece entre las distintas capas que constituyen el cuerpo. En aquellos escenarios en los cuales la longitud del cuerpo exhibe un incremento, el término adecuado para describir la deformación normal resultante es el de deformación por tracción; por el contrario, cuando se presenta una disminución en la longitud, se denomina deformación por compresión [3].

#### 2.1.1. Principio de detección del sensor de vibración basado en FBG

Normalmente, las FBG se inscriben en una fibra monomodo dopada con  $G_e$  utilizando un patrón espacial de radiación de luz ultravioleta y una máscara de fase [12]. La Figura 1 representa la configuración intrínseca de una fibra óptica que ha sido grabada con una red de Bragg (FBG). En el escenario en el cual un haz de luz de espectro amplio atraviesa la fibra y se encuentra con la FBG, se produce una bifurcación de este en dos componentes distintas: la porción de luz transmitida y la reflejada. Siguiendo la teoría de acoplamiento de modos, la longitud de onda central de la luz reflejada puede ser descrita en los términos siguientes:

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

$\lambda_B$  es la longitud de onda central de la luz reflejada,  $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo del núcleo,  $\Lambda$  es el periodo espacial de la rejilla. De la ecuación (1) se deduce que la longitud de onda central de la luz reflejada es lineal. Tanto  $n_{eff}$  como  $\Lambda$  están asociados con la deformación y la temperatura [5]. Por lo tanto, cuando la unidad de rejilla es perturbada por la temperatura externa o el cambio de tensión, la longitud de onda central de la luz reflejada cambiará. En consecuencia, la variación del desplazamiento de la longitud de onda central se puede determinar como:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \Delta\varepsilon + (\alpha_f + \xi_f) \Delta T \quad (2)$$

donde  $\Delta\varepsilon$  es la variación de la deformación longitudinal,  $\Delta T$  es el incremento de temperatura,  $\rho_e$  es el coeficiente elasto-óptico de la fibra,  $\alpha_f$  y  $\xi_f$  son el coeficiente termo-óptico y el coeficiente de expansión térmica de la fibra, respectivamente.

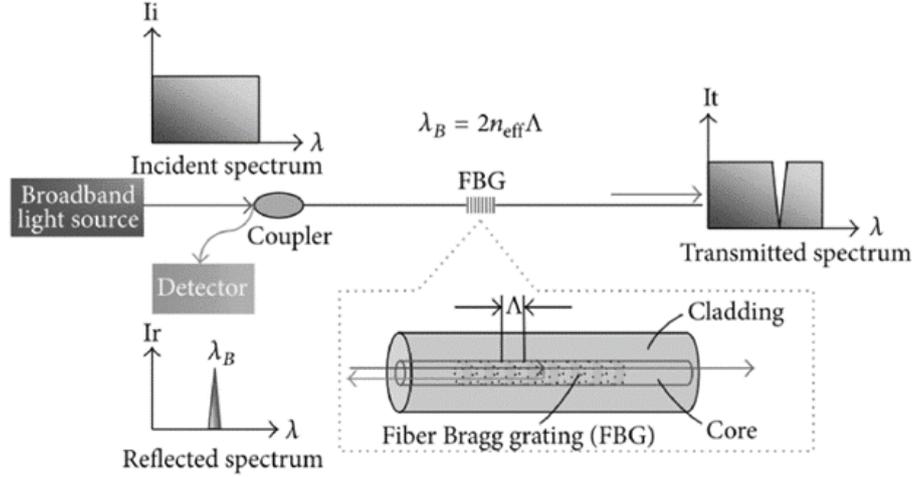


Figura 1: Configuración de inscripción de FBG. Obtenido de [6].

### 2.1.2. Modelo de vibración basado en FBG

La ecuación (2) describe que la FBG es directamente sensible a una tensión axial a lo largo de la longitud de la fibra. Pueden diseñarse algunas estructuras especiales para convertir las señales de vibración en la deformación detectada de FBG. Por lo tanto, deben determinarse los modelos de conversión para el desarrollo de sensores de vibración basados en FBG. Típicamente, un sensor de vibración basado en FBG puede simplificarse como un sistema masa-resorte con amortiguación, como se muestra en la Figura 2 [6]. Cuando se ejerce un desplazamiento dinámico  $x(t) = X \sin \omega t$  sobre el objetivo medido, el desplazamiento correspondiente de la masa  $M$  puede denotarse como  $y(t)$ . El desplazamiento relativo entre la masa y el objetivo medido es  $z$ , que puede formularse como  $z(t) = y(t) - x(t) = Z \sin(\omega t - \phi)$ . La relación entre la respuesta de salida  $Z$  y la entrada  $X$  se puede describir como:

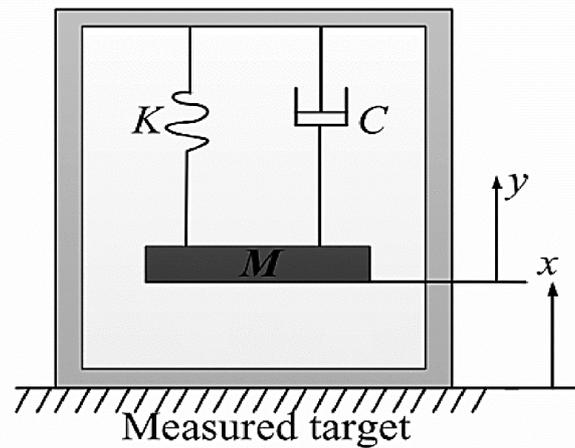
$$\beta = \frac{Z}{X} = \frac{\Delta^2}{\sqrt{(1 - \Delta^2)^2 + (2\zeta\Delta)^2}} \quad (3)$$

Donde  $\beta$  se considera el coeficiente de amplificación. La relación de amortiguación  $\zeta$  es igual a  $\frac{C}{2M\omega_n}$ ;  $\Delta$  representa una relación y es igual a  $\frac{\omega}{\omega_n}$ ;  $K$  y  $C$  son la rigidez y la amortiguación del sistema vibratorio, respectivamente;  $\omega$  representa la frecuencia vibratoria del objetivo medido;  $\omega_n$  es la frecuencia de resonancia del sensor de vibración [7].

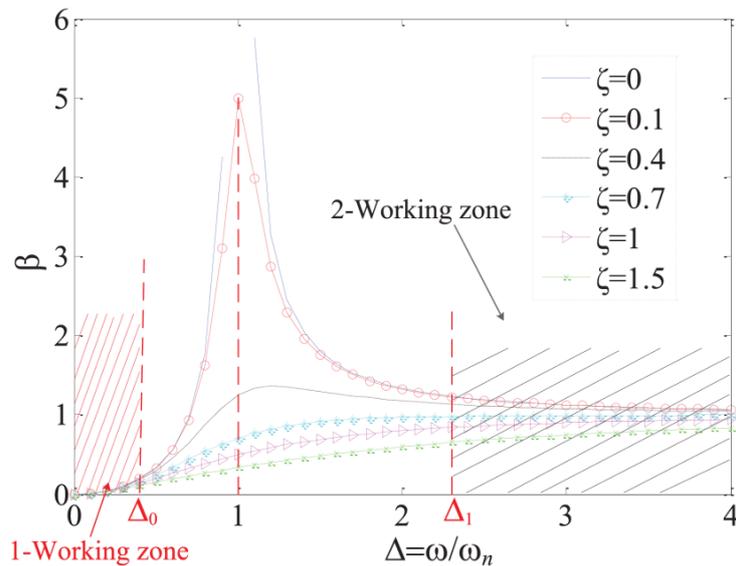
La Figura 3 muestra la relación entre el coeficiente de amplificación y  $\Delta$ . La frecuencia de vibración  $\omega$  del blanco medido debe situarse dentro de la zona 1-*Working* para evitar distorsiones en la reproducción. Cuando  $\Delta$  es cercana a cero,  $\omega$  se localiza en la zona 1-*Working*, y entonces la Ecuación (3) puede describirse como:

$$Z = \frac{\ddot{X}}{\omega_n^2} \quad (4)$$

donde  $\ddot{X}$  representa la aceleración del objetivo medido.



**Figura 2:** Sistema masa-resorte con amortiguación. Obtenido de [12].



**Figura 3:** Curvas de respuesta amplitud-frecuencia bajo diferentes relaciones de amortiguación. Obtenido de [7].

Cuando  $\Delta$  está cerca de infinito,  $\omega$  se encuentra en la zona 2 – *Working*, la relación entre  $Z$  y  $X$  puede ser reescrito como sigue:

$$\frac{Z}{X} = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{\Delta^2}{\sqrt{(1 - \Delta^2)^2 + (2\zeta\Delta)^2}} = 1 \quad (5)$$

De acuerdo con las ecuaciones (4) y (5), deben seleccionarse diferentes zonas de trabajo para diseñar sensores de vibración de aceleración o desplazamiento. Por lo tanto, la determinación de los modelos de vibración FBG es de vital importancia para el desarrollo de sensores [6].

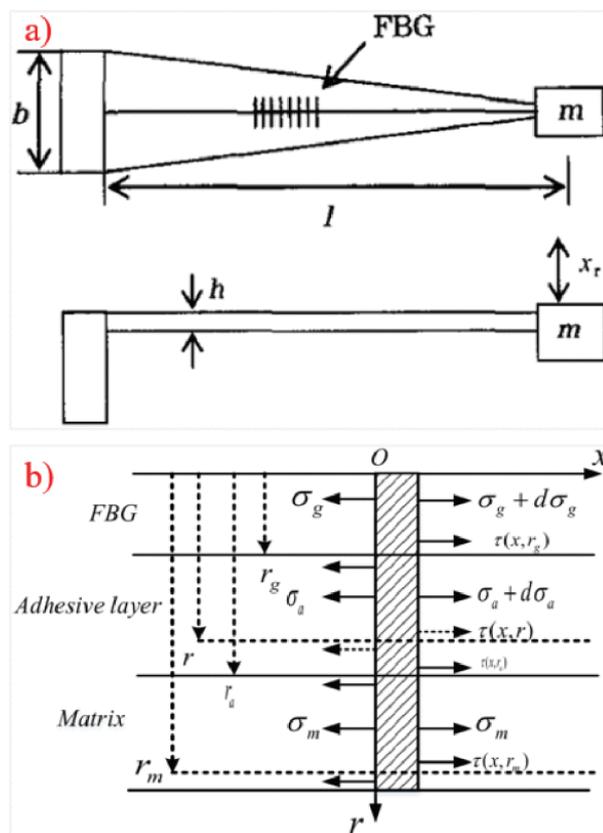
### 2.1.3. Modelo teórico del modelo de vibración basado en FBG adherido

El principio del sensor de vibración basado en FBG adherido es convertir la deformación inducida por la vibración de la viga u otros elastómeros en la tensión superficial percibida de FBG. Se ha considerado

como ejemplo un modelo de vibración basado en FBG adheridos con una viga en voladizo común. Se puede simplificar como un sistema voladizo-masa, como se muestra en la Figura 4 a). En la figura se visualiza que el bloque de masa vibra con el objeto medido, este puede simplificarse como una carga inercial variable en el tiempo  $F = ma(t)$  en la viga en voladizo. Esta carga produce una tensión superficial en el elastómero que es proporcional a la aceleración. Dicha tensión superficial puede transferirse de forma efectiva al FBG mediante una capa adhesiva (Figura 4 b)) [4]. La velocidad de transferencia de la deformación entre la deformación superficial y la deformación detectada por el FBG es una constante  $\alpha$  que depende del procedimiento adhesivo y de sus parámetros físicos. Por lo tanto, la relación entre la aceleración y el desplazamiento de la longitud de onda central con la consideración del efecto de la tasa de transferencia de deformación del pegamento puede formularse como:

$$\Delta\lambda_B = (1 - \rho_e) \frac{2\alpha d\lambda_B}{\omega_0^2 l^2} a \quad (6)$$

donde  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) es el factor de transferencia de deformación del pegamento.  $d$  es la distancia entre cualquier sección longitudinal y la capa neutra de la viga en voladizo.  $l$  es la longitud de la viga en voladizo.



**Figura 4:** a) Esquema del sensor de vibración de viga en voladizo basado en FBG adherido; b) Modelo de transferencia del esfuerzo cortante entre el FBG y la superficie del elastómero [4]. **Nota:**  $r$  indica la variable espacial a lo largo del radio del FBG,  $\sigma$  y  $\tau$  representan la tensión normal y la tensión de cizallamiento, respectivamente.

#### 2.1.4. Aplicaciones del sensor de vibración basado en FBG adherido

Los sensores de vibración basados en FBG adheridos son ampliamente utilizados debido a su simple principio y estructura. Según [6] el diseño del elastómero es una novedad clave y un enfoque para mejorar el rendimiento de detección de los sensores de vibración basados en FBG adheridos.

Mientras tanto, la adhesión de FBGs en la superficie de las vigas en voladizo tradicionales como la viga uniforme y la viga triangular es un método importante para diseñar sensores de vibración basados en FBGs. La configuración de deformación constante en la zona pegada es clave para evitar el fallo del chirrido (chirp) FBG. Además, se encuentran estudios en los cuáles se ha intentado diseñar sensores utilizando vigas en voladizo triangulares para garantizar la deformación uniforme de la superficie. En [10] se realizó un diseño de una viga triangular con una masa en su parte superior, se pegó un FBG en la bisectriz de la viga isósceles para lograr la detección de vibraciones. Este diseño posee una zona de deformación uniforme para el FBG y una sensibilidad transversal menor.

Además, dado que las características de detección de los sensores de vibración basados en FBG están determinadas también por los elastómeros. En consecuencia, se han propuesto algunas estructuras mejoradas, como vigas en voladizo modificadas y estructuras flexibles, para optimizar el rendimiento del sensor.

La ecuación 6 indica que la tecnología de pegado tiene un efecto en el rendimiento de detección del sensor de vibración basado en FBG pegado debido a la existencia del factor de transferencia de deformación  $\alpha$  [8]. Sin embargo, pocos investigadores se centran en la tecnología de pegado para mejorar el rendimiento de detección de los sensores de vibración basados en FBG. Así, se han encontrado investigaciones donde se añade un parche entre el FBG y la viga en voladizo para alterar la distancia entre el eje del FBG y el eje neutro de la viga en voladizo [2]. Esta disposición puede lograr una mayor sensibilidad en comparación con las configuraciones donde la FBG se pega directamente en la viga, otras opciones se han dispuesto como el ajuste con precisión del grosor del pegamento entre el FBG y la viga en voladizo. Los resultados experimentales indican que la sensibilidad del sensor puede aumentar hasta 2,9 veces en comparación con el proceso convencional cuando la distancia entre el núcleo de la fibra y la viga en voladizo es de 1 mm. Este método es más general y puede emplearse para la mayoría de los sensores de vibración basados en FBG pegados para mejorar sus sensibilidades.

## 2.2. Sistema de láser femtosegundo

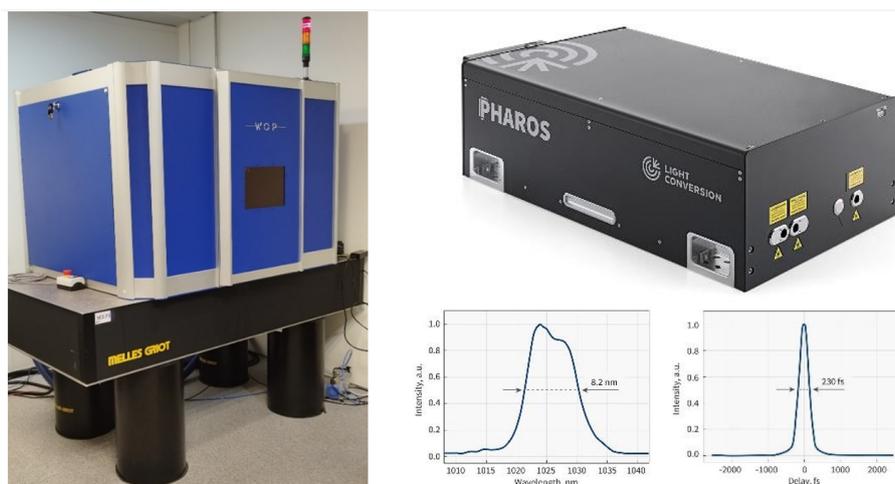
Un láser de femtosegundo es un láser que emite pulsos ópticos con una duración muy por debajo de 1 ps, son también conocidos como pulsos ultracortos ( $1fs = 10^{-15}s$ ). Existen diferentes tipos de láseres de femtosegundo, como pueden ser de estado sólido, láseres de fibra, láseres de semiconductor, y más. En el caso de los láseres de estado sólido, varios diodos láser “bombeados”, son controlados mediante métodos de bloqueo de modos, pasivos o activos, estos últimos permiten obtener pulsos de unos pocos cientos de femtosegundos con una muy elevada potencia ( $\mu J$ ), y generados a manera de un tren de pulsos.

El abanico de aplicaciones de los láseres femtosegundo va desde uso quirúrgico para cirugías con cortes de precisión micrométrica, pasando por aplicaciones de laboratorio para micro maquinado, hasta procedimientos industriales de alta potencia.

### 2.2.1. Equipo femtosegundo UPV-iTEAM-PRL

La Universidad Politécnica de València, a través del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia y el Laboratorio de Investigación Fotónica dispone de una estación de trabajo para micro maquinado basado en láser de femtosegundo como se muestra en la Figura 5.

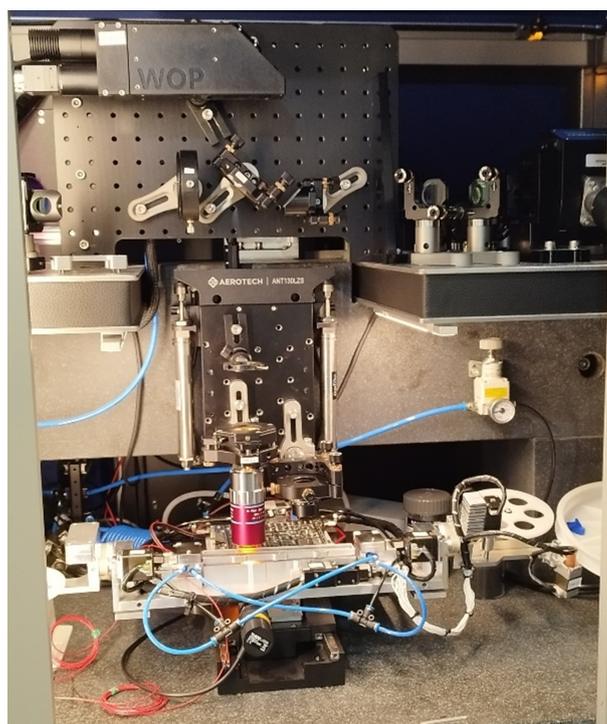
La estación de trabajo ha sido especialmente desarrollada para realizar perforación de fibras, inscripción de redes de difracción de Bragg (FBG), modificación del núcleo o la superficie de fibras ópticas,



**Figura 5:** Sistema de micromaquinado femtosegundo de WOP

inscripción de guías de onda y otros procesos sustractivos.

Equipado con un láser ultrarrápido LIGHT CONVERSION Yb:KGW, PHAROS de 10 Watos (Figura 6), con un tren de pulsos de máximo 200 kHz, y pulsos de hasta  $0,4\text{mJ} < 290\text{ fs}$ . Longitud de onda de láser de 1030 nm, y un generador de armónicos automático de 515 nm (Conversión de Luz).



**Figura 6:** Equipamiento sistema Femtosegundo

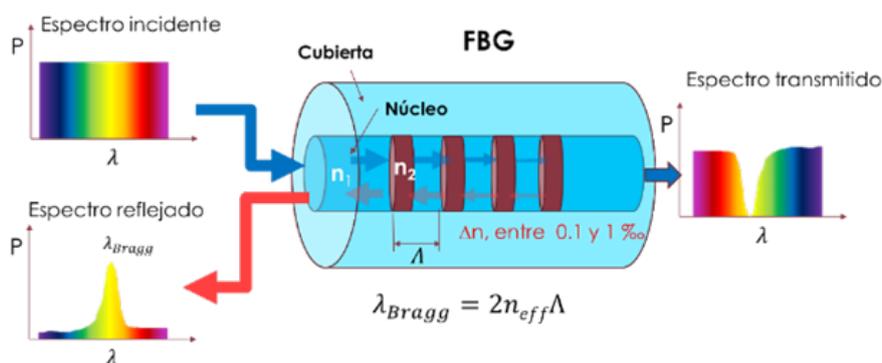
Entre los equipamientos de la estación de trabajo se encuentran:

- Sistema de visión de máquina de 590 nm (1280 x 1024 pixeles)

- Camino para direccionar el haz del láser para 1030 nm y 515 nm,
- Sistema de posicionamiento de alta precisión Aerotech XYZ ANT 130 con un controlador XR3 (XYZ max: 160 mm x 160 mm x 60 mm).
- Galvo scanners de alta precisión con espejos dieléctricos.
- Tres elementos de enfoque óptico (63 X 1.4 NA, 50 X 0.65 NA, 20 X, 04 NA)
- Solución para la operación semiautomática mediante la alimentación de fibra
- Soporte para muestras,
- Componentes opto mecánicos,
- Mascara de fase para inscripción de femtosegundo FBG.

### 2.2.2. Inscripción de Redes de Dispersión de Bragg

Una FBG es obtenida mediante la modulación periódica  $\Lambda$  del índice de refracción ( $n$ ) del núcleo de una fibra óptica, donde la longitud de onda de luz  $\lambda_{Bragg}$  que cumpla con la condición de Bragg es reflejada. Se dice que la FBG es un filtro pasa banda en reflexión, como se puede ver en la Figura 7.



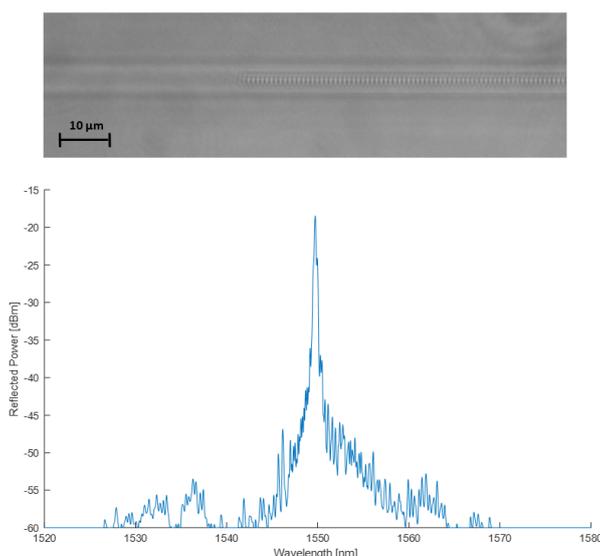
**Figura 7:** Diagrama de una red de dispersión de Bragg

La longitud de onda del láser es infrarroja, por lo que el vidrio de la fibra es transparente, es decir que la luz puede pasar a través de ella sin mayor atenuación, así también para los revestimientos mas comunes de fibra óptica, como el acrilato y la poliimida.

El haz de luz del láser es manipulado a través del camino opto mecánico para que incida en la fibra de manera perpendicular y tenga una anchura de varios milímetros. En esas condiciones, el haz de luz no puede atravesar la fibra completa, desde su revestimiento, cubierta y núcleo.

La incorporación de lentes objetivos de enfoque, conjugando con el sistema de posicionamiento tri-dimensional XYZ, permiten que el haz del láser sea enfocado en un punto de pocos micrómetros dentro núcleo de la fibra, por lo que esta energía puede provocar la modulación del índice de refracción de esa porción específica del núcleo la fibra. Al realizar una secuencia de puntos que se encuentren distanciados cumpliendo un período de Bragg ( $\Lambda$ ), se logra construir una FBG, denominada como fabricación Punto a Punto.

En la Figura 8 se puede ver el núcleo de una fibra óptica con la inscripción de una FBG y el espectro reflejado obtenido mediante un interrogador.



**Figura 8:** Incripcion de FBG con sistema femtosegundo. Arriba: Vista de la rejilla de Bragg fabricada mediante el método Punto a Punto. Abajo: Espectro reflejado de la FBG.

## 2.3. Ansys

### 2.3.1. Tipos de análisis

ANSYS es un software de simulación ampliamente utilizado en ingeniería para el análisis y diseño de estructuras y sistemas físicos. Ofrece una variedad de herramientas y capacidades para realizar diferentes tipos de análisis. A continuación, se proporciona una descripción de algunos análisis comunes en ANSYS, junto con los resultados que se pueden obtener:

- **Análisis Modal:** El análisis modal se utiliza para determinar las frecuencias naturales y los modos de vibración de una estructura. Permite identificar las formas de vibración predominantes y las frecuencias asociadas. Los resultados del análisis modal en ANSYS incluyen frecuencias naturales, formas modales (desplazamientos y deformaciones) y masas modales. Estos resultados son útiles para comprender el comportamiento dinámico de una estructura y evitar problemas de resonancia.
- **Análisis Armónico:** El análisis armónico se utiliza para analizar la respuesta de una estructura a una carga armónica o periódica, como una fuerza o vibración sinusoidal. Permite determinar las amplitudes de vibración y las fases en diferentes puntos de la estructura en función de la frecuencia de excitación. Los resultados del análisis armónico en ANSYS incluyen respuestas en frecuencia (amplitud y fase), desplazamientos y tensiones en diferentes componentes de la estructura.
- **Análisis Dinámico:** El análisis dinámico en ANSYS se utiliza para estudiar la respuesta de una estructura a cargas dinámicas, como vibraciones, impactos o cargas pulsantes. Puede proporcionar información sobre la respuesta temporal de la estructura, incluidos los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y tensiones en diferentes puntos de interés. Los resultados del análisis dinámico ayudan a evaluar la resistencia, durabilidad y estabilidad de una estructura bajo cargas dinámicas.
- **Análisis Paramétrico:** El análisis paramétrico en ANSYS se utiliza para explorar el efecto de diferentes variables o parámetros en el comportamiento de una estructura. Permite realizar múltiples análisis al variar los valores de los parámetros y estudiar cómo influyen en los resultados. Los resultados del análisis paramétrico pueden mostrar las relaciones entre los parámetros y las respuestas de interés, lo que ayuda en la optimización y toma de decisiones de diseño.

- **Análisis Geométrico:** El análisis geométrico en ANSYS se utiliza para evaluar el comportamiento de una estructura frente a deformaciones geométricas, como flexión, torsión o cambios de forma. Puede proporcionar información sobre los desplazamientos, deformaciones, tensiones y modos de deformación resultantes de tales cargas. Los resultados del análisis geométrico ayudan a comprender la integridad estructural y la respuesta a cargas no lineales.

Estos son solo algunos ejemplos de análisis disponibles en ANSYS y los resultados típicos que se pueden obtener. Cabe destacar que los resultados específicos pueden variar según la configuración y los objetivos del análisis, así como los parámetros y suposiciones utilizados.

### 2.3.2. Capacidades ópticas

ANSYS ofrece una amplia gama de capacidades para simular elementos ópticos, incluidos los sensores de fibra óptica. Algunas de las características relevantes son las siguientes:

1. **Análisis de propagación de luz:** Permite modelar y simular la propagación de luz a través de guías de onda ópticas, como fibras ópticas. Esto incluye la capacidad de analizar la propagación de modos, pérdidas de inserción, dispersión, atenuación y otros fenómenos ópticos relevantes.
2. **Diseño de fibras ópticas:** Proporciona herramientas para diseñar y optimizar fibras ópticas, permitiendo definir parámetros como el perfil del índice de refracción, la geometría de la fibra, el revestimiento y otras características estructurales. Esto permite simular el comportamiento de las fibras ópticas y evaluar su desempeño.
3. **Análisis de acoplamiento y alineación:** Permite simular el acoplamiento de la luz en los sensores de fibra óptica, teniendo en cuenta la alineación precisa de los componentes ópticos, como conectores y acopladores. Esto ayuda a evaluar la eficiencia del acoplamiento de luz y la pérdida de señal asociada.
4. **Análisis de interferencia y difracción:** ANSYS puede simular la interferencia y la difracción de la luz en componentes ópticos, como redes de difracción y espejos. Esto es útil para analizar la respuesta espectral y el rendimiento de dispositivos ópticos utilizados en sensores de fibra óptica.
5. **Simulación de sistemas ópticos completos:** Posibilita la simulación de sistemas ópticos completos, incluyendo múltiples componentes y configuraciones. Esto permite evaluar el rendimiento global del sistema, como la sensibilidad, la resolución y la respuesta del sensor de fibra óptica en diferentes condiciones de operación.
6. **Compatibilidad electromagnética (EMC):** ANSYS también proporciona capacidades para simular y analizar la compatibilidad electromagnética de los sensores de fibra óptica. Esto incluye la evaluación de la susceptibilidad a interferencias electromagnéticas y la emisión de señales indeseadas.

Estas características de simulación óptica de ANSYS ofrecen la capacidad de modelar, diseñar y analizar con precisión los sensores de fibra óptica y otros elementos ópticos. Esto ayuda en el desarrollo y optimización de estos dispositivos, así como la comprensión de su rendimiento en diversas aplicaciones.

### 3. Modelado y Análisis de componentes

#### 3.1. Modelos 3D de los componentes: tubería, cantilever y conjunto

##### 3.1.1. Diseño para simulación

A continuación se detalla la puesta en marcha de cada uno de los componentes que se utilizarán y analizarán en las simulaciones correspondientes, entre ellos destacan la tubería de prueba, las piezas mecánicas utilizadas en forma de cantilever (soporte superior) y su correspondiente soporte inferior.

**Tubería:** La tubería es la parte dominante del conjunto, y se genera en primer lugar, de modo que el resto de las partes del conjunto se basan en su geometría. Se define una circunferencia en el plano  $YZ$ , y una extrusión de superficie delgada con espesor hacia el exterior se extruye hacia la dirección positiva del eje  $X$ .

**Soporte:** El soporte se compone de dos partes diferentes: soporte superior y soporte inferior. El soporte superior está diseñado para soportar el FBG en condiciones de trabajo, de modo que se mejora la deformación y, por tanto, el estado de deformación del FBG. El soporte inferior sujeta firmemente ambas partes alrededor del tubo en una posición determinada con la ayuda de dos dobleces.

- **Soporte Superior:** El soporte superior se modela en 3 fases:
  1. El cuerpo base se crea como una caja con una ranura semicilíndrica que coincide con el diámetro exterior de la tubería. También contiene dos orificios pasantes laterales, listos para alojar los pernos que sujetarán todo el soporte a la tubería.
  2. Se crea un voladizo triangular, fijado a la superficie frontal de la base, como alargamiento de su superficie superior plana.
  3. Se añade un peso de sección rectangular en la punta del voladizo.
- **Soporte Inferior:** El soporte inferior reproduce la geometría de la base del soporte superior. Se crea a partir de una caja con una ranura cilíndrica que coincide con el diámetro exterior de la tubería, y dos orificios laterales, con el mismo diámetro y asignación relativa que los orificios laterales del soporte superior, de modo que todo el soporte pueda montarse alrededor de la tubería en cualquier lugar.

**Montaje:** El soporte se sitúa en el centro de la tubería, alrededor de ella, y la sujeta. Los ejes de los orificios laterales de las partes superior e inferior de la abrazadera están alineados, de modo que se puedan insertar un par de uniones atornilladas para asegurar la sujeción de la abrazadera con la tubería. En realidad, la conexión entre ambas partes del soporte, así como la conexión entre la tubería y el soporte, se materializa mediante un par de elementos de viga como uniones atornilladas precargadas.

El FBG no se modela y, por tanto, no se incluye en el montaje. Su tamaño y peso lo hacen despreciable en el cálculo de las frecuencias naturales del conjunto.

##### 3.1.2. Materiales

**Tubería:** Acero inoxidable, austenítico, AISI 301, totalmente duro, forjado. Datos recopilados por Ansys Granta, incorporando varias fuentes, incluyendo JAHM y MagWeb. ANSYS, Inc. no garantiza estos datos, una descripción más detallada se verifica en la Tabla 1.

**Soporte:** Aleación de aluminio, forjado, 7055, T77511. Datos recopilados por Ansys Granta, incorporando diversas fuentes, incluidas JAHM y MagWeb. ANSYS, Inc. no garantiza estos datos, se puede visualizar en la Tabla 2.

Densidad	$7,916e - 06 \text{ kg/mm}^3$
Endurecimiento isótropo bilineal	Deformación: $0,0e + 02,3e - 2$ ; Tensión: $0,0e + 01,0e + 3$
Coefficiente de dilatación térmica	$^{\circ}C - 2,5e + 28,7e + 21 / ^{\circ}C 8,0e - 61,9e - 5$
Temperatura de referencia de deformación térmica cero	$20,000 \text{ }^{\circ}C$
Curva S-N	$\log(10)3,0e + 08,0e + 0 \text{ MPa } 2,3e + 29,2e + 2$
Resistencia a la tracción	1271 MPa
Resistencia a la tracción	961,40 MPa
Conductividad térmica isótropa	$^{\circ}C - 1,3e + 29,4e + 2 \text{ W/mm} \cdot ^{\circ}C 1,1e - 22,7e - 2$
Calor específico presión constante	$^{\circ}C - 2,0e + 29,8e + 2 \text{ mJ/kg} \cdot ^{\circ}C 2,9e + 56,8e + 5$
Resistividad isótropa	$2,0e + 19,0e + 2 \text{ }^{\circ}C 7,2e - 41,3e - 3 \text{ ohm} \cdot \text{mm}$

Tabla 1: Datos de tubería a simular en Ansys.

Densidad	$2,88e - 06 \text{ kg/mm}^3$
Módulo de Young	68970 MPa
Relación de Poisson	0,32300
Módulo de masa	64944 MPa
Módulo de cizallamiento	26066 MPa
Endurecimiento isótropo bilineal	Deformación: $0,0e + 04,2e - 2$ ; Tensión: $0,0e + 06,1e + 2$
Coefficiente de dilatación térmica secante isotrópica	$2,368e - 05 1 / ^{\circ}C$
Curva S-N	$\log(10)3,0e + 08,0e + 0 \text{ MPa } 1,2e + 24,9e + 2$
Resistencia a la tracción	616,40 MPa
Resistencia a la tracción	582,90 MPa
Conductividad térmica isótropa	$0.15270 \text{ W/mm} \cdot ^{\circ}C$
Calor específico presión constante	$9,571e + 05 \text{ mJ/kg} \cdot ^{\circ}C$
Resistividad isótropa	$4,368e - 05 \text{ ohm} \cdot \text{mm}$

Tabla 2: Datos de soporte a simular en Ansys.

### 3.2. Análisis modal: tubería, cantilever y conjunto

En ANSYS, la obtención de las frecuencias propias (o modos naturales) de una estructura se realiza a través del análisis modal, para esto se siguen una serie de pasos como los que se describen a continuación:

1. **Preparación del modelo:** Antes de realizar el análisis modal, se debe preparar el modelo en ANSYS. Esto incluye la definición de la geometría, las propiedades del material, las condiciones de contorno y las restricciones.
2. **Definición del análisis:** En ANSYS, es necesario definir el tipo de análisis que se desea realizar. En este caso, se selecciona el análisis modal, que se utiliza para calcular las frecuencias propias y los modos de vibración de la estructura.
3. **Aplicación de las condiciones de contorno:** Define las condiciones de contorno necesarias para el modelo. Esto puede incluir restricciones en ciertos grados de libertad, como fijaciones o apoyos, y la aplicación de cargas si es necesario.
4. **Configuración de las opciones de análisis:** En la configuración del análisis modal, se especifican parámetros adicionales, como el número de modos a calcular o la frecuencia mínima y máxima de interés.

5. **Ejecución del análisis:** Una vez configuradas todas las opciones, se puede ejecutar el análisis modal en ANSYS. El software calculará las frecuencias propias y los modos de vibración correspondientes para el modelo.
6. **Revisión de los resultados:** Una vez que se complete el análisis, se podrá revisar los resultados obtenidos. ANSYS proporcionará información sobre las frecuencias propias y los modos de vibración correspondientes, que pueden ser representados gráficamente y analizados en detalle.

A continuación se definen los procesos seguidos para obtener al análisis modal en cada uno de los componentes del sistema que se simulará.

### Tubería

Se definen dos superficies cilíndricas cortas en ambos extremos de la superficie cilíndrica externa de la tubería para aplicar las restricciones correspondientes. También se define una arista de control, coincidente con la ubicación teórica del FBG, en el centro de la superficie externa de la tubería.

La tubería se discretiza utilizando un tamaño de cuerpo de 2 mm. Todos los bordes circulares se dimensionan con 120 divisiones y se aplica una malla cartografiada hexaédrica multizona para lograr la máxima uniformidad.

Se aplica un soporte cilíndrico a las superficies de los extremos del tubo, con *DOF* (grados de libertad) axiales y tangenciales fijos, y desplazamiento y/o deformación radial libres. Estos soportes cilíndricos intentan reproducir las condiciones de trabajo de los tramos de tuberías real y se mantienen lo más parecidos posible a un soporte simple para evitar el crecimiento de reacciones de pico no realistas en los alrededores de esas superficies. La mayoría de los trabajos anteriores han modelado dichos apoyos como fijos ( $DOF = 0$ ), ya que se trata de una simplificación conveniente de cara a la resolución del problema. Sin embargo, esta no es la disposición real, y genera tensiones pico de reacción irreales en las superficies empotradas que deben ignorarse en el análisis posterior.

Las pruebas preliminares mostraron un elevado número de frecuencias naturales para la tubería. Por ello, el análisis se limita a frecuencias naturales de hasta  $15000Hz$ , teniendo en cuenta los rangos de frecuencia evaluados por la bibliografía de referencia.

### Soporte Superior

Se define un borde de control, coincidente con la ubicación teórica del FBG, en el centro de la superficie superior del voladizo. El soporte superior se discretiza utilizando una malla cartesiana, con un tamaño de elemento de 1 mm. La superficie plana superior se refina con un tamaño de elemento de 0,5 mm. Se aplica un soporte cilíndrico a la superficie cilíndrica de la ranura del voladizo. El análisis se limita a las 6 primeras frecuencias naturales.

### Montaje

Se ensamblan la tubería y el soporte. La tubería se limita como en el análisis modal individual. El soporte se considera unido a la superficie del tubo. Se trata de una simplificación del montaje real, en el que se insertan un par de pernos a través de los orificios laterales de las partes superior e inferior del soporte para alinearlas y apretarlas alrededor de la tubería. La simplificación es sensible, ya que la inclusión de los pernos, ya sea como elementos tridimensionales independientes o como vigas, escala el consumo de recursos de cálculo y, en esencia, la fijación física es la misma que la de una sujeción completa.

El soporte inferior, único participante en la simulación del conjunto, se discretiza utilizando una malla cartesiana, con tamaño de elemento de 2 mm. Se crea un total de 27220 elementos y 155392 nodos.

### 3.3. Análisis paramétrico

Se ha diseñado un estudio paramétrico para comprender la influencia de los parámetros geométricos del soporte superior sobre sus frecuencias naturales. La Tabla 3 presenta los parámetros geométricos de entrada objeto de la investigación, así como los límites para el estudio paramétrico. La altura del cantilever no se tiene en cuenta debido a restricciones de fabricación y rendimiento. Tampoco el diámetro de la ranura de la base, ya que este valor depende del tamaño del tubo. Las frecuencias naturales y sus respectivas deformaciones asociadas configuran los parámetros de salida, todas las medidas se encuentran en *mm*.

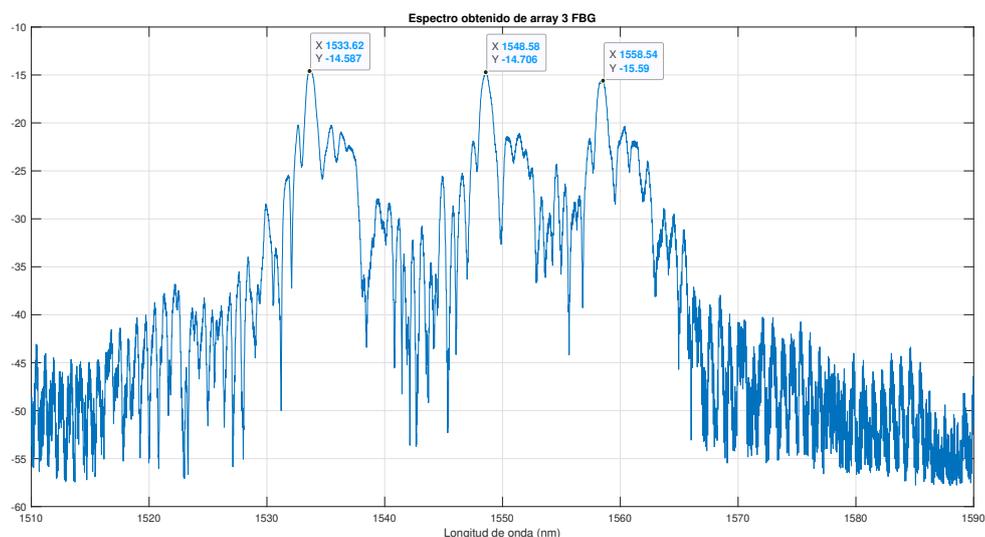
Parámetro	Descripción	Valor Nominal	Límite Inferior	Límite Superior
$CANT_L$	Longitud del cantilever	8.5	4.5	8.5
$CANT_B$	Anchura del cantiliver	4.0	2.0	4.0
$CANT_{BINT}$	Anchura intermedia del cantilever	0.2	0.2	0.6
$CANT_H$	Altura del cantilever	0.8	-	-
$ADW_L$	Peso añadido longitud	1.5	1.0	3.0
$ADW_B$	Peso añadido anchura	2.5	2.0	3.0
$ADW_H$	Peso añadido altura	1.0	0.8	2.0
$BASE_L$	Longitud de la base	8.7	8.7	10.0
$BASE_B$	Anchura de la base	44.3	44.3	50.0
$BASE_H$	Altura de la base	16.8	16.8	18
$BASE_D$	Diámetro de la ranura de la base	26.5	-	-

**Tabla 3:** Datos para simulación de análisis paramétrico

## 4. Fabricación de sensor, piezas y montaje de sistema de medida

### 4.1. Fabricación de sensor

Con la ayuda de investigadores del ITEAM, se obtuvo varias opciones de array de FBG siguiendo el proceso de fabricación descrito en la teoría, a partir de la conexión de la fibra con la FBG al Interrogador de detección óptica sm125 se puede obtener la representación de la FBG a utilizar, derivando de aquellos diversos datos, entre ellos los más importantes corresponden a las longitudes de onda a las que se obtienen los valores máximos de resonancia, obteniendo los picos de la señal que deberán corresponder con el rango medible admisible del láser que se encuentra entre 1527,6 y 1565,49 nm, uno de los ejemplos de las diferentes FBG que se han utilizado para las pruebas se visualiza en la Figura 9 donde se representa el espectro del array FBG en su totalidad.



**Figura 9:** Espectro obtenido de un array FBG utilizado para las pruebas de laboratorio

Como se verifica en la Figura, los 3 picos de las longitudes de onda del array se encuentran dentro del rango admisible del láser: 1533.62 nm; 1548.58 nm; 1558.54 nm. Para su calibración, a partir de estos datos se verifica en equipo de medida la potencia obtenida en dB, esta medida puede sufrir cambios debido a que se toma la medida con la FBG ya insertada en el sistema de pruebas, la variación es mínima pero sirve para fijar un valor real en las condiciones presentadas, por tanto con estos datos se sintoniza desde el láser y se establece la longitud de onda de trabajo real y se determina la separación entre pico y a -3 dB que permitirá fijar el valor para las medidas restantes.

El análisis se realiza en la zona de mayor detección que es a -3 dB, por tanto se pretende encontrar la medida en nm que permita conocer la separación entre el pico y la mitad de potencia de la señal, uno de los ejemplos de los análisis realizados con la toma de datos se muestra en la Tabla 4.

WL 1 Array (nm)	Nivel 1 (dBm)	WL 2 Láser (nm)	Nivel 2 (dBm)	Separación (nm)
1533,720	-24,6	1533,290	-26,78	0,43
1548,591	-24,7	1548,120	-27	0,471
1558,450	-25,6	1557,990	-28	0,464

**Tabla 4:** Calibración de medidas FBG.

En la Tabla 4 se verifica que se parte del nivel de potencia obtenido en la señal original del array FBG para el primer pico, a partir de esto se busca el valor de longitud de onda en la zona de trabajo (a -3 dB), se realiza la medición de una potencia monitor, es decir mide el 1 % de potencia que le llega al fotodetector, la diferencia entre estos dos valores medidos será la separación necesaria para la configuración de los demás valores de longitud de onda pico de la señal original, una vez establecida esta configuración, se procede con las mediciones de impacto y tonos con el sistema completo. El proceso se repite para cada una de las FBG utilizadas, y a partir de eso queda lista para realizar las mediciones con el montaje completo del sistema.

## 4.2. Diseño y fabricación de piezas mecánicas

Para la fabricación de las piezas se tomó en cuenta lo recopilado en las diversas fuentes de información encontradas correspondientes a sensores de vibración adheridos a superficies que se citan en el apartado teórico, tanto para las formas, dimensiones, frecuencias de resonancia y material, así como experiencias previas del grupo de investigación del ITEAM con la fabricación de piezas mecánicas. Se eligió las piezas mecánicas en forma de cantilever que tiene una terminación triangular, tal terminación concluye con la adición de una masa adicional, demás componentes son referidos para el agarre de las piezas a la tubería disponible.

A partir de las consideraciones citadas conjuntamente con lo obtenido en las simulaciones se ha procedido con el diseño de las piezas mecánicas, en primera instancia se han realizado bocetos a mano hasta encontrar las dimensiones correctas que permitan también acoplarse a sistemas de pruebas y materiales ya establecidos en los laboratorios del grupo de investigación, esto incluye:

- Tuberías
- Distancia entre agujeros
- Tipos de agujero (pasante o rodante) .
- Dimensiones (largo y grosor) de tornillos existentes para el agarre de los soportes procurando sean lo más cortos posibles.

Para el diseño ha sido importante tomar los consejos dados por autores anteriores como por ejemplo:

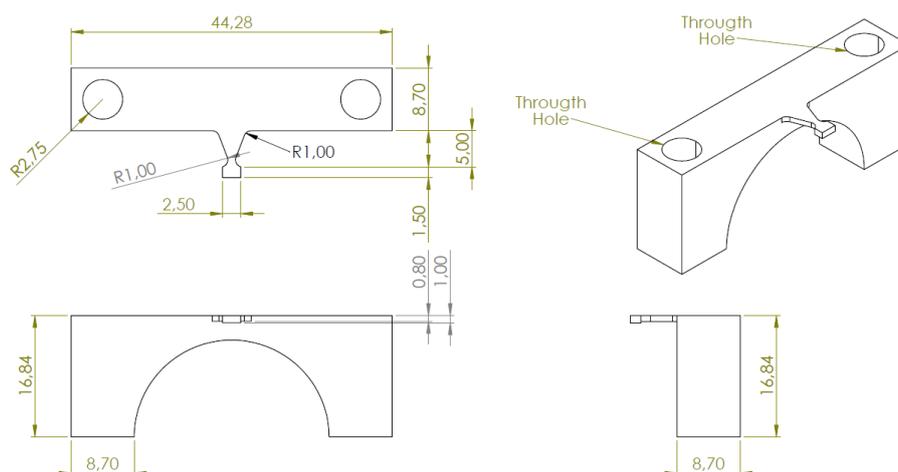
- Parte que sostenga la masa sea lo más fina posible
- Relación lógica de proporciones
- Escalamientos adecuados
- Grosos lo más pequeños posibles
- Espesor más conveniente

La fabricación se la llevó a cabo con la empresa **PROTO&GO** dedicada a la fabricación de piezas y prototipos la cuál muestra ciertas tolerancias mínimas que restringen el diseño y a las cuáles se asegura que la pieza tenga el desempeño deseado, entre ellos se encuentran:

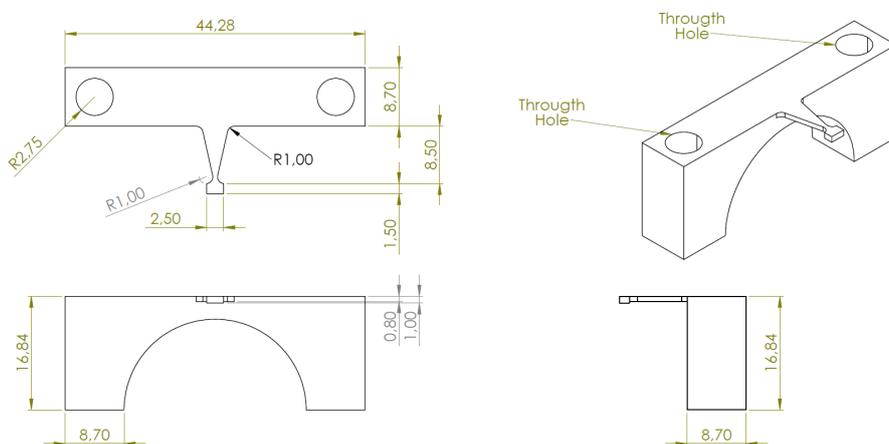
- Diámetro mínimo recomendado: 2,5 mm
- Diámetro mínimo fabricable: 0,5 mm
- No es posible obtener aristas internas de radio cero en los vaciados interiores (radio será mayor a 1/3 de la profundidad)
- Se debe evitar radios inferiores a 1 mm.

- Espesor mínimo recomendado: 0.8 mm
- Profundidad máxima: 10 X para aluminios.
- Tolerancias generales de  $\pm 0.05$  entre 0.5-6 mm de dimensión lineal y  $\pm 0.1$  de 6-30 mm de dimensión lineal para metales.

Tomando en cuenta cada una de las consideraciones detalladas, se ha hecho uso del software AutoCAD para su diseño y puesta en marcha, permitiendo etiquetar y otorgar una mejor presentación de las piezas deseadas al fabricante. En las Figuras 10 y 11 se visualiza los bocetos finales de los cantilever corto y largo posteriormente fabricados.



**Figura 10:** Boceto final con especificaciones de cantilever corto.



**Figura 11:** Boceto final con especificaciones de cantilever largo.

En el diseño mecánico de las piezas a utilizar, el material es una parte importante. En este trabajo, se sugiere la aleación de aluminio 7075, que tiene una mayor relación  $\frac{E}{\rho}$ , donde  $E$  representa el módulo de Young y  $\rho$  la densidad. Un mayor valor de  $\frac{E}{\rho}$  indica una mayor deformación admisible del material. Además, es suficiente para evitar el daño al aplicar cargas ejercidas por la marcha humana. Las especificaciones del material se tabulan en la Tabla 5.

Propiedades	Valores	Unidades
Densidad	2810	$\frac{kg}{m^3}$
Relación de Poisson	0.33	-
Módulo de Young	71.7	GPa
Resistencia a la tracción	503	MPa

**Tabla 5:** Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 7075

### 4.3. Pegado de sensores en piezas mecánicas

En cuanto a la forma de adherir la fibra a la estructura hay que tener en cuenta que los sensores de fibra óptica tienen que permanecer en contacto fijo con la superficie a medir para poder obtener resultados sobre la deformación que se produce. En este aspecto existen 2 técnicas: adherirlos a la superficie o embeberlos en la misma estructura. Para este caso, se ha utilizado la opción de adherirlos a estructuras ya fabricadas, al tener la ventaja de no interferir en el proceso de fabricación. Además, es un proceso sencillo de realizar.

Una vez elegidas las FBGs a utilizar y las piezas de prueba diseñadas, se realiza la inscripción de las FBG en las estructuras, esto conlleva un proceso de adhesión con materiales de recubrimiento como el adhesivo epoxi de dos componentes: una resina y un endurecedor, además del adhesivo epoxi, resulta de gran ayuda el uso de cianoacrilato (Loctite) para una primera etapa de adhesión ya que es de fácil aplicación y secado rápido (minutos).

En la Figura 12 se puede apreciar los materiales utilizados en el proceso de pegado de la FBG como la resina epoxi, acelerador de secado y líquido limpiador de superficies, en la parte izquierda se visualizan las fibras adheridas a los cantilever corto y largo.



**Figura 12:** Inscripción de fibras en piezas mecánicas, y elementos utilizados para su adhesión.

### 4.4. Descripción de elementos del sistema

En la Figura 13 se muestra el proceso de medición dispuesto por los principales elementos del sistema, a continuación, se describe el proceso seguido: El láser en primera instancia se dirige hacia un circulador, este a su vez lo envía hacia la FBG, la FBG por su parte devuelve la potencia reflejada por el mismo camino, previamente al montaje se han definido los puertos de salida, de uno de los puertos, la potencia reflejada se dirige hacia un acoplador 99 a 1 (por una rama va el 99% de la potencia y por la otra el 1%), el acoplador se lo usa para saber la potencia que llega al medidor y poder ajustar en el punto de trabajo (guiándose por la potencia) deseado, posteriormente esta potencia reflejada llega al fotodetector que está conectado directamente a un osciloscopio.

Para la simulación de las fugas se ha realizado dos tipos de montaje del sistema de tubería, ambos constan de una tubería anclada a una estructura fija, la fuga se simula con el uso de un martillo senso-

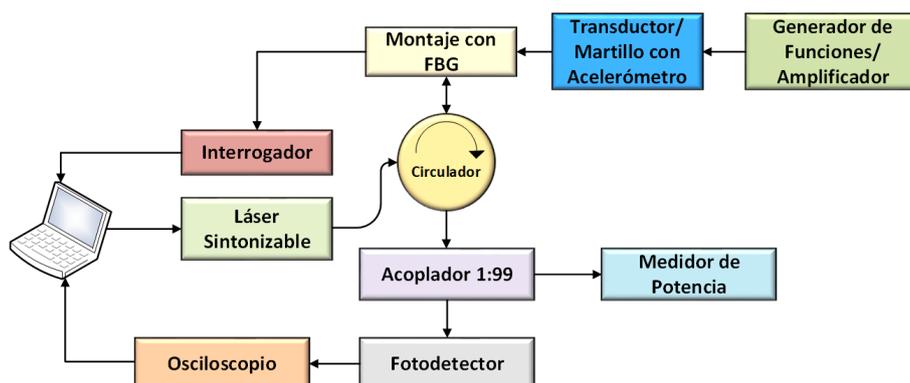


Figura 13: Elementos del sistema para la realización de medidas

rizado para un caso (Figura 14), el cual lleva un acelerómetro en la punta para conocer la fuerza que se tiene al emitir un golpe, el mismo está conectado a un amplificador, y el amplificador al osciloscopio, al emitir un golpe se genera una señal eléctrica que se analiza en el osciloscopio con los datos de calibración del martillo que vienen de fábrica. El osciloscopio se mantiene en modo idle, esperando a que se dispare. El disparo está configurado para detectarse conforme al uso del martillo, continuamente se mira lo que pasa en ese canal, al superarse un umbral se dispara y se captura la traza.

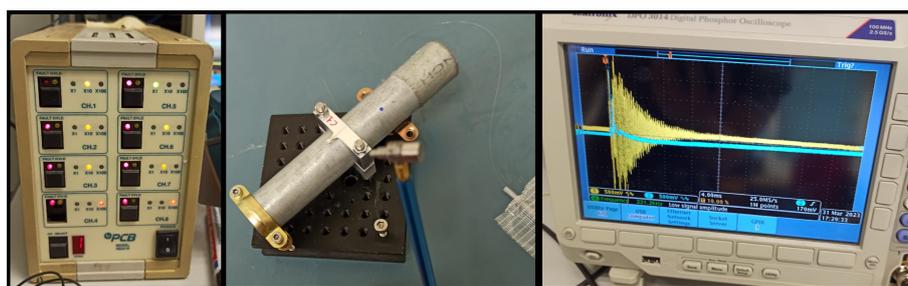


Figura 14: Elementos del sistema para la toma de medidas con martillo sensorizado.

Para el siguiente caso (Figura 15) se hace uso de un generador de funciones, lo cuál permite emitir señales de frecuencia fija con valores de voltaje variables, estas señales se emiten hacia un transductor el cuál está anclado a la tubería, la forma de tomar datos de la FBG es el mismo dispuesto para el uso del martillo.

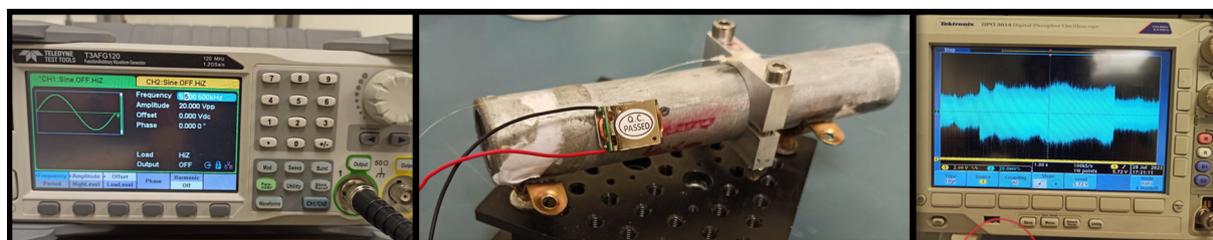


Figura 15: Elementos del sistema para la toma de medidas con transductor.

En general para cada uno de los casos descritos la toma de datos se describe a continuación:

- Medidas se toman de cada FBG, cada FBG está compuesta por un array de 3 FBGs.
- Se guarda fichero que da el osciloscopio y se lo representa en Matlab.
- Se realiza cálculo para establecer potencia a visualizar en equipo de medida, en este caso -20 dBm, es el 1% de la potencia (1% son -20 dB), se le inserta alrededor de 0.8 dBm de potencia en el punto máximo, pero en el máximo es donde menos sensibilidad se tiene, siempre se busca estar en la pendiente a 3 dB.

Ejemplo: Máximo en traza: -15.6 a 3 dB sería -18.6 (máximo), se realiza una estimación, para calibrar en instrumento de medida. El escenario real dispuesto para la toma de mediciones se visualiza en la Figura 16.

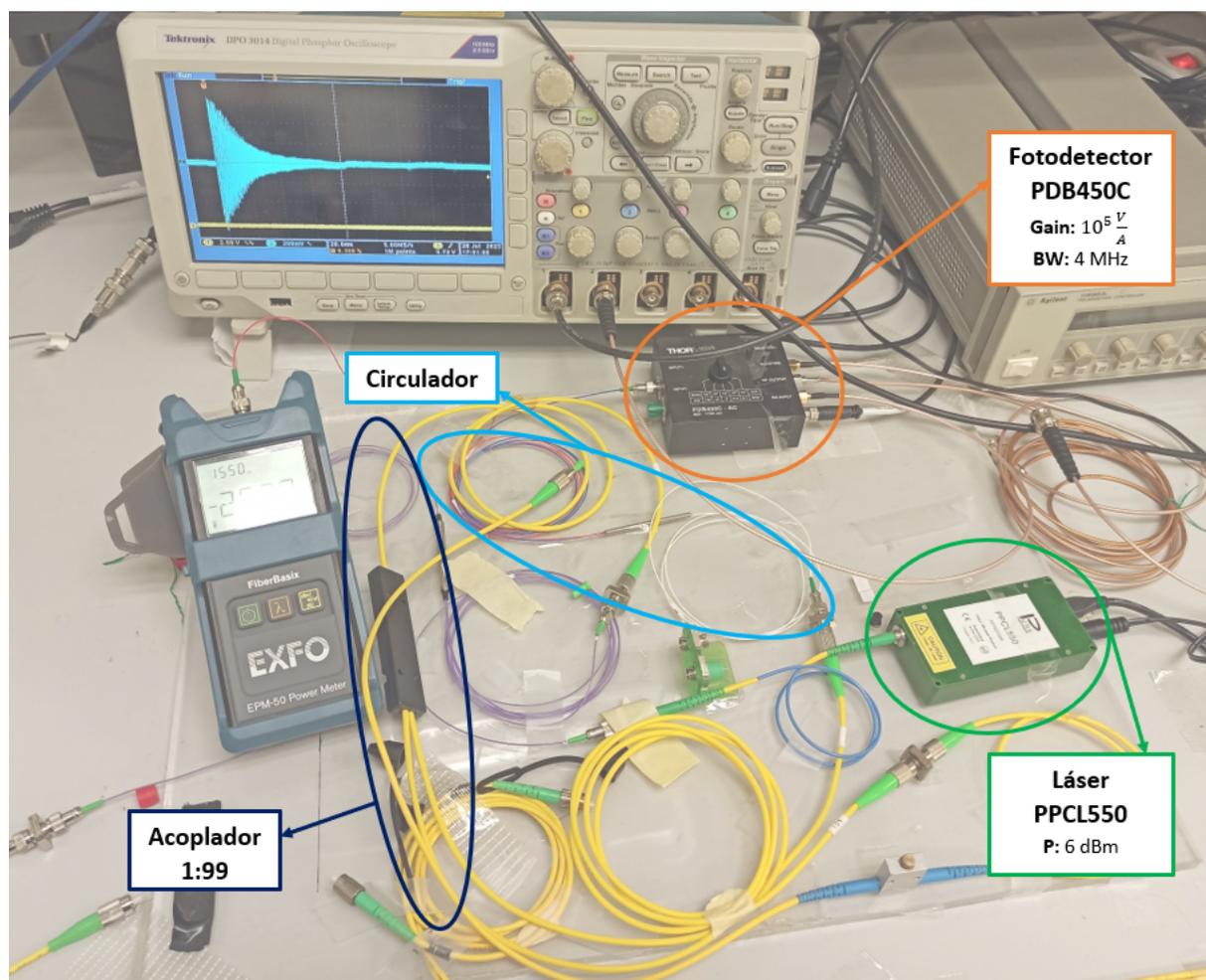


Figura 16: Sistema de elementos ópticos y eléctricos para la toma de medidas en laboratorio.

## 5. Resultados

### 5.1. Frecuencias naturales: tubería, cantilever y conjunto

#### 5.1.1. Tubería

En la Tabla 6 se puede verificar el número de frecuencias naturales obtenidas para la tubería simulada, conjuntamente con las frecuencias de resonancia dispuestas para cada tipo de deformación y la cantidad de nodos que se han deformado para cada análisis, se visualiza que para el análisis modal pueden llegar a existir diversos tipos de deformación así como cantidad de nodos, en la Figura 17 se establecen ejemplos de resultados de contorno obtenidos a partir de los análisis y simulaciones aplicadas a la tubería, se puede visualizar que a partir del análisis modal los datos más representativos correspondientes a valores de mayor amplitud en deformación se dan para la primera frecuencia natural: 1063.2 Hz con un tipo de deformación de oscilación con dos nodos, a su vez también para la frecuencia de 4931.6 Hz con 4 nodos de deformación en oscilación.

Frecuencia Natural	Frecuencia [Hz]	Nodos de deformación	Tipo de deformación
1	1063.2	2	Oscilación
2	1063.3	2	Oscilación
3	2725.4	3	Oscilación
4	2725.5	3	Oscilación
5	4086.7	2	Expansión central
6	4931.6	4	Oscilación
7	4932.7	4	Oscilación
8	6503.4	2	Expansión central
9	7502.9	5	Oscilación
10	7507.8	5	Oscilación
11	8194.2	2	Expansión central
12	10326	6	Oscilación
13	10333	6	Oscilación
14	10333	Mixto	-

Tabla 6: Resultado de frecuencias naturales de tubería.

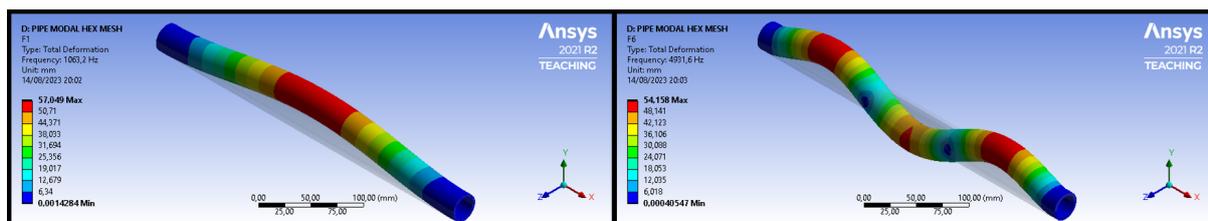


Figura 17: Resultados de contorno de tubería.

#### 5.1.2. Soporte superior

La Tabla 7 detalla los resultados del análisis modal correspondiente al soporte superior con la pieza mecánica en forma de cantilever, para C2(Cantilever largo), en ella se visualiza que para este caso, se tienen distintos tipos de deformación, debido a que el nodo de deformación que se fija es el soporte y se pretende encontrar la mayor deformación posible en el cantilever, es así que con una oscilación vertical, siendo el tipo de oscilación más representativo se tiene un valor máximo de amplitud para la primera frecuencia natural a 6995.4 Hz. En la Figura 18 se visualizan ejemplos de resultados de contorno obtenidos a partir de los análisis y simulaciones aplicadas al soporte superior con los tipos de oscilación

predominantes: vertical, lateral y horizontal.

Frecuencia Natural	Frecuencia [Hz]	Nodos de deformación	Tipo de deformación
1	6995.4	1	Oscilación vertical
2	17388	1	Oscilación lateral
3	31735	Mixto	-
4	31743	Mixto	-
5	34864	2	Oscilación vertical
6	44614	1	Torsión horizontal

Tabla 7: Resultado de frecuencias naturales de soporte superior.

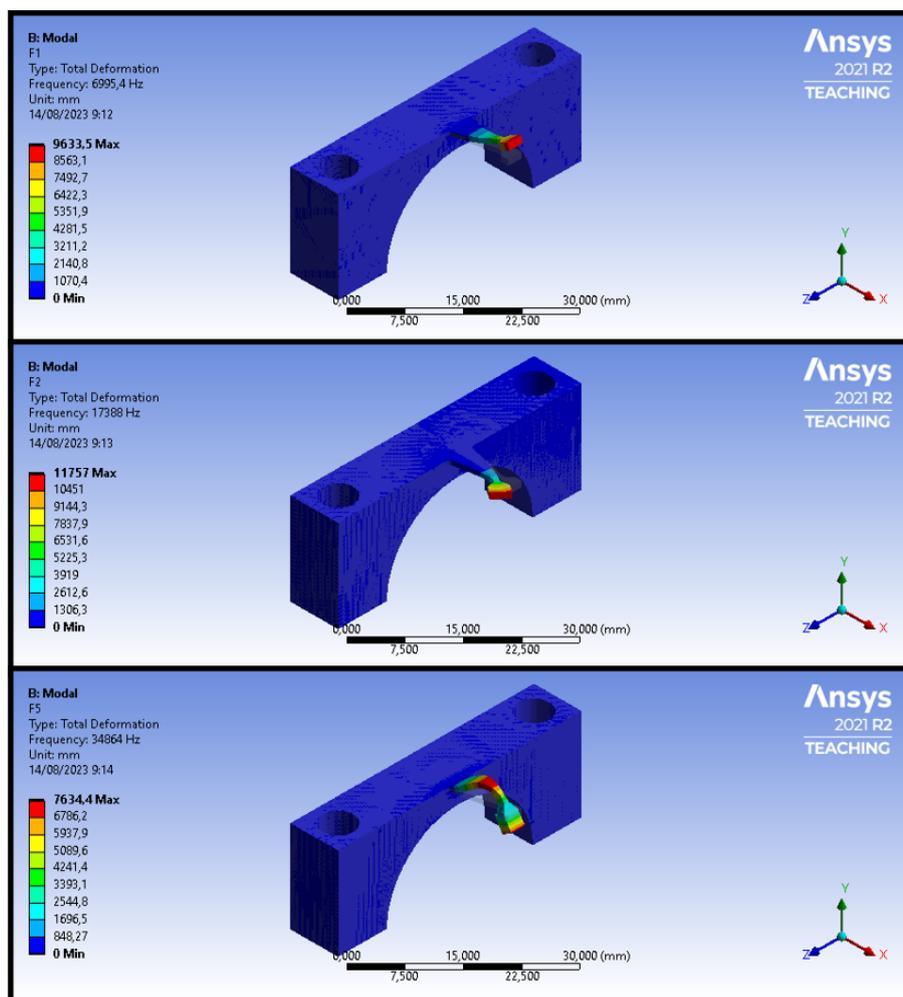


Figura 18: Resultados de contorno de soporte superior.

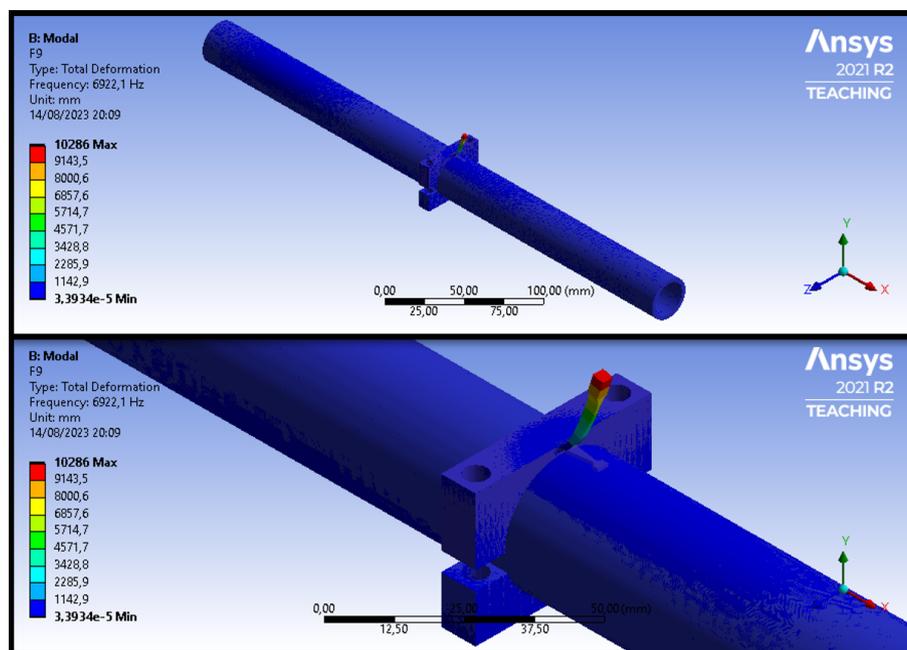
### 5.1.3. Conjunto

A continuación, en la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de la simulación, de la misma manera que para la tubería y el soporte superior, en este caso se obtienen muchas más frecuencias naturales

representativas para los diferentes nodos y tipos de deformación, tomando mayor predominancia aquellas frecuencias para las cuáles se tiene una deformación del cantilever que es el lugar donde reposará la fibra para la obtención de los resultados, dado el caso, en la Figura 19 se visualiza el resultado de contorno obtenido a partir del análisis y la simulación aplicada al conjunto, en específico la frecuencia 9, la cual detalla una oscilación vertical del cantilever, obteniendo una mayor amplitud a la frecuencia de 6922,1 Hz.

Frecuencia Natural	Frecuencia [Hz]	Nodos de deformación	Tipo de deformación
1	1037.8	2	Oscilación
2	1038.9	2	Oscilación
3	2717.2	3	Oscilación
4	2719.4	3	Oscilación
5	3940.6	2	Expansión central
6	4871.5	4	Oscilación
7	48775.4	4	Oscilación
8	6404	2	Compresión central
<b>9</b>	<b>6922.1</b>	5	<b>Oscilación vertical</b>
10	7540.6	5	Oscilación
11	7559.5	5	Oscilación
12	8301.2	3	Expansión central
13	10414	6	Oscilación
14	10433	6	Oscilación
15	11019	Mixto	-

**Tabla 8:** Resultado de frecuencias naturales de conjunto compuesto por tubería más cantilever.



**Figura 19:** Resultados de contorno de conjunto.

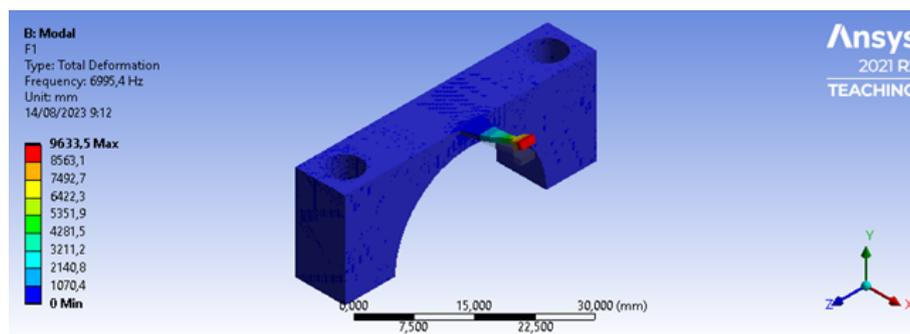
## 5.2. Correlación entre parámetros de entrada y salida del cantilever

La frecuencia natural F1 del soporte superior resulta ser el valor más relevante, ya que su deformación asociada (oscilación vertical de 1 nodo de la punta del voladizo), mejora las prestaciones esperadas de la pieza como soporte del FBG. Por tanto, el estudio paramétrico se circunscribe a conocer la influencia de los parámetros geométricos del soporte superior sobre F1.

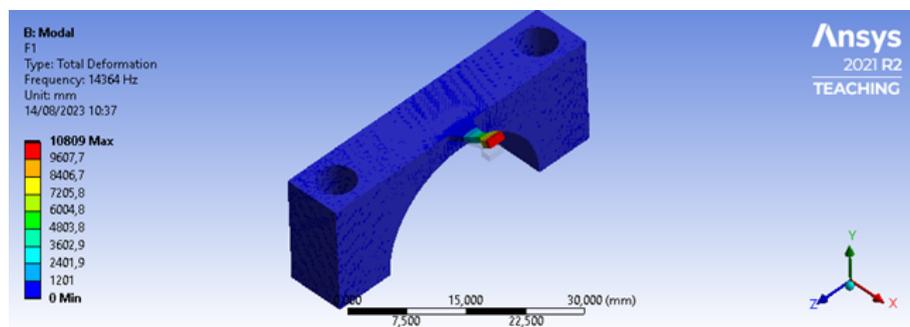
En resumen, los resultados relevantes para la comparación con las pruebas experimentales, se muestran en la Tabla 9 las frecuencias de resonancia para el cantilever largo y corto respectivamente, así también en la Figura 20 se verifica la mayor deformación obtenida en el cantilever largo y su frecuencia de resonancia: 6995,4 Hz; en la Figura 21 se verifica lo mismo para el cantilever corto con una frecuencia de resonancia de 14364 Hz.

Frecuencia Natural	Frecuencia [Hz] $CANT_L = 8,5$	Frecuencia [Hz] $CANT_L = 5,0$
1	6995.4	14364
2	17388	31787
3	31735	31795
4	31743	36679
5	34864	48018
6	44614	48364

**Tabla 9:** Resultado de frecuencias naturales de soporte superior.



**Figura 20:** Frecuencia natural obtenida a máxima amplitud para Cantilever Largo

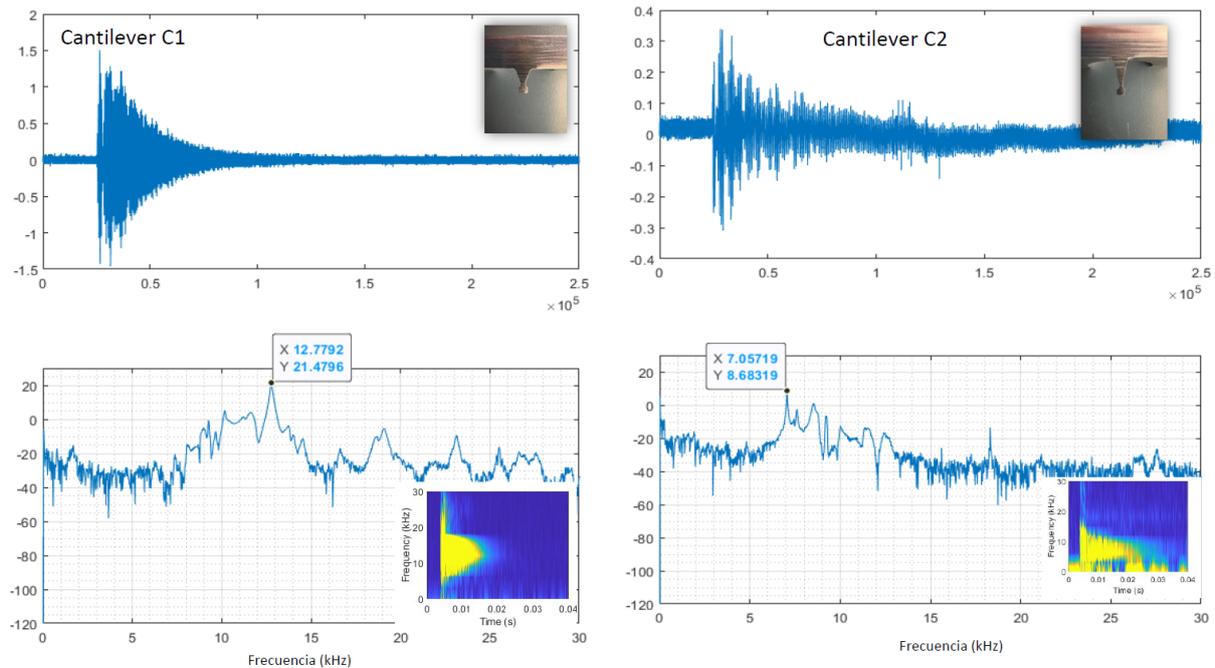


**Figura 21:** Frecuencia natural obtenida a máxima amplitud para Cantilever Corto

### 5.3. Resultados experimentales de cada elemento y del conjunto

#### 5.3.1. Piezas mecánicas (solas)

En primera instancia se realiza el análisis de las piezas sin ensamblar en el sistema, esto con el fin de obtener las frecuencias de resonancia, en la Figura 22 se puede visualizar lo obtenido para el cantilever corto y largo.



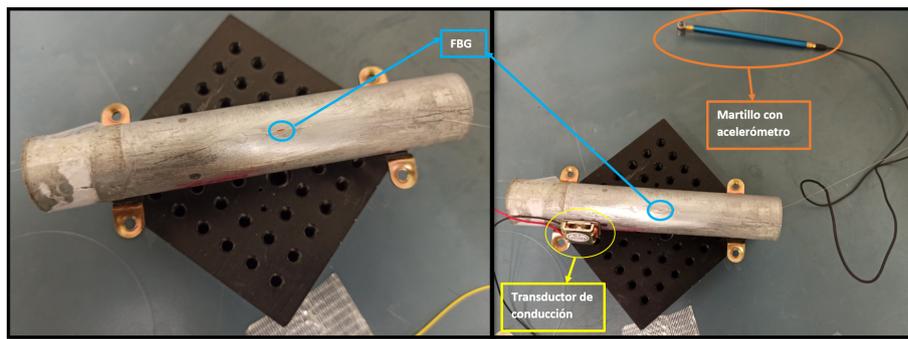
**Figura 22:** Medidas cantilever C1 y C2.

Como se puede observar para el cantilever corto (C1) se encuentra su frecuencia de resonancia en 12.7792 kHz, con armónicos posteriores que no representan mayor importancia para el análisis, la frecuencia de resonancia para el cantilever largo (C2) está en los 7.0572 kHz, estos resultados se obtuvieron en medición directa de los materiales.

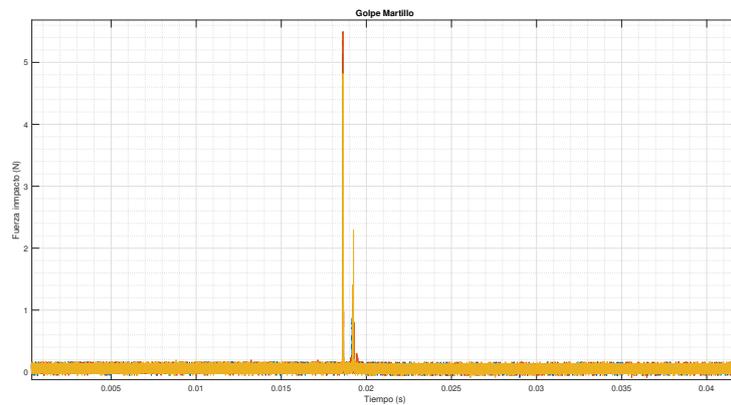
#### 5.3.2. Tubería

A continuación se establece la caracterización de la frecuencia de resonancia para la tubería establecida en laboratorio. Se han desplegado 2 tipos de simulaciones para la tubería, la primera con la tubería sola únicamente la FBG adherida y la siguiente con la inserción de un transductor de conducción, las trazas se recogen en el osciloscopio luego de la realización de golpes con el martillo con acelerómetro, el montaje de las pruebas detalladas se muestra en la Figura 23.

Antes de comenzar cada una de las medidas, es necesaria la calibración del martillo, esto permite evitar saturaciones que posteriormente puedan influir con los resultados obtenidos, esto se puede identificar al verificar las gráficas obtenidas en cada uno de los golpes, esta gráfica en los picos debe ser un único valor, además se debe visualizar la no inserción de rebotes, un ejemplo de la calibración se muestra en la Figura 24, los valores promedio de la fuerza ejercida en cada impacto se fijan por encima de los 5 N con una respuesta del mismo alrededor de los 20 ms.

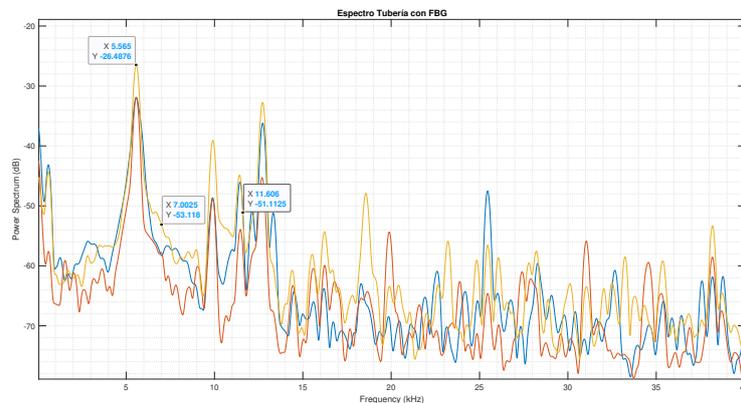


**Figura 23:** Montaje de tubería sola para pruebas de frecuencia de resonancia.



**Figura 24:** Resultados de calibración de martillo para pruebas de impacto.

Para las medidas de la tubería sola con la FBG adherida directamente con el proceso de pegado descrito en la sección 4.3, se puede visualizar en la Figura 25 una frecuencia máxima en 5.565 kHz, con una ganancia de -26.4876 dB, se han realizado tres impactos de prueba con el martillo para tener una mayor confiabilidad de los resultados a obtener, se visualizan también los valores de ganancia para las frecuencias de resonancia de los cantilever.



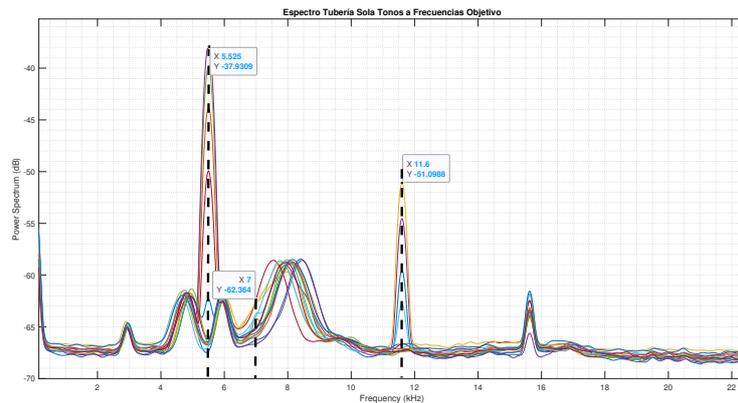
**Figura 25:** Frecuencia de resonancia para tubería sola con FBG adherida.

Para el siguiente apartado se han realizado mediciones simulando la fuga con un tono dispuesto por un transductor de conducción, el cuál simula un altavoz, cuyas especificaciones se detallan en la Tabla 10. Al insertar el altavoz, las frecuencias naturales estudiadas en las simulaciones previas cambian, ya que se ha ingresado una masa adicional, la misma va a permitir obtener respuestas sin entrar en el detalle de los impactos con el martillo que pueden verse no tan confiables debido a que dependen de la fuerza del golpe y del lugar dispuesto en la tubería para el mismo. Así, con el uso del altavoz se tiene un estímulo continuo que permite ser controlado también en amplitud y frecuencia para las verificaciones de sensibilidad correspondientes para cada caso estudiado.

Dimensiones	14x21,5 mm
Peso	9.6 g.
Potencia	1 W RMS
$L_e$	1,26 mH
Impedancia	8 ohm
$R_e$	5,8 ohm
Respuesta en Frecuencia	300 – 19000 Hz (Varía en función de la superficie)
$F_s$	51600 Hz
$SPL$	90,1 dB 1W/1m (Varía en función de la superficie)

**Tabla 10:** Especificaciones de transductor de conducción utilizado.

Con la información previa obtenida de las frecuencias objetivo que se consiguieron con las medidas tanto de las piezas solas como de la tubería sola, se puede tener una asimilación inicial de que las frecuencias a las que se pretende amplificar su sensibilidad se encuentran por el rango de 5.5 kHz (tubería sola), 7 kHz (cantilever largo) y 11.6 kHz (cantilever corto), es así que con el uso del transductor de conducción, se ha dispuesto una serie de pruebas con tonos a las frecuencias detalladas, incluyendo diferentes valores de voltaje desde el generador de funciones: 1, 5, 10, 15 y 20 Vpp, que permiten simular diferentes magnitudes de impactos, y en este caso relacionadas con las fugas que pudiera tener una tubería. La Figura 26 representa toda la caracterización del proceso citado anteriormente, es decir, se visualizan todos los tonos enviados a las 3 frecuencias objetivos, obteniendo un máximo (al ser la tubería sola con el transductor) en 5.525 kHz y una ganancia de -37.9309 dB, para los 7 kHz no se tiene mayor amplificación y coincidentemente para 11.6 kHz se tiene cierta amplificación que posteriormente con el análisis del conjunto con cada cantilever se podrá comprobar la utilidad de la inserción de los mismos.



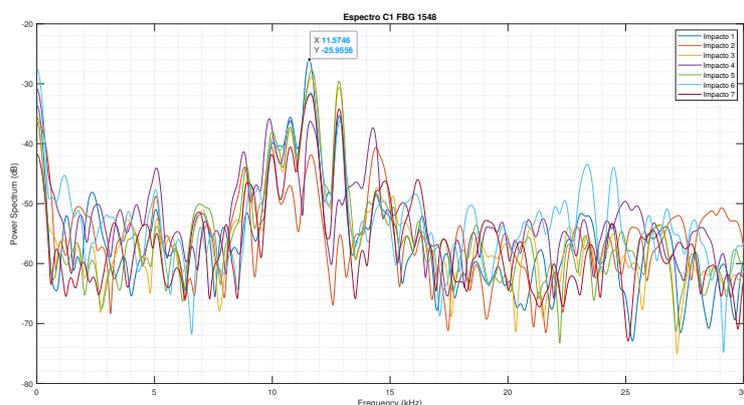
**Figura 26:** Espectro de tubería con transductor de conducción, con tonos a frecuencias objetivo y con diferentes valores de voltaje pico-pico.

### 5.3.3. Conjunto

#### Pruebas Impactos

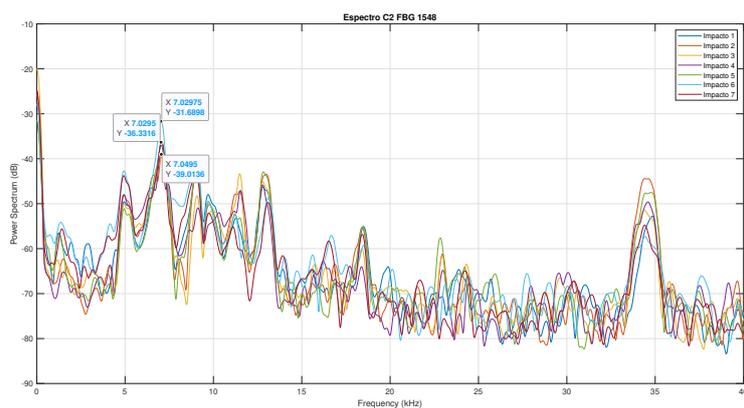
Para la obtención de resultados en las pruebas de impacto se ha establecido el uso de las longitudes de onda del array de FBG más cercanas a la frecuencia central, es decir 1550 nm de la tercera ventana, siendo así, para el cantilever corto y largo a 1548 nm.

Con el mismo proceso dispuesto para la tubería sola, se ha realizado el armado del conjunto para la obtención de medidas en el laboratorio, en primera instancia para el cantilever corto, cuya frecuencia de resonancia se comprobó estar alrededor de los 11.6 kHz. Para este caso, se realizan muchas más pruebas de impacto, obteniendo diferentes valores de ganancia según la fuerza invertida; se ha encontrado valores máximos representativos a la frecuencia de 11.5746 kHz con una ganancia de -25.9556 dB, lo cual se comprueba en la Figura 27.



**Figura 27:** Resultados obtenidos luego de pruebas de impacto con  $CANT_L = 5mm$  a 1548nm.

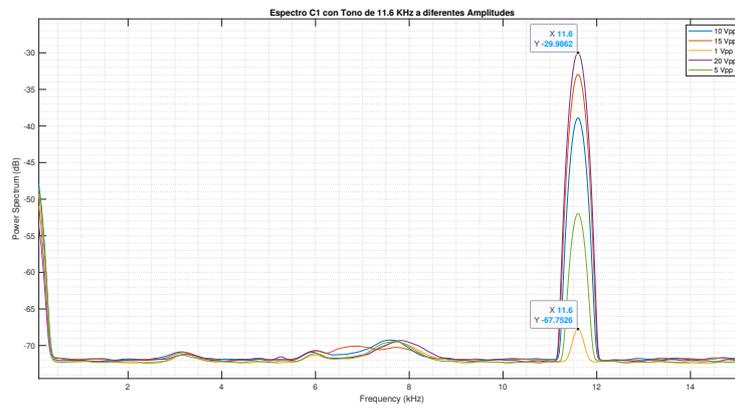
De igual manera para el cantilever largo, en la Figura 28, en este caso se tiene un máximo de detección a 7.02975 kHz, con una ganancia de -31.6898 dB.



**Figura 28:** Resultados obtenidos luego de pruebas de impacto con  $CANT_L = 8,5mm$  a 1548nm.

#### Pruebas Tonos

Para este tipo de pruebas se ha fijado en el generador de funciones las frecuencias de resonancia características obtenidas de cada uno de los cantilever, emitiendo tal señal a diferentes amplitudes o valores de voltaje pico-pico. La Figura 29 muestra el comportamiento que se obtiene para el conjunto de la tubería con el cantilever corto, en este caso su frecuencia de resonancia se encuentra a 11.6 kHz y se tiene una ganancia de -29.9862 para el valor máximo de voltaje dado, es decir 20 Vpp.



**Figura 29:** Resultados Espectro C1 con Tono 11.6 KHz

## 6. Conclusiones

### Conclusiones derivadas del análisis modal y paramétrico

La tubería presenta un elevado número de frecuencias naturales, muy probablemente debido al dominio de su longitud respecto a su diámetro y a la ubicación de los apoyos, en ambos extremos de la pieza, lo que hace que el sistema sea muy sensible a un amplio rango de excitaciones. No obstante, su primera frecuencia natural (en torno a 1000 Hz) es la más representativa, ya que es la responsable de la deformación binodal típica de una viga fija o simplemente apoyada.

El soporte superior muestra un conjunto bien definido de frecuencias naturales. Considerando la parte de propósito, su primera frecuencia natural F1 (alrededor de 7000 Hz) es la más representativa ya que es responsable de la máxima deformación vertical del voladizo.

En cuanto al estudio paramétrico, la longitud del voladizo y la longitud del peso añadido son claramente los parámetros más influyentes sobre la frecuencia natural responsable de la máxima deformación vertical de la pieza. Teniendo en cuenta las restricciones de fabricación, finalmente se seleccionan dos alternativas de soporte superior con longitudes de cantilever de  $5\text{mm}$  y  $8,5\text{mm}$  respectivamente para su conformación y ensayo físico, mientras que el resto de parámetros se mantienen en sus nominales.

### Conclusiones derivadas de las pruebas experimentales

Se ha encontrado una mayor exactitud y sensibilidad de detección para el cantilever largo, derivando de aquello que para menores longitudes de piezas mecánicas no se asegura un comportamiento acorde dadas las dificultades de fabricación que se han tenido en cuenta, además valores más cercanos se tienen para el cantilever largo pudiéndose comprobar con las frecuencias de resonancia obtenidas en las simulaciones: 6.9954 kHz y en las pruebas experimentales de 7 kHz, el error es mínimo tanto para las pruebas de impacto como para las realizadas con el transductor de conducción.

Bajo las gráficas obtenidas se verifica el tener una mayor ganancia al utilizar las piezas mecánicas en conjunto con la tubería que al realizar las mediciones directas con la FBG adherida a la tubería para las frecuencias características de cada pieza, es así que para el cantilever corto a 11.6 kHz se tiene una ganancia máxima de entre -25 y -29 dB tanto para la prueba con el martillo como con el transductor, a diferencia de la obtenida con la FBG adherida directamente que se tuvo un valor cercano a los -51 dB. Por su parte para el cantilever largo en 7 kHz con la tubería sola se tiene una ganancia de -53 dB a diferencia del conjunto cuya ganancia ronda los -30 dB.

Mientras menos elementos externos influyan en el sistema, mejores resultados de sensibilidad se obtendrán, ya que el insertar más elementos deriva en un análisis modal y paramétrico para cada uno de ellos, la inserción del transductor permitió tener un mayor control de las pruebas ya que se podía tener un estímulo constante, en este caso un tono que se pudo manipular también variando el voltaje pico-pico de las señales, lo cuál fue proporcional a las ganancias obtenidas en cada una de las pruebas. El uso del martillo establece un escenario más real de las fugas en tuberías, el principal problema que existió fue al intentar mantener una fuerza constante en cada impacto y la calibración constante necesaria en cada uso, lo cuál también incluyó en las ganancias obtenidas, es por tal razón que se realizaron varios impactos para poder discernir de manera más confiable los resultados.

## Referencias

- [1] Mutiu Adesina Adegboye, Wai-Keung Fung, and Aditya Karnik. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: Principles and approaches. *Sensors*, 19(11), 2019.
- [2] Nandini Basumallick, Palas Biswas, Kamal Dasgupta, and Somnath Bandyopadhyay. Design optimization of fiber bragg grating accelerometer for maximum sensitivity. *Sensors and Actuators A: Physical*, 194:31–39, 2013.
- [3] Carlo Edoardo Campanella, Antonello Cuccovillo, Clarissa Campanella, Abdulkadir Yurt, and Vittorio M. N. Passaro. Fibre bragg grating based strain sensors: Review of technology and applications. *Sensors*, 18(9), 2018.
- [4] Guang Chen, Keqin Ding, Qibo Feng, Xinran Yin, and Fangxiong Tang. Strain transfer mechanism of grating ends fiber bragg grating for structural health monitoring. *Structural Durability Health Monitoring*, 13(3):289–301, 2019.
- [5] Cheng-Yu Hong, Yi-Fan Zhang, Meng-Xi Zhang, Lai Ming Gordon Leung, and Li-Qiang Liu. Application of fbg sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques. *Sensors and Actuators A: Physical*, 244:184–197, 2016.
- [6] Tianliang Li, Jinxiu Guo, Yuegang Tan, and Zude Zhou. Recent advances and tendency in fiber bragg grating-based vibration sensor: A review. *IEEE Sensors Journal*, 20(20):12074–12087, 2020.
- [7] Tianliang Li, Yuegang Tan, Ping Xia, and Zude Zhou. Paralleled structure-based string-type fiber bragg grating acceleration sensor. *IEEE Sensors Journal*, 17(5):1325–1332, 2017.
- [8] Tianliang Li, Yuegang Tan, Zude Zhou, Li Cai, and Ruiya Li. Research on pasted fbg-based accelerometer’s sensitization process method and its characteristics. *IEICE Electronics Express*, 12, 09 2015.
- [9] Arvind Raju, Aditya Prakash, Anup M Upadhyaya, and Preeta Sharan. Design and analysis of pipeline leakage detection using fibre bragg grating sensor. In *2018 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, pages 114–120, 2018.
- [10] C. Z. Shi, N. Zeng, H. L. Ho, C. C. Chan, M. Zhang, Wei Jin, and Y. B. Liao. Cantilever optical vibrometer using fiber bragg grating. *Optical Engineering*, 42(11):3179–3181, November 2003.
- [11] Sun Yu, Liu Wei, Jiang Chunlei, Cong Zhicheng, Wang Yingying, Cui Kunyu, Ren Anning, and Yan Wendi. Acoustic microfiber sensor for gas pipeline leakage detection. *Measurement*, 218:113242, 2023.
- [12] Yong Zhao and Yanbiao Liao. Discrimination methods and demodulation techniques for fiber bragg grating sensors. *Optics and Lasers in Engineering*, 41(1):1–18, 2004.