



**Universidad**  
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Diseño de un sensor para la medida de deformaciones  
basado en fibra óptica

Sensor design for deformation measuring based on fiber  
optics

Autor

Darío Tolosana Mallada

Directores

Aránzazu Otín Acín

Isidro Urriza Parroque

EINA. Máster Universitario en Ingeniería Electrónica

Curso 2021/2022

## RESUMEN

Las galgas extensiométricas se han venido utilizando tradicionalmente para la medida de deformaciones, aunque presentan algunos inconvenientes como su sensibilidad tanto a interferencias magnéticas como a la temperatura.

El Trabajo Fin de Máster aborda el diseño de un sistema para la medida de pequeñas deformaciones mediante un elemento sensor basado en fibra óptica. Teniendo en cuenta que la fibra óptica además de utilizarse como medio de transmisión se puede utilizar como elemento sensor, se han aprovechado sus características, tales como la inmunidad frente a interferencias electromagnéticas y la fiabilidad, para trabajar en ambientes hostiles.

En este trabajo, se implementa una solución alternativa para medir pequeñas deformaciones con un sensor basado en fibra óptica, con el objetivo de ser aplicada en la medida de tejidos musculares. Para poder cuantificar e interpretar la deformación producida se plantea el diseño y caracterización del sistema de instrumentación desarrollado en este trabajo.

Para conseguirlo, se ha diseñado un sistema que procesa la medida y obtiene la deformación producida de manera automática.

Una vez verificado el diseño del sistema electrónico y su correcto funcionamiento, tiene lugar la caracterización del sensor para obtener su curva característica y poder así trasladar la deformación a la medida obtenida por el sistema.

Después de realizar este ejercicio se establecerá el rango de validez del sensor y su precisión.

Finalmente, se evalúa experimentalmente el sistema de medida para una aplicación real, los resultados obtenidos demuestran que el sistema propuesto es una alternativa muy a tener en cuenta de cara a la medida de pequeñas deformaciones.

## SUMMARY

Strain gauges have traditionally been used for strain measurement, although they have some drawbacks such as their sensitivity to magnetic interference and temperature.

The Master's Thesis is about the design of a system for the measurement of small deformations using a sensor element based on fiber optics. Bearing in mind that fiber optics, in addition to being used as a transmission medium, can also be used as a sensor element, we have taken advantage of its characteristics such as immunity to electromagnetic interference and reliability to work in harsh environments.

In this case, an alternative solution is implemented to measure small deformations with a sensor based on fiber optics to be applied on muscle tissue. In order to quantify and interpret the deformation produced, the design and characterization of the instrumentation system developed in this work is proposed.

To achieve this, a system has been designed to process the measurement and for getting automatically the deformation produced.

Once the design of the electronic system and the correct operation has been verified, the characterization of the sensor takes place to obtain the characteristic curve and be able to transfer the physical deformation to the measurement obtained by the system.

After this exercise has been carried out, the validity range of the sensor and its precision will be established.

Finally, the measurement system for a real application is experimentally evaluated, the results obtained show that the proposed system is an alternative to be taken into account for the measurement of small deformations.

# Índice

<b>Índice de figuras</b> .....	<b>1</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>3</b>
<b>Lista de acrónimos</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>5</b>
1.1 Introducción y estado del arte .....	5
1.2. Objetivos .....	7
1.3. Tareas del proyecto .....	7
1.4. Alcance .....	8
1.5. Contexto .....	9
1.6. Estructura de la memoria.....	10
<b>2. Sensor basado en fibra óptica</b> .....	<b>11</b>
2.1. Introducción.....	11
2.2. Utilización de la fibra óptica en los diseños .....	12
2.3. Sensado utilizando fibra óptica .....	13
<b>3. Fabricación del sensor</b> .....	<b>15</b>
3.1. Introducción.....	15
3.2 Fabricación del sensor de PMMA .....	15
3.3. Fabricación del sensor de PDMS .....	19
3.4. Selección del sensor utilizado. Justificación. ....	23
3.5. Selección del par. Dispositivo optoacoplado. ....	24
3.6. Simulación.....	28
<b>4. Plataforma de adquisición</b> .....	<b>30</b>
4.1. Diagrama de bloques del sistema electrónico de instrumentación.....	30
4.2 Diseño <i>hardware</i> .....	31
4.2.1. Alimentación .....	32
4.2.2. Bloque emisor - receptor .....	32
4.3. Sistema de medida.....	34
4.4. Sistema de visualización .....	36
4.5. Diseño de la PCB .....	37
<b>5. Ensayos de laboratorio</b> .....	<b>40</b>
5.1. Caracterización del sensor.....	40
5.2. Calibración y deriva térmica del circuito .....	47
<b>6. Conclusiones y trabajo futuro</b> .....	<b>49</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>50</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Red de Bragg .....	6
Figura 2. Diagrama de Gantt.....	8
Figura 3. Estructura de la fibra óptica.....	11
Figura 4. Reflexión total en fibra óptica .....	11
Figura 5. Diseño mediante plataformas .....	12
Figura 6. Estructura fibra óptica sin deformar .....	12
Figura 7. Estructura fibra óptica deformada .....	12
Figura 8. Situación de los extremos de fibra en lámina de PDMS .....	13
Figura 9. Vista lateral de las posiciones del cantilever dependiendo de la deformación.....	13
Figura 10. Diagrama de bloques para el sensado.....	14
Figura 11. Etapa optoacopladora .....	14
Figura 12. Estructura PSA ARcare® 8939 .....	15
Figura 13. Corte láser.....	16
Figura 14. Diseño inicial plataformas .....	16
Figura 15. Plataforma inicial.....	16
Figura 16. Plataforma con conector incrustado .....	17
Figura 17. Plataforma guía fibra .....	17
Figura 18. Diseño plataformas en voladizo .....	18
Figura 19. Estructura fibra óptica sin deformar .....	18
Figura 20. Estructura fibra óptica deformad .....	18
Figura 21. SYLGARD™ 184 <i>Silicone Elastomer Base y Curing Agent</i> .....	19
Figura 22. Cámara de vacío .....	20
Figura 23. Curador Prazitherm .....	20
Figura 24. Pieza de PDMS fabricada mediante molde de PMMA .....	20
Figura 25. Diseño del soporte fabricado mediante impresión 3D y lámina PDMS.....	21
Figura 26. Conector SMA 095.....	21
Figura 27. Soporte de impresión 3D con tubo .....	21
Figura 28. Soportes impresión 3D con diferentes diámetros para tubo.....	22
Figura 29. Moldes para la fabricación de tubos de PDMS .....	22
Figura 30. Plataforma con sensor de PDMS .....	24
Figura 31. Fuente de luz HL 2000 de Ocean Optics.....	24
Figura 32. Espectrómetro QE65000 .....	24
Figura 33. <i>Software OceanView</i> .....	25
Figura 34. Gráfico con diferentes deformaciones.....	25
Figura 35. Par optoacoplado FC300T.....	26
Figura 36. Diseño del modelo simulado .....	28
Figura 37. Comportamiento en diferentes posiciones.....	28
Figura 38. Gráfico <i>Transmittance vs Fiber Distance</i> .....	29
Figura 39. Diagrama de bloques del sistema electrónico .....	30
Figura 40. Diseño <i>hardware</i> .....	31
Figura 41. Esquema alimentación.....	32
Figura 42. Esquema del bloque emisor-receptor .....	33
Figura 43. STM32 NUCLEO-L452RE-P .....	34

Figura 44. Diagrama de flujo de las operaciones.....	35
Figura 45. Interfaz sistema de visualización.....	36
Figura 46. <i>Footprint</i> FC300T .....	37
Figura 47. Diseño esquemático del circuito.....	37
Figura 48. Diseño PCB. Top layer.....	38
Figura 49. Diseño PCB. Bottom layer .....	38
Figura 50. Diseño 3D PCB. Top layer y bottom layer.....	38
Figura 51. PCB Top layer .....	39
Figura 52. Montaje experimental de los ensayos.....	40
Figura 53. Montaje con micrómetro digital Beslands.....	41
Figura 54. Gráfico del CTR vs Distancia de separación entre núcleos .....	41
Figura 55. Gráfico de la desviación estándar vs Distancia de separación entre núcleos .....	42
Figura 56. Aproximación a la curva característica mediante polinomio de grado 3 .....	42
Figura 57. Aproximación lineal a la curva característica en 3 tramos.....	43
Figura 58. Gráfico de la media, aproximación lineal y polinómica vs CTR .....	44
Figura 59. Desviación estándar de la media y la aproximación polinómica .....	44
Figura 60. Desviación estándar de la media y la aproximación lineal.....	45
Figura 61. Incertidumbre CTR vs Distancia .....	45
Figura 62. Error absoluto y % de error .....	46
Figura 63. Diseño de plataformas en voladizo con fibra para calibración.....	47
Figura 64. Gráfico Deriva térmica .....	48

## Índice de tablas

Tabla 1. Longitud de onda vs Radiación .....	26
Tabla 2. Características LED FC300T .....	26
Tabla 3. Características fotodiodo FC300T .....	27
Tabla 4. Constantes aproximación polinomio de grado 3.....	42
Tabla 5. Constantes aproximación lineal a tramos .....	43

## **Lista de acrónimos**

**ADC:** Conversor Analógico Digital (*Analog to Digital Converter*)

**AO:** Amplificador operacional (*Operational Amplifier*)

**BSICoS:** *Biomedical Signal Interpretation and Computational Simulation*

**CNM:** Centro Nacional de Microelectrónica

**CTR:** Relación de Transferencia de Corriente (*Current Transfer Ratio*)

**FBG:** Red de Bragg (*Fiber Bragg Grating*)

**GPEM:** Grupo de Electrónica de Potencia y Microelectrónica

**LED:** *Light Emitter Diode*

**PCB:** Placa de Circuito Integrado (*Printed Circuit Board*)

**PDMS:** Polidimetilsiloxano

**PMMA:** Polimetilmetacrilato

**SMD:** Componente de montaje superficial (*Surface Mounting Device*)

**THD:** Componente de agujeros pasantes (*Through-Hole Device*)

**USB:** *Universal Serial Bus*



# 1. Introducción

## 1.1 Introducción y estado del arte

Un sistema electrónico de instrumentación es un sistema cuyo objetivo es medir magnitudes físicas utilizando un elemento sensor susceptible a la variación de esa magnitud física y un transductor que convierta la magnitud física en señal eléctrica que seamos capaces de medir.

En el caso de este trabajo, esa magnitud es la deformación, y especialmente aplicada a la medida en tejidos musculares.

Para medir deformaciones existen dos opciones bien diferenciadas. Por un lado, las galgas extensiométricas, que históricamente han sido consideradas como los elementos más comunes. Por otro lado, tenemos el uso de técnicas que implican el uso de la fibra óptica.

Las galgas se suelen emplear en análisis experimental de tensiones, control de resistencias y fabricación de transductores. Las galgas extensiométricas aprovechan la propiedad física de la resistencia eléctrica y su dependencia no sólo de la resistividad del conductor, la cual es una propiedad del propio material, sino también de la geometría del conductor. Cuando un conductor eléctrico es deformado dentro de su límite de elasticidad, sin llegar a producir rotura o deformación permanente en el mismo, éste se volverá más estrecho y alargado, incrementando su resistencia eléctrica. Análogamente, cuando el conductor es comprimido se acorta y ensancha, reduciendo así su resistencia al paso de corriente eléctrica. De esta manera, midiendo la resistencia eléctrica de la galga, puede deducirse la magnitud del esfuerzo aplicado sobre el objeto.

Dentro del uso de las técnicas con fibra óptica destacan los sensores ópticos de deformación o bandas extensométricas ópticas, en concreto los basados en tecnología de red de Bragg en fibra (FBG) han despertado un interés creciente en las últimas décadas, sobre todo en el campo de la monitorización de infraestructuras. Su tecnología se basa en la propagación de luz por el interior de una fibra óptica, siendo por tanto inmunes a las interferencias electromagnéticas. Esa es una de las razones por las que las galgas extensométricas ópticas resultan superiores a las eléctricas en determinadas aplicaciones.

En general, una fibra óptica consiste en una fibra de vidrio o sílice con una envoltura de polímero. La fibra en sí tiene dos capas: un núcleo y un recubrimiento que la rodea, de menor densidad. Adicionalmente, la fibra lleva una envoltura de polímero que le proporciona protección

Para crear un sensor de deformación, se inscribe en la fibra óptica lo que se denomina una rejilla o red de Bragg en fibra. Esta rejilla es, básicamente, un patrón físico de interferencia que refleja la luz de una forma distinta a como lo hace el resto de la fibra. Para entenderlo mejor, la fibra se puede visualizar como una extensión cilíndrica de material transparente, con una serie de rodajas delgadas como vemos en la Figura 1[7], que serían las redes de Bragg. Cuando la luz láser incide sobre este patrón, ciertas longitudes de onda se reflejan, mientras que el resto se transmiten.

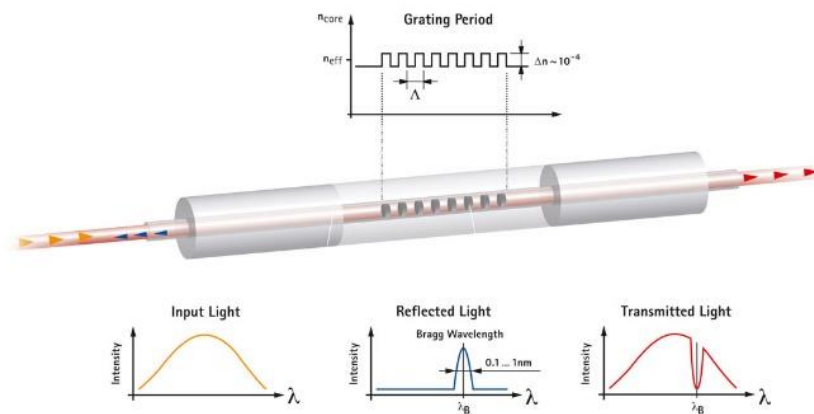


Figura 1. Red de Bragg

Los sensores de fibra óptica basados en redes de Bragg en fibra son extremadamente susceptibles a la temperatura. La fibra se dilata cuando aumenta la temperatura y se contrae cuando desciende. El índice de refracción también cambia. Si no se aplica ninguna compensación, se producirían lecturas de deformación que no se deben a tensiones mecánicas, sino a variaciones de temperatura.

En este trabajo, vamos a estudiar la viabilidad de un diseño alternativo al de las redes de Bragg pero utilizando también fibra óptica para medir pequeñas deformaciones, permitiendo utilizarse con fines biomédicos y utilizando para ello materiales biocompatibles en su fabricación.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el diseño y caracterización de un sistema para medir pequeñas deformaciones basado en fibra óptica. El sistema debe tener ciertas características como las siguientes:

- Alta resolución, del orden de micras ( $\mu\text{m}$ ).
- Repetibilidad en las medidas.
- Bajo consumo, facilitando su portabilidad y alimentación mediante batería.

Para poder conseguir lo citado anteriormente es necesario lograr los siguientes objetivos:

- Diseño y caracterización del sensor.
- Diseño y verificación experimental de un sistema electrónico de instrumentación que permita medir deformaciones con el sensor y obtener la deformación de manera automática.
- Obtención del rango de deformaciones que se puede obtener y evaluación de la incertidumbre de la medida.
- Verificación experimental del sistema completo.

## 1.3. Tareas del proyecto

Para poder desarrollar el trabajo se ha hecho un planteamiento general incluyendo las tareas necesarias para la su elaboración. Las fases por las que se ha pasado en su desarrollo han sido las siguientes:

- Revisión de bibliografía y análisis del estado del arte de los sistemas de sensado basados en fibra óptica.
- Diseño y fabricación mecánica del sensor.
- Verificación experimental del prototipo en diversas condiciones de funcionamiento.
- Selección del dispositivo óptico más adecuado para este proyecto.
- Diseño de la placa de circuito impreso (PCB).
- Caracterización del sistema: rango de aplicación y tolerancia.
- Diseño del sistema de medida y visualización de resultados.

- Verificación experimental del prototipo final para la medida de deformaciones.
- Elaboración de las conclusiones y documentación del trabajo.

En la Figura 2 aparece el diagrama de Gantt donde se detallan las actividades realizadas a lo largo del trabajo. Se ha considerado un tiempo aproximado para cada actividad colocándolas en el orden cronológico en que se han realizado. La división del tiempo que aparece en el diagrama es en semanas.

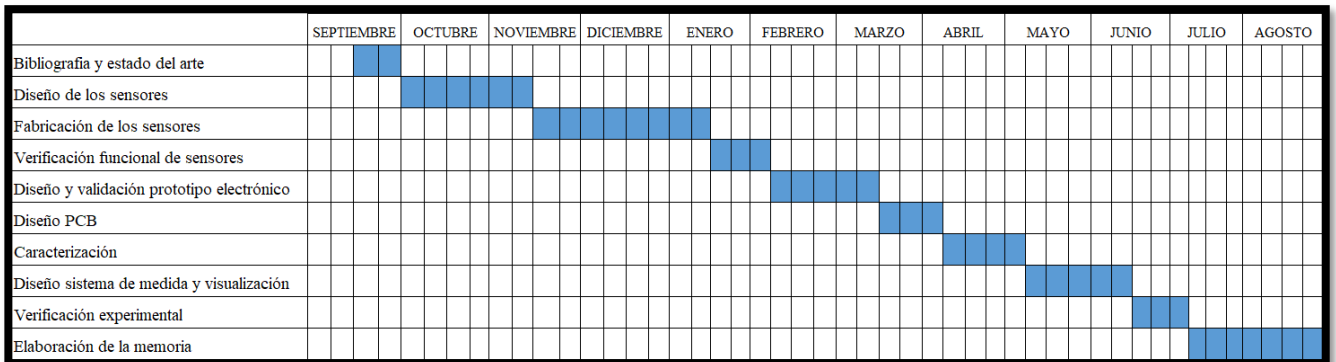


Figura 2. Diagrama de Gantt

#### 1.4. Alcance

La elaboración del trabajo plantea una tarea multidisciplinar en la que debemos abordar diferentes ámbitos que implican el diseño mecánico del sensor y la fabricación, el diseño del sistema electrónico necesario para ello incluyendo su fabricación en placa de circuito impreso, la caracterización óptima del sensor, el diseño de un sistema de medida automático y la implementación de un sistema de visualización por computador que sea capaz de mostrar los resultados.

Todas estas tareas se han desarrollado con el fin de conseguir un prototipo funcional que pudiera medir pequeñas deformaciones, con resolución de micras, para aplicarse en medidas de tejidos musculares.

## 1.5. Contexto

El trabajo fin de máster se realiza en colaboración con dos grupos de investigación, el *Biomedical Signal Interpretation and Computational Simulation* (BSICoS), y el Grupo de Electrónica de Potencia y Microelectrónica (GEPM), ambos pertenecientes al Instituto de Investigación de Aragón situado en la Universidad de Zaragoza.

El objetivo del BSICoS es mejorar el impacto de la tecnología en la salud y desarrollar métodos para el procesamiento de señales biomédicas. Para ello, trabajan con equipos clínicos y grupos de investigación que tengan experiencia en ambas áreas. Las investigaciones del grupo pretenden contribuir a proporcionar una caracterización integral de los cambios cardíacos inducidos por las enfermedades cardiovasculares, mediante la realización de experimentación a múltiples escalas (molecular, canal iónico, celular, tejido, corazón completo, superficie corporal).

Por otro lado, el GEPM se centra en la conversión y transferencia eficiente de potencia, y se dirige específicamente hacia tres líneas de investigación aplicada:

- LÍNEA 1: Sistemas electrónicos para aplicaciones de calentamiento por inducción.
- LÍNEA 2: Sistemas electrónicos para aplicaciones biomédicas electroquirúrgicas.
- LÍNEA 3: Sistemas electrónicos para aplicaciones de procesamiento de energía eléctrica.

El estudio realizado en el presente TFM se centra en la investigación para medir pequeñas deformaciones, siendo estas extrapolables a su utilización en tejidos cardíacos.

Se ha colaborado con profesores pertenecientes al departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, cuya aportación está centrada en los aspectos más técnicos y con investigadores del Centro Nacional de Microelectrónica (CNM) dedicados al diseño de sensores utilizando fibra óptica.

## 1.6. Estructura de la memoria

Para documentar este proyecto se ha redactado una memoria en la que se reflejan las tareas realizadas para conseguir los objetivos de este. Se ha estructurado la memoria de la siguiente manera:

Capítulo 1: Introducción del tema, objetivos y alcance del proyecto, así como las tareas necesarias para lograrlo además del contexto en el que se ha trabajado.

Capítulo 2: Se introduce la fibra óptica, así como el diseño del sistema para utilizarla.

Capítulo 3: El tercer capítulo abarca lo referido a la fabricación del sensor, los diseños en los que se ha trabajado, los medios utilizados para su fabricación, así como los resultados conseguidos.

Capítulo 4: En el cuarto capítulo se trata el diseño electrónico del sistema de instrumentación necesario para el funcionamiento del sensor, así como la implementación del sistema de medida y de visualización de resultados.

Capítulo 5: En este capítulo se aborda la caracterización del sensor, así como el estudio de su calibración y deriva térmica.

Capítulo 6: En el capítulo sexto se abordan las conclusiones globales obtenidas con el trabajo realizado y se plantean las líneas futuras.

## 2. Sensor basado en fibra óptica

### 2.1. Introducción

La fibra óptica se puede utilizar como elemento sensor, pudiendo medir magnitudes como temperatura, presión, deformación, etc.; y también obviamente como medio de transmisión. En el caso que nos ocupa se van a medir pequeñas deformaciones ( $\mu\text{m}$ ) utilizando para ello una fibra de plástico, barata y flexible. Se ha elegido la MH4001 (MH), también llamada ESKA-MEGA. En la Figura 3 podemos observar la estructura de la fibra óptica.

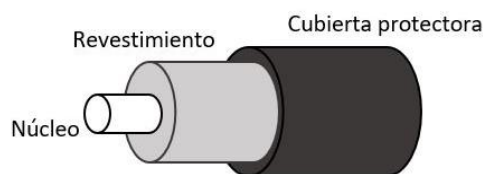


Figura 3. Estructura de la fibra óptica

La fibra óptica es un medio por el que se propaga la luz, que llega de la fuente emisora siendo esta un *light emitter diode* (LED) o un láser. Esta luz se propaga por el núcleo de la fibra, que está recubierto por otra capa, el revestimiento, con un índice de refracción ( $n_1$ ) menor que el índice del núcleo ( $n_2$ ). Esta diferencia entre los índices de refracción de ambas capas, según las leyes de Snell, permiten que se produzca el fenómeno de reflexión interna total, es decir, que la luz rebote y vuelva al núcleo de la fibra siempre y cuando el índice de refracción del núcleo ( $n_2$ ) sea mayor que el del revestimiento ( $n_1$ ), tal como podemos ver en la Figura 4.

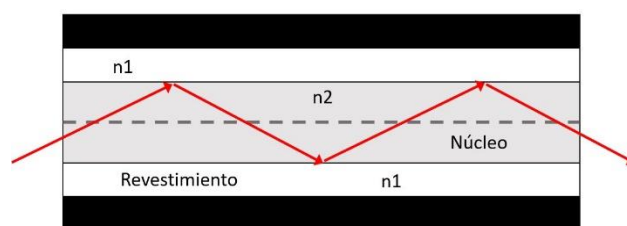


Figura 4. Reflexión total en fibra óptica

Con el objetivo de medir pequeñas deformaciones mediante un sensor, planteamos dos diseños distintos, en el primer diseño se varía la separación física existente entre los extremos de la fibra, lo que implica el hecho de que haya mayor o menor cantidad de aire entre ellos en función de la separación que tengamos. En el segundo diseño, los extremos de fibra están fijos y lo que hacemos es variar el camino óptico entre ellos.

## 2.2. Utilización de la fibra óptica en los diseños

Para el primer diseño del sensor, partimos de la idea que consiste en dos plataformas móviles que llevan embebidas fibras ópticas, entre las que se piensa poder cuantificar el distanciamiento o la separación entre ellas como vemos en la Figura 5.

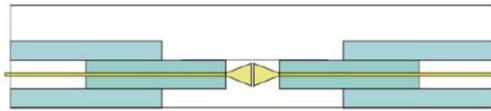


Figura 5. Diseño mediante plataformas

Para poder medir deformaciones con la fibra óptica se altera para que tenga una discontinuidad en el núcleo. Para ello, se realiza un corte en un punto de la fibra óptica y se retira parte del revestimiento como vemos en la Figura 6.

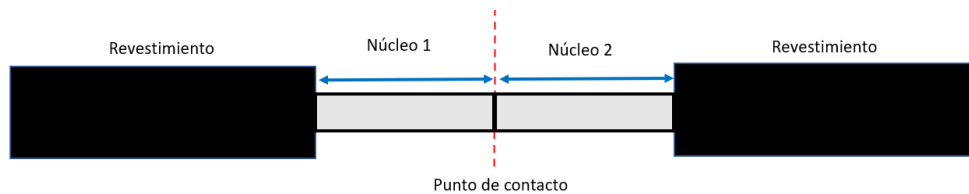


Figura 6. Estructura fibra óptica sin deformar

Con este sistema, queremos evaluar la posibilidad de obtener la distancia que separamos los núcleos como vemos en la Figura 7, interpretando para ello la información recibida por la fibra óptica.

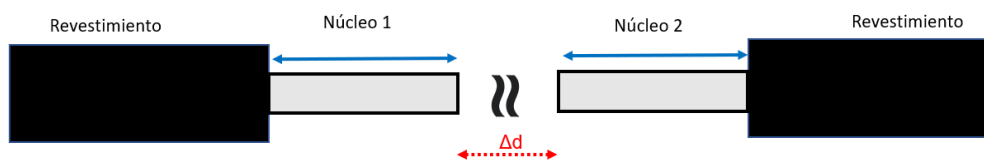


Figura 7. Estructura fibra óptica deformada

El segundo diseño que queremos evaluar está basado en un cantilever, fabricado a partir de una lámina de Polidimetilsiloxano (PDMS). Se colocan los extremos de las fibras a ambos lados de la parte central de la lámina, como vemos en la Figura 8, siendo esta el medio por el que circula la luz al tener un índice de refracción mayor que el del aire.



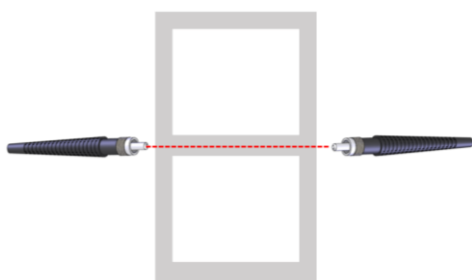


Figura 8. Situación de los extremos de fibra en lámina de PDMS

En la Figura 9 vemos una vista transversal de la parte central de la lámina de PDMS o cantilever donde esta se iría combando mediante la aplicación de una fuerza externa.

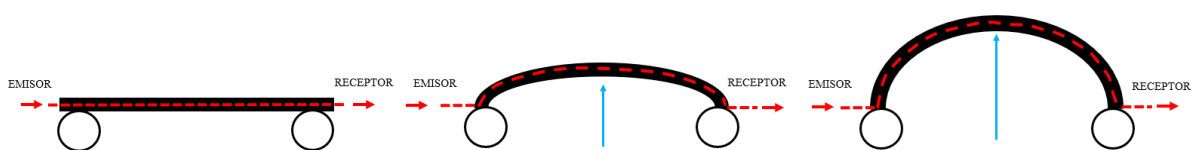


Figura 9. Vista lateral de las posiciones del cantilever dependiendo de la deformación

En el primer caso, el camino óptico es perfectamente perpendicular atravesando la pieza de PDMS. A medida que vamos forzando la deformación, ese mismo camino óptico deja de ser perpendicular adoptando diferentes formas, afectando este movimiento de la lámina a la señal que obtenemos en el receptor.

El bajo módulo de Young de este material lo hace idóneo para este tipo de aplicaciones, siendo capaz de deformarse bastante mediante la aplicación de un pequeño esfuerzo.

### 2.3. Sensado utilizando fibra óptica

La fibra óptica es un medio por el que se propaga luz. Por tanto, el sistema electrónico necesario para utilizar la fibra óptica como elemento sensor necesita un dispositivo que genere la señal que se va a propagar por la fibra óptica (bloque emisor) y otro que la reciba (bloque receptor).

El sistema de medida debe procesar la señal recibida en el bloque receptor, ya que esta señal será la que cambiará cuando se mida una deformación.

El bloque emisor consta de un elemento que convierte una señal eléctrica de excitación en una señal óptica, en este caso se utiliza un LED. Esta señal óptica se propaga por la fibra óptica hasta el bloque receptor, que incorpora en primer lugar un dispositivo que convierte la luz recibida en señal eléctrica. El diagrama de bloques completo lo podemos ver en la Figura 10.

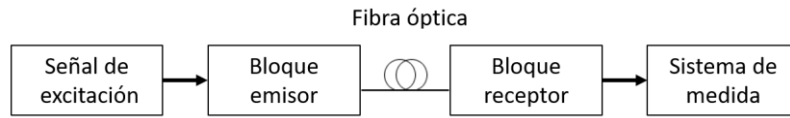


Figura 10. Diagrama de bloques para el sensado

En este caso se utiliza un fotodiodo como dispositivo receptor. De este modo, los bloques emisor y receptor forman una etapa optoacopladora, que vemos en la Figura 11, utilizando la fibra óptica como nexo de unión.

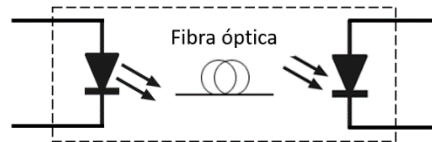


Figura 11. Etapa optoacopladora

Como la señal recibida es la que varía al deformarse el material a estudio, si la excitación se mantiene constante, la deformación producida se puede asociar a un parámetro que relacione la entrada con la salida de esta etapa optoacopladora. El parámetro que se ha considerado en este trabajo es característico de estas etapas, la relación de transferencia de corriente (CTR). De este modo, y de acuerdo con el funcionamiento explicado del sensor propuesto, este parámetro variará conforme se produzca la deformación del material. Se ha considerado el CTR estático como parámetro a procesar para obtener la deformación producida, ya que la transferencia de corriente en el par variará al modificar el camino óptico entre ambos como consecuencia de la deformación producida.

### 3. Fabricación del sensor

#### 3.1. Introducción

Se han planteado dos diseños distintos del sensor, el primero de ellos mediante unas plataformas móviles que se fabrican de Polimetilmetacrilato (PMMA), material utilizado por su facilidad para ser mecanizado, robustez y bajo coste además de su carácter biocompatible.

En el segundo diseño, la lámina se ha fabricado de PDMS utilizando para ello un molde de PMMA, siendo también el PDMS un material biocompatible. El soporte donde iría alojada esta lámina de PDMS se ha fabricado mediante tecnología de impresión 3D aprovechando la variabilidad de los diseños que pueden fabricarse mediante este método.

En ambos casos debe asegurarse la estanqueidad en el diseño del sensor, teniendo en cuenta su aplicación con carácter biomédico, el tejido muscular sobre el que medir la deformación debe estar inmerso en líquido.

#### 3.2 Fabricación del sensor de PMMA

Para llevar a cabo la fabricación del sensor, se diseña una estructura en láminas de PMMA que se adhieren entre sí mediante un adhesivo conocido como PSA, cuya estructura podemos ver en la Figura 12 [5]. El PSA forma la unión cuando se aplica presión para unir el adhesivo con una superficie. No necesita disolvente, agua o calor para activar el adhesivo.



Figura 12. Estructura PSA ARcare® 8939

Para diseñar estos módulos se utilizan materiales poliméricos fácilmente mecanizados por técnicas de prototipado rápido como el corte láser que vemos en la Figura 13.



Figura 13. Corte láser

El diseño inicial consiste en dos plataformas con las fibras embebidas que se desplazan, acercándose o alejándose entre sí como vemos en la Figura 14.

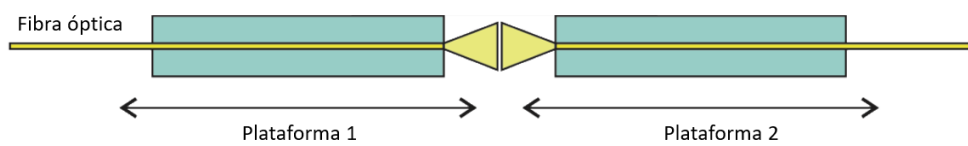


Figura 14. Diseño inicial plataformas

Realizamos un primer diseño con dos plataformas simétricas de PMMA con un orificio central para introducir la fibra óptica como vemos en la Figura 15.

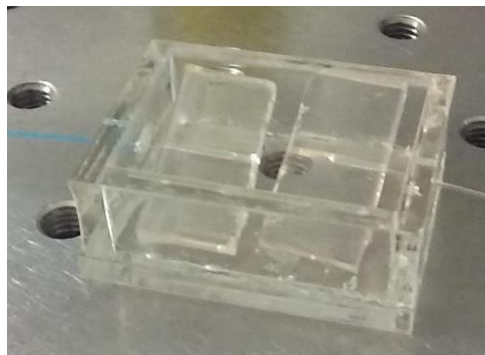
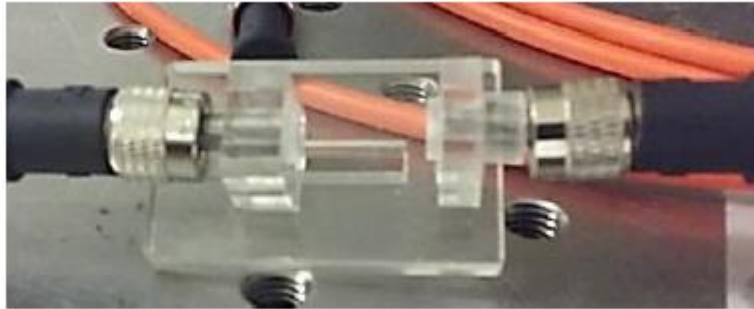


Figura 15. Plataforma inicial

Al pegar las fibras en las plataformas de PMMA se crea una tensión en las plataformas que impide fijar su posición adecuadamente, provocando que no se lleve a cabo la medida correctamente.

Probamos una segunda opción que consiste en dos piezas de PMMA con el conector de fibra incrustado para garantizar un perfecto alineamiento entre ambas fibras. Una de las piezas de PMMA tenía la posición fija, mientras que la segunda se puede desplazar por una guía hecha en otra pieza de PMMA en el eje horizontal como vemos en la Figura 16.

Esta opción la descartamos porque el peso del conector de la fibra es demasiado elevado por tanto, impide que el movimiento se realice sin mucha resistencia que es uno de los objetivos que se persiguen.



*Figura 16. Plataforma con conector incrustado*

Diseñamos una nueva celda basada en las plataformas de PMMA con la fibra embebida, pero añadiendo unas guías superiores e inferiores a las plataformas en el dispositivo para garantizar en todo momento el alineamiento como vemos en la Figura 17.



*Figura 17. Plataforma guía fibra*

Los tejidos necesitan estar inmersos en líquido y la estructura diseñada presenta algunos problemas de estanqueidad en los orificios en los que se sitúan los núcleos de las fibras afectando esto a las medidas obtenidas y complicando la limpieza en el caso de querer cambiar el medio en el que se encuentra el tejido.

Es por esto por lo que planteamos la opción de añadir a este diseño unas plataformas en voladizo, las plataformas dentro de la cubeta estarían solidarias con otras en voladizo que hacen que la medida del sistema sea independiente del medio en el que se encuentra el tejido.

Para garantizar el alineamiento de los núcleos, todo el rango de movimiento se producirá dentro de una de las plataformas, podemos ver este diseño en la Figura 18.

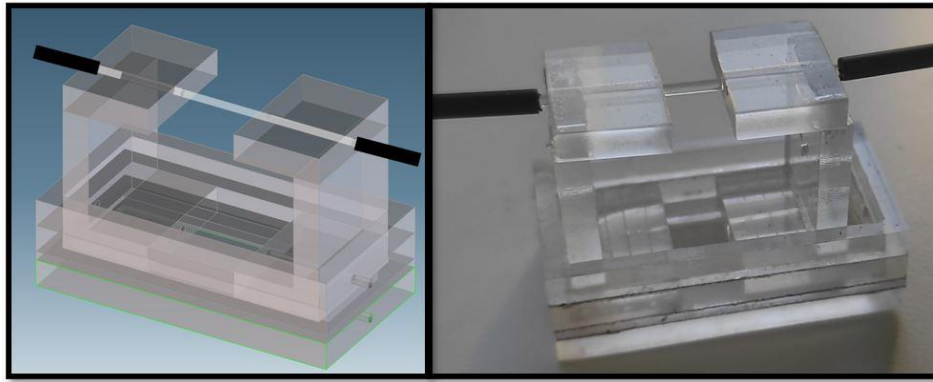


Figura 18. Diseño plataformas en voladizo

Para ello, se realiza un corte en un punto de la fibra óptica y se retira parte de la cubierta de uno de los dos extremos. El punto de partida es en el que ambos núcleos están en contacto, tal como vemos en la Figura 19.

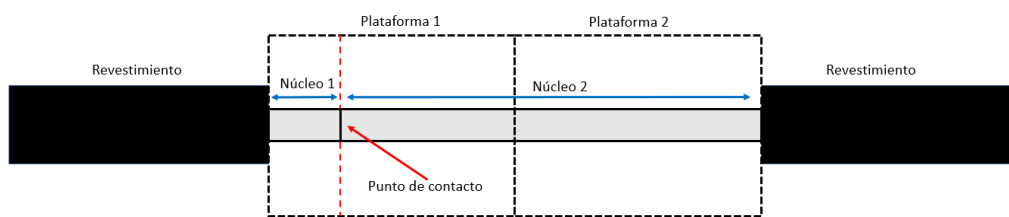


Figura 19. Estructura fibra óptica sin deformar

En la otra fibra se realiza el mismo procedimiento, pero en este caso, se retira una parte mayor de la cubierta, dejando más longitud de núcleo al descubierto.

Ambos núcleos están alojados en unas plataformas del mismo tamaño, pero al tener distinta longitud la parte de núcleo al descubierto, una parte del núcleo 2 estará introducido en la plataforma 1, manteniéndose siempre dentro de esta, pero pudiéndose desplazar a lo largo de la misma garantizando su alineamiento como vemos en la Figura 20.

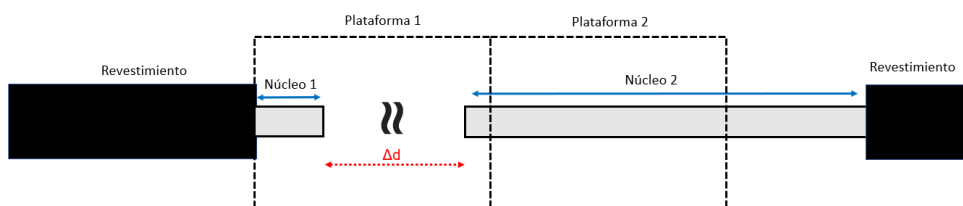


Figura 20. Estructura fibra óptica deformad

### 3.3. Fabricación del sensor de PDMS

El PDMS es un elastómero transparente cada vez más empleado en aplicaciones ópticas debido a sus propiedades fisicoquímicas, a su bajo coste, fácil manejo y nula toxicidad. La fabricación de membranas hechas de PDMS es relativamente fácil, y su uso como material reduce el tiempo y complejidad de elaboración de prototipos.

La fabricación en PDMS es directa ya que generalmente se utiliza un molde maestro, esto es debido al fácil curado y manipulación del material, así como a la excelente propiedad de sellado que posee. El PDMS es suministrado en dos componentes, una base y un agente de curado como vemos en la Figura 21. El proveedor sugiere mezclar las dos partes en una proporción de 10:1 base-agente de curado, verter el líquido sobre el molde y curar la mezcla.

La metodología desarrollada en este caso consiste en 4 pasos:

- 1) Pesado de componentes en proporción 10:1, base: agente de curado respectivamente.

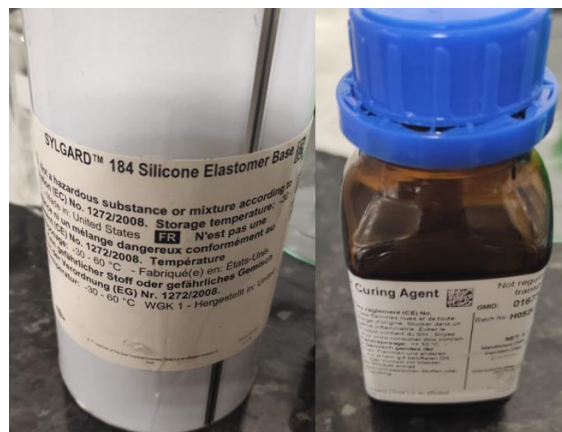


Figura 21. SYLGARD™ 184 Silicone Elastomer Base y Curing Agent

- 2) Mezclado de componentes mediante agitación manual. Hasta obtener una mezcla en un vaso de precipitado.
- 3) Extracción de burbujas de aire presentes en la mezcla dentro de una cámara de vacío que podemos ver en la Figura 22.



*Figura 22. Cámara de vacío*

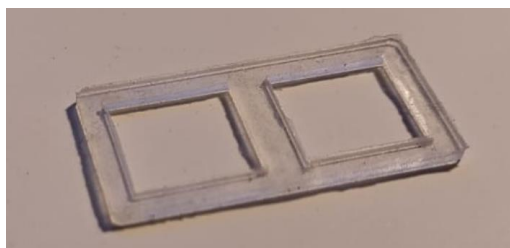
- 4) Vertido de la mezcla en el molde dejándola reposar encima de un curador durante unos minutos hasta que se solidifique como vemos en la Figura 23.



*Figura 23. Curador Prazitherm*

Para diseñar la pieza de PDMS, nos hemos basado en el diseño de un cantilever, sistema utilizado ampliamente por el CNM habitualmente para la fabricación de sensores ópticos.

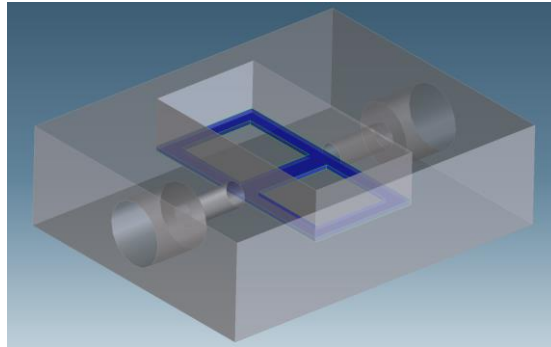
Se ha diseñado una lámina de PDMS fabricada mediante un molde de PMMA como vemos en la Figura 24.



*Figura 24. Pieza de PDMS fabricada mediante molde de PMMA*



El diseño del soporte que vemos en la Figura 25 se ha fabricado mediante tecnología de impresión 3D.



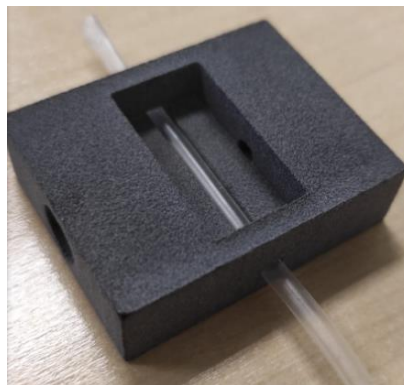
*Figura 25. Diseño del soporte fabricado mediante impresión 3D + lámina PDMS*

Este diseño lleva unos zócalos donde encajar los conectores de fibra SMA095, que vemos en la Figura 26.



*Figura 26. Conector SMA 095*

En la parte inferior del soporte hemos diseñado un canal como vemos en la Figura 27 desde el que se forzaría la deformación de la pieza de PDMS pandeándola.



*Figura 27. Soporte de impresión 3D con tubo*

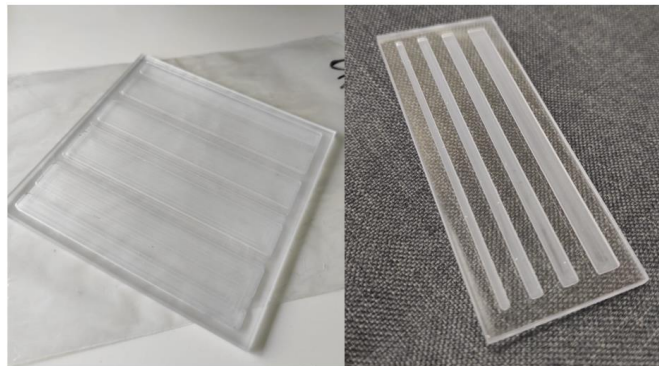
Para lograrlo se han propuesto varias alternativas como vemos en la Figura 28, la primera de ellas utilizar tubo de silicona de distintos diámetros y diferentes relaciones diámetro externo/interno de tubo, teniendo en cuenta su facilidad para deformarse.



*Figura 28. Soportes impresión 3D con diferentes diámetros para tubo*

Habiéndose explorado esta opción y no logrando resultados convincentes se piensa en desarrollar los propios tubos mediante su fabricación a partir de láminas de PDMS del grosor y diámetro elegidos.

Para ello se fabricó el molde en PMMA que vemos en la Figura 29 donde solidificar estas láminas de PDMS y posteriormente hacer un sellado mediante plasma logrando así construir un tubo de las características deseadas.



*Figura 29. Moldes para la fabricación de tubos de PDMS*

El sellado mediante plasma realizado en la sala blanca del CNM no contribuye a tener los resultados esperados. La presión del fluido necesaria para modificar la situación de la lámina de PDMS que alberga el camino lumínico entre los dos conectores de fibra es tan elevada que acaba por romper el sellado.

### 3.4. Selección del sensor utilizado. Justificación.

El sensor fabricado mediante láminas de PMMA nos ofrece las características que necesitamos en cuanto a sencilla fabricación, estanqueidad, repetibilidad, y fácil manejo para su posterior caracterización teniendo monitorizada la deformación mediante un micrómetro.

Por el contrario, el diseño basado en cantilever o lámina de PDMS sí nos ofrece estanqueidad para el tejido, pero siendo mucho más complicado de caracterizar. No somos capaces de controlar de una manera precisa la deformación producida y por tanto la medida es muy poco repetible. Sí resulta interesante dejar abierta una puerta a la investigación en ese sentido mediante otro modo de producir la deformación en el cantilever, pero aun habiéndose explorado esta opción no hemos conseguido resultados convincentes.

Después de explorar las características de ambos diseños, y valorando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, para la elaboración de este trabajo nos centraremos en el sensor mediante plataformas de PMMA.

### 3.5. Selección del par. Dispositivo optoacoplado.

Con la finalidad de seleccionar la etapa optoacoplada que usaremos en el sensor, analizamos mediante un espectrómetro las longitudes de onda con las que podemos trabajar para ver variación al modificar el camino óptico entre emisor y receptor a través de las piezas de PDMS.

Utilizamos el sensor con el diseño del cantilever para ello, dado que las conexiones para la fibra del soporte son exactamente las que utilizan tanto la fuente de luz como el espectrómetro del que disponemos. El montaje utilizado lo podemos ver en la Figura 30.

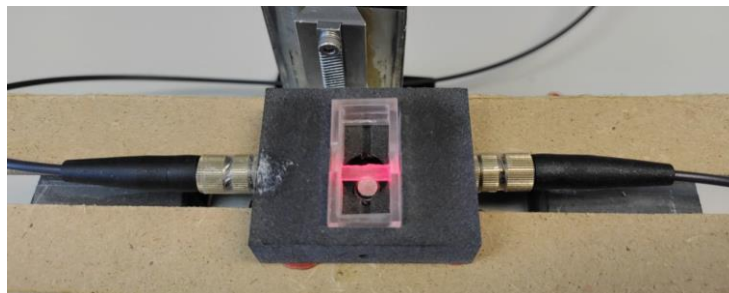


Figura 30. Plataforma con sensor de PDMS

Para poder realizar dichas pruebas, necesitamos conectar la fuente de luz al extremo emisor de la fibra óptica y en el extremo receptor el espectrómetro con el que analizar la señal recibida.

Estas primeras pruebas las hacemos utilizando el espectrómetro QE65000 de *Ocean Optics* que vemos en la Figura 31 y la fuente de luz HL 2000 que podemos ver en la Figura 32 del mismo fabricante.



Figura 32. Espectrómetro QE65000



Figura 31. Fuente de luz HL 2000 de Ocean Optics

Podemos observar la señal obtenida mediante el *software OceanView* en la Figura 33 en el caso de camino óptico óptimo a través de la pieza de PDMS.

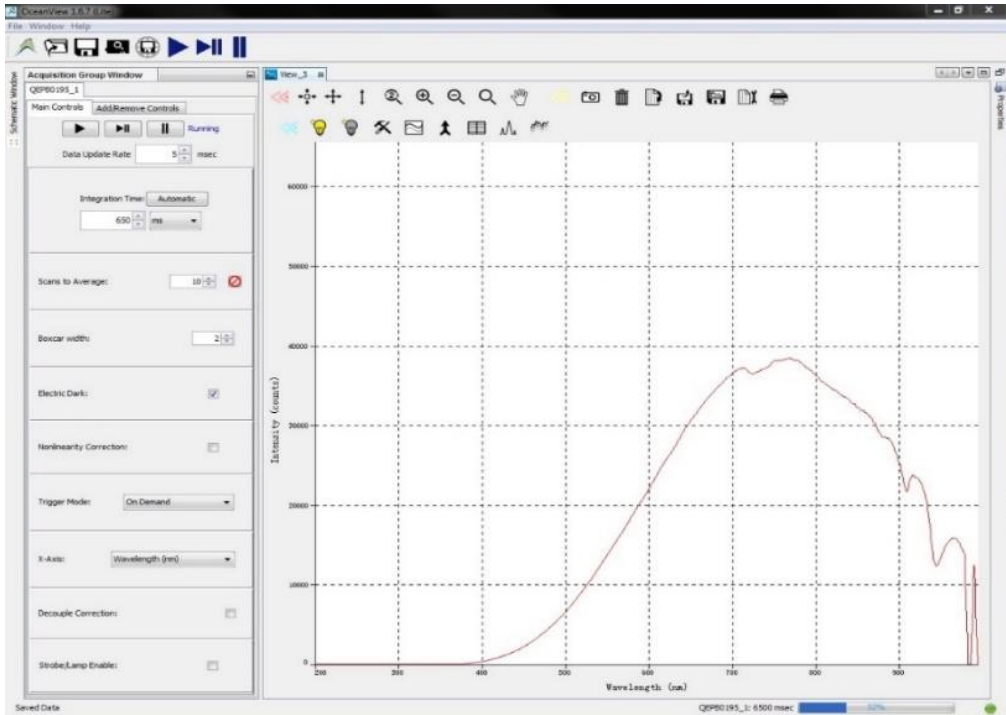


Figura 33. Software OceanView

Después de realizar las pruebas, modificando para ello el camino óptico podemos ver los resultados en el gráfico de la Figura 34.

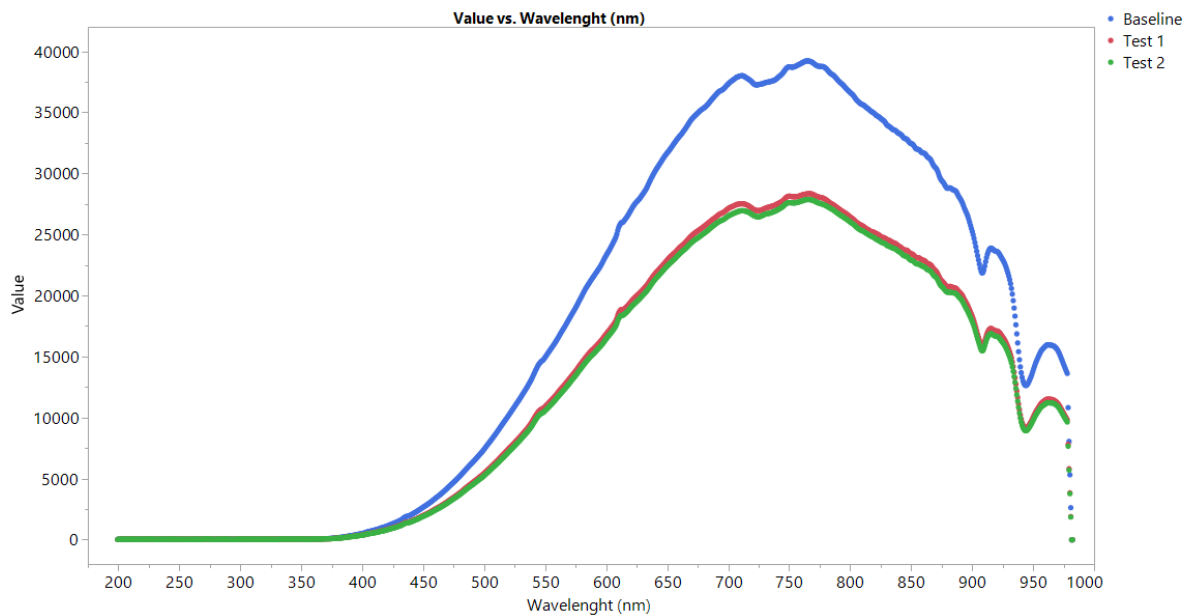


Figura 34. Gráfico con diferentes deformaciones

Vemos en azul los resultados con el camino óptico óptimo, situación en la que la pieza de PDMS es totalmente perpendicular a la trayectoria de la luz. En verde y rojo vemos dos instantes de medidas diferentes en las que el camino óptico ya no es perpendicular sino curvo, provocando en este caso la deformación desde la parte inferior.

Analizando los resultados obtenidos mediante las pruebas con el espectrómetro y teniendo en cuenta que los resultados son extrapolables al otro diseño del sensor, las longitudes de onda en las que vemos mayor variación al modificar el camino óptico corresponden al rojo según podemos ver en la Tabla 1.

Radiación		Longitud de onda $\lambda$
Ultravioleta 100-400 nm	ultravioleta C	100 nm – 280 nm
	ultravioleta B	280 nm – 315 nm
	ultravioleta A	315 nm – 400 nm
Visible 400-780 nm	violeta	400 nm – 455 nm
	azul	455 nm – 490 nm
	verde	490 nm – 570 nm
	amarillo	570 nm – 590 nm
	anaranjado	590 nm – 620 nm
	rojo	620 nm – 780 nm
Infrarroja 780nm-1mm	infrarroja A	780 nm – 1400 nm
	infrarroja B	1400 nm – 3000 nm
	infrarroja C	3000 nm – 1 mm

Tabla 1. Longitud de onda vs Radiación

Se ha elegido el par FC300T de *Laser Components* que contiene un LED emisor de luz roja y un fotodiodo siendo utilizado previamente por el grupo de investigación y que se ajusta a las características que necesitamos.



Figura 35. Par optoacoplado FC300T

Las características del LED perteneciente al par según el fabricante las podemos observar en la Tabla 2.

LED	
<b>Hoja de características: ROJO VISIBLE</b>	
$I_{F, \max}$	100 mA
$V_{F, \max}$	1.7 V - 2.3 V
Tensión de ruptura inversa: $V_R$	$V_R = 5$ V
C ( $V_F=0V$ )	5 pFV
Frecuencia de corte: $f_c$ (10 - 20 mA)	80 MHz - 100 MHz

Tabla 2. Características LED FC300T

Las características del fotodiodo perteneciente al par según el fabricante las podemos observar en la Tabla 3.

<b>FOTODIODO</b>	
<b>Hoja de características:</b>	
$P_{\max}$	100 mW
$V_{R, \max}$	25 V
Tiempos de conmutación	1 ns
C (f 0 1 MHz)	3 pF

*Tabla 3. Características fotodiodo FC300T*

La corriente mínima requerida por este LED es de 1 mA aproximadamente y su tensión típica de conducción es de alrededor de los 2 V. La corriente máxima que soporta es de 100 mA. Por tanto, el rango del que se va a disponer en corriente es bastante amplio.

La frecuencia máxima de trabajo posible alcanza hasta unos 250 kHz, esto implica que podemos trabajar en el rango de 1-25 kHz sin ningún problema.

### 3.6. Simulación

Una vez seleccionado el prototipo que vamos a utilizar para el diseño del sensor, el diseño mediante plataformas móviles se ha realizado una simulación del comportamiento del sensor en el que se puede ver como teóricamente se comportaría a medida que se van desplazando los extremos de fibra y va aumentando la distancia entre ellos. Se parte de una situación en la que los extremos de fibra están en contacto, llegando hasta 5mm de distancia entre ambos.

En esta ocasión se ha llevado a cabo mediante el software *Comsol*, dicho software es ampliamente utilizado para la simulación de fenómenos electromagnéticos, mecánica estructural, acústica, flujo de fluidos, transferencia de calor e ingeniería química.

El modelo utilizado para la simulación ha sido el que podemos ver en la Figura 36, se trataría de dos fibras enfrentadas, rodeadas de PMMA y con un hueco de aire entre ellas. El tamaño del hueco entre ellas es el parámetro variable de la simulación.



Figura 36. Diseño del modelo simulado

En la Figura 37 podemos ver el comportamiento en diferentes posiciones de los extremos de fibra utilizados.

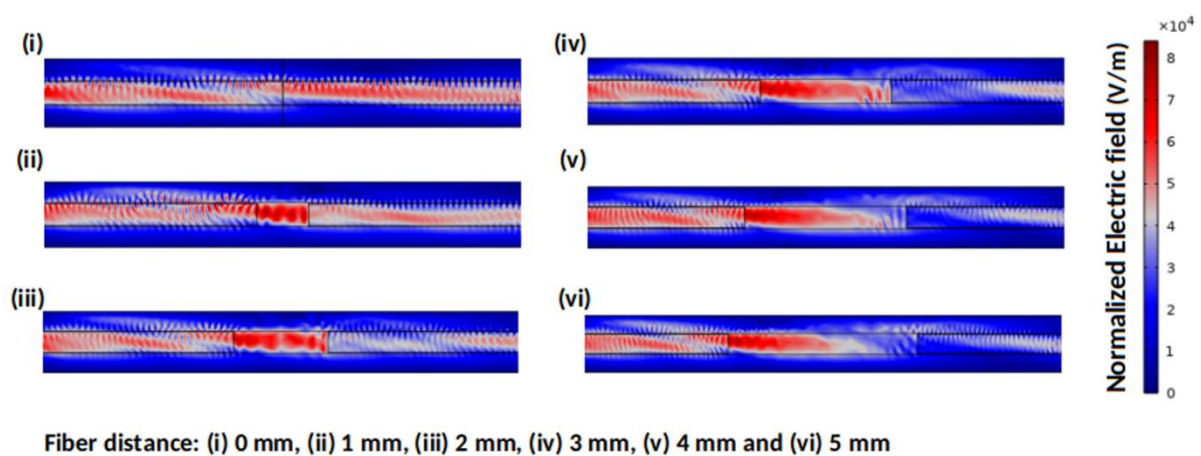


Figura 37. Comportamiento en diferentes posiciones



Si realizamos la simulación en las posiciones elegidas obtenemos el gráfico de la Figura 38, que nos da una aproximación del comportamiento teórico que podríamos esperar, disminuyendo a medida que aumentamos la distancia de separación entre los extremos de fibra.

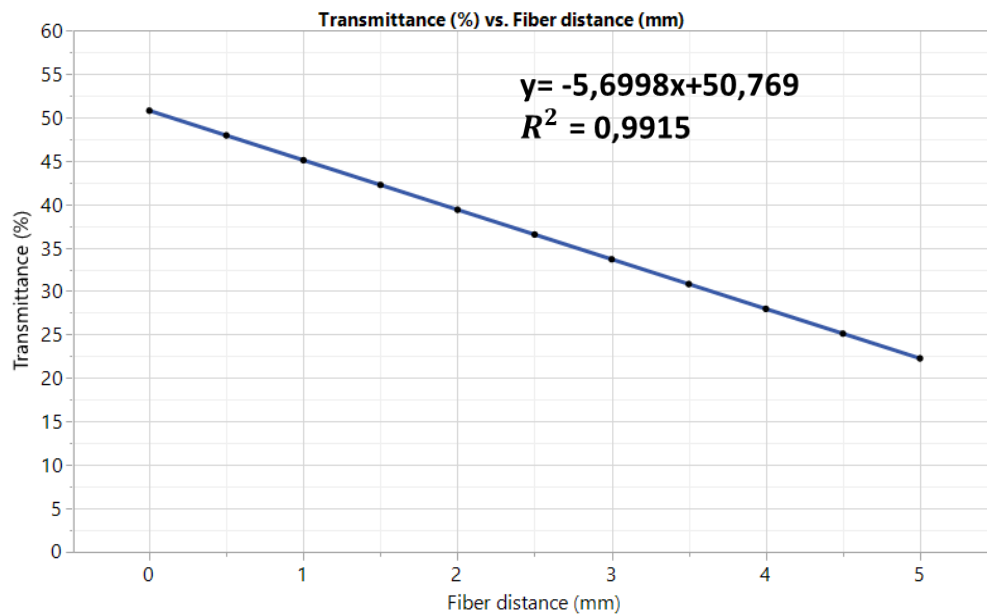


Figura 38. Gráfico Transmittance vs Fiber Distance

## 4. Plataforma de adquisición

### 4.1. Diagrama de bloques del sistema electrónico de instrumentación

Conocidos los dispositivos a utilizar y el comportamiento del sensor basado en fibra óptica podemos realizar el diseño completo del sistema electrónico de instrumentación para la medida de pequeñas deformaciones. Se ha decidido alimentar el sistema con una alimentación unipolar y pequeña para facilitar su portabilidad y su posible alimentación mediante batería.

El diagrama de bloques del sistema electrónico lo podemos ver en la Figura 39, siendo sus 4 bloques los siguientes:

- Señal de excitación: Bloque cuya función es generar la señal de excitación eléctrica que convertiremos en una señal óptica y será transmitida a través de la fibra óptica.
- Bloque emisor: Recibe la señal de excitación, en este caso el bloque es un diodo led que transforma la señal eléctrica en óptica y se emite a través de la fibra.
- Bloque receptor: Recibe la señal de la fibra óptica a través de un fotodiodo, dispositivo encargado de transformar la señal óptica recibida en una señal eléctrica.
- Sistema de medida: Bloque encargado de procesar la información del bloque receptor. Se obtiene el valor de la señal recibida y por tanto las variaciones provocadas por la separación en el núcleo.

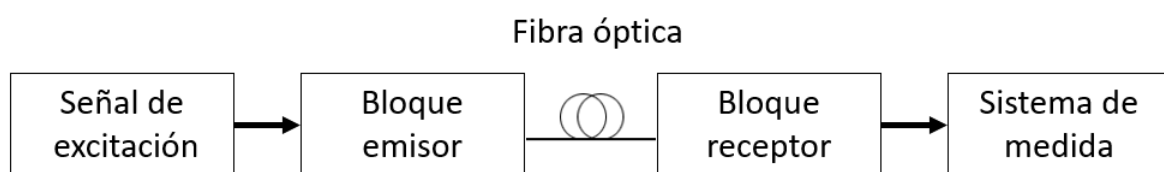


Figura 39. Diagrama de bloques del sistema electrónico

El funcionamiento global del sistema al ir aumentando la distancia entre los extremos de la fibra es el siguiente:

- Se parte de la fibra sin separación.
- Al separar los extremos de la fibra óptica, la intensidad luminosa transferida por la fibra disminuye y por tanto disminuye la corriente continua recibida por el fotodiodo.

- Si volvemos a aproximar los extremos de la fibra, la intensidad luminosa transferida por la fibra aumenta y por tanto aumenta la corriente continua recibida por el fotodiodo hasta el valor máximo, siendo este el punto de partida con las fibras en contacto.

## 4.2 Diseño *hardware*

Una vez explicados los bloques analógicos de manera general se procede a su diseño individualmente. En la Figura 40 podemos ver un esquema de los bloques del sistema *hardware*.

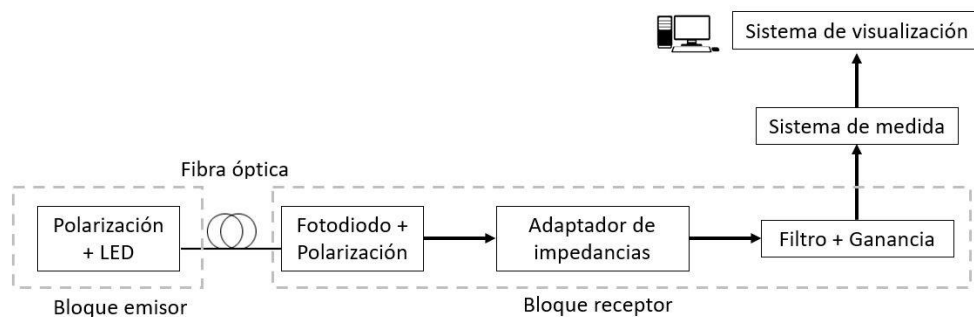


Figura 40. Diseño *hardware*

Antes de comenzar con el diseño de los bloques, se realizaron simulaciones de cada uno de ellos utilizando Cadence OrCAD, para realizar el diseño final. Primero se simularon los bloques emisor y receptor por separado.

Una vez confirmado esto y conociéndose el comportamiento del sensor al separar el núcleo de la fibra, se pudo simular dicho comportamiento. Para ello, se fueron modificando los factores de CTR, de forma que un valor inferior de CTR se correspondía con una mayor distancia de separación en el núcleo.

Los diferentes bloques, que tenemos son:

- Alimentación: Suministrando la potencia necesaria a todo el *hardware* para su correcto funcionamiento.
- Bloque emisor: Encargado de la polarización del diodo LED para la emisión de señal luminosa.
- Bloque receptor: Recibe la señal luminosa a través del fotodiodo y genera la señal de salida que obtendremos en el sistema de medida.

#### 4.2.1. Alimentación

Es un sistema electrónico con una alimentación que permitiría su portabilidad y su funcionamiento mediante baterías al tener un bajo consumo, de unos pocos mA. En este caso se ha considerado una tensión de  $V_{cc}=5V$ , de esta manera facilitamos también la alimentación mediante *universal serial bus* (USB) estándar tipo B.

En el diseño fabricado se puede obtener la alimentación desde la propia placa del STM32 o bien mediante un conector USB estándar tipo B. Podemos ver el esquema en la Figura 41.

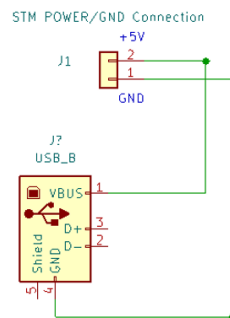


Figura 41. Esquema alimentación

#### 4.2.2. Bloque emisor - receptor

Se ha diseñado el bloque emisor-receptor con la electrónica más sencilla posible con el objetivo de cumplir los requisitos funcionales del mismo. Vemos el esquema completo en la Figura 42.

En el bloque emisor, teniendo en cuenta la alimentación del circuito y la tensión de conducción del LED, se elige una resistencia ( $R1=470\Omega$ ) con la que garantizar la polarización del LED.

En el bloque receptor, se ha añadido además de la resistencia de polarización del fotodiodo ( $R4 = 47k\Omega$ ), un seguidor de tensión haciendo la función de adaptador de impedancias y un filtro pasa-bajas *Sallen-Key* de segundo orden.

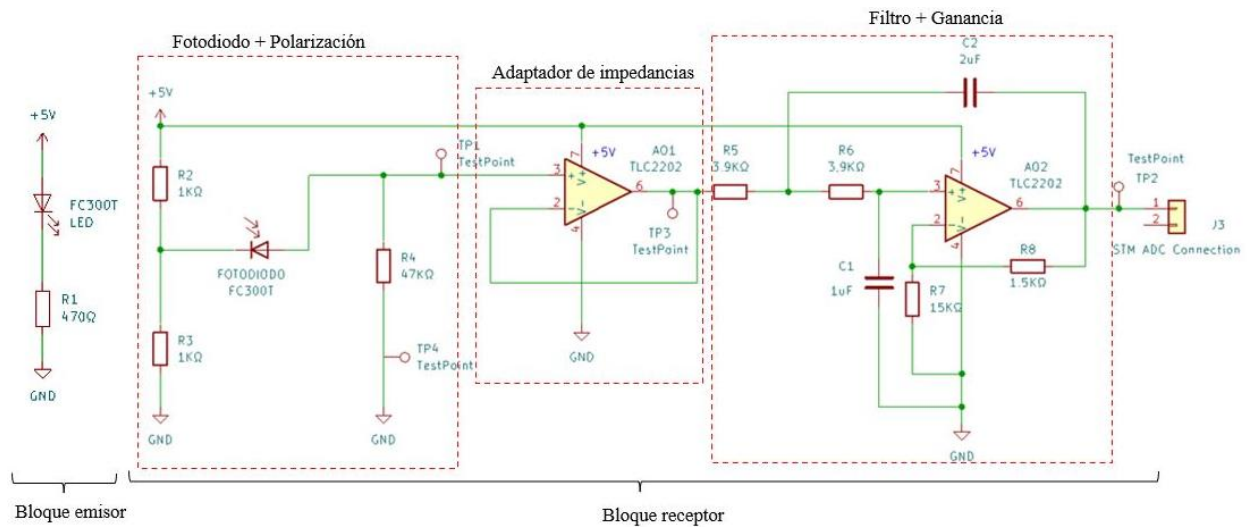


Figura 42. Esquema del bloque emisor-receptor

Independientemente de la corriente que consumamos en la salida, con el amplificador operacional (AO) TLC2202 garantizamos en este diseño la máxima tensión posible en la salida.

Para evitar interferencias en las medidas debido a las lámparas fluorescentes del laboratorio se añade un filtro con una frecuencia de corte de 50 Hz. Elegimos  $R5=R6$  por simplicidad, al igual que los valores de los condensadores,  $C2=2 \cdot C1$ . La ganancia del filtro viene dada por  $(R7+R8)/R7$ . Seleccionando  $R7=15 \text{ k}\Omega$  y  $R8=1,5 \text{ k}\Omega$  tenemos una ganancia igual a  $(15 \text{ k}\Omega + 1,5 \text{ k}\Omega) / 15 \text{ k}\Omega = 1,1$  para intentar aprovechar todo el rango de entrada del ADC de la placa STM32, que es de 3.3V.

### 4.3. Sistema de medida

El sistema de medida utilizado debe constar necesariamente de un microcontrolador capaz de gestionar las operaciones llevadas a cabo. Estas operaciones son:

- La adquisición de datos analógicos proporcionados por el bloque receptor.
- La conversión analógico-digital de los datos.
- El envío de los datos mediante el puerto serie hasta el ordenador.

El sistema de medida propuesto deberá ser capaz de medir pequeñas deformaciones con una frecuencia en el rango de 1-25 kHz, frecuencia establecida en función de las necesidades de muestreo.

Para ello, se ha utilizado la plataforma de desarrollo STM32 NUCLEO-L452RE-P [15] (Figura 43), ampliamente utilizada por el grupo GPEM y que cumple con todos los requerimientos que se plantean para este trabajo.

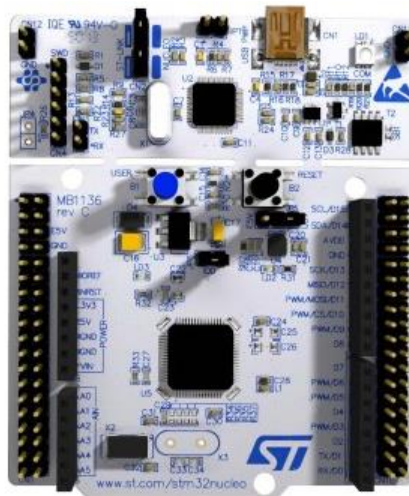


Figura 43. STM32 NUCLEO-L452RE-P

Algunas de las principales características de la placa son las siguientes:

- Microcontrolador STM32L452RET6 de núcleo Cortex-M4F de 80 MHz con memoria Flash de 256 KB y 64 KB de SRAM.
- Comunicaciones serie: USART, SPI, QSPI, I<sup>2</sup>C, USB 2.0, SAI, CAN.
- Fuente de alimentación en placa flexible.
- Botones pulsadores de usuario y restablecimiento.
- Oscilador de cristal de 32,768 KHz.

El diagrama de flujo de las operaciones sería el mostrado en la Figura 44:



Figura 44. Diagrama de flujo de las operaciones.

Se configura un *Timer* para generar una interrupción con una frecuencia de 1-25 kHz. Cuando la interrupción es generada, se lee el dato que tenemos en la salida del bloque receptor, siendo este un valor analógico, y mediante la conversión con el conversor analógico digital (ADC) obtenemos el valor digital que enviamos por el puerto serie hasta el ordenador, con una velocidad de 921600 baudios para el caso de 25kHz.

#### 4.4. Sistema de visualización

Se ha diseñado un sistema de visualización en lenguaje C# que permite seleccionar el tipo de aproximación con el que queremos obtener el cálculo y ver la evolución temporal de la deformación. Podemos ver la interfaz en la Figura 45.

Tenemos 3 modos distintos de funcionamiento:

- *Datalogger*: Modo exclusivamente de adquisición de datos que se almacenaran en un archivo con extensión .csv.
- Visualización en tiempo real: Podemos ver la evolución de la deformación a una frecuencia de 10 muestras por segundo y también almacenar esos mismos datos en un archivo con extensión .csv.
- Visualización (*Datalogger*): Permite cargar un archivo .csv generado previamente y graficarlo.

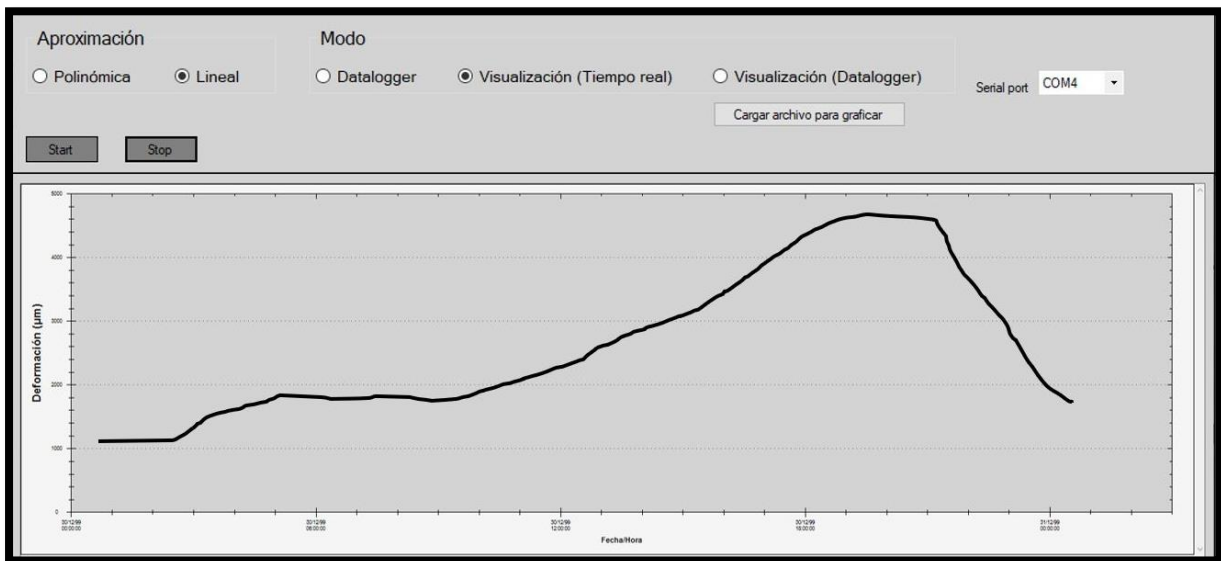


Figura 45. Interfaz sistema de visualización



## 4.5. Diseño de la PCB

Con el diseño ya finalizado, se procede al diseño de la placa de circuito impreso (PCB). Para ello, se ha utilizado el KiCad, paquete de software libre que facilita el diseño de esquemáticos para circuitos electrónicos y su conversión a PCB.

Se ha optado por priorizar tamaño y sencillez, utilizando tanto componentes de montaje superficial (SMD) como de agujeros pasantes (THD) disponibles con pistas en ambas caras, *top* y *bottom*. El ruteo se ha realizado con pistas de 0.5mm de ancho y una distancia entre estas de 0.3mm.

Todos los componentes se han elegidos con huellas comúnmente utilizadas y disponibles en las librerías de cualquier software de diseño electrónico, mientras que la huella del par optoacoplado la hemos tenido que diseñar específicamente teniendo en cuenta las dimensiones que podemos ver en la Figura 46.

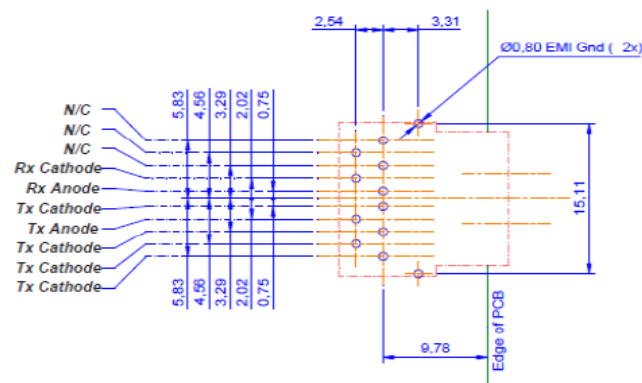


Figura 46. Footprint FC300T

El diseño del esquemático completo lo podemos ver en la Figura 47.

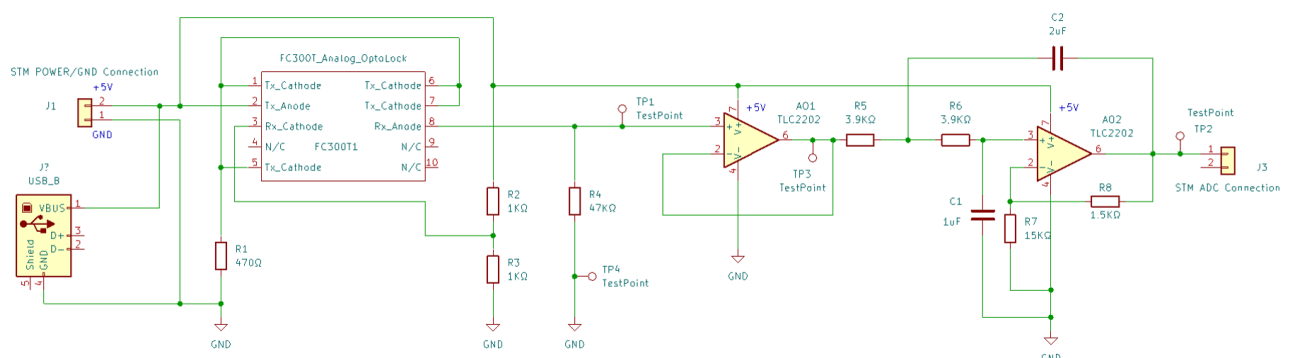


Figura 47. Diseño esquemático del circuito

El diseño de la cara *top* lo podemos ver en la Figura 48:

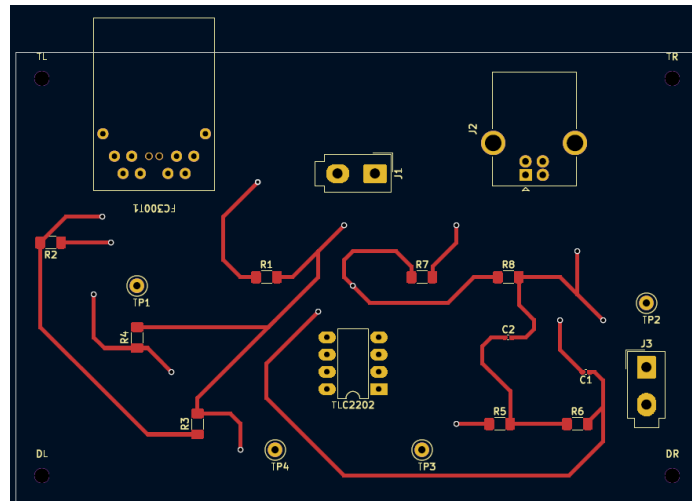


Figura 48. Diseño PCB. Top layer

El diseño de la cara *bottom* lo podemos ver en la Figura 49:

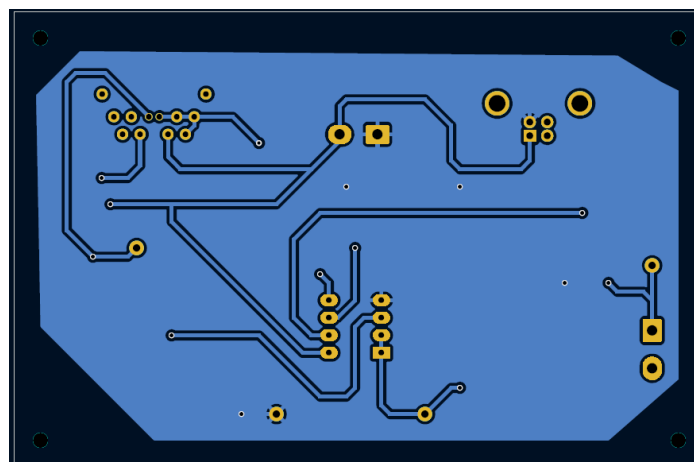


Figura 49. Diseño PCB. Bottom layer

EL diseño de la PCB en 3D de las caras *top* y *bottom* lo podemos ver en la Figura 50:

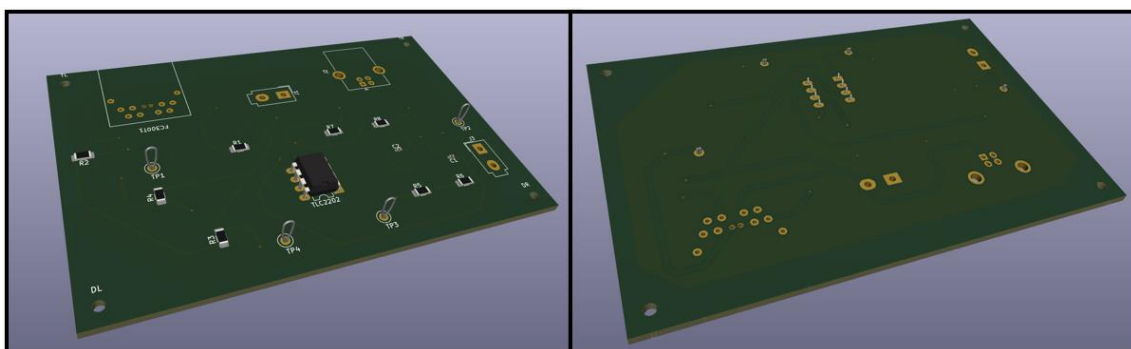
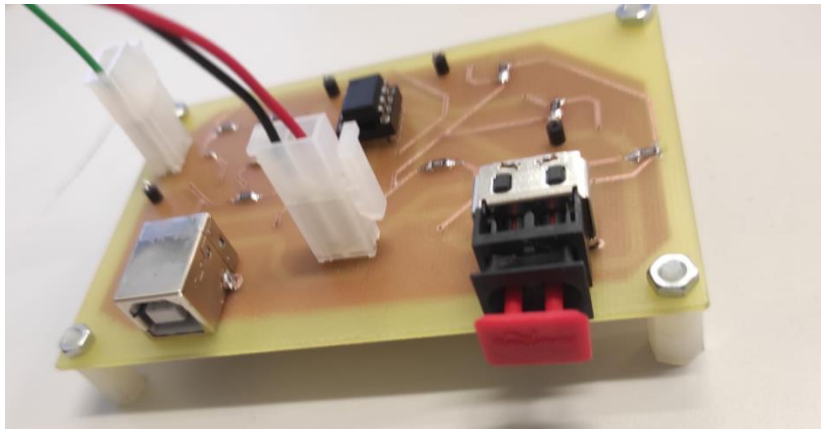


Figura 50. Diseño 3D PCB. Top layer y bottom layer

El diseño de la PCB ya fabricada con los componentes montados en la cara *top* lo podemos ver en la Figura 51.



*Figura 51. PCB Top layer*

## 5. Ensayos de laboratorio

### 5.1. Caracterización del sensor

Una vez terminado el diseño del sistema electrónico, procedemos a su evaluación en el laboratorio para verificar su correcto funcionamiento y caracterizar su comportamiento ante distintas situaciones en función de la distancia de separación entre los núcleos de ambos extremos de la fibra.

Para esto, utilizamos la configuración que vemos en la Figura 52, que contiene los siguientes elementos:

- La placa PCB que integra el diseño completo del diseño electrónico
- Par transceptor del diodo led y el fotodiodo seleccionado
- Extremos de fibra óptica
- Micrómetro, para medir la distancia entre ambos extremos de fibra
- Osciloscopio, para comprobar el correcto funcionamiento del diseño electrónico y medir la señal del sensor.

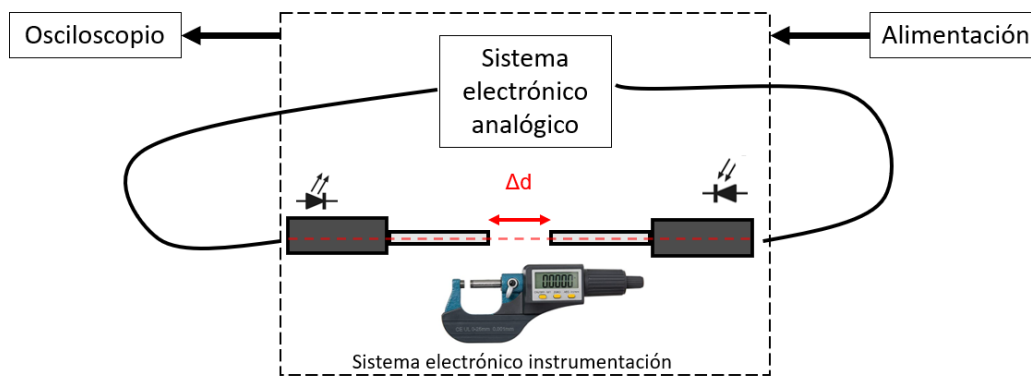


Figura 52. Montaje experimental de los ensayos

Los ensayos realizados en el laboratorio para caracterizar el sistema se han realizado con el montaje anterior utilizando el micrómetro digital *Beslands* con resolución de 1  $\mu\text{m}$  que podemos ver en la Figura 53.



Figura 53. Montaje con micrómetro digital Beslands

Para evaluar su comportamiento se procede a aproximar los dos núcleos de la fibra óptica mediante el tornillo micrométrico partiendo de una situación inicial de separación de 5000 $\mu$ m.

Para cada medida de separación producida, se obtiene el valor del CTR estático, calculado como el cociente entre los valores de las corrientes que circulan por el fotodiodo y por el LED. Una vez recogidos datos suficientes, se puede obtener una curva de CTR vs Distancia de separación entre núcleos, utilizándose esta para calcular la separación producida en función del CTR obtenido. Para poder tener caracterizado el comportamiento del sensor, realizamos varios barridos completos del rango de desplazamiento. Una vez trazadas las curvas se separan los núcleos de fibra en distancias aleatorias para comprobar la repetibilidad. Realizando estos ensayos, tanto las curvas obtenidas como la media de ellas las podemos observar en el gráfico de la Figura 54.

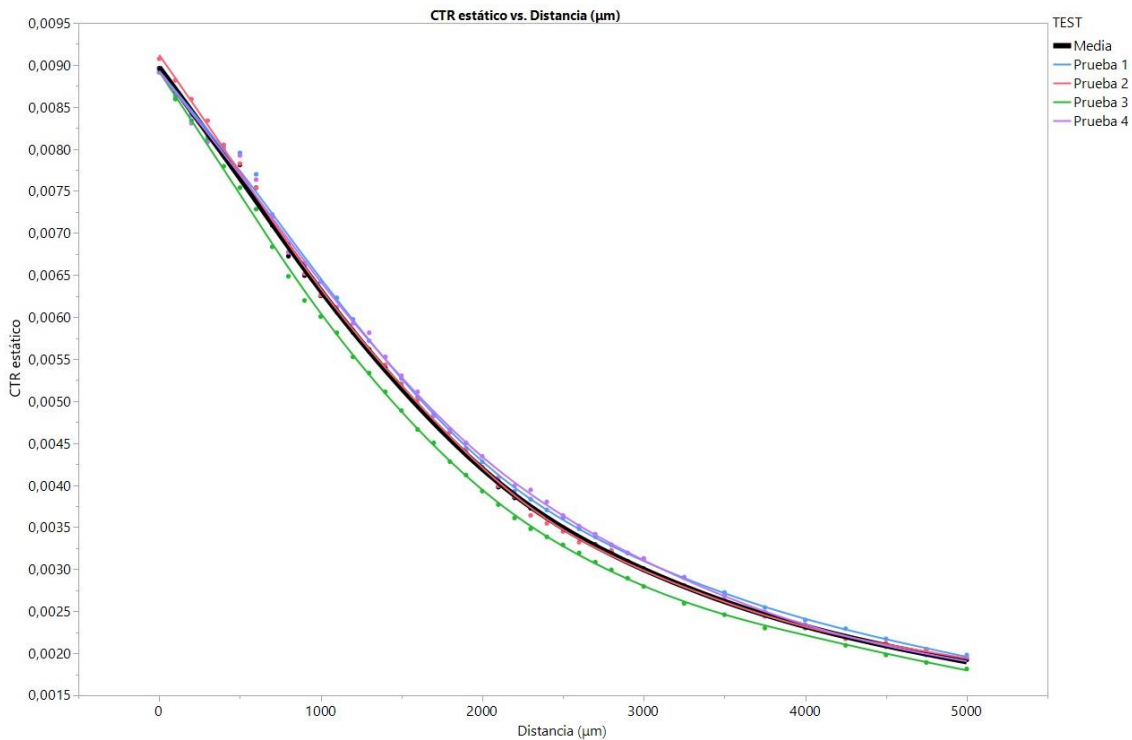


Figura 54. Gráfico del CTR vs Distancia de separación entre núcleos

Podemos ver la desviación estándar de las medidas en el gráfico de la Figura 55.

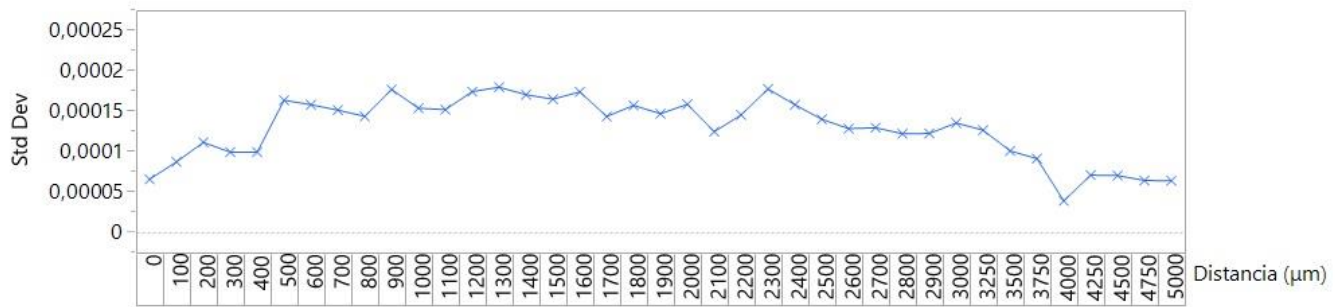


Figura 55. Gráfico de la desviación estándar vs Distancia de separación entre núcleos

Podemos aproximar el comportamiento de la curva característica media mediante un polinomio de grado 3 mostrando el resultado que vemos en la gráfica de la Figura 56.

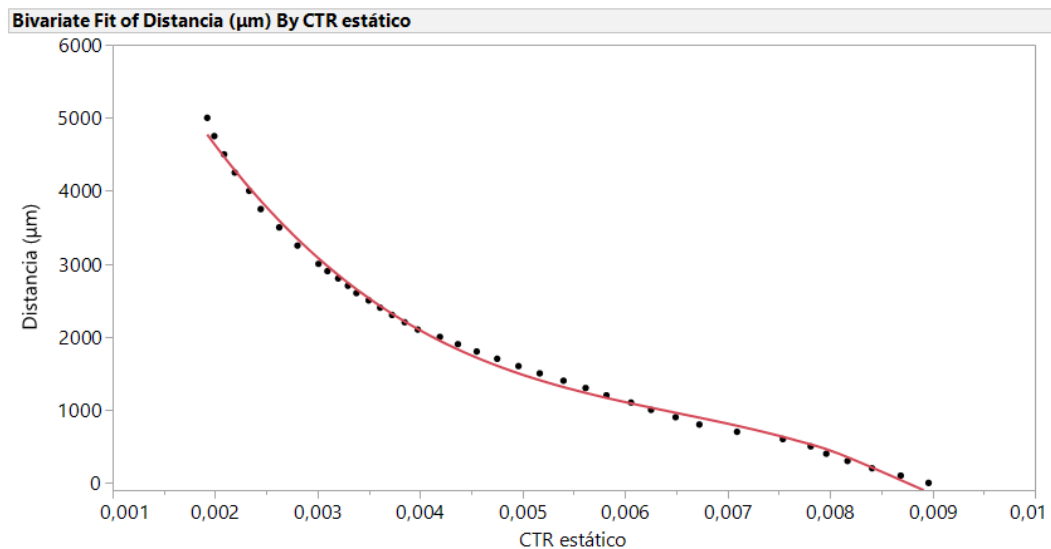


Figura 56. Aproximación a la curva característica mediante polinomio de grado 3

El polinomio de grado 3 tendría la siguiente ecuación:

$Distancia (\mu m) = A - B \cdot CTR + C(CTR - E)^2 - D(CTR - E)^3$ , teniendo una  $R^2$  de 0,996877. Podemos ver el valor de las constantes en la Tabla 4.

Constantes Aproximación Polinomio de grado 3			
A	4027,0484	B	509876,33
C	130737023	D	$2,576 \cdot 10^{10}$
E	0,00482		

Tabla 4. Constantes aproximación polinomio de grado 3

Si optamos por una aproximación en modo lineal, debemos dividir en varios tramos la curva característica para obtener un resultado óptimo. Consideramos la mejor opción dividir la curva en tres tramos como podemos ver en la imagen de la Figura 57.

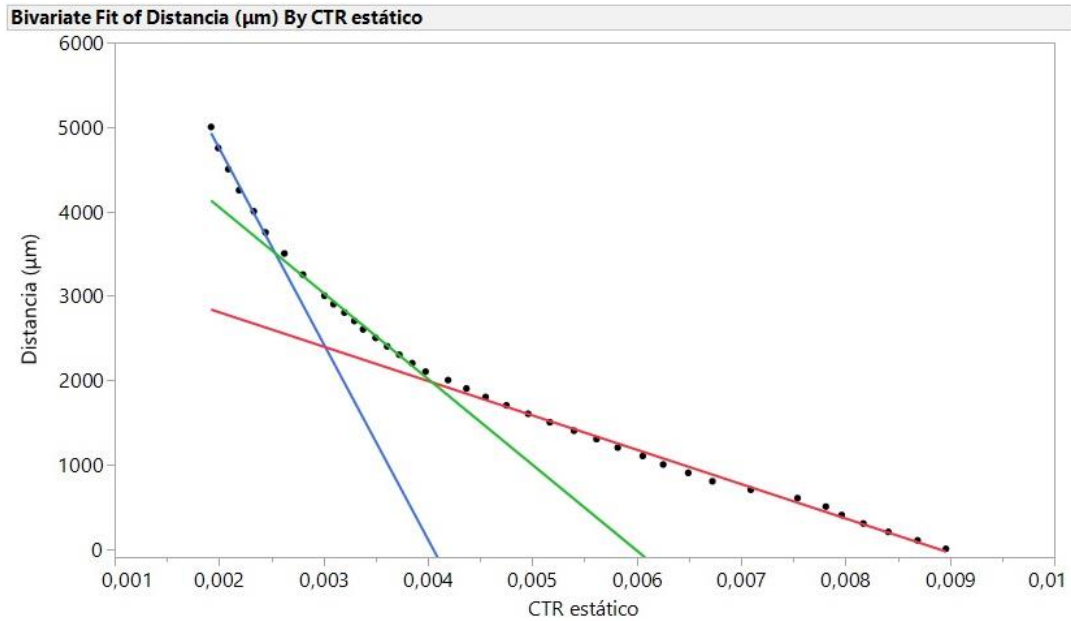


Figura 57. Aproximación lineal a la curva característica en 3 tramos

Los tramos en los que dividir la curva serían los siguientes:

- $CTR \leq 0,0025$
- $0,0025 > CTR \geq 0,004$
- $CTR > 0,004$

La aproximación lineal sería la siguiente:  $Distancia (\mu m) = A - B \cdot CTR$

En la Tabla 5 podemos ver los valores de las constantes dependiendo del tramo en el que nos encontremos, así como el valor de la  $R^2$  para cada caso.

Constantes Aproximación Lineal a tramos					
CTR ≤ 0,0025		0,0025 > CTR ≥ 0,004		CTR > 0,004	
A	9386,934	A	6084,8621	A	3619,2318
B	2318185,3	B	1017420,8	B	407436,05
$R^2$	0,988853	$R^2$	0,990289	$R^2$	0,993972

Tabla 5. Constantes aproximación lineal a tramos

Si graficamos conjuntamente tanto la media de las medidas como las dos aproximaciones, tenemos el gráfico que podemos ver en la Figura 58.

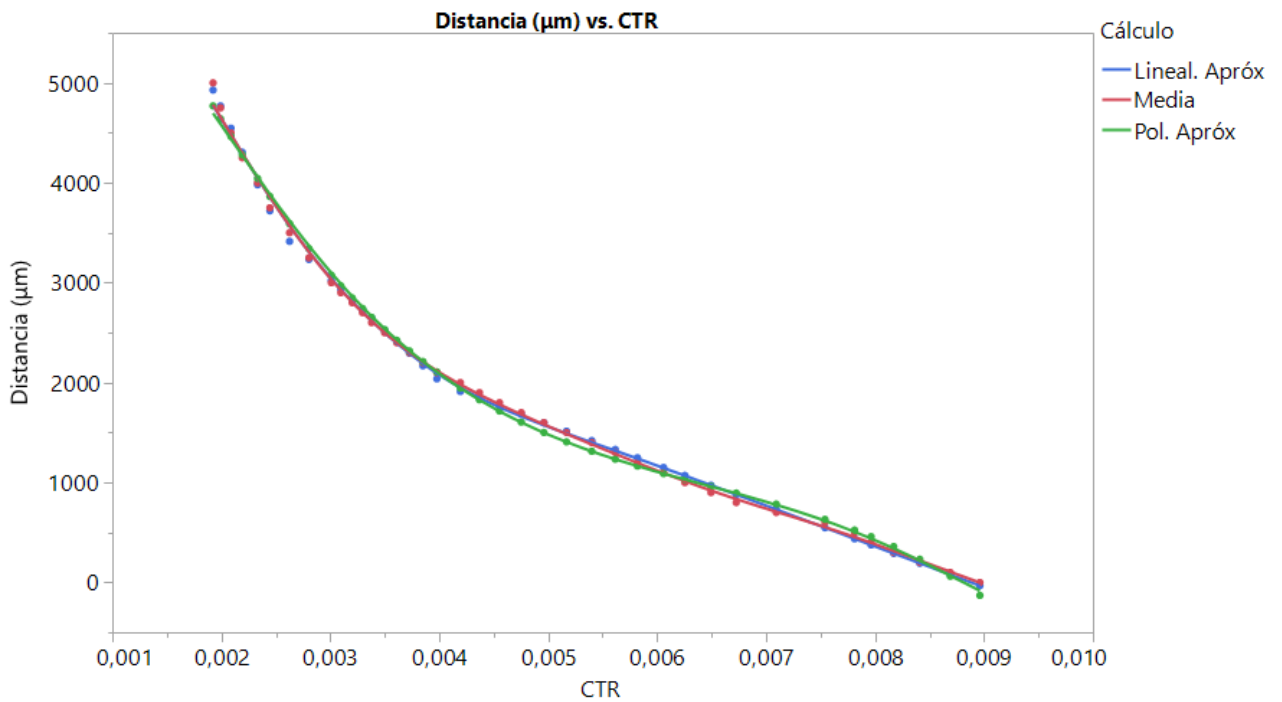


Figura 58. Gráfico de la media, aproximación lineal y polinómica vs CTR

La desviación estándar de la aproximación polinómica y la media la podemos ver en el gráfico de la Figura 59.

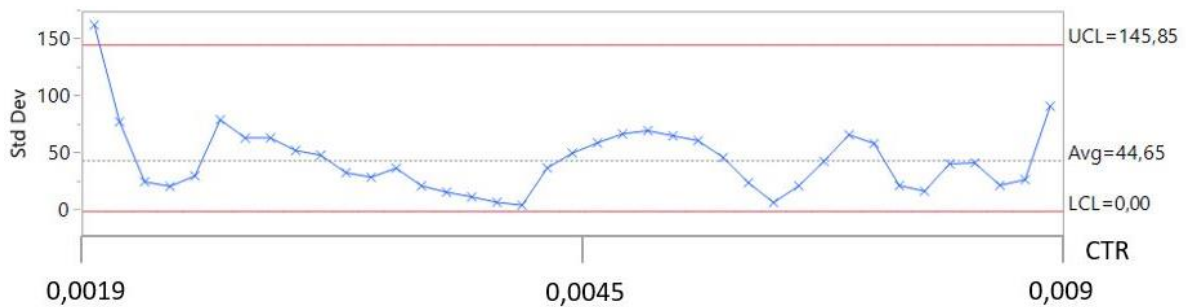


Figura 59. Desviación estándar de la media y la aproximación polinómica

No se aprecia una tendencia clara que implique una desviación estándar en función del CTR.



La desviación estándar de la aproximación lineal y la media la podemos ver en el gráfico de la Figura 60.

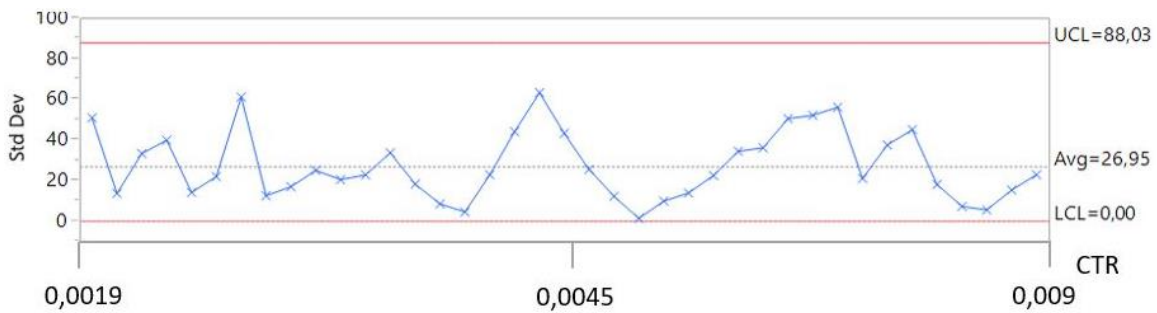


Figura 60. Desviación estándar de la media y la aproximación lineal

Mediante la aproximación lineal, en la desviación estándar tampoco se aprecia una tendencia clara en función del CTR.

En el gráfico de la Figura 61 podemos ver la incertidumbre de la medida del CTR en función de la distancia de deformación.

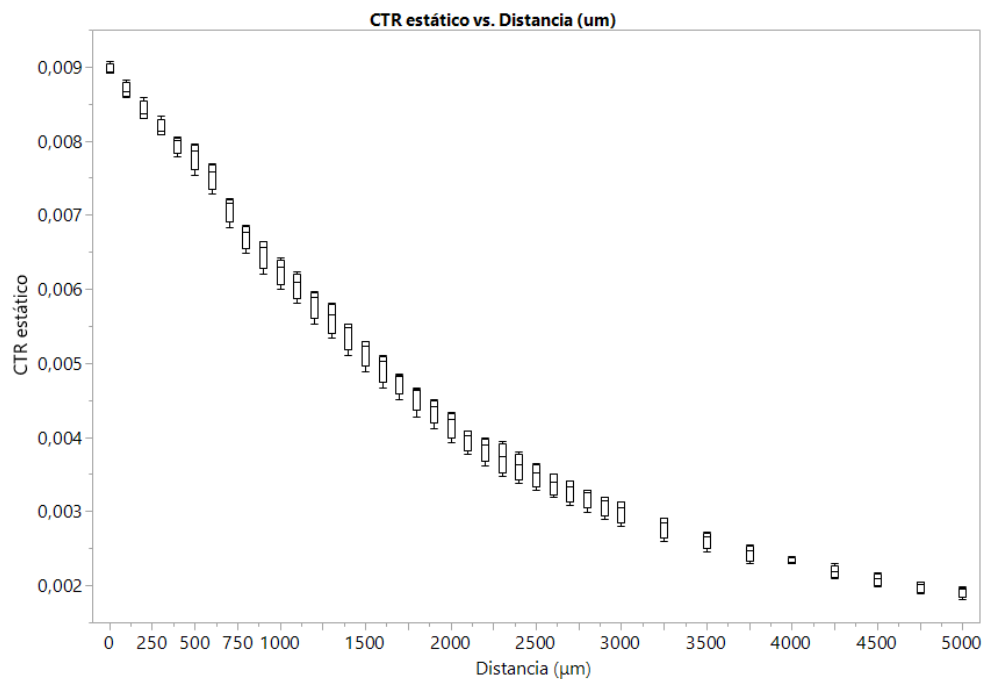


Figura 61. Incertidumbre CTR vs Distancia

Podemos observar que tenemos una región con la incertidumbre especialmente más alta entre 1000-3000  $\mu\text{m}$ , siendo esta el codo de la curva característica.

Podemos cuantificar el tamaño del rango de incertidumbre en la medida del CTR en función de la distancia, pero dado que nuestro sistema tiene el objetivo de medir deformaciones, debemos trasladar la incertidumbre en el CTR a la deformación.

Con el CTR mínimo y máximo en cada punto de estudio obtenemos las deformaciones que representarían esos valores de CTR, mediante el uso de los dos tipos de aproximaciones calculadas anteriormente, tanto mediante polinomio de grado 3 como mediante una aproximación lineal separada en tres tramos.

Una vez obtenidas las deformaciones dadas por cada una de las ecuaciones, calculamos el error obtenido en cada punto, de manera absoluta y porcentual. Todos estos datos los vemos graficados en la Figura 63.

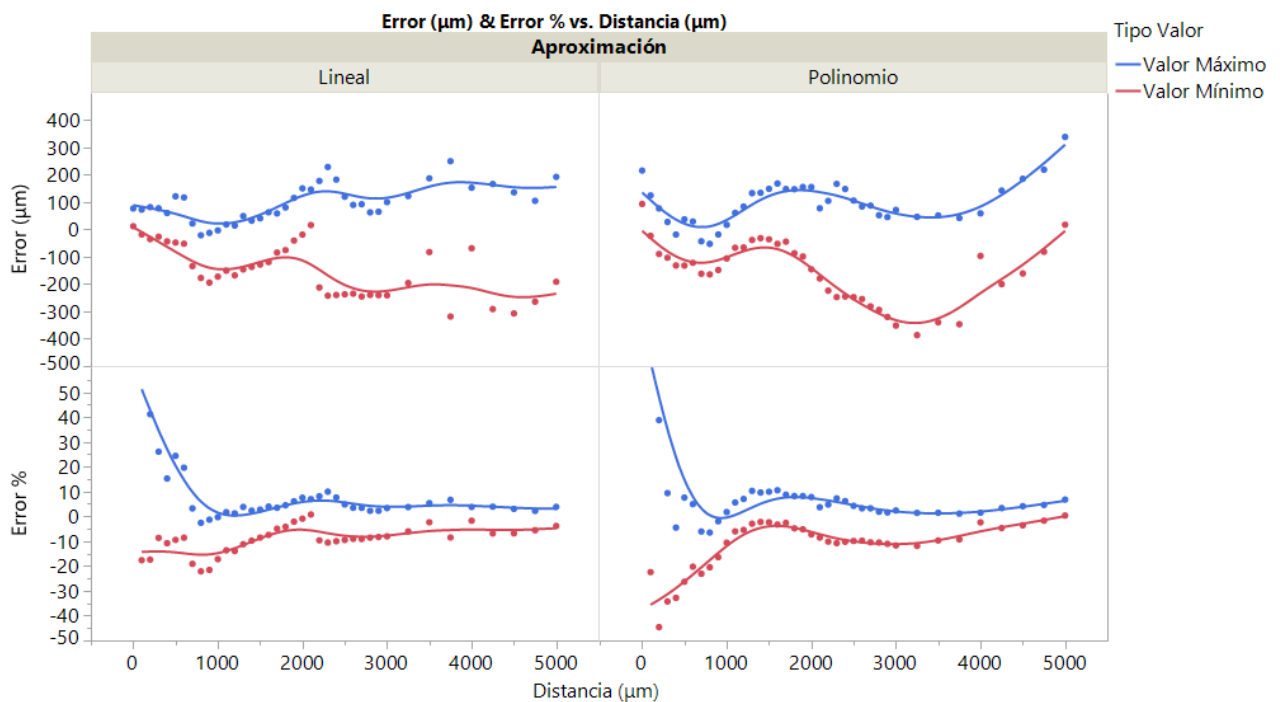


Figura 62. Error absoluto y % de error

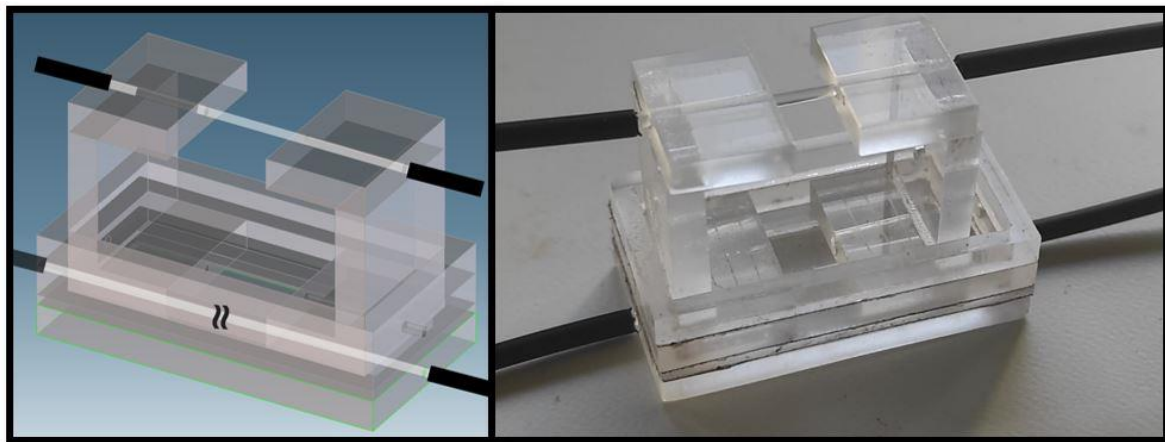
Utilizando ambos tipos de aproximaciones obtenemos unos errores altos en medidas por debajo de 1000  $\mu\text{m}$ . Por encima de ese punto, encontramos un error  $\leq 10\%$ .

También podemos observar que el uso de un polinomio de grado 3 no aporta una mejora significativa respecto a la linealización en tramos, con el coste computacional que esto podría suponer, ya que el porcentaje de error es similar en ambos casos.

## 5.2. Calibración y deriva térmica del circuito

Con el fin de realizar una calibración del circuito que además nos sirviera para corregir una posible deriva térmica del mismo se ha realizado una modificación en el diseño mecánico del sensor, tal como podemos ver en la Figura 63.

Dicha modificación nos permite colocar dos extremos de fibra que estuvieran siempre en contacto en la base del sensor, privándolos de movimiento que pudiese alterar esa situación. Teniendo en cuenta esta situación, si monitorizáramos la salida del circuito, cualquier variación que pudiéramos ver sería originada por fenómenos ajenos al propio movimiento del sensor, en este caso la causa podría deberse a una deriva térmica del circuito.



*Figura 63. Diseño de plataformas en voladizo con fibra para calibración*

Utilizando el diseño electrónico propuesto, se ha realizado una batería de medidas de los valores generados por el sensor durante 10.000 sg (3h aproximadamente) en una determinada posición de deformación. De esta manera, si fuésemos capaces de ver que los valores se modifican con el paso del tiempo podríamos determinar que tenemos efecto de deriva térmica. En el caso de que así fuera, se implementaría un control para evitar que esta variación se trasladase a un error en la medida del sensor.

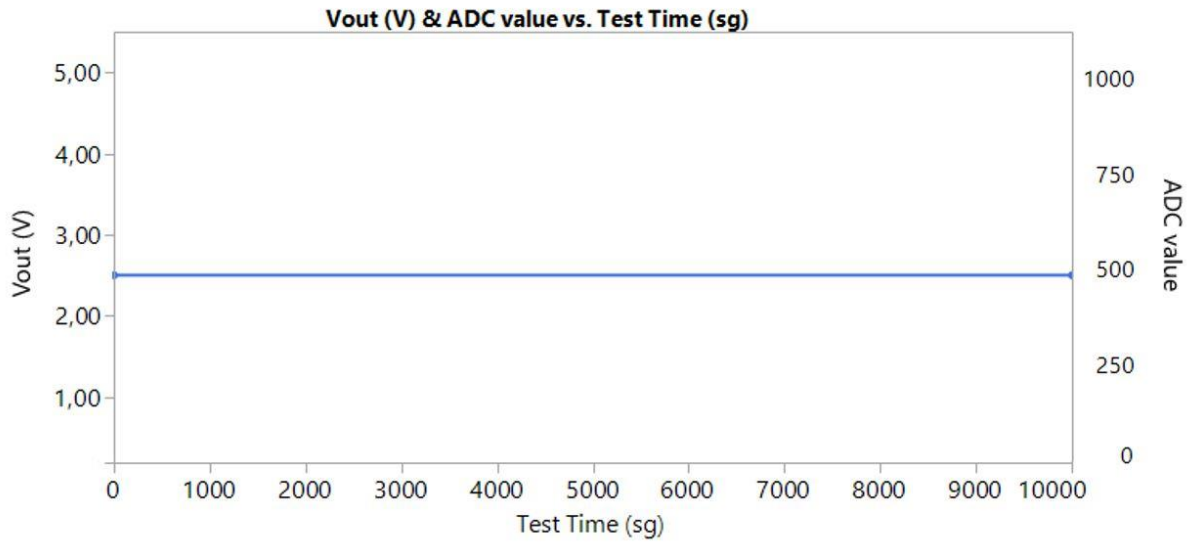


Figura 64. Gráfico Deriva térmica

En el gráfico de la Figura 64 podemos ver que no tenemos variaciones en la salida con el paso del tiempo, ya que la tensión de salida se mantiene constante. No tenemos efectos que nos impliquen un comportamiento relacionado con el fenómeno comentado, por tanto, no es necesario implementar un control que así lo compensase.

## 6. Conclusiones y trabajo futuro

El objetivo de este trabajo es el diseño y caracterización de un sistema de adquisición basado en fibra óptica, pretendiendo evaluar la viabilidad de la utilización de la fibra óptica como elemento sensor con el fin de medir pequeñas deformaciones.

Se ha diseñado y caracterizado el sensor propuesto basado en fibra óptica que permite realizar medidas de pequeñas deformaciones ( $\mu\text{m}$ ). Se ha diseñado, fabricado, montado y comprobado el sistema electrónico de instrumentación utilizando como elemento sensor la fibra óptica.

Se ha caracterizado el sistema de medida, obteniendo la curva característica que relaciona la medida del sensor con la deformación producida. El rango máximo de deformación obtenido ha sido de 5 mm. En este caso, la resolución para la toma de medidas es la que conseguimos mediante el uso de un tornillo micrométrico.

Se ha implementado en un Microcontrolador un sistema de medida autónomo y un sistema de visualización de resultados mediante una aplicación de ordenador.

Durante la realización de este trabajo he tenido la oportunidad de trabajar en un laboratorio del Centro Nacional de Microelectrónica situado en la Universidad Autónoma de Barcelona con la colaboración de distintos profesionales expertos en el diseño de sensores ópticos.

Como trabajo futuro se podría valorar la posibilidad de implementar un control de ganancia automático para maximizar la resolución en la medida de la deformación que tengamos en cada momento. Con el fin de minimizar posibles errores en la medida, se deben valorar otros métodos de fabricación mecánica que garanticen una mejor manera mantener la fibra perfectamente alineada en cualquiera de los puntos de deformación que nos encontremos. Por tanto, se debería intentar reducir al máximo los errores fruto del proceso de fabricación mecánico y del procedimiento de toma de medidas para lograr un sistema todavía más robusto.

Teniendo todo esto en cuenta, podemos decir que es un buen punto de partida para la realización de una investigación más profunda en esta dirección.

## Bibliografía

1. E. Udd, "Fiber optic smart structures," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 84, no. 6, pp. 884-894, Jun 1996. doi: 10.1109/5.503144
2. P. V. Komi, A. Belli, V. Huttunen, R. Bonnefoy. et al. "Optic fibre as a transducer of tendomuscular forces". *Europ. J. Appl. Physiol.* 1996, 72: 278–280. 10.1007/BF00838652
3. De jonckheere, J., Narbonneau, F., Kinet, D., Zinke, J., Paquet, B., Depre, A., Jeanne, M., Logier, R., "Optical fibre sensors embedded into technical textile for a continuous monitoring of patients under Magnetic Resonance Imaging," *2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Vancouver, BC, 2008, pp. 5266-5269.
4. Paulo Roriz, Lída Carvalho, Orlando Frazão, José Luís Santos, José António Simões. "From conventional sensors to fibre optics sensors for strain and force measurements in biomechanics applications: A review,." *Journal of Biomechanics*, vol. 47, no. 6, pp. 1251-1261, 2014.
5. Adhesives Research (16 Octubre 2020) "Product Information Sheet Arcare 8939 " datasheet [Online]. Available: <https://www.adhesivesresearch.com/wp-content/uploads/2020/11/Arcare%C2%AE-8939-Product-Information-Sheet.pdf>
6. Jose Luis Alcoba. (17 Octubre 2012). "Especial comunicaciones II: Qué es una fibra óptica y cómo funciona," [Online]. Available: <http://www.xatakaon.com/tecnologia-de-redes/especial-comunicaciones-opticas-ii-que-es-una-fibra-optica-y-como-funciona>.
7. Cristina Barbosa, "Fundamentos sobre sensores ópticos de deformación," [Online]. Available: [https://www.hbm.com/es/6827/articulo-como-funciona-una-galga-extensometricaoptica/?product\\_type\\_no=Art%C3%ADculo:%20%C2%BFC%C3%B3mo%20funciona%20una%20galga%20extensom%C3%A9trica%20%C3%B3ptica?](https://www.hbm.com/es/6827/articulo-como-funciona-una-galga-extensometricaoptica/?product_type_no=Art%C3%ADculo:%20%C2%BFC%C3%B3mo%20funciona%20una%20galga%20extensom%C3%A9trica%20%C3%B3ptica?)
8. Industrial Fiber Optics, Inc. (8/2/12). "Plastic fiber optic red LED," datasheet [Online]. Available: <http://i-fiberoptics.com/pdf/if-e96edatasheet.pdf>
9. Firecomms. Laser components. (11/12). "Analog OptoLock FC300T," datasheet [Online]. Available: [https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user\\_upload/home/Datasheets/firecomms/fc300t.pdf&no\\_cache=1](https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/firecomms/fc300t.pdf&no_cache=1)
10. Texas Instruments. (February 1997-Revised January 2008). " TLC220x Advanced LinCMOS Low-Noise Precision Operational Amplifiers, " datasheet [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc2202.pdf?ts=1660901152593&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.bing.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc2202.pdf?ts=1660901152593&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.bing.com%252F)
11. Texas Instruments. (January 2000 – Revised December 2014). "LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers," datasheet [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>
12. R. Rodríguez, T. Nils, J.A. Plaza, U. Simonsen, V. Matchkov, A. Llobera, X. Muñoz-Berbel. "Ultrasensitive Photonic Microsystem Enabling Sub-micrometric Monitoring of Arterial Oscillations for Advanced Cardiovascular Studies" *Frontiers in Physiology*. July 2019. doi.org/10.3389/fphys.2019.00940
13. A. Llobera, V. J. Cadarso, K. Zinoviev, C. Domínguez, S. Büttgenbach, Senior Member, IEEE, J. Vila, J. A. Plaza. "Poly(Dimethylsiloxane) Waveguide Cantilevers for Optomechanical Sensing." *IEEE Photonics Technology Letter*, vol. 21, no.2, January 2009.

14. STMicroelectronics. (December 2020). “STM32 Nucleo-64-P boards (MB1319 User manual,” [Online]. Available: [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user\\_manual/group0/ff/5d/51/50/db/12/47/98/DM00387966/files/DM00387966.pdf/jcr:content/translations/en.DM00387966.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/group0/ff/5d/51/50/db/12/47/98/DM00387966/files/DM00387966.pdf/jcr:content/translations/en.DM00387966.pdf)
15. STMicroelectronics. (October 2020). “STM32L452xx Ultra-low-power Arm® Cortex®-M4,” datasheet [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l452cc.pdf>
16. STMicroelectronics. (March 2020). “STM32 Cortex®-M4 Programming manual,” [Online]. Available: [https://www.st.com/resource/en/programming\\_manual/pm0214-stm32-cortexm4-mcus-and-mpus-programming-manual-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/programming_manual/pm0214-stm32-cortexm4-mcus-and-mpus-programming-manual-stmicroelectronics.pdf)
17. STMicroelectronics. (October 2018) “STM32L41xxx/42xxx/43xxx/44xxx/45xxx/46xxx advanced Arm®-based 32-bit MCUs Reference manual,” [Online]. Available: [https://www.st.com/resource/en/programming\\_manual/pm0214-stm32-cortexm4-mcus-and-mpus-programming-manual-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/programming_manual/pm0214-stm32-cortexm4-mcus-and-mpus-programming-manual-stmicroelectronics.pdf)
18. STMicroelectronics. (September 2019) “Description of STM32L4/L4+ HAL and low-layer drivers,” [Online]. Available: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00173145-description-of-stm32l4l4-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00173145-description-of-stm32l4l4-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf)
19. D. Jahshan, P. Hutchinson, F. Tappero, C. Jarron, M. van den Berg. (17 Octubre 2021) “Comenzando en KiCad” [Online] Available: [https://docs.kicad.org/4.0/es/getting\\_started\\_in\\_kicad/getting\\_started\\_in\\_kicad.pdf](https://docs.kicad.org/4.0/es/getting_started_in_kicad/getting_started_in_kicad.pdf)
20. N.M. Cerón (Septiembre 2017) “Sensor LC para la medida de pequeñas deformaciones: aplicación en mallas abdominales,” *Memoria de Tesis presentada para optar al Título de Doctor en Microelectrónica y Sistemas Electrónicos* [Online] Available: <https://www.tdx.cat/handle/10803/454830#page=7>