



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIERÍA  
INDUSTRIAL VALENCIA

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA BIOMÉDICA**

# **ESTUDIO DEL USO DE CABEZALES DE LECTURA DE DISCOS ÓPTICOS PARA LA INTERROGACIÓN DE SENSORES FOTÓNICOS DE SILICIO POROSO**

AUTOR: KRISTIAN DAVID ESCALANTE RODRÍGUEZ

TUTOR: ALEJANDRO JOSÉ MARTÍNEZ ABIETAR

COTUTORES: SALVADOR PONCE ALCÁNTARA  
JAIME GARCÍA RUPÉREZ

**Curso Académico: 2019-20**

## Agradecimientos

A Salva, por haberme acompañado en cada paso del proyecto y estar siempre dispuesto a darme su apoyo, por haberme enseñado que con ingenio y esfuerzo puedes resolver casi cualquier problema y por haberme guiado a pesar de las circunstancias, sin él no este trabajo no habría sido posible.

A Jaime y Alejandro por haberme confiado en mí para este proyecto.

A mi familia, especialmente a mis padres, por haberme dado la oportunidad de estudiar lo que me apasionaba, por haberme apoyado desde el primero de estos cuatro años y ser un pilar indispensable durante toda esta travesía.

A mis amigos de Tenerife, por permanecer ahí a pesar de la distancia y acompañarme durante los primeros compases de esta andadura.

Y a las personas que he conocido en Valencia, especialmente a todos esos amigos que me llevo de la carrera, gracias por haberme acogido y por ser mi familia en esta ciudad. Han sido cuatro años maravillosos que han cambiado mi vida como nada lo había hecho y donde me habéis enseñado el verdadero significado de la amistad.

Una etapa se acaba, pero tengo la certeza de que esto no es un adiós, sino un hasta luego.

Incendiamos el mundo otra vez.

BioR.

Muchas gracias a todos

## Resumen

Hace ya varios años que se comenzó a desarrollar la tecnología de lo que hoy llamamos biosensores. Muchos de estos dispositivos son muy comunes en la sociedad y su uso está muy extendido y democratizado, como los glucómetros que utilizan las personas diabéticas o la famosa prueba de embarazo.

Sin embargo, en los últimos años se ha avanzado mucho en la investigación y desarrollo de nuevos biosensores más pequeños, baratos, sensibles, con menor tiempo de respuesta y portables. En línea con lo comentado, los biosensores fotónicos basados en capas de silicio poroso tienen una gran proyección de futuro. Su funcionamiento se basa en funcionalizar la superficie interna de los poros y hacer fluir por encima una solución acuosa que penetra en los poros. Si esta contiene el analito buscado, el índice de refracción del silicio poroso cambia, lo cual puede detectarse usando un espectrómetro.

El principal problema es que el equipamiento para la interrogación de los sensores es costoso, siendo en general superior a 3000 €. Este precio puede hacer que su implantación a gran escala sea difícil. Por estas razones, en este trabajo se plantea el diseño de un set-up de medida basado en un cabezal de lectura óptica, como el que se encuentra en los DVD. Estos componentes no superan los 10 €, abaratando los mencionados costes sustancialmente.

Para analizar esta posibilidad, se utilizó un cabezal óptico comercial. Se diseñó un soporte impreso en 3D para soportar el cabezal, bajo el cual se sitúa la muestra a caracterizar, y se completó el montaje con un canal de microfluídica para hacer las pruebas, empleando fluidos en tiempo real. Para poder procesar la señal de salida del cabezal DVD se utilizó un microcontrolador Arduino, y se escribió un programa en Python que permite capturar todos los datos. Además, se construyó un circuito de acondicionamiento, para adaptar la señal de salida del cabezal de DVD al rango de entrada del conversor analógico-digital (A/D) de Arduino.

A pesar de las diferentes complicaciones surgidas, se han podido realizar medidas que demuestran la capacidad del equipo. Sin embargo, las propias características del cabezal DVD hacen que no sea óptimo su uso con la finalidad establecida en este proyecto. Para trabajos futuros, se propone sustituir el láser del cabezal por uno más potente y el fotodiodo por uno con una superficie mayor, mientras se continúa usando la óptica del cabezal.

**Palabras clave:** *biosensores; silicio poroso; interferometría óptica; fotónica; sensado; cabezal DVD.*

## Resum

Fa ja prou anys que s'ha començat a desenvolupar la tecnologia del que hui nomenem biosensors. Molts d'aquests dispositius són molt comuns en la societat i el seu ús està estès i democratitzat, com els glucòmetres que utilitzen les persones diabètiques o la famosa prova de l'embarç.

Però, en els últims anys s'ha avançat molt en la investigació i el desenvolupament de nous biosensors més xicotets, barats, sensibles, en menys temps de resposta i portables. Seguint la línia del comentat, els biosensors fotònics basats en capes de silici porós tenen una gran projecció de futur. El seu funcionament es basa en funcionalitzar la superfície interna dels pors i fer fluir per damunt una solució aquosa que penetra en els porus. Si esta conté l'anàlit buscat, l'índex de refracció del silici porós canvia, la qual cosa pot detectar-se usant un espectròmetre.

El principal problema és que l'equip per a la interrogació dels sensors és costós, sent en general superior a 3000 €. Aquest preu pot fer que la seua implementació a gran escala siga difícil. Per aquestes raons, en aquest treball es planteja el disseny d'un set-up de mesura basat en un capçal de lectura òptica, com el que és troba en els DVD. Aquests components no superen els 10 €, abaratint els anomenats costos substancialment.

Per a analitzar aquesta possibilitat, es va utilitzar un capçal òptic comercial. Es va dissenyar un suport imprès en 3D per a suportar el capçal, sota el qual es situà la mostra a caracteritzar, i es complementà el muntatge en un canal de microfluídica per fer les proves, gastant fluids a temps real. Per a poder processar la senyal d'eixida del capçal DVD es va gastar una placa Arduino, i es va escriure un programa en Python que permet capturar totes les dades. A demès, es va construir un circuit d'acondicionament, per adaptar la senyal d'eixida del capçal de DVD al rang d'entrada del convertidor analògic-digital (A/D) d'Arduino.

Malgrat les diferents complicacions sorgides, s'han pogut realitzar mesures que demostren la capacitat de l'equip. Però, les pròpies característiques del capçal DVD fan que no siga òptim el seu ús amb la finalitat establida en aquest projecte. Per a treballs futurs, es proposa substituir el làser del capçal per un més potent i el fotodíode per un amb una superfície major, mentre es continua usant l'òptica del capçal.

**Paraules clau:** *Biosensors; silici porós; interferometria òptica; fotònica; sensat; capçal DVD*

## Abstract

The development of the biosensor's technology began several years ago. Some of these devices are very common in our society, and their use is widespread and democratized, such as the glucometers used by diabetic people, or the famous pregnancy test.

However, in recent years much progress has been made in the research and development of new, smaller, cheaper and more sensitive biosensors, with shorter response times and more portable. In line with the aforementioned, photonic biosensors based on porous silicon layers have a great future projection. Its operation is based on functionalizing the inner surface of the pores and making flow over then an aqueous solution that penetrates the pores. If it contains the desired analyte, the refractive index of the porous silicon changes, which can be detected using a spectrometer.

The main problem is that the equipment for the interrogation of the sensors is expensive, generally it's higher than 3000 €. This price can make difficult to implement it on a large scale. For these reasons, this work proposes the design of a measurement set-up based on an optical pick-up head, such as the one found in DVDs. These components do not exceed 10€, reducing the aforementioned costs substantially.

To analyse this possibility, a commercial optical pick-up head was used. A 3D printed support was designed to support the head, under which the sample to be characterized is located, and the assembly was completed with a microfluidic channel to carry out the tests using fluids in real time. In order to process the output signal of the DVD pick-up head, an Arduino board was used, and a Python program that allows all the data to be captured was written. In addition, a conditioning circuit was built, to adapt the output signal of the DVD pick-up head to the input range of the Arduino analogical-digital (A/D) converter.

Despite the different complications that have arisen, it has been possible to carry out measures that demonstrate the possibilities of the equipment. However, the characteristics of the DVD pick-up head make it not optimal for use with the purpose established in this project. For future work, it is proposed to replace the laser with a more powerful one and the photodiode with one with a larger surface area, while continuing to use the pick-up head optics.

**Keywords:** *biosensors; porous silicon; optical interferometry; photonics; sensing; DVD pick-up head.*

## Documentos contenidos en el TFG:

- **Memoria**
- **Presupuesto**
- **Anexos**

Documento

# Memoria

Estudio del uso de cabezales de lectura de discos  
ópticos para la interrogación de sensores fotónicos  
de silicio poroso

AUTOR: KRISTIAN DAVID ESCALANTE RODRÍGUEZ

TUTOR: ALEJANDRO JOSÉ MARTÍNEZ ABIETAR

Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica, Universidad Politécnica de Valencia

COTUTOR: SALVADOR PONCE ALCÁNTARA

Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica, Universidad Politécnica de Valencia

COTUTOR: JAIME GARCÍA RUPÉREZ

Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica, Universidad Politécnica de Valencia

CURSO 2019-2020

## Índice

<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Motivación</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3. Introducción y estado del arte</b> .....	<b>2</b>
1.3.1 Los biosensores.....	2
1.3.2. Biosensores ópticos .....	5
1.3.3. Biosensores de silicio poroso .....	8
1.3.4. Cabezales de lectura ópticos.....	14
<b>Capítulo 2. Diseño, funcionamiento y montaje del set-up.</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1. Características técnicas del cabezal óptico</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2. Caracterización del funcionamiento del cabezal</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3. Adecuación de la tensión procedente de los fotodiodos</b> .....	<b>26</b>
<b>2.4. Diseño y montaje del set-up definitivo</b> .....	<b>30</b>
<b>2.5. Diseño del circuito impreso</b> .....	<b>33</b>
<b>2.6. Resumen de las primeras medidas realizadas</b> .....	<b>36</b>
<b>Capítulo 3. Diseño y funcionamiento del software</b> .....	<b>37</b>
<b>Capítulo 4. Validación experimental del set-up</b> .....	<b>41</b>
<b>4.1. Caracterización estática del set-up de medida</b> .....	<b>41</b>
4.1.1. Caracterización de muestras con diferentes reflectividades .....	41
4.1.2. Caracterización de muestras con distintas capas de anti reflectantes .....	43
<b>4.2. Medidas de sensado fluyendo en tiempo real</b> .....	<b>50</b>
<b>Capítulo 5. Discusión, conclusiones y líneas futuras</b> .....	<b>57</b>
<b>5.1. Posibles líneas de trabajo futuras</b> .....	<b>59</b>
<b>5.2. Conclusiones</b> .....	<b>60</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>62</b>

## Tabla de ilustraciones

<b>Figura 1:</b> Representación esquemática de un biosensor (Bhalla et al., 2016). .....	3
<b>Figura 2:</b> Ejemplos representativos de sensores wearables (Kim et al., 2019). .....	5
<b>Figura 3:</b> Representación de un biosensor basado en SPR. La luz incidente interactúa con el conductor e induce el fenómeno de SPR. Cuando receptor y analito se unen, la variación en el índice de refracción cambia la velocidad de propagación del plasmón de superficie, lo cual se puede detectar en la luz reflejada que es recogida por un detector (elaboración propia).....	6
<b>Figura 4:</b> (a) Ejemplo de nanoestrellas de oro que pueden utilizarse en sensores basados en LSPR (Mayer & Hafner, 2011). (b) Estructura de un resonador óptico en forma de anillo. Se puede ver tanto la guía de onda del propio resonador como la que transporta la luz hasta el mismo (Baaske & Vollmer, 2012). (c) Estructura de un cristal fotónico al microscopio electrónico de barrido usado para la detección del VIH (Shafiee et al., 2014).....	7
<b>Figura 5:</b> Esquema de una celda electrolítica usada para fabricar silicio poroso (Martín Sánchez, 2019).....	8
<b>Figura 6:</b> Ejemplo de la distribución de las cargas libres en el fondo de los poros durante el proceso de anodización para formar el cristal de silicio poroso. Se ilustra también la dirección de crecimiento en vertical de los poros (Martín Sánchez, 2019). .....	10
<b>Figura 7:</b> Celda electroquímica usada para preparar PSi mediante electrolito basado en HF, bajo polarización anódica e iluminando una oblea de silicio tipo N (Harras, 2014). .....	10
<b>Figura 8:</b> Imagen FESEM de capas de PSi fabricado mediante ataque electroquímico empleando distintas densidades de corriente. (a) HF:EtOH 2:1, $I = 650 \text{ mA/cm}^2$ , $T = 30\text{s}$ and (b) HF:EtOH 2:1, $I = 730\text{mA/cm}^2$ , $T = 30\text{s}$ . En este segundo caso, la capa de PSi fue tratada con una solución de 0.1 M de NaOH durante 2 minutos (Martín-Sánchez et al., 2019). .....	11
<b>Figura 9:</b> Esquema de un biosensor interferométrico basado en silicio poroso. Se puede ver como la cara interna de los poros está funcionalizada con moléculas que reconocen un analito específico. Una fuente de luz envía un haz que incide sobre la capa de PSi, donde es reflejado. Posteriormente es recogido por un detector, que es el que permite detectar el cambio en el índice de refracción (Lin et al., 1997). .....	11
<b>Figura 10:</b> Arriba: interferencia constructiva entre dos ondas en fase de la misma amplitud, la señal resultante es una sinusoidal con el doble de amplitud. Abajo: interferencia destructiva entre dos ondas a contrafase y misma amplitud, el resultado es una señal plana de amplitud cero. ....	12
<b>Figura 11:</b> Ejemplo del patrón de reflectividades recogido tras hacer incidir un haz de luz sobre una muestra de PSi y analizar la luz reflejada con un espectrómetro. Se pueden ver picos en la luz reflejada, que corresponden a las longitudes de onda para las que existen interferencias	

constructivas. Mientras que los valles son las longitudes de onda para las que existen más interferencias destructivas.....	13
<b>Figura 12:</b> Representación del funcionamiento de un interferómetro de Fabry-Perót. Los haces de luz salientes interfieren entre sí para generar el patrón sinusoidal que se puede visualizar en el espectrómetro (elaboración propia).....	14
<b>Figura 13:</b> Comparación entre el tamaño de un LD y de un DVD ( <i>File:LDDVDComparison-Mod.Png - Wikimedia Commons</i> , n.d.).....	15
<b>Figura 14:</b> Esquema de la disposición interna de los componentes de un cabezal de lectura óptica (Chu & Chiu, 2007). .....	15
<b>Figura 15:</b> (a) Esquema del proceso de lectura de la superficie del disco. (b) Cambio de alineación del punto de luz sobre el array de fotodiodos al detectarse la muesca ( <i>La Tecnología Del DVD</i> , n.d.; Russell-Pavier et al., 2018). .....	16
<b>Figura 16:</b> Esquema del microscopio de fuerza atómica de alta velocidad diseñado por Russell-Pavier et al., (2018). .....	17
<b>Figura 17:</b> Esquema de un set up de medida utilizado para realizar pruebas de sensado con capas de silicio poroso (Lin et al., 1997). .....	18
<b>Figura 18:</b> (a) Esquema de un interferómetro de Fabry-Pérot basada en una capa de PSi durante un paso de sensado. (b) Modificación y (c) desplazamiento que puede sufrir el espectro durante el paso de sensado. En este caso, el paso de sensado consistió en fluir un 20% De alcohol isopropílico. ....	19
<b>Figura 19:</b> Diagrama de bloques del set-up de medida planteado. ....	20
<b>Figura 20:</b> Vistas anterior (a) y posterior (b) del cabezal utilizado. En la vista posterior se ha retirado la protección que cubre la óptica interna del dispositivo con el fin de ilustrar su disposición. ....	21
<b>Figura 21:</b> (a) Disposición de los fotodiodos en el modo DVD. (b) Disposición de los fotodiodos en el modo CD. ....	21
<b>Figura 22:</b> Vista del cabezal con las varillas de sujeción insertadas en los soportes laterales (Las varillas están recortadas en la imagen). .....	22
<b>Figura 23:</b> Esquema eléctrico del cabezal de DVD extraído de la hoja de características del fabricante .....	23
<b>Figura 24:</b> Conector (a) y cables (b) utilizados para la comunicación con el cabezal. ....	24

ESTUDIO DEL USO DE CABEZALES DE LECTURA DE DISCOS ÓPTICOS PARA LA INTERROGACIÓN DE  
SENSORES FOTÓNICOS DE SILICIO POROSO

<b>Figura 25:</b> Soporte construido para las primeras pruebas junto a dos muestras, un espejo de aluminio y uno de silicio. ....	25
<b>Figura 26:</b> Circuito empleado para el acondicionamiento de la señal. ....	26
<b>Figura 27:</b> Esquema de la disposición interna de los cables de un conector USB.....	28
<b>Figura 28:</b> Representación de las medidas con línea de tendencia y barras de error. ....	29
<b>Figura 29:</b> Vista superior del montaje preliminar del set-up. Se pueden ver las barras originales y el soporte extraído de la unidad DVD .....	30
<b>Figura 30:</b> Vista lateral del montaje preliminar del set-up. Se pueden ver los postes, la plataforma y el posicionador debajo del cabezal.....	31
<b>Figura 31:</b> Montaje definitivo del set up. Los tornillos de cabeza delgada son los que controlan la inclinación del plano, mientras que los gruesos evitan que se mueva el set-up. También se puede ver la adaptación realizada en la placa ThorLabs y una muestra colocada entre los imanes de neodimio. ....	32
<b>Figura 32:</b> Nuevo esquema del circuito al utilizar el amplificador AMP02. $V_1$ corresponde a la salida del fotodiodo y $V_2$ a la tensión de referencia. ....	33
<b>Figura 33:</b> Esquema del circuito electrónico a imprimir.....	34
<b>Figura 34:</b> Diseño de la placa para el circuito impreso, a doble cara, con pistas de 1 mm. ....	35
<b>Figura 35:</b> Vista 3D de la placa del circuito impreso. ....	35
<b>Figura 36:</b> Ventana principal .....	37
<b>Figura 37:</b> Ventana para especificar los parámetros de la medida. ....	38
<b>Figura 38:</b> Ventana donde se muestran los datos adquiridos en tiempo real. Solo se muestran 200 muestras por pantalla a la vez, pues el gráfico se actualiza en tiempo real. En el eje de ordenadas se muestra la tensión medida en voltios, y el de abscisas el número de muestras. ....	39
<b>Figura 39:</b> Ventana donde se visualizan las medidas directamente desde el software. En el eje de abscisas se indica el número de muestras, mientras que en el de ordenadas la tensión medida. Se puede apreciar el ruido que está presente durante la captura de los datos. ....	39
<b>Figura 40:</b> Captura del script utilizado para controlar el Arduino .....	40

<b>Figura 41:</b> Medida de la potencia reflejada por una placa de silicio. La diferencia entre la tensión de salida y la línea base es de en torno a 0,3 V; para una reflectividad de en torno a 34%. .....	42
<b>Figura 42:</b> Medida de la potencia reflejada por una oblea de silicio con una capa de óxido de silicio de aproximadamente 3 $\mu\text{m}$ de espeso. La diferencia entre la tensión de salida y la línea base es de en torno a 0,16 V; para una reflectividad del 23,48%. .....	42
<b>Figura 43:</b> Repetitividad en la medida de una oblea de silicio pulida por parte del set-up realizado en este proyecto.....	43
<b>Figura 44:</b> Muestras utilizadas para la prueba. (1) Oblea SOI, 2 $\mu\text{m}$ de óxido + 200 nm de Si; (2) Capa de 3 $\mu\text{m}$ de $\text{SiO}_2$ ; (3) $\text{SiN}_x$ – 275 nm, (4) $\text{SiN}_x$ – 1 $\mu\text{m}$ ; (5) $\text{SiN}_x$ - 193 nm, (6) $\text{SiN}_x$ - $\text{SiO}_2$ (97 y 136 nm respectivamente). .....	44
<b>Figura 45:</b> Reflectividad de las muestras al examinarlas con el espectrómetro. La línea central resalta la respuesta de cada una a una longitud de onda de 650 nm, que coincide con la emisión del cabezal DVD. ....	45
<b>Figura 46:</b> Respuesta del set-up ante una muestra SOI antes y después de procesarla. ....	46
<b>Figura 47:</b> Respuesta del set-up ante una muestra de $\text{SiO}_2$ antes y después de procesarla. ....	46
<b>Figura 48:</b> Respuesta del set-up ante una capa AR de $\text{SiN}_x$ de 275 nm, antes y después de procesarla. ....	47
<b>Figura 49:</b> Respuesta del set-up ante una capa AR de $\text{SiN}_x$ de 1 $\mu\text{m}$ de espesor, antes y después de procesarla. ....	47
<b>Figura 50:</b> Respuesta del set-up ante una capa AR de $\text{SiN}_x$ 193 nm, antes y después de procesarla. ....	48
<b>Figura 51:</b> Respuesta del set-up ante una capa AR de $\text{SiO}_2$ - $\text{SiN}_x$ de 97 y 136 nm respectivamente, antes y después de procesarla. ....	48
<b>Figura 52:</b> Comparación entre las respuestas del set-up de medida a las seis muestras utilizadas en este apartado, después de su procesado. ....	49
<b>Figura 53:</b> Relación entre la tensión de salida (en voltios) y la reflectividad de cada muestra (en %). Se ha añadido una línea de tendencia y el coeficiente de correlación para mostrar la relación lineal existente entre estas dos variables. ....	50
<b>Figura 54:</b> Celda de medida realizada para la caracterización de muestras fluyendo en tiempo real. ....	51

ESTUDIO DEL USO DE CABEZALES DE LECTURA DE DISCOS ÓPTICOS PARA LA INTERROGACIÓN DE  
SENSORES FOTÓNICOS DE SILICIO POROSO

<b>Figura 55:</b> Set-up preparado para realizar medidas de sensado en tiempo real. ....	51
<b>Figura 56:</b> Comparativa entre la reflectividad de la muestra con y sin metacrilato medida con el espectrómetro. Se puede apreciar un pequeño cambio en la reflectividad a 659 nm. ....	52
<b>Figura 57:</b> Desplazamiento del espectro de una capa de silicio poros al fluir DIW e IPA. El cambio de la reflectividad a 650 nm es notable, por lo que debería apreciarse al medir con el set-up diseñado. ....	53
<b>Figura 58:</b> Variación de la reflectividad de la capa de silicio poroso al fluir DIW y PBS. En este caso, la diferencia en la reflectividad a 650 nm es pequeña. ....	53
<b>Figura 59:</b> Prueba de sensado fluyendo DIW e IPA sobre una capa de silicio poroso. ....	54
<b>Figura 60:</b> Señal de la prueba de sensado sin procesar. ....	55
<b>Figura 61:</b> Prueba con DIW e IPA al 50%. Se puede ver como la señal tiene una deriva y que va disminuyendo a lo largo del tiempo, mientras que no se puede apreciar el cambio entre ambos líquidos. ....	56
<b>Figura 62:</b> Comparativa entre la intensidad del láser del cabezal de DVD y la del láser de un puntero comercial. (a) Spot de luz del láser del cabezal; (b) Spot de luz del puntero láser. ....	59

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Asignación de funciones de cada uno de los pines. Extraído de la hoja de características del fabricante. ....	22
<b>Tabla 2:</b> Medidas de tensión a la salida del circuito sin amplificar la señal ni eliminar el offset. ....	28
<b>Tabla 3:</b> Medidas de tensión a la salida del circuito tras eliminar el offset y amplificar la señal.....	29
<b>Tabla 4:</b> Valores de reflectividad de cada una de las muestras a analizar .....	44
<b>Tabla 5:</b> Valor promedio de la respuesta obtenida para cada muestra después de haber procesado la señal.....	49
<b>Tabla 6:</b> Comparativa entre la respuesta con y sin metacrilato encima de un espejo de aluminio. Las pérdidas que este ocasiona se sitúan en una media de 29,28% menos de tensión de salida. ....	58

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Motivación

Hoy en día la medicina es uno de los campos que más rápido evolucionan. Constantemente se diseñan nuevas tecnologías, técnicas o fármacos que mejoran nuestra calidad de vida. Además, cada día que pasa se avanza más hacia un nuevo modelo sanitario basado en la medicina preventiva, personalizada y de precisión. Es aquí donde entra en juego la importancia que pueden tener en el futuro los biosensores.

En la actualidad, las personas diabéticas pueden controlar de forma muy sencilla su nivel de glucosa en sangre gracias al glucómetro. Se trata de un dispositivo portable y sencillo de manejar que utiliza un biosensor para desempeñar su trabajo. Este mismo principio se podría aplicar para el control y el diagnóstico de muchas enfermedades, como el VIH y determinados biomarcadores de algunos tipos de cáncer, e incluso la presencia de determinadas sustancias en el cuerpo como drogas o toxinas.

Es aquí donde entra en juego el desarrollo de los nanosensores fotónicos, que aprovechan el comportamiento óptico de determinados materiales a escalas nanométricas. En este proyecto se utilizarán nanosensores de silicio poroso (PSi). Para poder utilizar esta tecnología, el interior de los nanoporos debe ser funcionalizado de cara a reconocer una determinada sustancia que podría encontrarse en un líquido que fluyese sobre la capa porosa. La reacción de reconocimiento del analito dará lugar a un cambio en el índice de refracción del material, que puede ser medido al incidir sobre la oblea de PSi un haz de luz, recoger la parte reflejada y ser analizada con un espectrómetro para detectar el desplazamiento del patrón de interferencias.

Sin embargo, este tipo de equipamiento es un tanto costoso, pudiendo alcanzar solo el espectrómetro precios por encima de los 3000 €. Si comparamos esto con los precios que suelen tener los equipos hospitalarios puede incluso resultar barato. Sin embargo, si se pretende aplicar esta tecnología de forma individualizada para cada paciente, llevarla a la consulta de los médicos de cabecera, e incluso a las casas de los propios pacientes, este precio si puede resultar excesivo.

Por ello, la propuesta de este trabajo es utilizar un cabezal DVD para interrogar los sensores de PSi, pues haciendo uso del láser y el fotodiodo integrados en el dispositivo, se podría detectar el cambio de índice de refracción como una variación en la tensión de salida del fotodiodo al incidir la luz del láser reflejada por la muestra. Todo esto teniendo en cuenta que el precio del cabezal ronda los 10€, por lo que el abaratamiento del coste podría ser enorme. Aunque primero se deben estudiar sus posibilidades, hay que determinar características como su sensibilidad, estabilidad o el límite de detección.

## 1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es el diseño y la puesta en funcionamiento de un set-up de medida basado en el uso de un cabezal DVD para interrogar sensores de silicio poroso. La idea es aprovechar al máximo el potencial del cabezal, haciendo uso de los mecanismos inherentes a su diseño, como el diodo laser, el fotodiodo, el bus de comunicación o la lente de enfoque. De esta forma se pretende:

- **Estudiar el funcionamiento del cabezal.** Para ello es necesario tanto conocer su diseño de fabricación como su estructura interna. Además, se deben caracterizar las señales de entrada y salida del dispositivo para poder garantizar un control eficiente del mismo y una buena respuesta del sensor.
- **Diseñar el set-up.** Es necesario diseñar un montaje que permita realizar medidas de una forma sencilla y estable, y que evite en la medida de lo posible las influencias de las perturbaciones externas que pudiesen afectar a la medida. A su vez hay que diseñar los circuitos analógicos necesarios para el acondicionamiento de la señal procedente de los fotodiodos. También hay que utilizar conversores A/D para transformar dicha señal digital y realizar de forma rápida y sencilla su procesamiento, así como el intercambio de información con el ordenador.
- **Diseñar el software.** Resulta imprescindible implementar un programa que permita tanto recoger los datos desde el cabezal como enviar información al mismo, de cara a controlar el proceso de adquisición y facilitar un futuro tratamiento de los resultados.
- **Testar el dispositivo.** Para lo que será necesario hacer una serie de medidas de caracterización con diferentes muestras de prueba, así como realizar una prueba de sensado con una capa de PSi, empleando soluciones con distintos índices de refracción, las cuales fluirán sobre la capa en tiempo real.

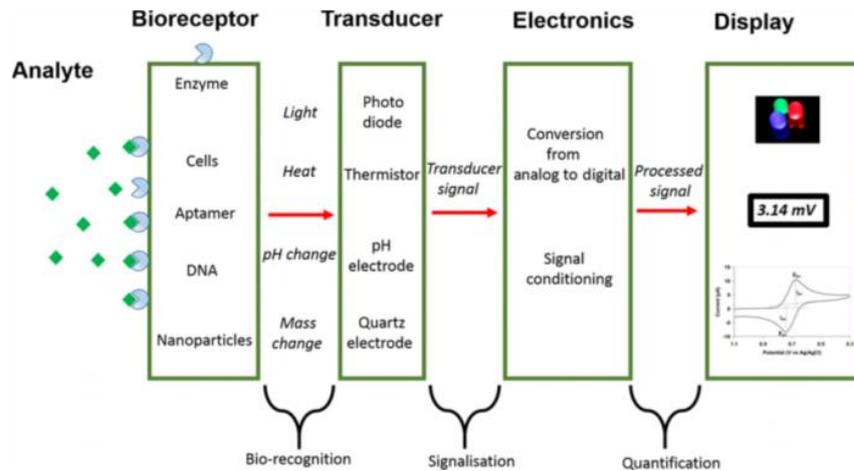
## 1.3. Introducción y estado del arte

### 1.3.1 Los biosensores

Los biosensores son dispositivos capaces de detectar una sustancia concreta, o analito (sustancia cuya presencia se quiere conocer), y de generar una señal que depende de la concentración de dicha sustancia en el medio a analizar. Este tipo de sensores son muy utilizados para la monitorización de pacientes, la detección de drogas, contaminación y el diagnóstico de enfermedades, basándose en la detección de biomarcadores o de los microorganismos causantes de una enfermedad determinada (Bhalla et al., 2016; Red Bio-Sens, n.d.).

La estructura general de los biosensores se puede representar de forma esquemática como se muestra en la figura 1. Los biosensores están constituidos por dos elementos fundamentales. Por un lado, poseen un receptor biológico capaz de reconocer de forma específica el analito de interés. Algunos de los más comunes son las enzimas y los anticuerpos, aunque pueden ser otro tipo de moléculas, como proteínas o cadenas de ADN. Por otro lado, deben poseer un transductor o sensor que sea capaz de transformar la energía intercambiada en la reacción de

reconocimiento a una señal medible. Lo más común es que esta señal sea de tipo óptico o eléctrico (Bhalla et al., 2016; Red Bio-Sens, n.d.).



**Figura 1:** Representación esquemática de un biosensor (Bhalla et al., 2016).

Normalmente, el receptor biológico está formado por una capa bioquímica de reconocimiento que trabaja en concordancia con el transductor para generar la señal en base a una reacción de afinidad. Para que esto suceda, ambos deben ser combinados siguiendo un procedimiento que dependerá del tipo de sensor a fabricar. Las técnicas más comunes de biofuncionalización son la adsorción física del receptor sobre la superficie del transductor, como ocurre en los sensores de glucosa; el atrapamiento de los biorreceptores en una red; la unión covalente, como al usar anticuerpos marcados con partículas fluorescentes; o la reticulación química (Chen & Wang, 2020; Martín Sánchez, 2019).

Como se puede ver en el párrafo anterior, uno de los ejemplos más sencillos de biosensor lo encontramos en el medidor de glucosa utilizado para controlar la diabetes. Este posee un biosensor donde una capa de enzimas glucosaoxidasas (receptor) favorecen la oxidación de la glucosa, lo que da lugar a una reacción de oxidación reducción que genera una corriente eléctrica en un electrodo (transductor), que es proporcional a la concentración de glucosa (Red Bio-Sens, n.d.).

Por otro lado, en la inmensa mayoría de las pruebas de sensado se hace necesario un acondicionamiento previo de la señal que genera el transductor para que esta pueda ser correctamente interpretada. Para ello se emplean circuitos electrónicos encargados de minimizar el ruido y las interferencias, amplificar la señal deseada y transformarla de analógica a digital, para luego poder procesarla mediante un microcontrolador o similar y poder mostrarla al usuario de una forma amigable y fácil de interpretar, ya sea mediante números, gráficos, imágenes, etc. (Bhalla et al., 2016; Red Bio-Sens, n.d.).

Todos los biosensores poseen una serie de características que son las que van a determinar su buen desempeño y utilidad. Bhalla et al. (2016) las definen de la siguiente manera:

- **Selectividad:** es la primera característica que debemos considerar a la hora de elegir biorreceptores y resulta, por lo tanto, la más importante de un biosensor. Se refiere a la habilidad que tiene un biorreceptor para detectar un analito en concreto dentro de una

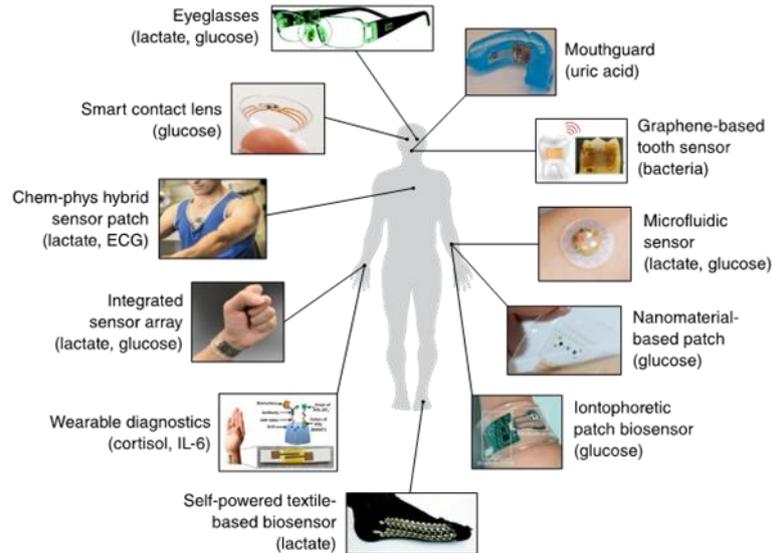
solución en la que pueden existir muchas sustancias diferentes. Es muy habitual que estos biorreceptores sean anticuerpos.

- **Reproducibilidad:** depende fundamentalmente de la precisión y la exactitud del sensor. Se refiere a la capacidad de este para generar una respuesta idéntica cuando se replica un mismo experimento.
- **Estabilidad:** es el grado en el que la respuesta del sensor en cuestión depende de las condiciones ambientales. Cuanto mayor sea esta dependencia, mayores serán las interferencias que introduzcan errores en la medida, y menores la precisión y exactitud del sensor. Hay otros factores que pueden influir en la estabilidad del sensor, como la afinidad del analito por el biorreceptor o la degradación de este último con el tiempo. Una forma de controlar estos efectos es mediante la introducción de circuitos electrónicos capaces de filtrar las interferencias y de mantener la estabilidad de la señal.
- **Sensibilidad:** es una propiedad muy importante del biosensor, ya que indica cuanto cambia la respuesta del sensor en función del cambio de concentración de la sustancia que se quiere detectar. Cuanto más alta sea, mayor será la respuesta del sensor ante pequeñas concentraciones del analito. Normalmente, una alta sensibilidad implica un menor límite de detección, es decir, que la mínima cantidad de analito que se puede detectar va a ser menor.
- **Linealidad:** se refiere a lo bien que se ajusta la respuesta del sensor en cuestión a una línea recta, donde la pendiente de esta sea igual a la sensibilidad.

En los últimos años, se han conseguido grandes avances en el desarrollo académico y la investigación de nuevas tipologías de biosensores que mejoran considerablemente las capacidades de estas herramientas para la detección de sustancias. Cada vez se diseñan dispositivos más precisos, capaces de detectar cantidades extremadamente pequeñas de analito, en menor tiempo, y con menores errores de reproducibilidad (Martín Sánchez, 2019).

Además, la utilización de nuevos materiales y los recientes desarrollos en nanotecnología posibilitan la fabricación de biosensores cada vez más pequeños, consiguiendo una miniaturización sin precedentes que llega incluso a la escala nanométrica. Un ejemplo interesante es el biosensor de índice de refracción estudiado por Claes et al., (2010), está basado en resonadores ópticos y es capaz de detectar variaciones del índice de refracción de  $8,3 \cdot 10^{-6}$  RIU (unidades de índice de refracción). Las ventajas asociadas a este tipo de sensor son la notable relación señal ruido, la necesidad de volúmenes más pequeños de muestra y la capacidad de detectar concentraciones ínfimas gracias al aumento de la relación superficie-volumen del sensor (Bhalla et al., 2016).

Por otro lado, desde la llegada de los *smartphones* y el reciente empuje de la telemedicina, las tecnologías IoT y los *wearables*, se está estimulando el desarrollo de un gran número de sensores no invasivos o mínimamente invasivos destinado a la monitorización constante de marcadores biológicos presentes en los biofluidos de los pacientes, como la sangre, la saliva o el líquido intersticial (Figura 2). La mayor parte de los esfuerzos se están concentrando en los sensores ópticos y electroquímicos y, mientras que algunos siguen en fases de desarrollo, otros han alcanzado un alto grado de madurez y han conseguido la aprobación para su uso y comercialización. Un ejemplo claro de este extremo es el sensor subcutáneo para la monitorización continua de la glucosa desarrollado por Eversense y recientemente aprobado por la FDA (Kim et al., 2019).



**Figura 2:** Ejemplos representativos de sensores wearables (Kim et al., 2019).

Sin embargo, a pesar de todos los avances que se están realizando a nivel académico en el desarrollo de todo tipo de biosensores y para detectar un gran número de biomoléculas, en la práctica, dejando de lado la prueba de embarazo y los biosensores de glucosa, realmente muy pocos han llegado a comercializarse a gran escala.

Esto es en parte debido a la gran cantidad de regulaciones que se debe seguir a la hora de llevar al mercado productos de carácter sanitario. Además, no se debe olvidar que las líneas de desarrollo de las empresas suelen seguir el flujo del mercado y siempre van de la mano con la obtención de beneficios. Por ello no es de extrañar que las compañías sean conservadoras a la hora de invertir en productos que pueden no llegar a ser un éxito comercial, ya sea porque puede que nunca llegue a obtener el visto bueno de las autoridades o porque no se encuentre un mercado lo suficientemente amplio para dicha tecnología (Bhalla et al., 2016).

### 1.3.2. Biosensores ópticos

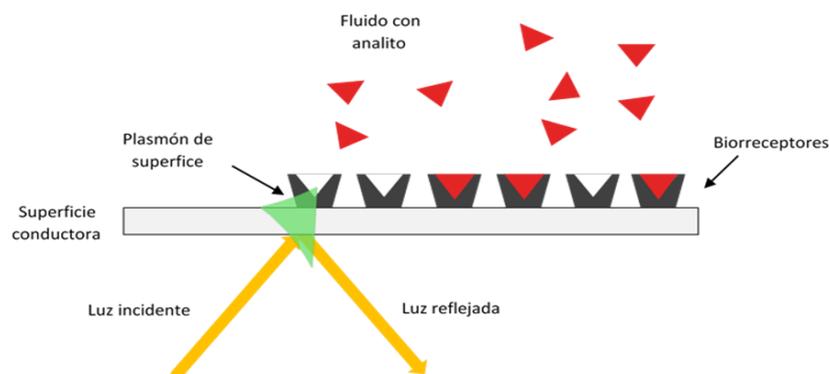
Los biosensores ópticos están siendo muy investigados actualmente. Este tipo de herramientas basan su capacidad de detección en los cambios inducidos en las propiedades ópticas del dispositivo debido a las reacciones de biorreconocimiento que tienen lugar en el biorreceptor. Estas variaciones inducen cambios en la luz que interactúa con el sensor, pudiéndose afectar, entre otros, a la frecuencia, la amplitud, la fase o la polarización. Algunas de sus ventajas más interesantes son la capacidad de realizar medidas a distancia, su poca o nula sensibilidad a las interferencias electromagnéticas, la capacidad de realizar medidas en tiempo real, su elevada sensibilidad ante bajas concentraciones de analito, su reducido tamaño y la capacidad de multiplexación (Karunakaran et al., 2015).

Los biosensores ópticos pueden ser clasificados en dos grandes grupos, dependiendo del protocolo de detección usado en cada uno:

- **Detección basada en fluorescencia:** como su nombre indica, en este grupo, las moléculas biorreceptoras están marcadas con una etiqueta fluorescente. La intensidad de dicha fluorescencia va a depender de la concentración de analito que exista en la solución analizada (Karunakaran et al., 2015). Este podría ser considerado un método de detección indirecta, pues los cambios producidos por la reacción de reconocimiento no pueden ser cuantificados sin la presencia de los marcadores, cuyos cambios de luminiscencia sí pueden ser medidos (Martín Sánchez, 2019).
- **Detección libre de etiquetas:** en este caso, las moléculas biorreceptoras no son alteradas de ninguna manera, por lo que realizan la detección en su estado natural (Karunakaran et al., 2015). En este caso, se dice que la transducción es directa, pues el propio transductor varía sus características ópticas en presencia del analito. Por ello, la forma en la que la radiación electromagnética se propaga por el transductor cambia, dando lugar a alteraciones en propiedades como la dispersión, la polarización o la refracción (Martín Sánchez, 2019). Son este tipo de sensores los que se abordarán en el presente trabajo.

Dentro de este último grupo, los dispositivos más extendidos y estudiados actualmente son los sensores basados en la resonancia del plasmón de superficie (SPR). Este es un efecto que se produce cuando una onda electromagnética incide sobre la superficie de un conductor y algunos de sus fotones interactúan con los electrones del material, haciéndolos oscilar. Estos sensores con capaces de medir variaciones del índice de refracción del orden de  $10^{-7}$  a  $10^{-6}$  RIU (Martín Sánchez, 2019; Pérez-Luna, 2005).

Este tipo de sensores poseen una región funcionalizada con biorreceptores que se encuentran sobre una fina capa conductora. Cuando sobre la zona de detección se hace fluir un líquido que contenga el analito para el que el sensor fue diseñado, tendrá lugar una reacción de reconocimiento entre este y los biorreceptores de la superficie, que inducirá un cambio en el índice de refracción en las proximidades de la superficie del conductor. Esta variación se traduce en un cambio en la velocidad a la que se propaga el plasmón de superficie, y que puede ser detectado en las propiedades del haz de luz que está acoplado al plasmón (Piliarik et al., 2009). Este fenómeno se ilustra en la figura 3.



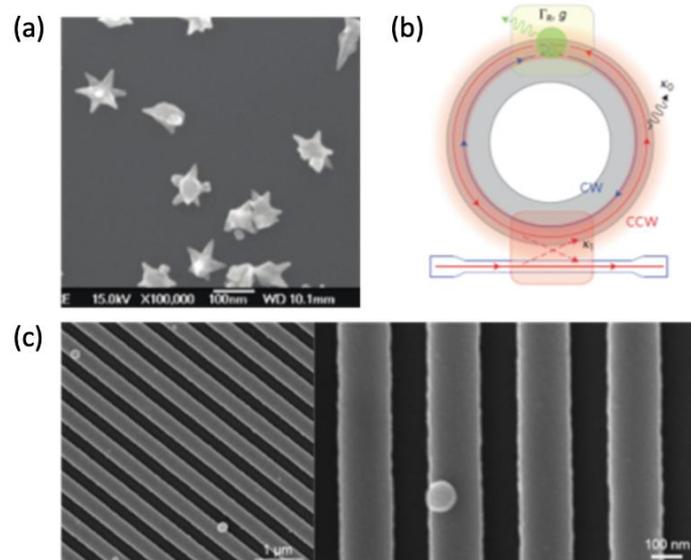
**Figura 3:** Representación de un biosensor basado en SPR. La luz incidente interactúa con el conductor e induce el fenómeno de SPR. Cuando receptor y analito se unen, la variación en el índice de refracción cambia la velocidad de propagación del plasmón de superficie, lo cual se puede detectar en la luz reflejada que es recogida por un detector (elaboración propia).

Además de estos, existen otros tipos de biosensores ópticos de transducción directa (figura 4), como los sensores interferométricos, que se tratarán más adelante pues en ellos se basa el trabajo realizado en este documento. Además, están los sensores basados en plasmones de superficie localizados (LSPR), cuyo funcionamiento se basa en el uso de nanopartículas, pues este efecto se produce cuando la partícula sobre la que incide la luz tiene un tamaño comparable a la longitud de onda del haz, provocando que el plasmón quede confinado en ella, sin desplazarse como lo haría sobre un metal de mayor tamaño (Mayer & Hafner, 2011).

Por otro lado, están los resonadores ópticos, que dan lugar a biosensores muy sensible. Utilizan cavidades ópticas capaces de confinar la luz en su interior mediante la reflexión total interna. Esta luz confinada interfiere consigo misma, permitiendo que solo unas longitudes de onda determinadas permanezcan confinadas dentro del resonador, las llamadas frecuencias de resonancia. Estas pueden ser interpretadas con un fotodetector, y cambian cuando se produce la reacción de reconocimiento entre analito y receptor (Baaske & Vollmer, 2012).

También se tienen los cristales fotónicos, que emplean materiales microestructurados en los que se intercalan periódicamente dos o más materiales de distinto índice de refracción que van a ser capaces de manipular la luz que incide sobre ellos a la escala de la longitud de onda, produciendo efectos como una variación en las longitudes de onda reflejadas, que se puede detectar como un cambio en el color de la luz reflejada (Chen & Wang, 2020).

Por último, están los sensores basados en fibra óptica que, en contraste con los anteriores, que suelen requerir de un equipamiento más complejo tanto para su producción como para su manejo, son más baratos y fáciles producir y utilizar. Esto, junto a la facilidad con la que pueden ser usados en aplicaciones *in vivo* hace que presenten buenas perspectivas de cara a su futura comercialización (Chen & Wang, 2020; Martín Sánchez, 2019).

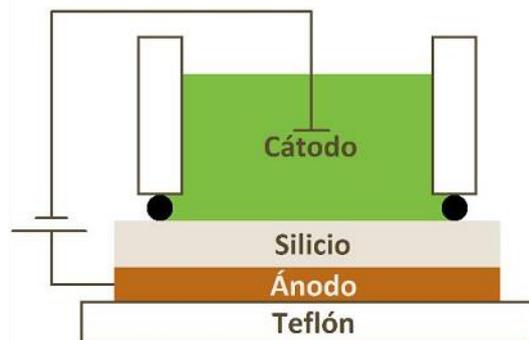


**Figura 4:** (a) Ejemplo de nanoestrellas de oro que pueden utilizarse en sensores basados en LSPR (Mayer & Hafner, 2011). (b) Estructura de un resonador óptico en forma de anillo. Se puede ver tanto la guía de onda del propio resonador como la que transporta la luz hasta el mismo (Baaske & Vollmer, 2012). (c) Estructura de un cristal fotónico al microscopio electrónico de barrido usado para la detección del VIH (Shafiee et al., 2014).

### 1.3.3. Biosensores de silicio poroso

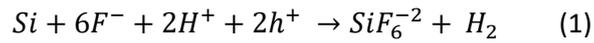
El silicio poroso (PSi) no es una tecnología precisamente nueva, pues fue descubierto en 1956 por Arthur e Ingeborg Uhlir (Uhlir, 1956), aunque su naturaleza porosa y sus propiedades no fueron desveladas hasta más tarde por Watanabe et al., (1975). Se trata de un material nanoestructurado que, actualmente, responde a una gran variedad de aplicaciones en optoelectrónica y biomedicina, especialmente desde que se descubrió que es capaz de emitir fotoluminiscencia en el rango visible del espectro, y de variar su índice de refracción. La razón de que además sea un material muy interesante para su uso en biomedicina es la elevada superficie específica con la que cuenta a causa de su estructura porosa, lo cual permite disponer de una gran región funcionalizada, aumentando la sensibilidad de un posible sensor ante concentraciones muy pequeñas de analito. Además, es un compuesto biocompatible, biodegradable y fácilmente funcionalizable con anticuerpos, enzimas o proteínas (Kilian et al., 2009; Martín Sánchez, 2019).

Una de las formas más habituales de fabricar el PSi es mediante la técnica de ataque electroquímico. Se trata de un proceso de anodización que genera poros en el substrato de silicio debido a la oxidación de este en presencia de oxígeno, para su posterior disolución en ácido fluorhídrico (HF). Para llevar a cabo este proceso, se coloca una oblea de silicio en el ánodo de una celda electroquímica (figura 5) en presencia de un electrolito compuesto por HF y, generalmente, etanol (EtOH) (Harraz, 2014). Aunque también es posible sustituir este último por otras soluciones orgánicas (Martín-Sánchez et al., 2019). Esta técnica habitualmente se realiza de forma galvanostática, con una observación rigurosa de la corriente circulante, para permitir un mayor control del tamaño del poro.

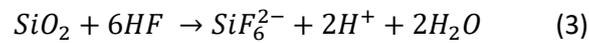


**Figura 5:** Esquema de una celda electroquímica usada para fabricar silicio poroso (Martín Sánchez, 2019)

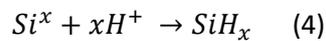
El proceso de formación de los poros solo es posible gracias a que el campo eléctrico suministrado en la celda es capaz de aportar las cargas eléctricas necesarias para que se produzcan las dos reacciones químicas que dan lugar a los poros. La primera de ellas es la disolución directa del silicio, gracias a una reacción entre este y el flúor disuelto en el electrolito, que es posible debido a la presencia de cargas libres en el ánodo. Este proceso trae consigo la liberación de hidrógeno y está regido por la ecuación 1 (Martín Sánchez, 2019; Sailor, 2011).



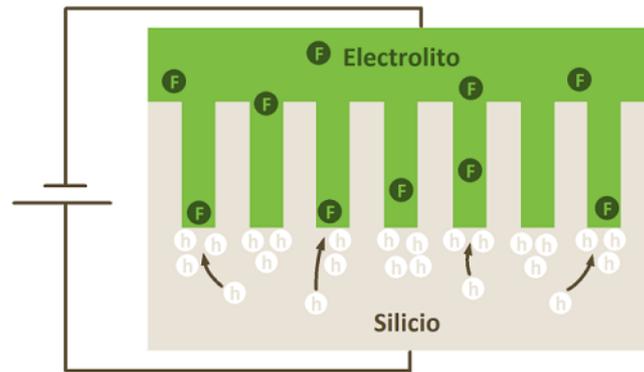
La segunda reacción implicada realmente se descompone en dos reacciones que ocurren de forma simultánea. En primer lugar, está la reacción de oxidación del silicio, que ocurre de forma espontánea en presencia de oxígeno, en este caso en el agua (Ecuación 2). De este modo, se forma una capa de óxido de silicio sobre la superficie de la muestra, que la pasiva y en condiciones normales la protegería. Sin embargo y gracias a la gran electronegatividad del flúor, en presencia de HF la capa de óxido de silicio se puede disolver, al romperse los enlaces Si-O y formarse enlaces Si-F, que son los únicos más fuertes que los anteriores y, por lo tanto, son termodinámicamente favorables (Sailor, 2011). Nuevamente este proceso no sería posible sin la presencia de cargas libres. La ecuación 3 muestra cómo sería químicamente esta reacción.



Una vez se disuelve el silicio y comienza la formación de los poros, los átomos que han quedado expuestos reaccionan con el hidrógeno y dan lugar a una reacción de pasivación que genera una estructura más estable gracias a la formación de enlaces Si-H. Este proceso se rige por la ecuación 4, donde la “x” representa el número de enlaces covalentes que ha perdido el silicio (Martín Sánchez, 2019).

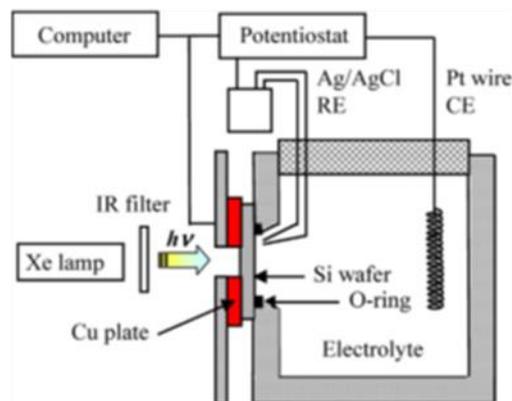


A partir del inicio de la reacción, el proceso de crecimiento de los poros se desarrolla exclusivamente en vertical como se aprecia en la figura 6, por lo que, una vez comienza su formación, estos no pueden aumentar su tamaño. Esto es así debido a que en las paredes laterales no hay cargas libres que puedan activar las reacciones anteriores, puesto que estas se concentran exclusivamente en el fondo del poro. Esto sucede por dos razones principales, una de ellas es que cuanto más decrece el ancho de las paredes, más dificultades tienen para transportar las cargas libres. La otra es que, por el contrario, el gran radio de curvatura que posee el fondo del poro las atrae y las concentra (Föll et al., 2002; Sailor, 2011).



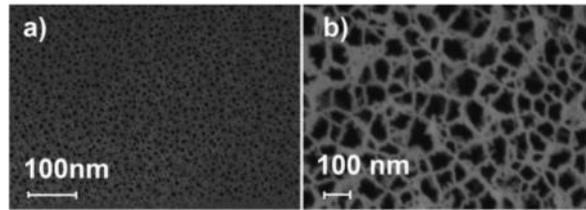
**Figura 6:** Ejemplo de la distribución de las cargas libres en el fondo de los poros durante el proceso de anodización para formar el cristal de silicio poroso. Se ilustra también la dirección de crecimiento en vertical de los poros (Martín Sánchez, 2019).

Es importante destacar que este proceso puede realizarse tanto para Si dopado de tipo P, siendo esta la técnica predominante, como de tipo N, aunque este último debe ser iluminado para que se generen los poros necesarios durante el proceso de disolución (Harraz, 2014). Un esquema de una celda electroquímica empleada para silicio tipo N se muestra en la siguiente figura.



**Figura 7:** Celda electroquímica usada para preparar P*Si* mediante electrolito basado en HF, bajo polarización anódica e iluminando una oblea de silicio tipo N (Harraz, 2014).

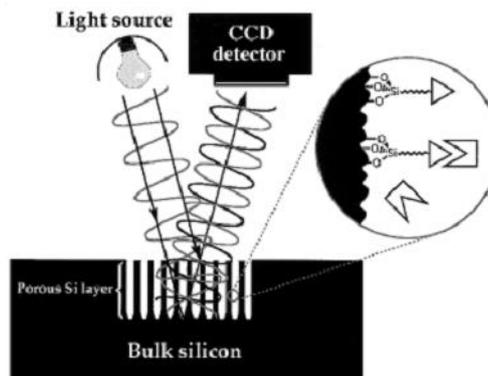
El tamaño de poro depende fuertemente de las condiciones químicas y eléctricas de la reacción, como se observa en la figura 8, siendo normalmente mayor cuanto mayor sea también la corriente utilizada durante el ataque electroquímico (Harraz, 2014; Martín-Sánchez et al., 2019). Adicionalmente, es posible aplicar técnicas posteriores al grabado para expandir el tamaño del poro, como la disolución en sustancias alcalinas como el NaOH o el KOH (Martín-Sánchez et al., 2019).



**Figura 8:** Imagen FESEM de capas de PSi fabricado mediante ataque electroquímico empleando distintas densidades de corriente. (a) HF:EtOH 2:1,  $I = 650 \text{ mA/cm}^2$ ,  $T = 30\text{s}$  and (b) HF:EtOH 2:1,  $I = 730 \text{ mA/cm}^2$ ,  $T = 30\text{s}$ . En este segundo caso, la capa de PSi fue tratada con una solución de 0.1 M de NaOH durante 2 minutos (Martín-Sánchez et al., 2019).

Las propiedades ópticas del material resultante son bastante interesantes, como ya se ha comentado anteriormente. Una vez funcionalizada la superficie interna de los poros, obtenemos un biosensor muy sensible que podemos utilizar para detectar un determinado analito dentro de una solución, valiéndonos especialmente del cambio que se produce en el índice de refracción efectivo de la capa de PSi.

El funcionamiento del sensor se basa en hacer fluir la solución que queremos analizar sobre los poros usando un canal de microfluídica y una bomba. En este estado, el conjunto presentará un determinado índice de refracción, que cambiará cuando se introduzca el analito y se acople a las moléculas que funcionalizan la superficie interna de los comentados poros. Si hacemos incidir un haz de luz sobre la capa de PSi, parte de este será reflejado; si se recoge con un detector y se analiza, se puede detectar esa variación en el índice de refracción, que es lo que nos permitirá determinar la presencia y la concentración de la molécula que queríamos detectar. En la figura 9 se esquematiza la estructura y funcionamiento de un biosensor de PSi.



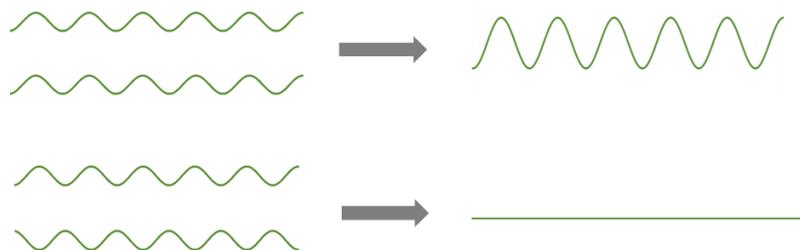
**Figura 9:** Esquema de un biosensor interferométrico basado en silicio poroso. Se puede ver como la cara interna de los poros está funcionalizada con moléculas que reconocen un analito específico. Una fuente de luz envía un haz que incide sobre la capa de PSi, donde es reflejado. Posteriormente es recogido por un detector, que es el que permite detectar el cambio en el índice de refracción (Lin et al., 1997).

Ahora bien, esta detección es posible gracias a la existencia del fenómeno de interferometría óptica. Este proceso está mediado por las pequeñas variaciones que se producen en un haz de luz mientras este se propaga por uno o más medios diferentes. Estos cambios pueden afectar a la longitud de onda, a la longitud del camino que sigue el haz de luz, al índice de refracción del medio por el que se propaga o a una combinación de todos, y son medibles gracias a que todos influyen en las variaciones que experimenta la fase ( $\varphi$ ) del haz de luz según la relación dada por la ecuación 5 (Campbell, 2008), donde  $L$  es la longitud del camino que recorre la luz,  $\lambda$  la longitud de onda y  $n$  el índice de refracción.

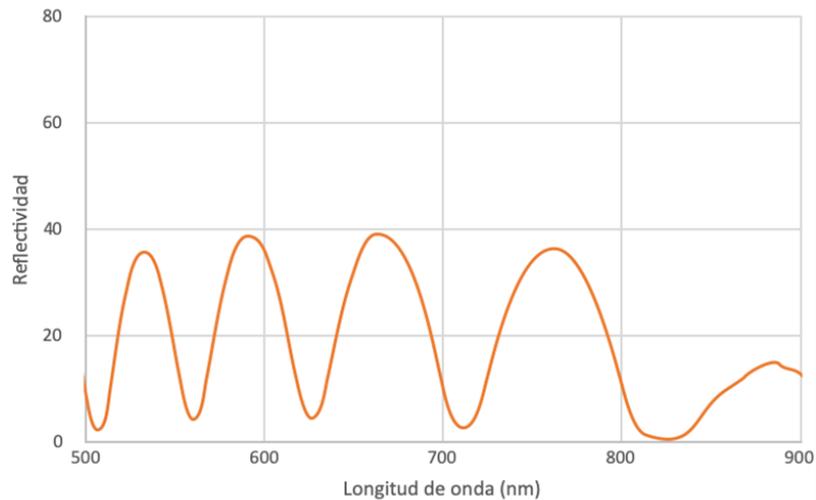
$$\varphi = 2\pi Ln/\lambda \quad (5)$$

No obstante, para el desarrollo de biosensores interesan principalmente las variaciones en el índice de refracción, pues los cambios en las otras dos variables suelen ser pequeños y dan lugar a una sensibilidad muy pobre (Campbell, 2008).

De este modo, los sensores interferométricos se basan en la detección de los cambios de fase que se producen en un haz de luz al atravesar diferentes medios. Dichos cambios de fase normalmente se traducen en interferencias entre las ondas del propio haz de luz. Estas pueden ser destructivas o constructivas, y pueden producirse a diferentes longitudes de onda, por lo que el espectro de frecuencias del haz de luz que sale del interferómetro va a ser diferente al de la luz entrante. Este va a tener una forma sinusoidal, donde los picos estarán en las longitudes de onda que experimenten interferencias constructivas, mientras que los valles corresponderán a las interferencias destructivas. La forma en la que se producen estas interferencias se ilustra en la figura 10, mientras que en la figura 11 se tiene un ejemplo del espectro resultante a la salida de un interferómetro.



**Figura 10:** Arriba: interferencia constructiva entre dos ondas en fase de la misma amplitud, la señal resultante es una sinusoidal con el doble de amplitud. Abajo: interferencia destructiva entre dos ondas a contrafase y misma amplitud, el resultado es una señal plana de amplitud cero.



**Figura 11:** Ejemplo del patrón de reflectividades recogido tras hacer incidir un haz de luz sobre una muestra de PSi y analizar la luz reflejada con un espectrómetro. Se pueden ver picos en la luz reflejada, que corresponden a las longitudes de onda para las que existen interferencias constructivas. Mientras que los valles son las longitudes de onda para las que existen más interferencias destructivas.

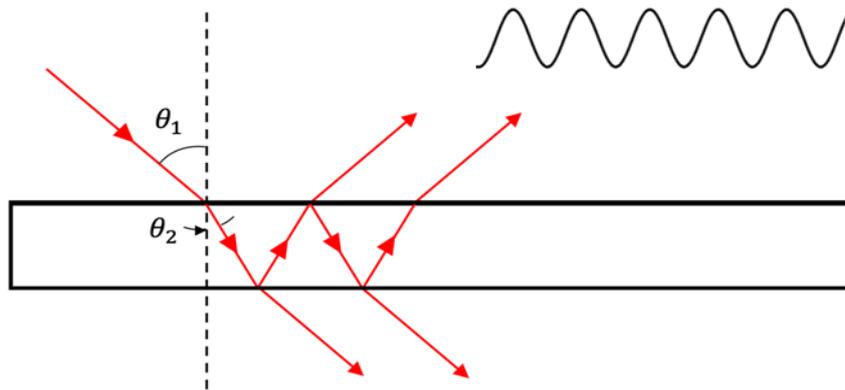
En concreto, en este trabajo se utilizan sensores de PSi, que actúan como un interferómetro de Fabry-Pérot (Campbell, 2008; Martín Sánchez, 2019).

El interferómetro de Fabry-Pérot funciona al hacer incidir un haz de luz sobre un medio formado por dos superficies semirreflectantes separadas por un determinado material. Al incidir el haz sobre la superficie del interferómetro una parte será transmitida al nuevo medio con un ángulo que viene dado por la ley de Snell (6), mientras que la otra será reflejada al medio original con un ángulo igual al de entrada. Lo mismo ocurrirá cuando la luz llegue al final del material de separación y se encuentre con la segunda capa límite del interferómetro (Ismail et al., 2016; Martín Sánchez, 2019).

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (6)$$

En esta ecuación,  $n_1$  representa el índice de refracción del medio 1, mientras que  $n_2$  es el índice de refracción del medio 2. Por otro lado,  $\theta_1$  corresponde al ángulo de incidencia, mientras que  $\theta_2$  es el ángulo de salida en el medio 2 (Martín Sánchez, 2019).

Esta continua reflexión-transmisión generan un patrón de interferencias dentro del propio haz de luz que se traducen en una respuesta sinusoidal en la descomposición espectral de la luz debido a la existencia de interferencias constructivas y destructivas (Martín Sánchez, 2019). Este tipo de interferómetros puede tener una o más capas de materiales con distintos índices de refracción lo que, en el caso de los sensores de PSi, se traduce en diferentes capas de silicio con tamaños de poro y/o densidades diferentes. La siguiente figura esquematiza el funcionamiento de un interferómetro de Fabry-Pérot.



**Figura 12:** Representación del funcionamiento de un interferómetro de Fabry-Perót. Los haces de luz salientes interfieren entre sí para generar el patrón sinusoidal que se puede visualizar en el espectrómetro (elaboración propia).

La forma habitual de interrogar este tipo de sensores es usando un espectrómetro que haga una adquisición continua del espectro de la luz reflejada. De este modo, se puede saber cómo se desplaza este espectro al cambiar el índice de refracción de la muestra de PSi. Este proceso resulta complejo, pues se requiere un equipamiento costoso; además, es necesario procesar el espectro para detectar sus máximos y sus mínimos y, a partir de estos, estudiar su desplazamiento.

Otra forma de estudiar la variación de la respuesta de estos sensores es medir utilizando únicamente una longitud de onda. De este modo, se puede detectar el desplazamiento del espectro a partir del cambio en la intensidad de la luz reflejada por la muestra. Este principio es el que se usará en este proyecto a la hora de interrogar los sensores de PSi utilizando un cabezal de DVD.

#### 1.3.4. Cabezales de lectura ópticos

Las funcionalidades de los cabezales de lectura óptica son muy interesantes. Como ya se ha comentado anteriormente, su diseño y funcionamiento les convierten en una buena opción para desarrollar una set-up de medida experimental capaz de interrogar sensores de PSi, basándose en la detección de la variación de la potencia de la luz reflejada por la muestra.

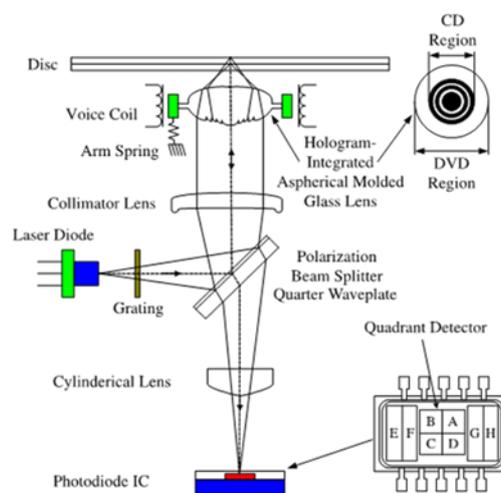
La tecnología de los cabezales de lectura ópticos lleva ya varias décadas implantada en la sociedad. Los primeros pasos en el desarrollo comercial de discos de lectura óptica o magnetoóptica para el almacenamiento de audio y vídeo fueron dados por la empresa Magnavox en 1978, quienes desarrollaron un sistema llamado "DiscoVision", basado en el uso de unos discos ópticos llamados *LaserDisc* (LD) para almacenar la información. Su funcionamiento básico no ha cambiado desde entonces, pues es exactamente el mismo principio que utilizan los discos CD, DVD y Blu-Ray, aunque en formatos cada vez más compactos y económicos, como se puede apreciar en la figura 13 (Goldwasser, 2011).



**Figura 13:** Comparación entre el tamaño de un LD y de un DVD  
(File:LDDVDComparison-Mod.Png - Wikimedia Commons, n.d.).

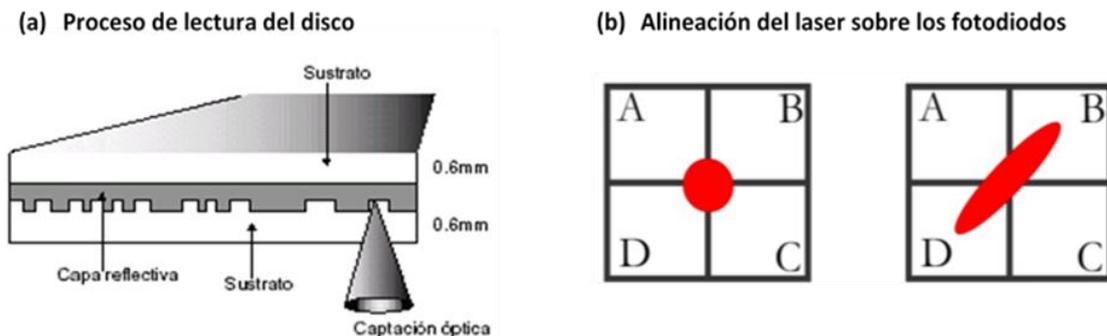
El principio básico del funcionamiento de esta tecnología es la detección óptica mediante láser de las muescas que se realizan sobre la superficie del disco, tal y como se esquematiza en la figura 15. Estas hendiduras alcanzan un tamaño de 0,5 micras en los CDs, pero son aún más pequeñas en los formatos DVD y Blu-Ray, y están cubiertas de una capa reflectante donde el haz de luz se refleja de vuelta al cabezal lector (Goldwasser, 2011; *Optical Storage*, n.d.).

El propio cabezal está compuesto por un emisor láser, un fotodiodo receptor y un conjunto de espejos y prismas encargados de dirigir el haz de luz hacia la superficie del disco. El camino que esta recorre comienza en el diodo láser. A continuación, pasa por una rejilla que separa el haz principal en tres haces diferentes. Éstos se dirigen a una serie de lentes que polarizan el haz de forma circular y lo coliman antes de dirigirlo hacia la lente principal, que es la encargada de enfocar el láser sobre la superficie del disco que se va a leer. Una vez la luz se refleja, vuelve a entrar en el cabezal a través de la lente principal y es dirigida y enfocada sobre la superficie del fotodetector, que está formado por un *array* de fotodiodos (Goldwasser, 2011). El esquema más comúnmente usado en la construcción de un cabezal de lectura óptica está representado en la siguiente figura.



**Figura 14:** Esquema de la disposición interna de los componentes de un cabezal de lectura óptica (Chu & Chiu, 2007).

La lectura del disco se realiza al detectarse el patrón de muestras mediante el fotodiodo y ser transformado, mediante un convertor A/D, en 1's y 0's lógicos. Dicha transformación se realiza al corregirse el enfoque del láser sobre la superficie del disco, lo cual se traduce en un correcto posicionamiento del punto de luz en el centro del *array* de fotodiodos. Cuando el láser pasa de reflejarse en la superficie a hacerlo en uno de los valles, el enfoque sobre el fotodetector cambia (figura 15), y es corregido por dos bobinas que acercan la lente al disco para corregir el error de enfoque. Estas subidas y bajadas son las que luego se transforman en 1's y 0's y son interpretados por el procesador (Goldwasser, 2011; *Optical Storage*, n.d.).



**Figura 15:** (a) Esquema del proceso de lectura de la superficie del disco. (b) Cambio de alineación del punto de luz sobre el array de fotodiodos al detectarse la muesca (*La Tecnología Del DVD*, n.d.; Russell-Pavier et al., 2018).

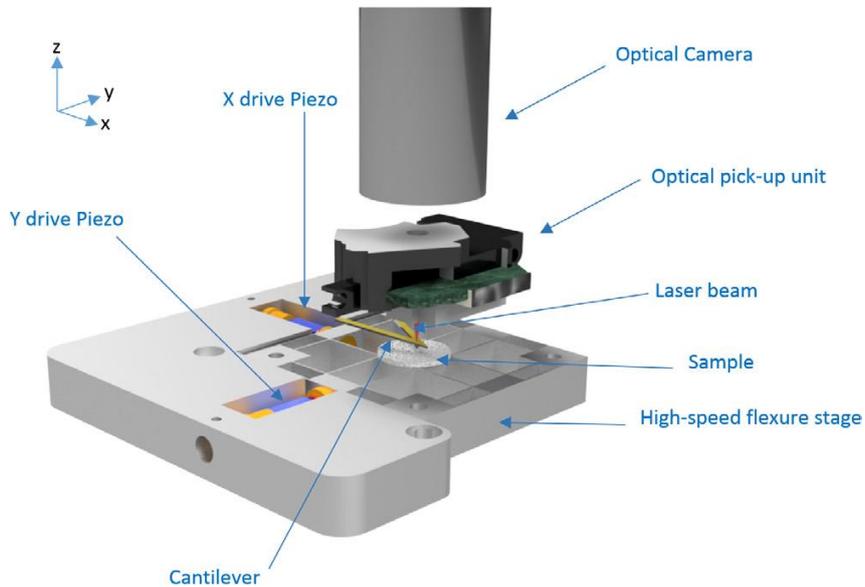
En este proyecto, el cabezal de DVD ha sido ligeramente modificado retirándole la lente de enfoque, pues no es compatible con las pruebas de sensado fluyendo en tiempo real que se realizarán posteriormente. Por ello, el sistema de medida que se utilizará va a ser diferente al funcionamiento estándar de un cabezal de lectura óptica que se ha explicado anteriormente. En este caso, el mecanismo de detección no va a depender del cambio del enfoque del spot de luz sobre los fotodiodos. Al contrario, se pretende que el láser este continuamente enfocado sobre el fotodiodo, de manera que se pueda detectar el cambio en la potencia de la luz reflejada como un cambio en la tensión a la salida de los fotodiodos.

Generalmente, estos dispositivos cuentan con láseres de muy poca potencia, de en torno a unos pocos mW. Las longitudes de onda que manejan dependen de la tecnología usada, en el caso del CD es de en torno a 780 nm, mientras que para el DVD se sitúa en los 650 nm. Además, los fotodiodos usados tienen una superficie muy pequeña ( $<1\text{mm}^2$ ), y son altamente sensibles debido a las pequeñas variaciones de enfoque que tienen que detectar (Goldwasser, 2011; *Optical Storage*, n.d.).

Este tipo de tecnología lleva implantada un largo tiempo en la sociedad y ha ido madurando con el paso de los años hasta estar plenamente integrada. Una gran variedad de equipos de investigación ha estudiado la posibilidad de utilizar estos cabezales para propósitos diferentes de los originales.

La lente principal de un cabezal DVD es de muy buena calidad, por lo que uno de sus usos más evidentes es en microscopía óptica. En este sentido, Hong et al. (2013) diseñaron un microscopio óptico de bajo coste pero buena resolución, pudiendo distinguir hasta 161 líneas por milímetro.

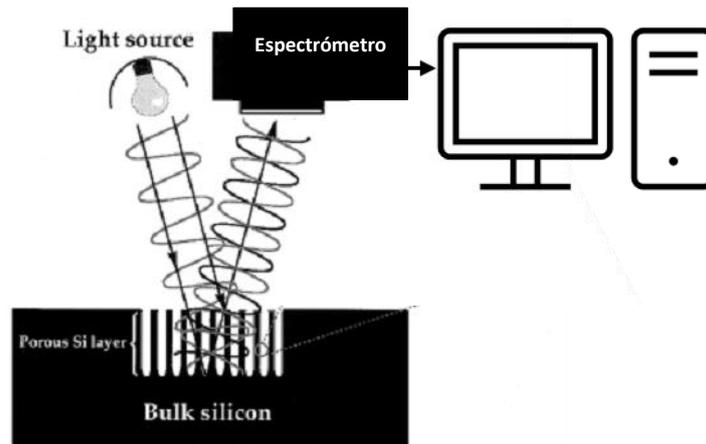
Por otro lado, también es posible aprovechar las propiedades ópticas del láser y la construcción del cabezal para realizar otro tipo de medidas. Russell-Pavier et al. (2018) diseñaron un microscopio de fuerza atómica de alta velocidad utilizando un cantiléver micrométrico sobre el que se enfoca el punto de luz que concentra la lente junto con el *array* de fotodiodos del cabezal (figura 16). Incluso algunos grupos han conseguido construir un citómetro de flujo de bajo coste, como el diseñado por Kostner & Vellekoop (2008).



**Figura 16:** Esquema del microscopio de fuerza atómica de alta velocidad diseñado por Russell-Pavier et al., (2018).

## Capítulo 2. Diseño, funcionamiento y montaje del set-up.

De acuerdo con lo comentado en el capítulo anterior, el set-up de medida empleado de forma genérica para caracterizar sensores fotónicos basados en PSi posee una lámpara halógena como fuente de luz, y un detector espectrómetro para analizar el espectro de la señal reflejada por el sensor. La figura 17 muestra un esquema de dicho set-up.



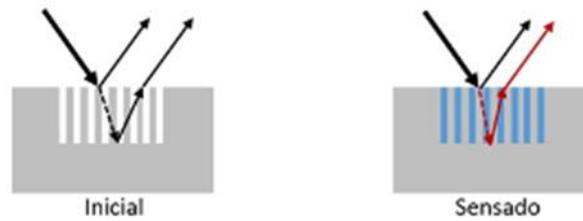
**Figura 17:** Esquema de un set up de medida utilizado para realizar pruebas de sensado con capas de silicio poroso (Lin et al., 1997).

La reflectividad del sensor depende principalmente del espesor y del índice de refracción efectivo de la capa porosa. Tal y como se muestra de forma esquemática en la siguiente figura, durante una prueba de sensado, el índice de refracción efectivo de la capa porosa se modifica al rellenarse los poros con la solución que contiene el analito que se desea detectar. Esta modificación da lugar a un desplazamiento del espectro, que puede ser medido con un espectrómetro y posteriormente analizado realizando el seguimiento de un punto de máxima o mínima reflectividad con algún software específico para ello.

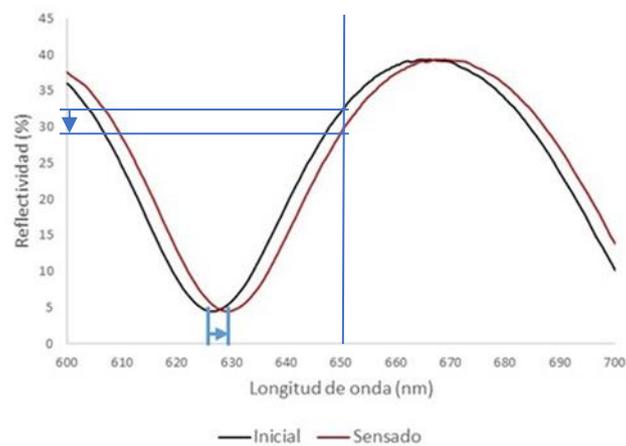
En la figura 18 (b) se puede apreciar el desplazamiento que ocurre en el espectro cuando se realiza una prueba de sensado sobre una muestra de PSi. En este caso, se ha tomado la posición de un mínimo local en el espectro para analizar este movimiento. Tras este análisis, y como se muestra en la figura 18 (c), se puede ver que el desplazamiento del espectro es de entre 3 y 3,5 nm. Con ello, considerando que la muestra se ilumina con una longitud de onda presente en un flanco de subida o bajada de la reflectividad, al desplazarse el espectro se tiene también una variación de la potencia de la luz reflejada para dicha longitud de onda. Si por ejemplo se ilumina el sensor con un láser rojo de 650 nm, la reflectividad pasa a ser del 32,1% al 29,6% durante el proceso de sensado, como también se muestra en la figura 18 (b). Esta variación en la potencia de la luz reflejada puede ser cuantificada y procesada mediante un set-up de medida y un software adecuado. En este sentido, y como ya se ha explicado anteriormente, en el presente proyecto, la fuente de luz y el espectrómetro serán sustituidos por un cabezal de DVD comercial. La señal reflejada y recogida por los fotodiodos del cabezal de DVD será adaptada y digitalizada,

con el fin de facilitar el manejo y la interpretación de los datos recogidos durante las pruebas de sensado.

(a)



(b)

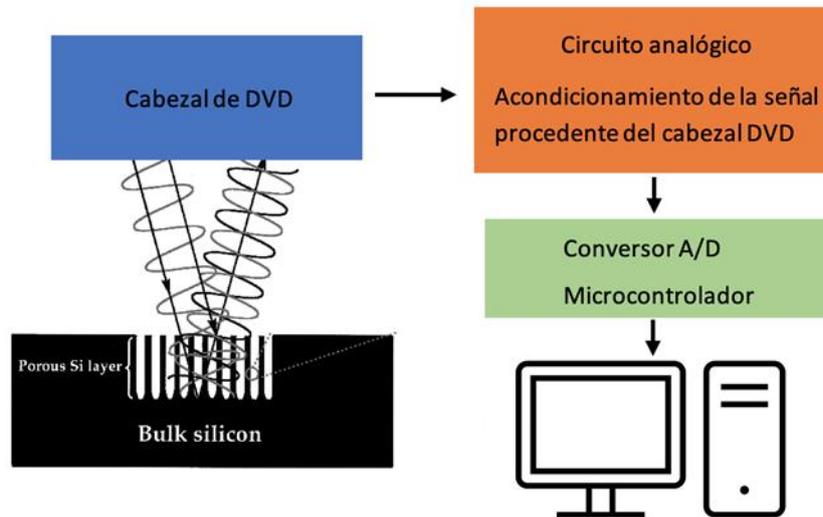


(c)



**Figura 18:** (a) Esquema de un interferómetro de Fabry-Pérot basada en una capa de PSi durante un paso de sensado. (b) Modificación y (c) desplazamiento que puede sufrir el espectro durante el paso de sensado. En este caso, el paso de sensado consistió en fluir un 20% De alcohol isopropílico.

De cara a tener una visión esquemática de las distintas partes que formarán el nuevo set-up, la siguiente figura muestra un diagrama con los distintos bloques necesarios.



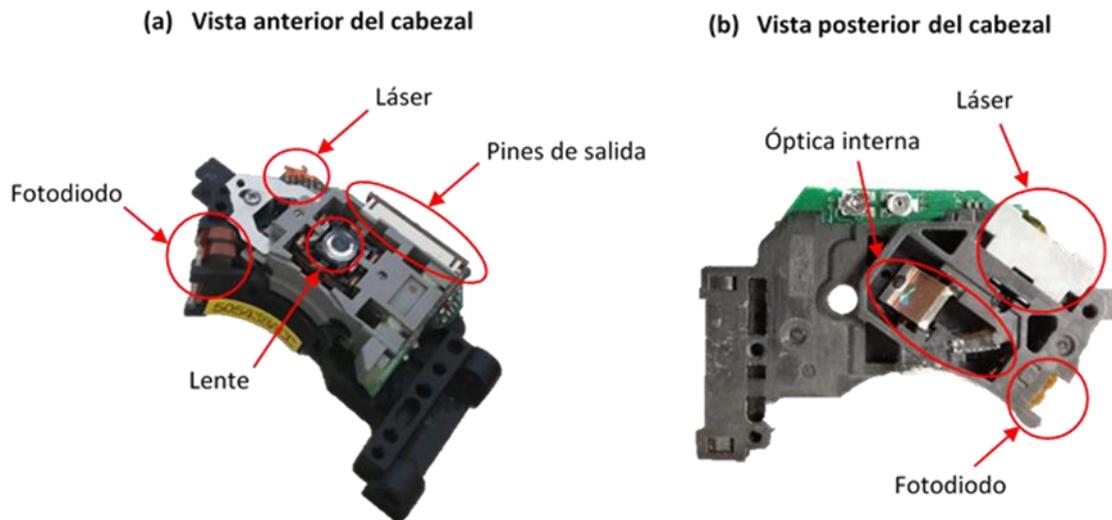
**Figura 19:** Diagrama de bloques del set-up de medida planteado.

En primer lugar, se requiere de un cabezal de DVD para iluminar la muestra y recoger la luz reflejada sobre la misma. La respuesta por parte de los fotodiodos presentes en el cabezal de DVD será una tensión que es proporcional a la reflectividad de la muestra caracterizada. A continuación, se incluye un circuito analógico para acondicionar la comentada tensión, considerando las características del convertor A/D necesario para digitalizar dicha señal, y poder procesarla de una forma sencilla con un ordenador.

En los próximos puntos se presenta de forma detallada cada una de las partes que constituirán el nuevo set-up de medida.

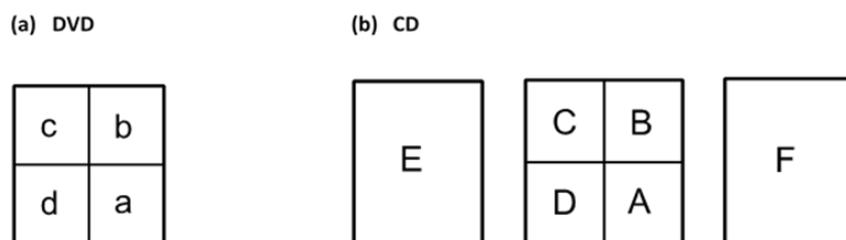
## 2.1. Características técnicas del cabezal óptico

Para el diseño del set-up se utilizó un cabezal óptico Sanyo HD SF-65. Esta elección se debió a que es un dispositivo comercial muy accesible, pues lleva siendo utilizado por diversas marcas de reproductores desde hace ya varios años. Además, sus hojas de características son fáciles de encontrar en internet y tiene un precio bajo. Cuenta con la capacidad de operar tanto en formato CD como DVD, por lo que posee dos diodos láser que trabajan con diferentes longitudes de onda, en concreto a 780 nm para la lectura de CDs y 650 nm para los DVD. La potencia de estos láseres es de 7 mW, según se indica en la hoja de características del fabricante, y operan con una alimentación de 5 V a una corriente máxima de 90 mA para el láser DVD y de 70 mA para el CD. La figura 20 muestra fotografías de dicho cabezal óptico.



**Figura 20:** Vistas anterior (a) y posterior (b) del cabezal utilizado. En la vista posterior se ha retirado la protección que cubre la óptica interna del dispositivo con el fin de ilustrar su disposición.

Para la lectura de la información, el cabezal cuenta con un fotorreceptor que contiene un array formado por 4 fotodiodos para leer a 650 nm, y por 6 para 780 nm. La figura 21 muestra de forma esquemática la disposición de los fotodiodos. Para cambiar de un modo de funcionamiento al otro, existe un conmutador que se activa gracias a una señal digital, funcionando en modo DVD para una alimentación menor a 0,7 V, y en CD para más de 3,5 V. El detector también requiere una alimentación de 5 V, además de una tensión de referencia de 2,1 V para la polarización inversa de los fotodiodos.



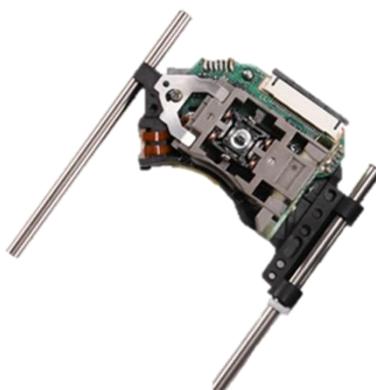
**Figura 21:** (a) Disposición de los fotodiodos en el modo DVD. (b) Disposición de los fotodiodos en el modo CD.

La estructura interna del dispositivo es similar a la comentada en el apartado anterior e ilustrada en la figura 14, cambiando la disposición de los elementos ópticos para un correcto direccionamiento del haz. El cabezal también cuenta con las dos bobinas para controlar la posición y el enfoque de la lente y el bus de comunicaciones es un conector para un cable plano de 24 pines con una separación de 0,5 mm entre cada pista. Cada uno de los pines tiene asignada una función que viene expuesta en la Tabla 1 y representada en el esquema eléctrico de la figura 23.

Nº de PIN	Nombre de PIN	Unidad funcional	Nº de PIN	Nombre de PIN	Unidad funcional
1	F-	Actuador (Lente)	13	Vc(Vref)	Fotodiodo
2	F+		14	Vcc	
3	T-		15	E	
4	T+		16	(N.C.)	
5	C/c	Fotodiodo	17	VR-CD	Láser
6	D/d		18	VR-DVD	
7	CD/DVD SW		19	CD-LD	
8	RF		20	MD	
9	A/a		21	HFM	
10	B/b		22	(N.C.)	
11	F		23	DVD-LD	
12	GND-PD		24	GND-LD	

**Tabla 1:** Asignación de funciones de cada uno de los pines. Extraído de la hoja de características del fabricante.

En cuanto al cuerpo del cabezal, como se muestra en la figura 22, está fabricado íntegramente en plástico, con pequeñas piezas de metal para la sujeción de otros componentes. Cuenta con dos soportes cilíndricos a ambos laterales donde, en condiciones normales, se acoplan las barras que sujetan el dispositivo al armazón del reproductor DVD, y que permiten el movimiento de este para seguir la pista del disco. Estos detalles también se pueden apreciar en los planos extraídos de a hoja de características del fabricante que se adjuntan en los anexos a este documento.



**Figura 22:** Vista del cabezal con las varillas de sujeción insertadas en los soportes laterales (Las varillas están recortadas en la imagen).

ESTUDIO DEL USO DE CABEZALES DE LECTURA DE DISCOS ÓPTICOS PARA LA INTERROGACIÓN DE  
 SENSORES FOTÓNICOS DE SILICIO POROSO

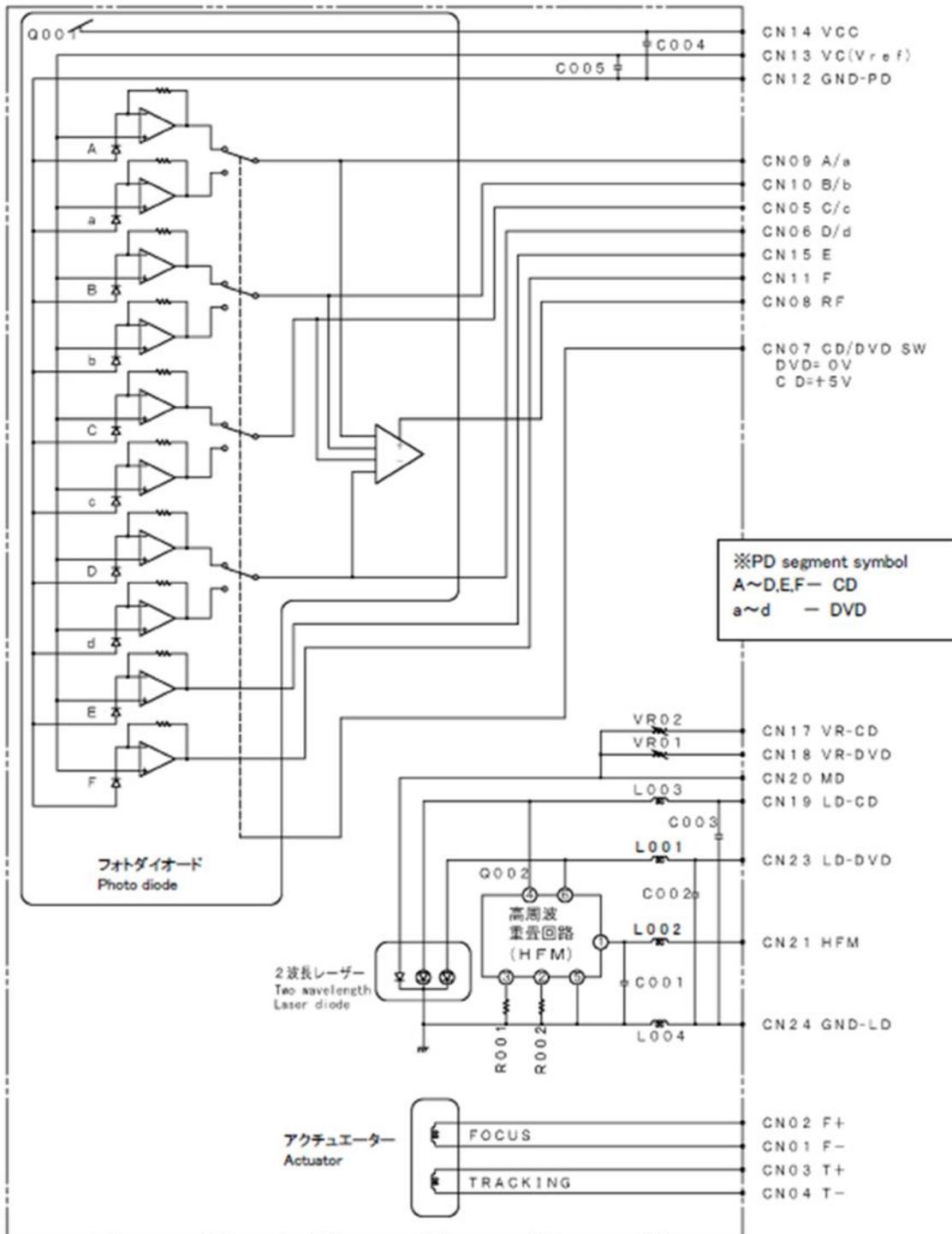


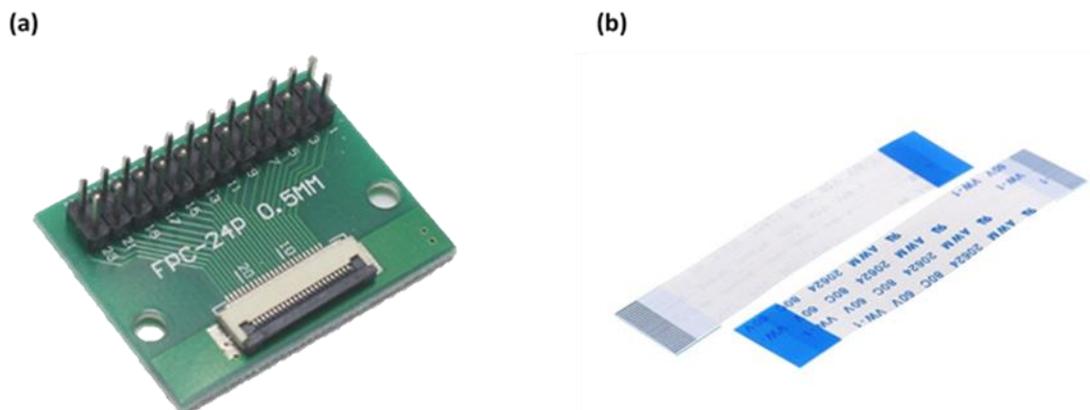
Figura 23: Esquema eléctrico del cabezal de DVD extraído de la hoja de características del fabricante

## 2.2. Caracterización del funcionamiento del cabezal

El primer paso que se llevó a cabo en el proceso de diseño del set-up fue la caracterización del cabezal. Para ello en primer lugar se comprobó el funcionamiento del láser. Para que este pudiese operar, era necesario retirar un punto de soldadura que cortocircuitaba el terminal de alimentación del diodo láser (CD-LD y DVD-LD) con la referencia (GND-LD), y cuya función es proteger el diodo de las cargas electrostáticas durante el proceso de transporte.

Una vez operativo el láser, se procedió a comprobar la respuesta de los fotodiodos, para lo cual se conectó el cabezal, usando un cable plano de 24 pines, a un conector que permitiese separar las pistas (figura 24) y llevar las conexiones a una placa board, desde la cual se podría alimentar el láser y recoger la información de los fotodiodos para leer la tensión de salida usando un multímetro digital comercial. En concreto, el medidor utilizado era de la marca Xindar, modelo DP1000.031.

Por otro lado, fue necesario conectar un potenciómetro de 10 kOhm en serie con la entrada de tensión del láser con el fin de regular la corriente suministrada al mismo para no exceder la máxima permitida según el fabricante. Para esta prueba se utilizó el láser DVD, pues es el único de los dos que opera dentro del espectro de la luz visible, por lo que podemos ver el punto de luz roja que se proyecta.



**Figura 24:** Conector (a) y cables (b) utilizados para la comunicación con el cabezal.

Con vistas a las futuras pruebas que se debían realizar se retiró la lente del cabezal, pues al usarla, la distancia focal a la que se debía operar es de 3 mm. Por lo tanto, cuando en un futuro se hicieran pruebas con celdas de microfluídica sobre la muestra, el enfoque resultaría imposible, pues el metacrilato con el que se construyen de por sí ya tiene un grosor de 3 mm. Además, la comentada lente dificulta mucho la alineación del montaje.

Por último y teniendo en cuenta las condiciones de confinamiento vividas durante los pasados meses, se construyó un soporte sencillo donde ubicar el cabezal (figura 25), de manera que quedase lo más sujeto posible y que el láser estuviese perpendicular a la muestra a caracterizar. Debido a las circunstancias en las que se realizó esta parte del trabajo, dicha estructura se realizó con tres tablillas y dos varillas de madera, para sujetar el cabezal por los soportes laterales de los que ya disponía para este fin.



**Figura 25:** Soporte construido para las primeras pruebas junto a dos muestras, un espejo de aluminio y uno de silicio.

Una vez completado este proceso, se tomó la salida de uno de los cuatro fotodiodos, y se suministró una tensión de 0 V al pin 7 para activar el modo DVD. Para encender el láser, se alimentó el pin 23 con 5 V y se conectó el 24 a la referencia del circuito montado en la placa board. Para utilizar los fotodiodos, también fue necesario alimentar el pin 14 con 5 V y el pin 13 con 2,1 V, regulados mediante un potenciómetro de 10 kOhm. La referencia del detector se cortocircuitó con la del láser. Para leer la respuesta, se conectó la salida del fotodiodo elegido al multímetro y se utilizó un espejo de aluminio para comprobar cómo variaba la salida del dispositivo al cambiar entre una muestra de alta reflectividad y la oscuridad.

Las primeras pruebas realizadas arrojaron tres resultados claros. En primer lugar, la salida tenía un offset que se situaba en torno a los 1,6 V; es decir, que con el láser apagado y en total oscuridad, la salida del fotodiodo devolvía una tensión de en torno a 1,6 V. Además, esta tensión variaba ligeramente debido a los movimientos de las conexiones de la placa board utilizada. La razón de la presencia de este voltaje de base es desconocida, pues no viene indicada en la hoja de características del fabricante ni se menciona en ningún documento de la bibliografía consultada. De cara a aprovechar todo el rango de entrada del posterior conversor A/D, se hace necesaria la eliminación de dicha tensión.

Por otro lado, la variación de tensión existente entre la respuesta en oscuridad y ante el espejo de aluminio era muy baja, del orden de los milivoltios. Además, y este fue uno de los mayores problemas, el dispositivo es extremadamente sensible a los cambios de alineación del láser, es decir, que la alineación entre el cabezal DVD y la muestra a caracterizar debe ser perfecta. En este sentido, una mínima incorrección se traduce en una falta notable en la respuesta del fotodiodo.

## 2.3. Adecuación de la tensión procedente de los fotodiodos

Para solventar dos de los problemas anteriores, se diseñó un circuito analógico que permitiese eliminar el offset de 1,6 V y amplificar la señal resultante para obtener mayores diferencias de tensión a la salida. Para ello se utilizó un amplificador diferencial de ganancia ajustable que permitiese tanto restar una tensión determinada a la señal de salida, como amplificar el resultado para obtener una mayor variación en la tensión resultante (Figura 26). Existen distintos amplificadores diferenciales con todas las resistencias ya integradas, salvo la correspondiente a la ganancia, y que se alimentan entre 0 y 5V. Como ejemplo, cabe citar el AD8553. Si bien esta opción tuvo que descartarse debido a la situación asociada a la pandemia. Por ello, y aunque requiere de alimentación simétrica, se optó por realizar el amplificador diferencial a partir de amplificadores operacionales muy accesibles, como el TL084.

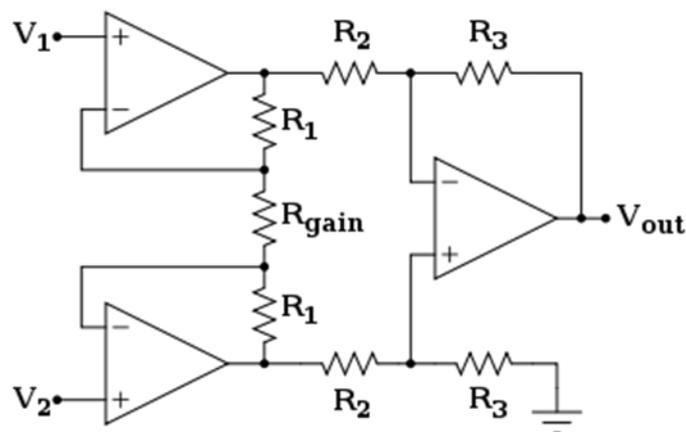


Figura 26: Circuito empleado para el acondicionamiento de la señal.

El comportamiento de este circuito viene regido por la ecuación (7), donde  $V_1$  corresponde al offset que vamos a restar, cuya tensión inicialmente era regulada por un potenciómetro de 10 kOhm, mientras que  $V_2$  es la tensión de salida del fotodiodo. Las resistencias  $R_2$  y  $R_3$  se fijaron en 1 kOhm y  $R_1$  en 10 kOhm. De este modo, y usando la ecuación (7) para obtener una ganancia de 21, se obtiene que  $R_g$  debe valer 1 kOhm.

$$V_o = \frac{R_3}{R_2} \left( 1 + \frac{2R_1}{R_g} \right) (V_2 - V_1) \quad (7)$$

Se ha escogido este valor de ganancia para que la horquilla de valores a la salida estuviese entre 0 V y 1,1 V. Dichos valores se han elegido teniendo en cuenta el rango de entrada del convertor A/D utilizado para poder procesar la señal y trabajar con ella desde un ordenador. El microcontrolador utilizado para realizar esta conversión y la comunicación con el ordenador ha sido el Arduino MKR WAN 1300. Su convertor A/D es de 10 bits y su rango de entrada de 3,3V. Sin embargo, existe la opción de fijar internamente, mediante código, la referencia de entrada máxima a 1,1 V, lo cual hace que nuestra medida gane en resolución.

El valor de la ganancia se obtuvo tras una serie de medidas realizadas con el multímetro para caracterizar las tensiones de salida del fotodiodo, y su variación entre medir sobre una muestra negra con una reflectividad nula, y un espejo de aluminio, con reflectividad de en torno al 91% para la longitud de onda de la fuente utilizada (650 nm). También se ha analizado la reflectividad de una muestra de silicio pulida, siendo su valor del 34% para la longitud de onda considerada.

Estas medidas se hicieron inicialmente con la señal sin eliminar el offset ni amplificar, y se pueden consultar en la tabla 2. De ellas se extrajo una tensión de salida máxima promedio con el espejo de aluminio de 1,634 V que, si tenemos en cuenta que el offset es de alrededor de 1,6 V, correspondería en realidad a una salida de 34 mV. Sabiendo esto, que la tensión máxima que va a poder operar el Arduino es de 1,1 V y los valores de resistencias comerciales que se tenían disponibles, se deduce que el valor de ganancia en tensión necesaria es 21. Con ello, la tensión de salida máxima se establece en torno a los 0,9 V, dejando un margen suficiente para no saturar las entradas analógicas del microcontrolador.

Posteriormente, y una vez fijados los parámetros del amplificador, se procedió al montaje del circuito sobre una placa board, para lo que se utilizó un amplificador operacional TL084, 5 resistencias de 1 kOhm y una de 10 kOhm. Además, para controlar  $V_1$ , que es la tensión que se va a restar a la salida del fotodiodo, se montó un divisor de tensiones con una resistencia de 1 kOhm y un potenciómetro de 10 kOhm.

Para que este circuito funcionase es necesario proporcionarle una alimentación simétrica entre +5 V y -5 V, pues es la alimentación a la que trabaja el amplificador operacional elegido. Para ello, y teniendo en cuenta la situación de confinamiento vivida, se utilizaron dos fuentes independientes, por un lado, la salida de 5 V del propio Arduino y su referencia y; por otro lado, se utilizó un conector USB antiguo conectado al cargador de un teléfono móvil. Tal y como se muestra en la figura 27, dicho conector posee cuatro terminales: uno de ellos proporciona una tensión de 5 V cuando está conectado; otro es el de referencia de tensiones; y los otros dos son conexiones de datos. Estos últimos han sido ignorados en este estudio.

Las tensiones medidas empleando distintas muestras y considerando el circuito comentado se pueden consultar en la tabla 3. En la figura 28 se representan las medidas tomadas.

Medidas de la tensión de salida sin amplificar ni eliminar el offset						
Material	Laser	Fotodiodo	Reflectividad	Vout (V)	Promedio	Desviación típica
Aluminio	DVD	a	0,91	1,635	1,634	0,007
				1,624		
				1,636		
				1,641		
Silicio	DVD	a	0,34	1,622	1,619	0,004
				1,620		
				1,621		
				1,613		
Vacío	DVD	a	0	1,606	1,606	0,001
				1,606		
				1,605		
				1,606		

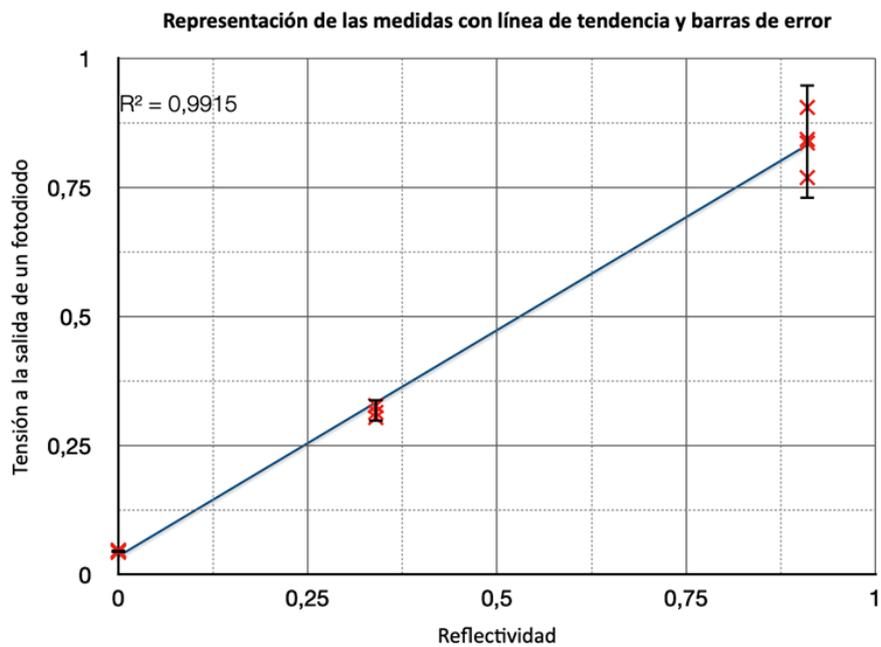
**Tabla 2:** Medidas de tensión a la salida del circuito sin amplificar la señal ni eliminar el offset.



**Figura 27:** Esquema de la disposición interna de los cables de un conector USB

Eliminando el offset con el amplificador diferencial						
Material	Laser	Fotodiodo	Reflectividad	Vout (V)	Promedio	Desviación típica
Aluminio	DVD	a	0,91	0,905	0,838	0,056
				0,843		
				0,769		
				0,836		
Silicio	DVD	a	0,34	0,327	0,318	0,011
				0,314		
				0,304		
				0,327		
Vacío	DVD	a	0	0,043	0,045	0,002
				0,046		
				0,044		
				0,047		

**Tabla 3:** Medidas de tensión a la salida del circuito tras eliminar el offset y amplificar la señal.



**Figura 28:** Representación de las medidas con línea de tendencia y barras de error.

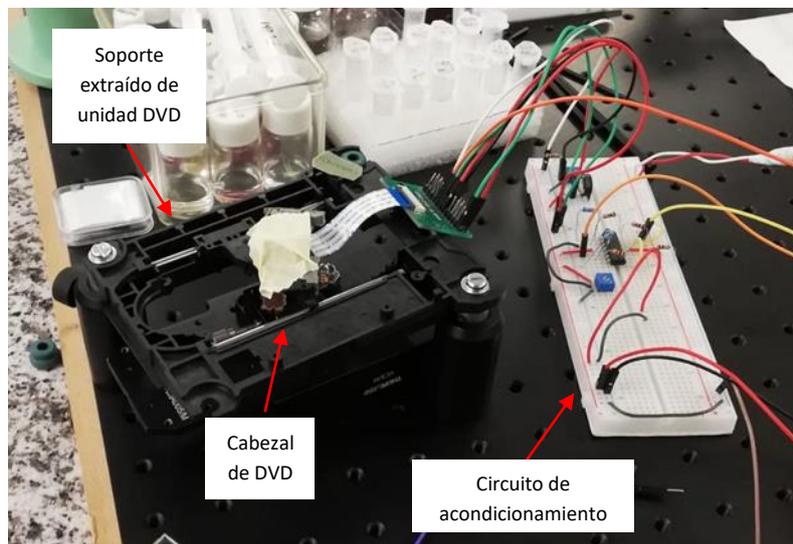
Como se puede apreciar, de estas medidas preliminares se deduce que la relación entre la reflectividad de la muestra y la tensión de salida es lineal, lo cual es bueno de cara a procesar las medidas tomadas. Además, también se extrae que existen variaciones en la medida, que son mayores al aumentar la reflectividad de las muestras que se están analizando. Esta desviación se debe tanto a faltas de alineación entre el cabezal de DVD y la muestra a caracterizar, como a los malos contactos en la placa board. Estas variaciones se acentúan cuando aumenta la reflectividad de la muestra y han sido uno de los principales problemas que se encontraron a la hora de diseñar el set-up.

## 2.4. Diseño y montaje del set-up definitivo.

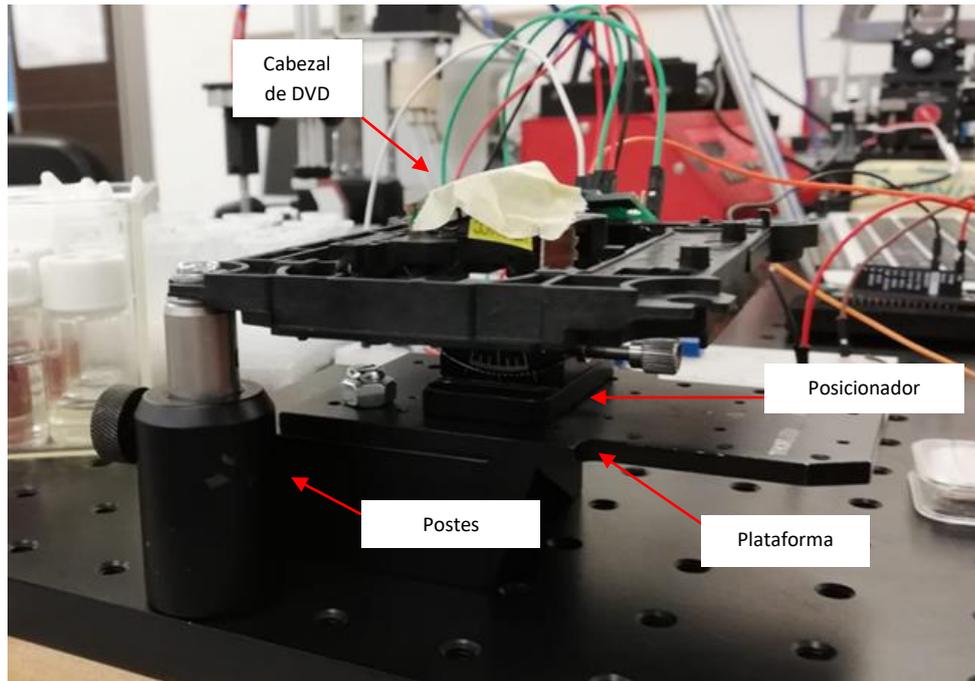
Una vez recogidos todos los datos del apartado anterior, fue posible diseñar al completo todo el montaje que sería utilizado finalmente para la realización del set-up de medida.

Lo primero que se hizo fue intentar controlar la alineación todo lo posible, pues es uno de los principales factores que influyen en la medida. Para ello primero se probó la estabilidad del cabezal sobre un soporte extraído de un reproductor DVD antiguo atornillado sobre dos postes y anclado a la mesa óptica del laboratorio. De este modo se evita que el cabezal se vea afectado por cualquier movimiento de los cables o de cualquier componente externo, además, posibilita variar la altura con respecto a la superficie.

Para poder situar correctamente la muestra se empleó una plataforma y un posicionador angular marca ThorLabs, modelo GN1, que permite variar la inclinación en un eje de forma manual, y así facilitar la alineación del haz láser en perpendicular a la muestra (Figuras 29 y 30).



**Figura 29:** Vista superior del montaje preliminar del set-up. Se pueden ver las barras originales y el soporte extraído de la unidad DVD



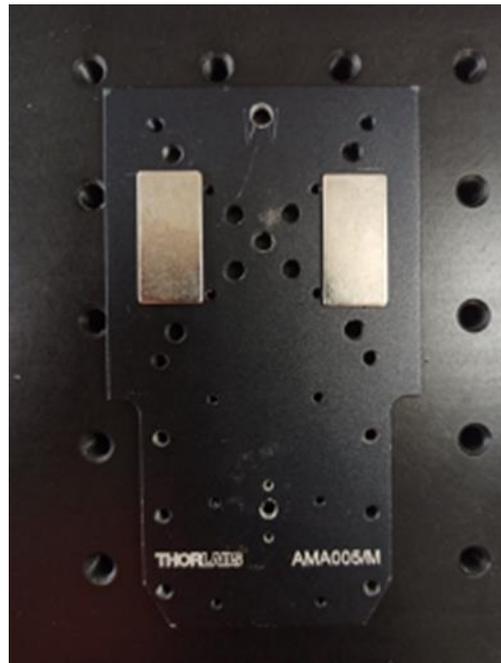
**Figura 30:** Vista lateral del montaje preliminar del set-up. Se pueden ver los postes, la plataforma y el posicionador debajo del cabezal.

Una vez comprobado que se podía usar un soporte similar al que utilizan los reproductores DVD y de cara a facilitar la alineación entre el cabezal de DVD y la muestra a caracterizar, se diseñó un armazón propio que permitía sujetar el cabezal con las dos barras de metal originales del reproductor. Este se realizó mediante impresión 3D y sus planos se adjuntan en los anexos de este documento.

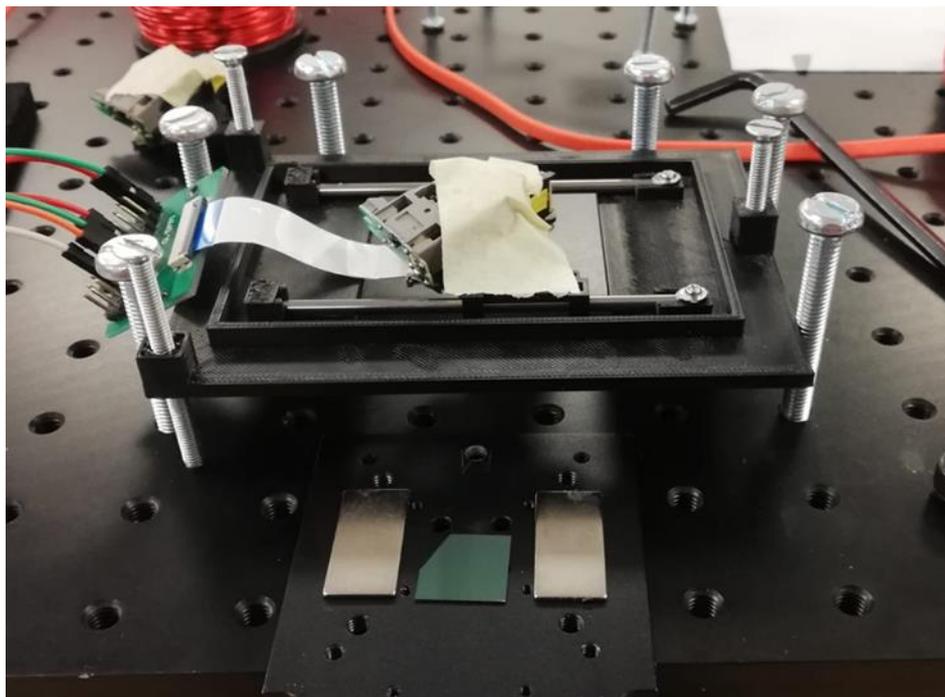
Además, se sustituyeron todos los componentes ópticos utilizados en las pruebas iniciales, como los postes y el posicionador, pues son elementos muy costosos y la idea de este proyecto es reducir los costes del set-up todo lo posible, así como hacerlo sencillo para cualquier usuario. De este modo, el control de alineación se realizará usando tres tornillos que sujetan el soporte impreso, pues con ellos se puede determinar cualquier inclinación de cualquier plano. Para evitar desplazamientos del set-up, se utilizaron unos tornillos más gruesos que sujetaban el montaje a la mesa óptica por el exterior, de manera que se pudiera seguir variando la inclinación del cabezal sin cambiar su posición en los planos X e Y.

Para poder introducir y retirar la muestra más fácilmente, se utilizó una plancha metálica de la casa ThorLabs, que ya se había empleado anteriormente. A esta pieza se le acoplaron dos imanes de neodimio de 2 mm de espesor, pues serán necesarios posteriormente para realizar medidas de sensado fluyendo en tiempo real. A su vez y para evitar mover la muestra de forma accidental, la placa se inmovilizó mediante una pieza de plástico fijada con dos tornillos a la mesa óptica, tal y como se muestra en la figura 31.

(a)



(b)



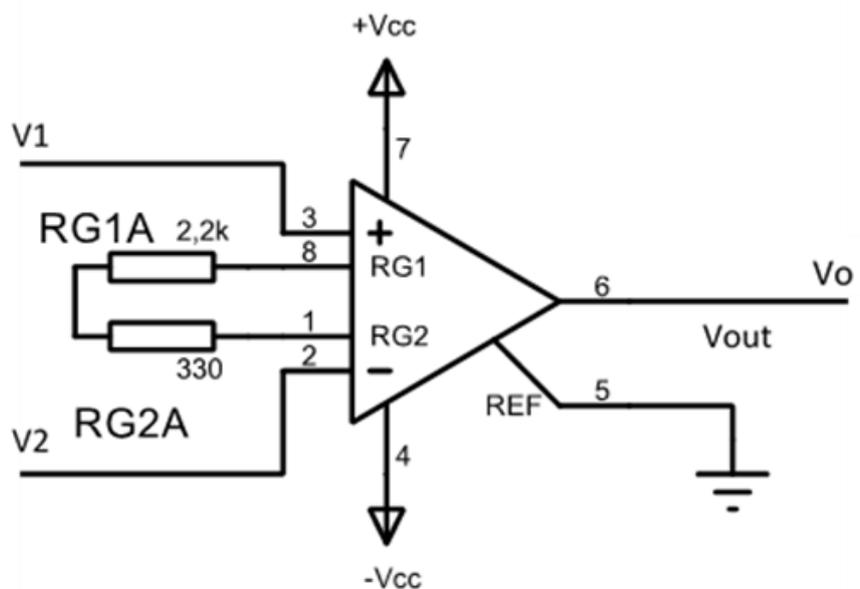
**Figura 31:** Montaje definitivo del set up. Los tornillos de cabeza delgada son los que controlan la inclinación del plano, mientras que los gruesos evitan que se mueva el set-up. También se puede ver la adaptación realizada en la placa ThorLabs y una muestra colocada entre los imanes de neodimio.

Por último, para reducir el ruido y mejorar el funcionamiento del circuito se sustituyó el amplificador operacional TL084 por un amplificador diferencial de instrumentación AMP02.

Este, si bien es un poco más costoso, tiene unas mejores características eléctricas, como un mejor factor de rechazo al modo común, menos ruido y permite reducir el número de componentes electrónicos necesarios, pues está preparado para ajustar la ganancia mediante una única resistencia.

La ganancia de este amplificador viene dada por la ecuación (8), y su esquema eléctrico se ilustra en la figura 32. Para que la ganancia sea similar a la original, el valor de  $R_g$  debe ser de a 2,5 kOhm. Como no disponemos de una resistencia comercial con este valor nominal, la aproximamos usando dos resistencias en serie, una de 2,2 kOhm y otra de 330 Ohm. De este modo, la ganancia será de 20,76; tan solo ligeramente inferior a la original. Se limita aún más de este modo la posibilidad de saturar entrada del Arduino.

$$G = \frac{V_o}{V_{in+}-V_{in-}} = \left( \frac{50k\Omega}{R_g} \right) + 1 \quad (8)$$



**Figura 32:** Nuevo esquema del circuito al utilizar el amplificador AMP02.  $V_1$  corresponde a la salida del fotodiodo y  $V_2$  a la tensión de referencia.

## 2.5. Diseño del circuito impreso

Uno de los principales problemas que se encontraron durante el diseño del set-up es que la repuesta del cabezal variaba considerablemente al moverse cualquier elemento del circuito. Esta es una de las principales razones de que muchas veces la línea base de la medida no fuese cero o de que el valor de esta cambiase.

Este inconveniente debe ser tenido en cuenta porque significa que, mientras se esté midiendo, el circuito analógico no se debe tocar, y ha de evitarse cualquier movimiento de cables o de

conexiones para no perder la medida que se esté realizando. De cara a solucionarlo, se propuso sustituir el prototipo en placa board por un circuito impreso, lo que reduciría enormemente el uso de cables y daría más estabilidad al circuito.

El circuito impreso se diseñó utilizando la aplicación Proteus facilitada por la UPV, y con el objetivo de utilizar los cuatro fotodiodos del cabezal en lugar de uno solo. Por ello, se hace necesario el uso de amplificadores de instrumentación AMP02. Además, se incluyó espacio para dos transistores con los que poder alimentar el haz laser del CD y del DVD de forma independiente mediante una señal digital. El terminal de base de ambos estará conectado a una salida digital de Arduino, pudiendo controlar el encendido de una u otra fuente de luz mediante software. El esquema eléctrico y el diseño del circuito impreso, tanto en 2D como en 3D, se pueden consultar en las figuras 33, 34 y 35 respectivamente.

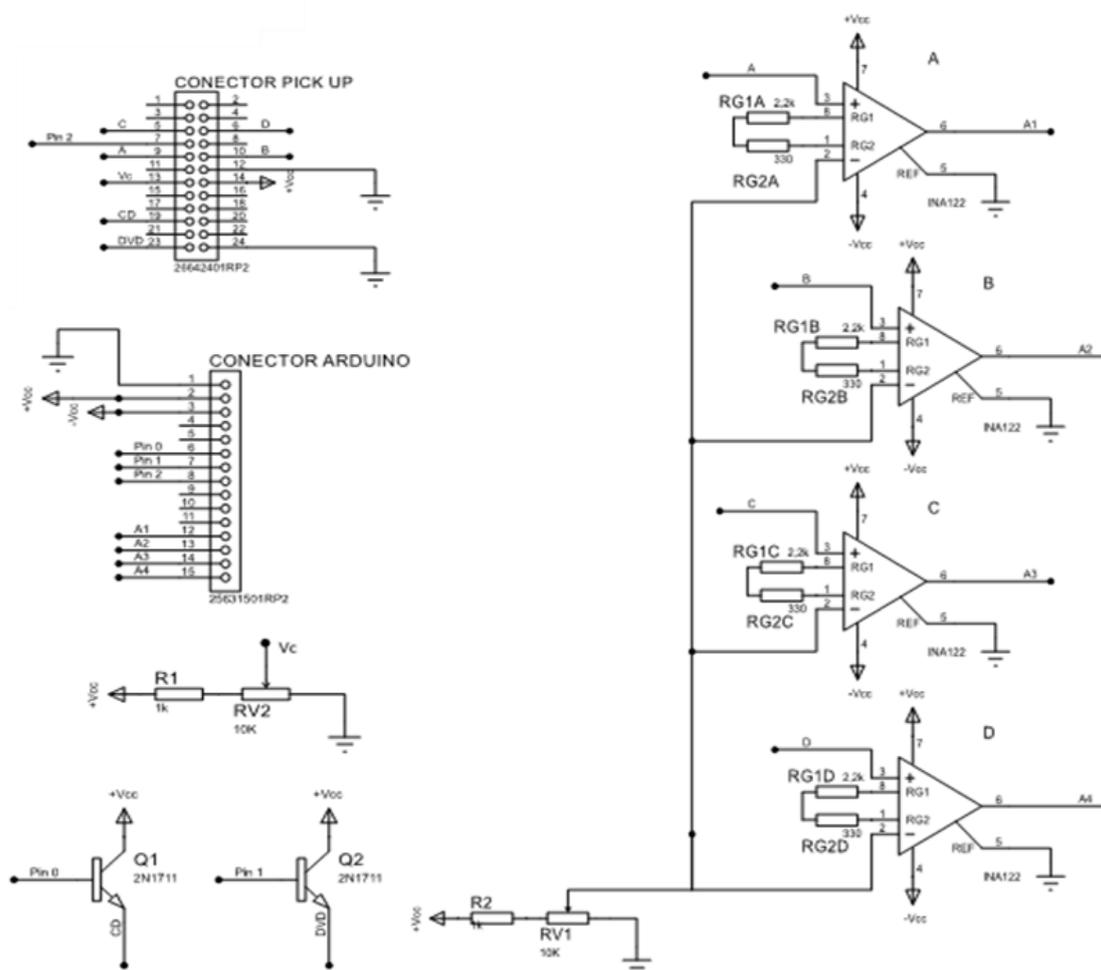
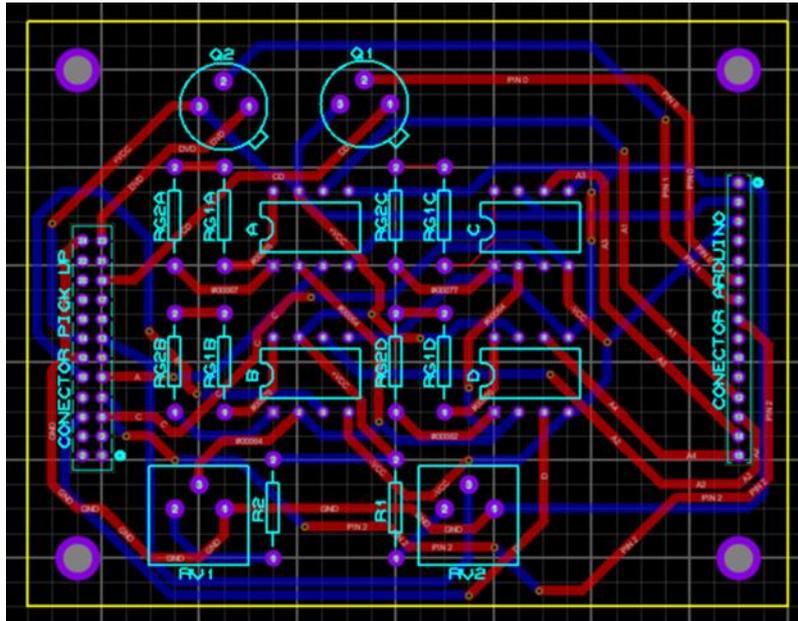
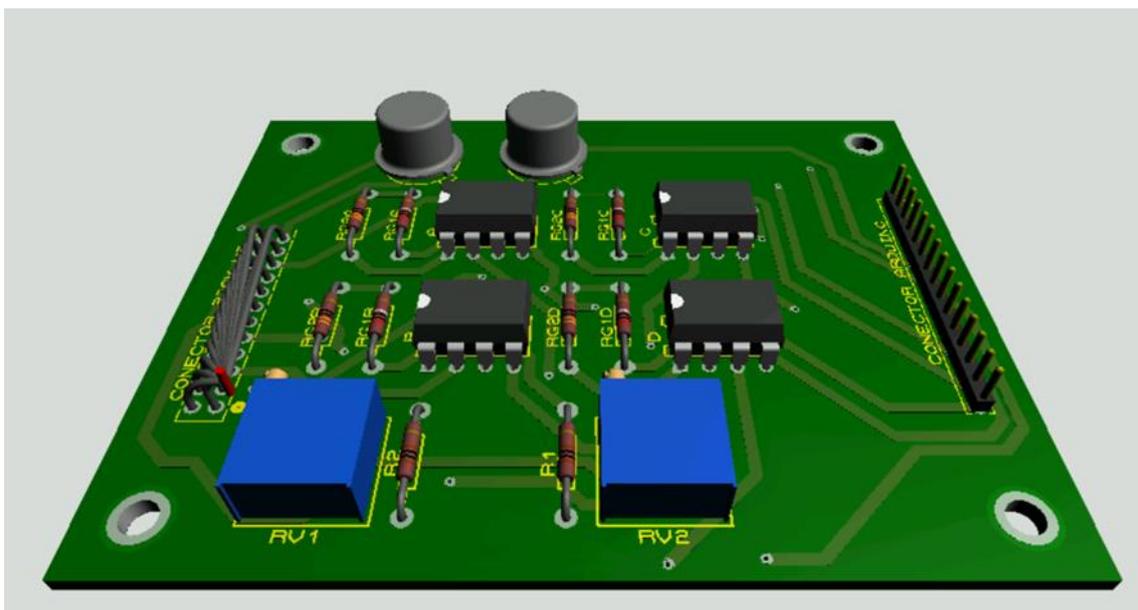


Figura 33: Esquema del circuito electrónico a imprimir.



**Figura 34:** Diseño de la placa para el circuito impreso, a doble cara, con pistas de 1 mm.



**Figura 35:** Vista 3D de la placa del circuito impreso.

Para este trabajo, simplemente se hizo el diseño del circuito impreso, pues debido a las circunstancias extraordinarias en las que fue desarrollado debido a la pandemia de COVID 19, fue imposible realizarla de forma real. Sin embargo, se deja indicada para posibles proyectos futuros.

## 2.6. Resumen de las primeras medidas realizadas

Para finalizar este capítulo y a modo de resumen, hay que indicar que se han podido realizar medidas de la señal reflejada por distintas muestras a partir de un cabezal de DVD. Las muestras utilizadas han sido una muestra negra, una oblea de silicio pulido y un espejo de aluminio. La tensión de salida del fotodiodo varía de forma lineal con la reflectividad de la muestra utilizada, y la desviación presente aumenta al hacerlo la reflectividad de la muestra.

Ha sido necesario el uso de un circuito analógico para acondicionar las tensiones de salida procedentes del cabezal de DVD, para eliminar un offset de aproximadamente 1,6 V que este presenta, y de cara a extender las tensiones resultantes a todo el rango dinámico del conversor A/D necesario para digitalizar la señal y prepararla para su posterior análisis.

En este punto, ya se tiene el set-up físico diseñado y montado, además, ya podía ser utilizado para realizar algunos experimentos de validación. Sin embargo, aún faltaría diseñar el software que permitirá adquirir los datos automáticamente. El proceso de diseño de este explicará en el siguiente capítulo.

## Capítulo 3. Diseño y funcionamiento del software

Para controlar el equipo de medida y poder recoger la información con el ordenador fue necesario diseñar un software que permitiese la comunicación entre los distintos bloques del set-up, y el procesamiento de los datos. Para su desarrollo se eligió el lenguaje Python, pues es un lenguaje sencillo y fácil de aprender, además de disponer de muchas librerías que han sido de utilidad de cara al proyecto.

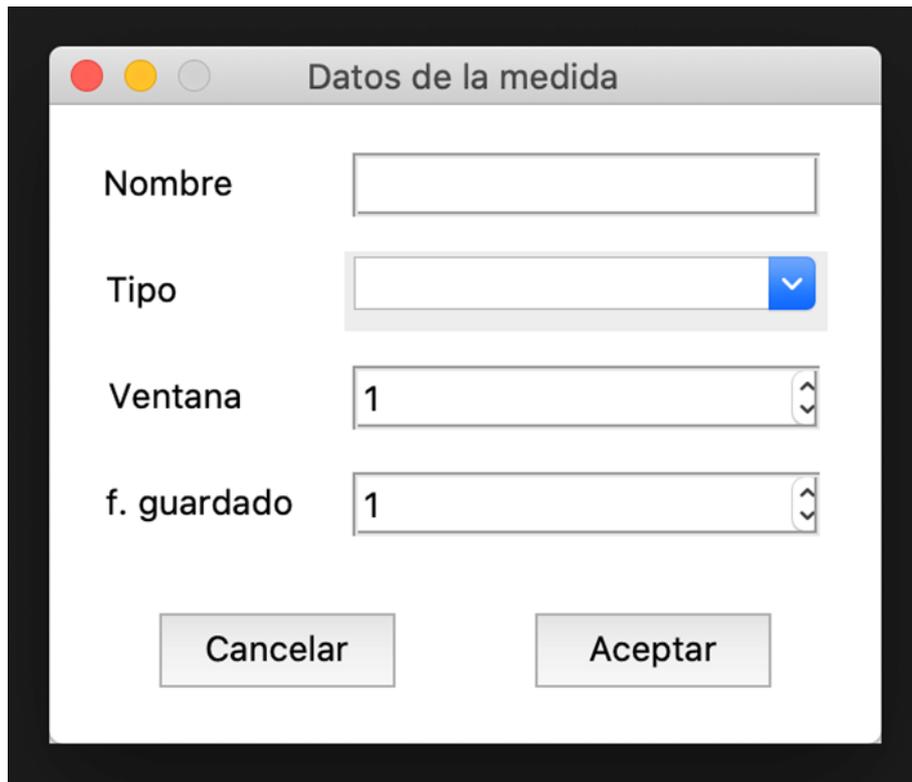
El programa está formado por varios scripts que controlan los diferentes aspectos de este. Muchos de ellos están dedicados al diseño y al control de la interfaz gráfica de usuario, que se intentó que fuese lo más cómoda y simple posible para facilitar su uso, si bien Python no es un lenguaje que destaque en el diseño de interfaces gráficas.

La primera ventana que aparece al ejecutar el script principal desde el símbolo del sistema del ordenador es un menú principal, como se muestra en la figura 36, a partir del cual se puede elegir entre tomar una nueva medida o visualizar alguna ya guardada.



**Figura 36:** Ventana principal

Si seleccionamos la opción de tomar una nueva medida se abrirá otra ventana en la que el usuario debe elegir los parámetros que quiere que siga el programa a la hora de tomarla (figura 37). Estos son el nombre del archivo, el tipo, el ancho de ventana de datos y la frecuencia de guardado. La fuente de luz y los fotodiodos empleados son por defecto los del DVD, y es el único láser que se ha usado en este estudio por las razones y limitaciones que se han comentado anteriormente. El programa aplica un filtro de mediana a los datos en tiempo real para suavizar la presencia de picos espurios que falseen la verdadera medida; no obstante, el filtrado solo se realiza para facilitar la visualización en tiempo real de los datos, pues los que se guardarán al finalizar la medida no estarán filtrados y deberán ser procesados a la hora de trabajar con ellos. Para ello es necesario especificar el ancho de la ventana a la que se aplicará el filtrado en muestras usando el selector indicado. Por otro lado, también es posible seleccionar cuántas muestras por segundo se guardarán aproximadamente en el archivo CSV que se generará al acabar la adquisición.

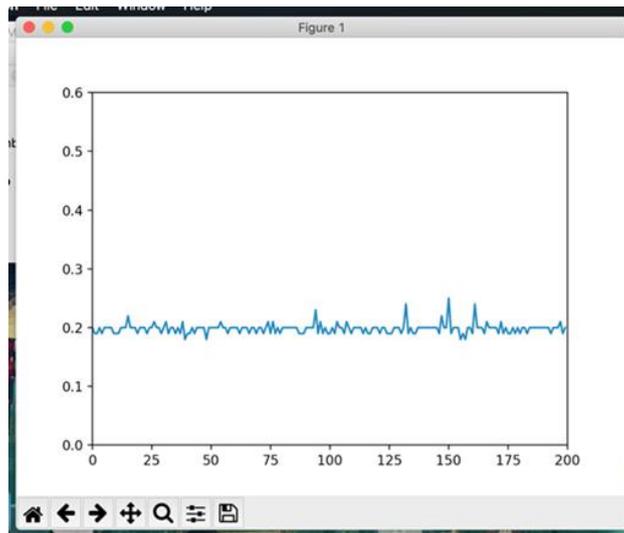


**Figura 37:** Ventana para especificar los parámetros de la medida.

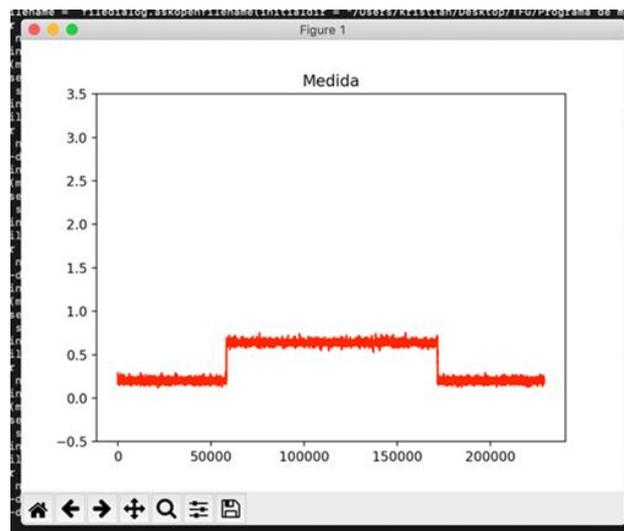
Una vez se pulse el botón de “Aceptar”, se abrirá una ventana en la que se mostrará la adquisición de datos en tiempo real, tal y como se muestra en la figura 38, y utilizando la frecuencia a la que Arduino adquiere datos, que normalmente es de 9,6 kHz; no obstante, en este caso es menor, pues la adquisición se ve ralentizada por el resto de las operaciones que hay en el script. Por ello, a pesar de que anteriormente se haya especificado que el programa guardará un número de muestras por segundo en concreto, la gráfica en tiempo real aparecerá con la máxima resolución.

Cuando se cierra la ventana, se detiene la adquisición y los datos se guardan en un archivo CSV. Dicho archivo puede ser editado con posterioridad usando por ejemplo MatLab o Excel. Además, puede consultarse directamente desde el propio software mediante el botón “Visualizar medida” que se encuentra en el menú principal. Al seleccionarlo, se abrirá una ventana que permite al usuario buscar y abrir el archivo que desea consultar. Posteriormente, el software representa gráficamente la medida desde el CSV y lo mostrará al usuario a través de una nueva ventana, como se muestra en la figura 39.

Para la realización de este script se han utilizado las librerías de Tkinter para el diseño de las ventanas gráficas; Serial, para la comunicación con Arduino; Pandas, para el manejo de los datos adquiridos y matplotlib, para la representación de los gráficos. De igual manera se han utilizado puntualmente numpy; para operaciones matemáticas y time y threading, para el control interno del programa y la creación de hilos de ejecución paralelos.

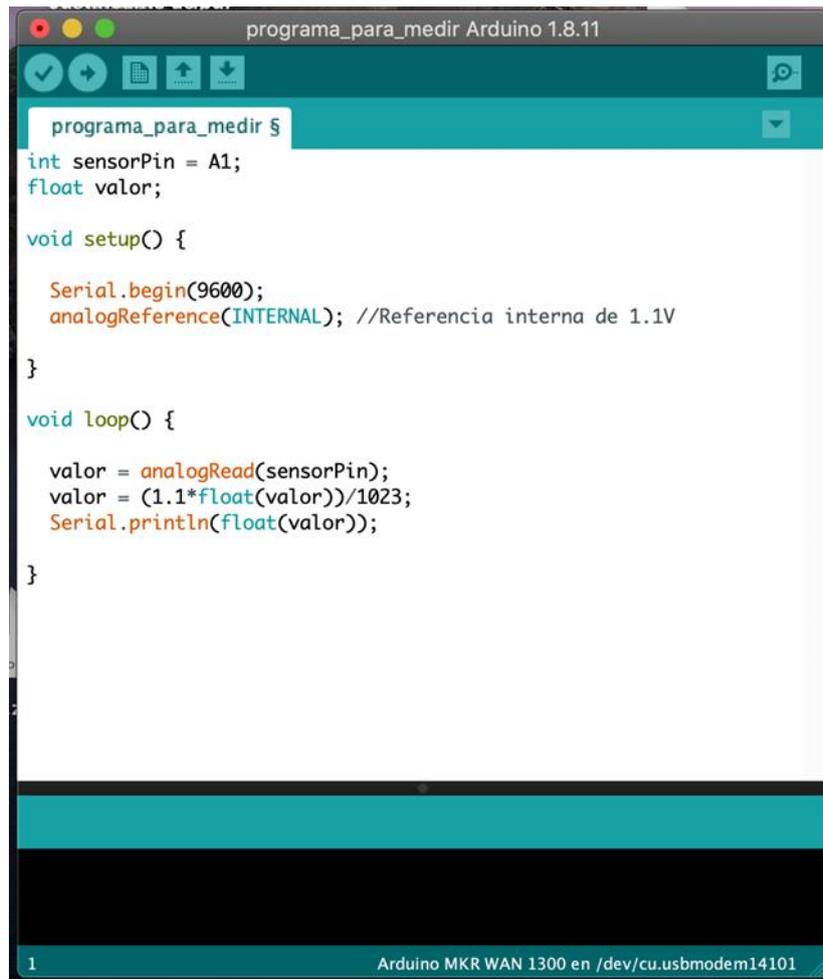


**Figura 38:** Ventana donde se muestran los datos adquiridos en tiempo real. Solo se muestran 200 muestras por pantalla a la vez, pues el gráfico se actualiza en tiempo real. En el eje de ordenadas se muestra la tensión medida en voltios, y el de abscisas el número de muestras.



**Figura 39:** Ventana donde se visualizan las medidas directamente desde el software. En el eje de abscisas se indica el número de muestras, mientras que en el de ordenadas la tensión medida. Se puede apreciar el ruido que está presente durante la captura de los datos.

Además del programa principal, también fue necesario implementar un script para el microcontrolador Arduino, de cara a controlar la adquisición de datos desde la placa (figura 40). Su funcionamiento consiste básicamente en capturar datos a la frecuencia de muestreo interna del Arduino, realizar una conversión digital-analógica y enviarlos por el puerto serie. La conversión es necesaria porque el microcontrolador toma muestras y las representa del 0 al 1023, ya que el convertor A/D utilizado es de 10 bits. En trabajos posteriores se podría implementar la funcionalidad de controlar el encendido y apagado del láser desde el script de Python, comunicándolo con Arduino. El código de Python se adjunta en los anexos del documento para su consulta.



```
programa_para_medir Arduino 1.8.11
programa_para_medir §
int sensorPin = A1;
float valor;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  analogReference(INTERNAL); //Referencia interna de 1.1V
}

void loop() {
  valor = analogRead(sensorPin);
  valor = (1.1*float(valor))/1023;
  Serial.println(float(valor));
}
```

1 Arduino MKR WAN 1300 en /dev/cu.usbmodem14101

Figura 40: Captura del script utilizado para controlar el Arduino

## Capítulo 4. Validación experimental del set-up

Una vez concluido el proceso de diseño y montaje del set-up y el desarrollo del software de control y adquisición, se inició la fase pruebas y testeo. La finalidad ha sido determinar realmente hasta qué punto el dispositivo diseñado es capaz de discernir entre muestras con diferente reflectividad, cual es el grado de fiabilidad del equipo y que tan buenas y estables son las medidas. Para ello se han utilizado obleas de silicio pulido, con diferentes capas antirreflectantes (AR) de óxido y nitruro de silicio depositadas sobre ellas. Posteriormente, se realizará una prueba de sensado haciendo fluir diferentes soluciones a través de una capa de PSi, para así comprobar también si se podían medir cambios de reflectividad al variar el fluido utilizado para rellenar los poros de la muestra.

### 4.1. Caracterización estática del set-up de medida

Lo primero que se hizo fue comprobar la capacidad del set-up para diferenciar entre muestras con diferente reflectividad y para proporcionar medidas repetitivas. Además, también se quería averiguar la respuesta máxima que se podía obtener al interrogar cada una de las muestras de las que se disponía.

#### 4.1.1. Caracterización de muestras con diferentes reflectividades

Las primeras medidas que se realizaron fueron sobre dos muestras diferentes, una oblea de silicio y otras con capas de óxido de silicio. Se realizaron capturas cortas, de en torno a un minuto, pues la intención simplemente era ver cómo se comportaba el equipo ante muestras con diferentes reflectividades.

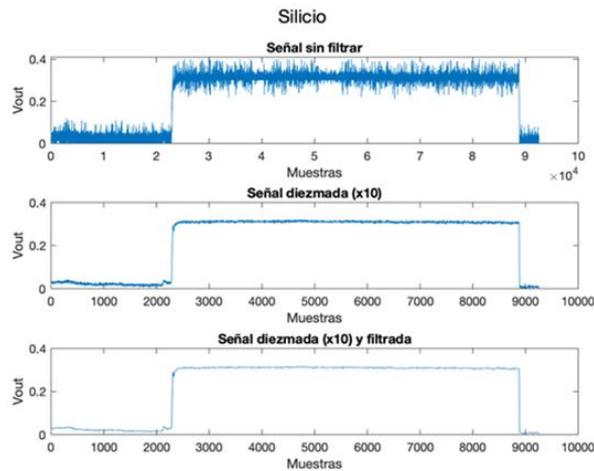
Antes de iniciar cada toma, es importante alinear correctamente el cabezal con la muestra debajo del láser hasta obtener la máxima salida de voltaje posible. Y es que, como ya se ha comentado anteriormente, el equipo es muy sensible a pequeñas desviaciones de la alineación, e incluso un pequeño ángulo en el pulido de la superficie de la muestra puede hacer variar la posición del haz de luz reflejado en la muestra sobre el fotodiodo.

Una vez alineado correctamente, se retira la muestra de debajo del cabezal de DVD con unas pinzas, con cuidado de no mover el montaje para no desalinear el láser. En este punto, se inicia un nuevo ciclo de medida y se captura primero la salida del dispositivo sin colocar la muestra bajo el láser. Después de unos segundos, se introduce la muestra a caracterizar, se comprueba que hay un cambio en la respuesta, se esperan unos segundos y se retira. A continuación, se vuelve a capturar durante unos segundos la salida en vacío, comprobando que la tensión de referencia no ha variado durante la medida, y finaliza el proceso de medida.

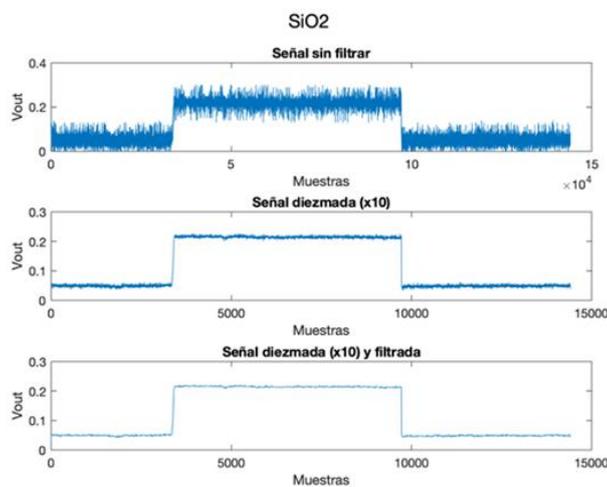
Una vez tomadas las medidas, los datos del fichero CSV generado han sido procesados en Matlab, aplicando un diezmodo y un filtro de mediana de orden 10 para suavizar el ruido de la señal.

En las siguientes figuras, se puede apreciar que el equipo sí discrimina correctamente muestras con una diferencia de reflectividad evidente. Además, a pesar del ruido que tenemos a la salida, una vez procesados los datos, la medida es bastante legible y estable, al menos para capturas

cortas y para este tipo de muestras, como se ilustra en las figuras 41 y 42. En las dos siguientes medidas, un ligero movimiento del set-up provoco un cambio en la línea base de las dos muestras, por lo que para comparar los resultados se utilizó la diferencia entre la tensión de salida al interrogar la muestra y la obtenida en vacío.



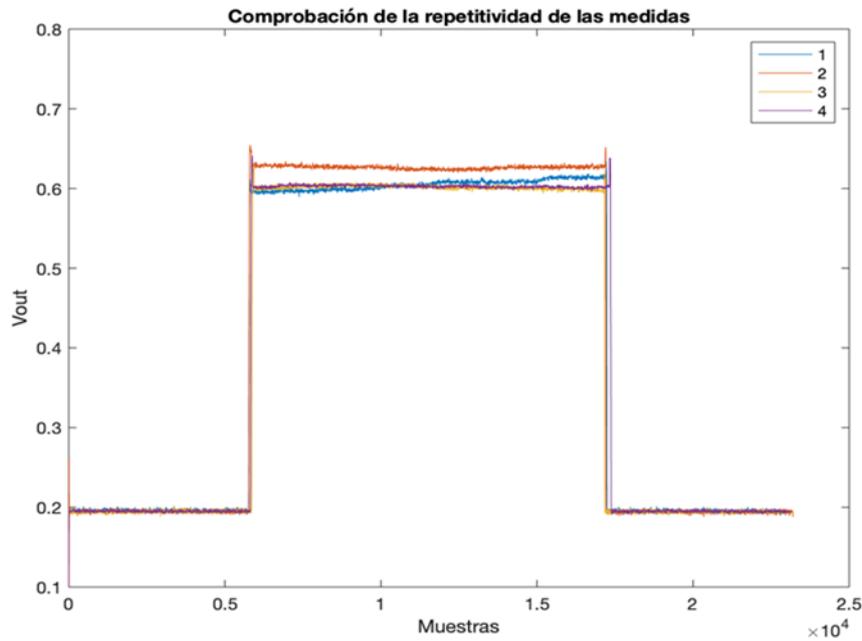
**Figura 41:** Medida de la potencia reflejada por una placa de silicio. La diferencia entre la tensión de salida y la línea base es de en torno a 0,3 V; para una reflectividad de en torno a 34%.



**Figura 42:** Medida de la potencia reflejada por una oblea de silicio con una capa de óxido de silicio de aproximadamente 3  $\mu\text{m}$  de espeso. La diferencia entre la tensión de salida y la línea base es de en torno a 0,16 V; para una reflectividad del 23,48%.

Por otro lado, se realizaron pruebas encaminadas a comprobar que las medidas obtenidas del dispositivo son repetitivas al interrogar muestras pulidas, a pesar de la inestabilidad del circuito ante movimientos. Para ello se realizaron cuatro capturas de 6 minutos usando una oblea de silicio. Los primeros y últimos 2 minutos de la medida corresponden a la referencia, tomada sin muestra.

Si se alinea correctamente y se tiene cuidado de no mover ningún componente del montaje, las medidas son repetitivas (figura 43). No obstante, la inestabilidad sí que puede introducir una mínima deriva en la respuesta, especialmente notable cuando se trata de medidas de larga duración. Nuevamente, este problema presuntamente se solucionaría sustituyendo la placa board empleada en el circuito analógico por un circuito impreso.



**Figura 43:** Repetitividad en la medida de una oblea de silicio pulida por parte del set-up realizado en este proyecto

Se evidencia que las medidas son bastante repetitivas, siendo el valor promedio 0,6086 V. La captura 2 tiene una respuesta 0,0177 V por encima de la media debido a un pequeño movimiento del set-up. En la captura 1 se puede ver la pequeña deriva que introduce la inestabilidad del circuito. Las cuatro medidas han sido procesadas del mismo modo que todas las anteriores.

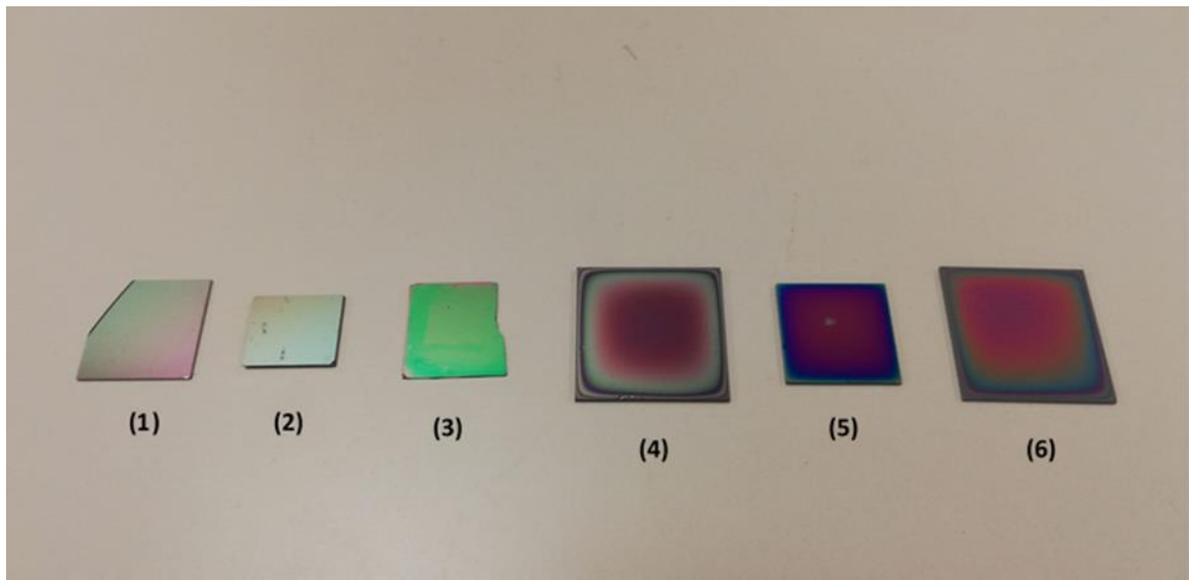
#### 4.1.2. Caracterización de muestras con distintas capas de antirreflectantes

Una vez caracterizada la respuesta del set-up ante muestras con una diferencia de reflectividad evidente, se comienza a evaluar la respuesta del cabezal de DVD ante cambios de reflectividad muy pequeños. Para ello se utilizan seis obleas de silicio con distintas capas antirreflectantes (AR) realizadas con óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y/o nitruro de silicio ( $\text{SiN}_x$ ) (Figura 44). Los valores de la reflectividad de estas muestras para una longitud de onda de 650 nm se encuentran recogidos en la tabla 4.

La reflectividad de dichas muestras en función de la longitud de onda se obtuvo con un espectrómetro de la casa OceanOptics modelo FLAME T, dentro del rango VIS-NIR del espectro. Como fuente de luz se empleó una lámpara halógena de OceanOptics, modelo HL-2000-LL. Con la medida realizada se obtuvieron valores fiables de la respuesta de cada muestra a la longitud

de onda de trabajo del cabezal de DVD, 650 nm. Esta relación se puede ver en a tabla 4 y en la figura 45, donde se pone de manifiesto que algunas muestras poseen una baja diferencia en la reflectividad, de en torno al 0,35%. La intención de esta prueba es comprobar si dicha diferencia puede quedar enmascarada por el efecto del ruido presente en la medida.

Para esta prueba, se siguió el mismo protocolo de medida comentado en el punto anterior. En este sentido, se tomó primero una medida en vacío durante un minuto, luego se introdujo la muestra bajo el láser y se esperaron dos minutos, finalmente, se retira la muestra y se captura un minuto más en vacío. Además, en este caso también se debe ajustar la alineación previamente para cada muestra hasta que se obtenga el máximo valor de repuesta.

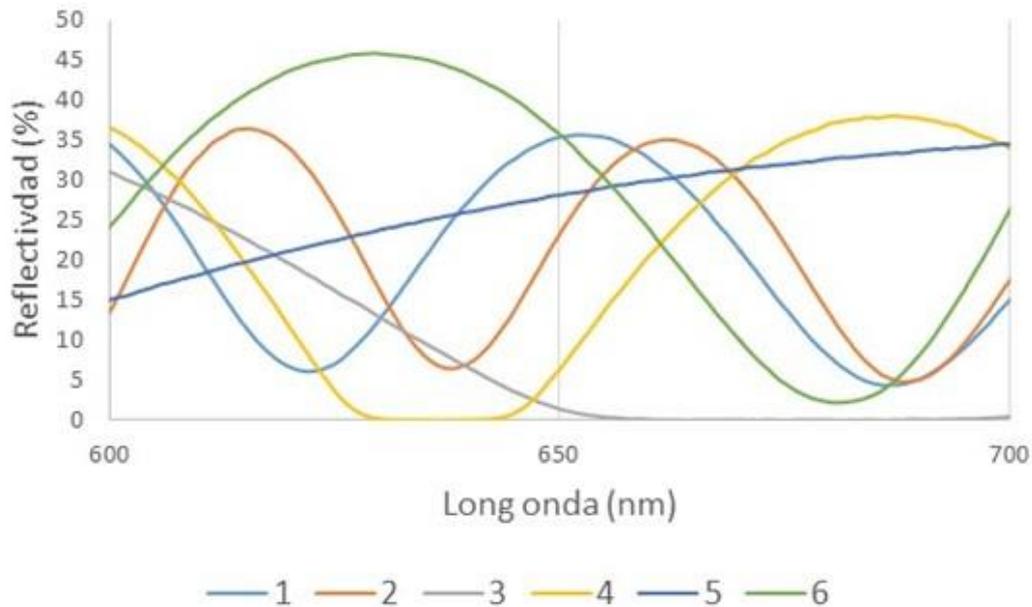


**Figura 44:** Muestras utilizadas para la prueba. (1) Oblea SOI, 2  $\mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$  + 200 nm de Si; (2) Capa de 3  $\mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$ ; (3)  $\text{SiN}_x$  – 275 nm, (4)  $\text{SiN}_x$  – 1  $\mu\text{m}$ ; (5)  $\text{SiN}_x$  - 193 nm, (6)  $\text{SiN}_x$  -  $\text{SiO}_2$  (97 y 136 nm respectivamente).

Valores de reflectividad de cada una de las muestras caracterizadas		
Nº de muestra	Referencia de la muestra	Reflectividad (%)
1	SOI	35,34
2	$\text{SiO}_2$ – 3 $\mu\text{m}$	23,45
3	$\text{SiN}_x$ – 275 nm	1,38
4	$\text{SiN}_x$ – 1 $\mu\text{m}$	6,48
5	$\text{SiN}_x$ – 193 nm	28,2
6	$\text{SiN}_x$ – $\text{SiO}_2$ (97 y 136 nm)	35,69

**Tabla 4:** Valores de reflectividad de cada una de las muestras a analizar

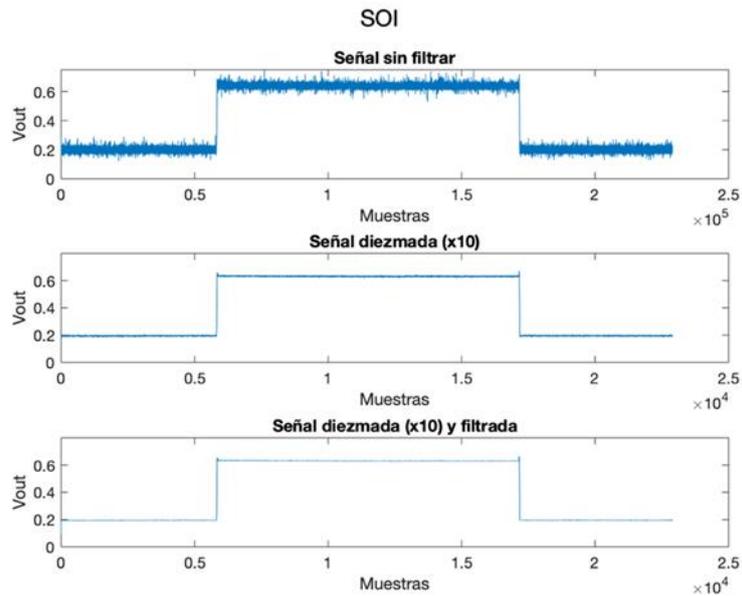
Comparativa entre los espectros obtenidos para cada muestra  
con el espectrómetro



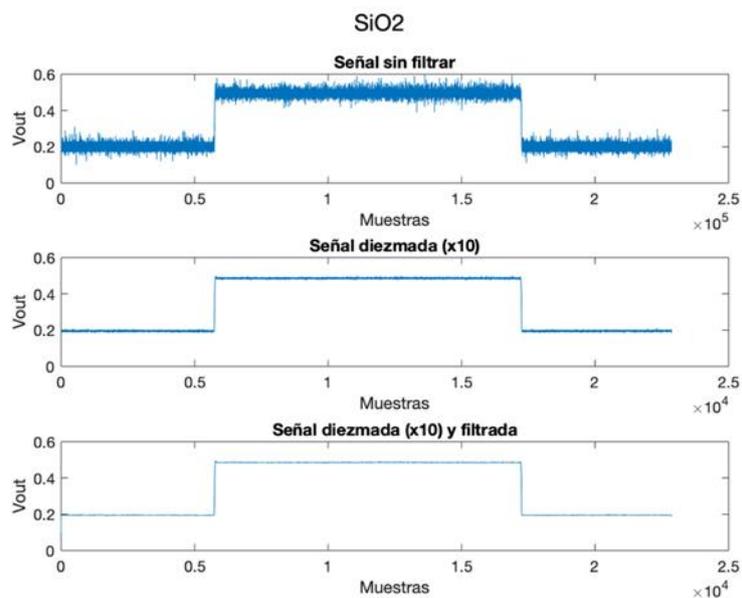
**Figura 45:** Reflectividad de las muestras al examinarlas con el espectrómetro. La línea central resalta la respuesta de cada una a una longitud de onda de 650 nm, que coincide con la emisión del cabezal DVD.

Una vez llevado a cabo el proceso, los resultados que se obtienen son claros. Tal y como se puede apreciar en las figuras 46-52 y en la tabla 5, el dispositivo sí que es capaz de discriminar entre diferencias muy pequeñas de reflectividad. Si bien es cierto que la señal acumula bastante ruido, y que este es más evidente si cabe cuando las variaciones que se miden son muy pequeñas.

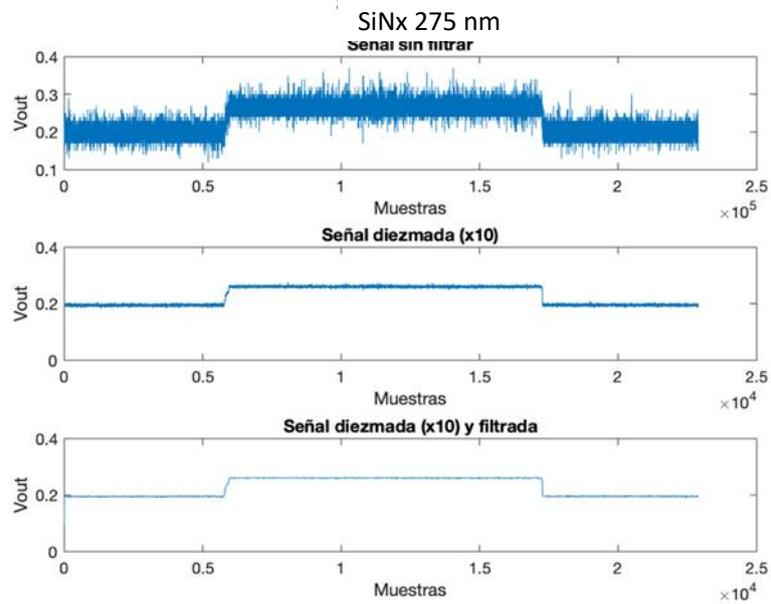
Es importante también mencionar que, para realizar este tipo de medidas, siempre se deben tomar medidas en vacío antes y después, y hay que comprobar antes de iniciar las medidas que esta línea base es estable, pues como ya se dijo anteriormente, los movimientos del circuito pueden afectarla y es importante tener este efecto controlado.



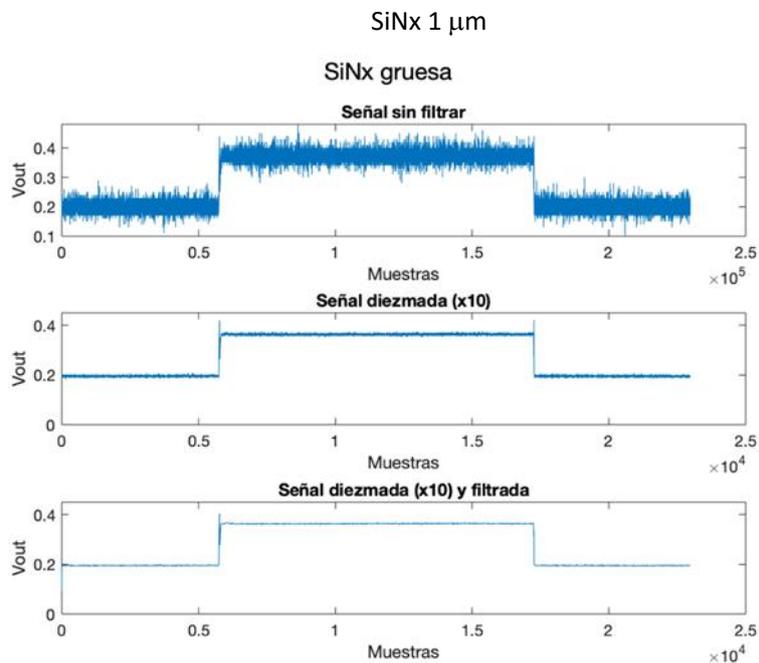
**Figura 46:** Respuesta del set-up ante una muestra SOI antes y después de procesarla.



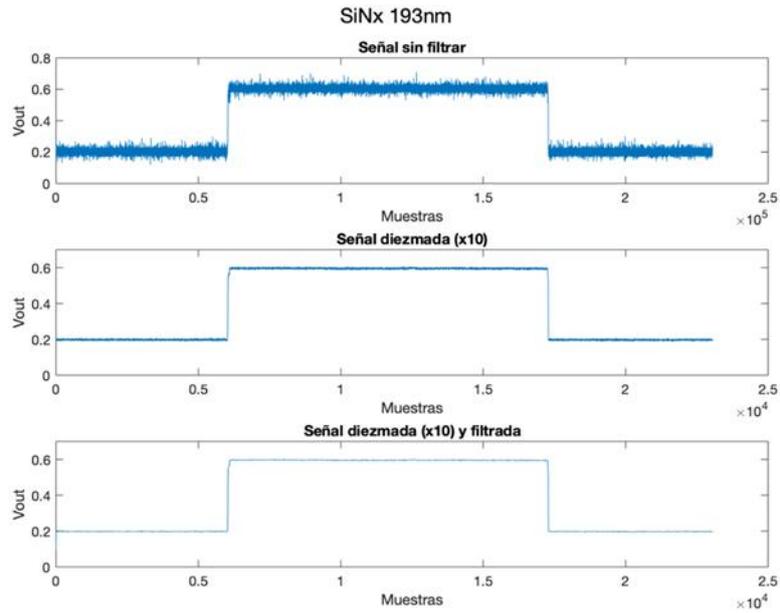
**Figura 47:** Respuesta del set-up ante una muestra de SiO<sub>2</sub> antes y después de procesarla.



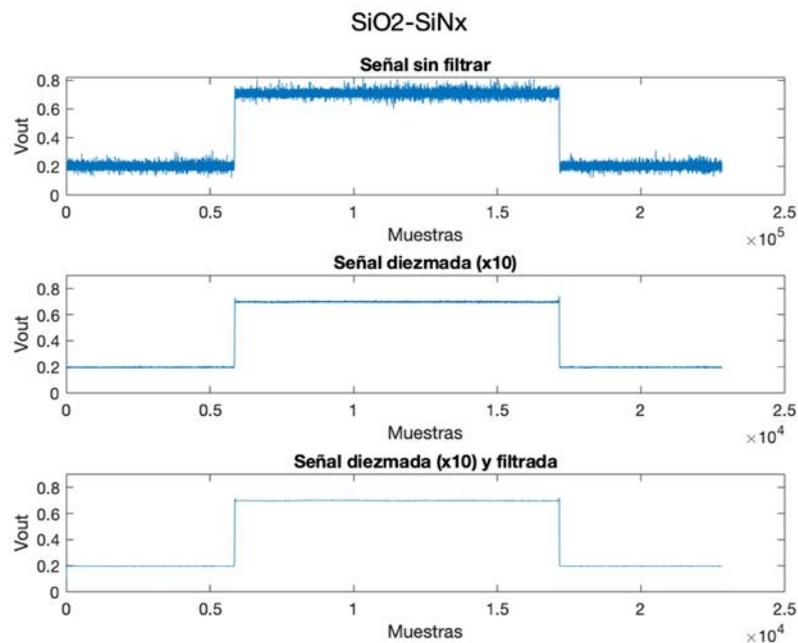
**Figura 48:** Respuesta del set-up ante una capa AR de SiN<sub>x</sub> de 275 nm, antes y después de procesarla.



**Figura 49:** Respuesta del set-up ante una capa AR de SiN<sub>x</sub> de 1 μm de espesor, antes y después de procesarla.



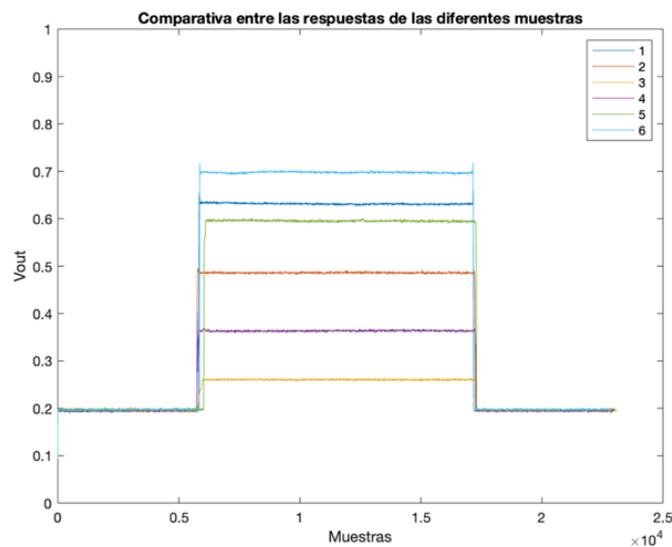
**Figura 50:** Respuesta del set-up ante una capa AR de SiN<sub>x</sub> 193 nm, antes y después de procesarla.



**Figura 51:** Respuesta del set-up ante una capa AR de SiO<sub>2</sub>-SiN<sub>x</sub> de 97 y 136 nm respectivamente, antes y después de procesarla.

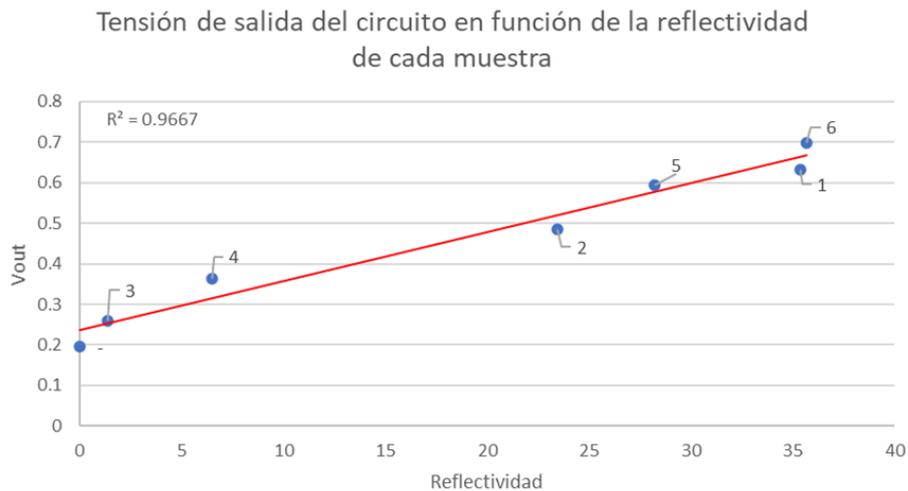
Valores de respuesta de cada una de las muestras				
Nº de muestra	Referencia de la muestra	Reflectividad (%) a 650 nm	Vout (V)	Vout eliminando línea base (V)
1	SOI	35,34	0,6314	0,4355
2	SiO <sub>2</sub> – 3 μm	23,45	0,4858	0,2899
3	SiN <sub>x</sub> – 275 nm	1,38	0,2605	0,0646
4	SiN <sub>x</sub> – 1 μm	6,48	0,3632	0,1673
5	SiN <sub>x</sub> – 193 nm	28,2	0,5951	0,3992
6	SiN <sub>x</sub> – SiO <sub>2</sub> (97 y 136 nm)	35,69	0,6975	0,5016
Línea base	-	0	0,1959	0

**Tabla 5:** Valor promedio de la respuesta obtenida para cada muestra después de haber procesado la señal.



**Figura 52:** Comparación entre las respuestas del set-up de medida a las seis muestras utilizadas en este apartado, después de su procesado.

Además, y como era de esperar, la respuesta entre la tensión proporcionada por el set-up realizado y la reflectividad de las muestras analizadas es lineal. En este sentido, en la figura 53, usando los datos promedios recogidos en la tabla 5, se puede ver como los valores de la tensión de salida frente a los de reflectividad se ajustan bastante bien a una línea, que en este caso tiene un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,9667$ . Este resultado valida los valores ya obtenidos anteriormente en el capítulo 2, donde también se llegó a la conclusión de que la dependencia entre la respuesta del cabezal la reflectividad de la muestra es lineal.



**Figura 53:** Relación entre la tensión de salida (en voltios) y la reflectividad de cada muestra (en %). Se ha añadido una línea de tendencia y el coeficiente de correlación  $R^2$  para mostrar la relación lineal existente entre estas dos variables.

Por lo tanto, se han realizado medidas de distintas muestras de silicio pulidas y con capas AR, cuya diferencia en reflectividad era en ocasiones del orden de solo el 0,35%. Así mismo, se ha podido medir la respuesta de una muestra con una reflectividad de solo el 1,35%. Ambos resultados nos dan una idea de las posibilidades del set-up de medida planteado en este TFG.

## 4.2. Medidas de sensado fluyendo en tiempo real

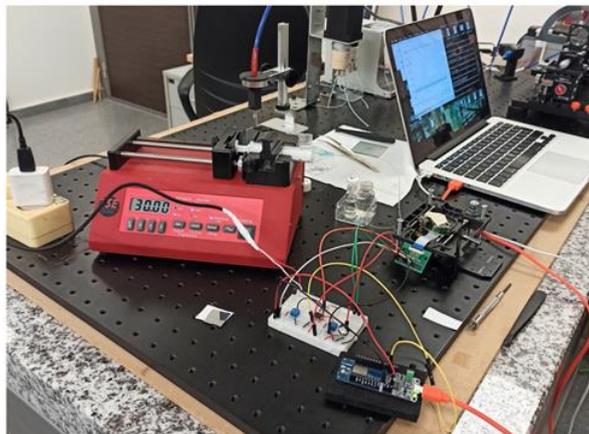
Las últimas pruebas realizadas consistieron en una serie de medidas de sensado empleando distintas soluciones. Teniendo en cuenta que el objetivo final de este dispositivo es la interrogación de sensores de silicio poroso, y que las pruebas de sensado se realizan con un flujo constante de líquido que entra a través de sus poros, es necesario conocer cómo se comporta el cabezal en estas circunstancias. También si es capaz de discriminar los cambios en la reflectividad de la muestra inducidos por el paso de un líquido a través de esta.

Para llevar a cabo este procedimiento, se utiliza la celda de medida realizada en el laboratorio basada en una placa de metacrilato. En ella se sitúa una pegatina de doble cara con un canal de 7 x 2 mm y un espesor de 100  $\mu\text{m}$  aproximadamente. Dicho canal se comunica con el exterior a través de dos tubos de 0,5 mm de diámetro interno. Uno de ellos se utiliza para la entrada y otro para la salida del fluido. La capa de silicio poroso se fija al canal de la celda de medida gracias a la pegatina de doble cara. De cara a delimitar la región de sensado, sobre el comentado canal también se situó una pegatina negra con una pequeña apertura. Finalmente, y para evitar movimientos no deseados en la muestra a caracterizar, la celda de metacrilato es fijada a la base de medida mediante imanes de neodimio. La siguiente figura muestra una fotografía de la celda de medida resultante.



**Figura 54:** Celda de medida realizada para la caracterización de muestras fluyendo en tiempo real.

Una vez está todo colocado y sujeto a la mesa óptica, se conecta uno de los tubos de plástico a una bomba de jeringa TSE Systems NE-1000, en la que se programó un flujo de  $30 \mu\text{l}/\text{min}$ . La bomba se utilizará en modo succión. El otro tubo se introduce directamente en el recipiente que contiene la solución que se desea fluir. La siguiente figura presenta una fotografía realizada durante la prueba de sensado.



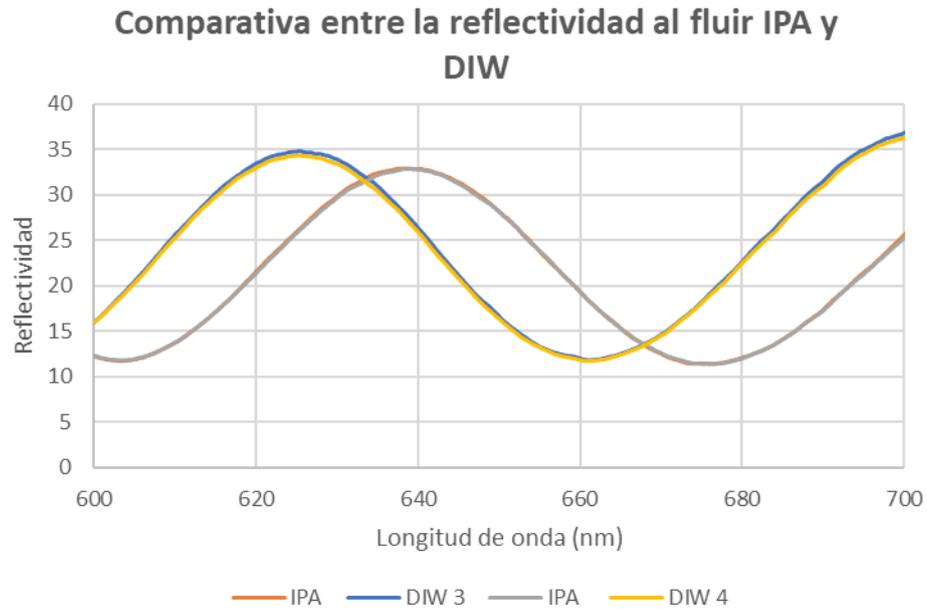
**Figura 55:** Set-up preparado para realizar medidas de sensado en tiempo real.

Lo primero que se hizo fue comprobar con el espectrómetro cuanto influía la celda de metacrilato en el desplazamiento del espectro de la luz reflejada por la muestra a caracterizar. Para ello se utilizó una muestra de silicio pulida con una capa AR, y se capturó su espectro sin y con la celda de metacrilato. Como se ve en la figura 56, la influencia es bastante pequeña.

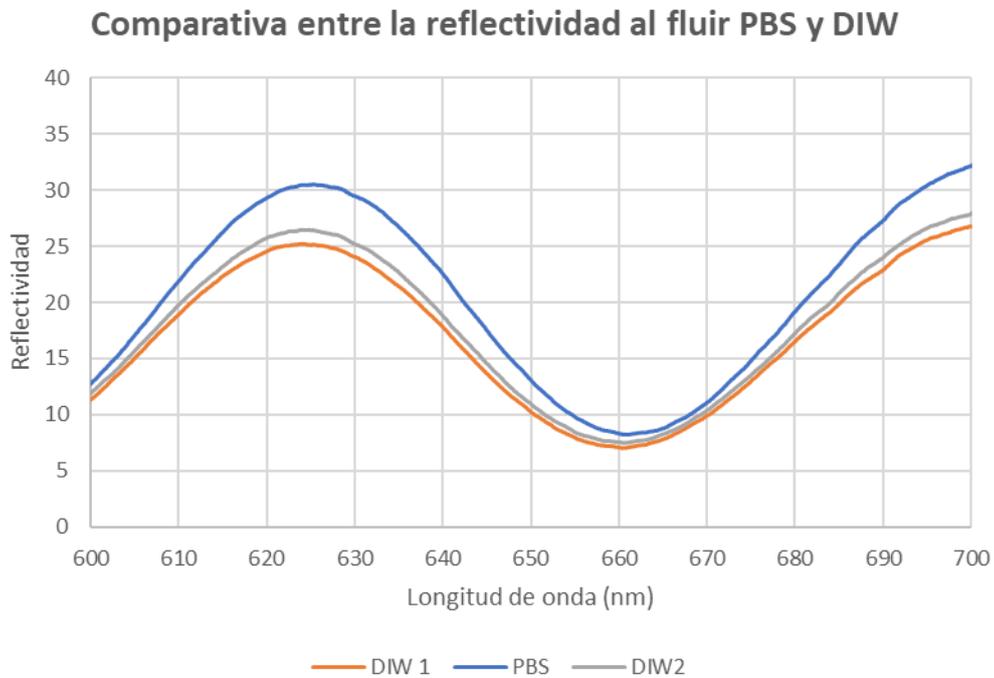


**Figura 56:** Comparativa entre la reflectividad de la muestra con y sin metacrilato medida con el espectrómetro. Se puede apreciar un pequeño cambio en la reflectividad a 659 nm.

A continuación, y de cara a saber qué esperar en la prueba realizada con el nuevo set-up, se realizaron diferentes medidas de sensado empleando una capa de silicio poroso como sensor, y el espectrómetro como equipo de medida. El objetivo de este paso fue comprobar la variación de la reflectividad de la capa de silicio poroso a 650 nm al fluir distintas soluciones (figuras 57 y 58). Inicialmente se realiza una medida con agua desionizada (DIW) para tener una referencia, y se mantiene fluyendo durante varios minutos para que se establezca la respuesta. Una vez transcurrido dicho tiempo, se pasa a fluir la solución a sensar. En este estudio, se usó alcohol isopropílico (IPA) y una solución salina (PBS). Nuevamente el líquido se mantiene fluyendo sobre la capa de silicio poroso hasta que se estabiliza su respuesta. Finalmente, se vuelve a fluir DIW, para comprobar que la referencia no ha cambiado. La medida se llevó a cabo con el espectrómetro. Cabe destacar que, debido a la baja componente especular de la luz reflejada por la capa de silicio poroso, fue necesario multiplicar por 3 el tiempo de integración del espectrómetro respecto al de una muestra de silicio pulido.



**Figura 57:** Desplazamiento del espectro de una capa de silicio poros al fluir DIW e IPA. El cambio de la reflectividad a 650 nm es notable, por lo que debería apreciarse al medir con el set-up diseñado.



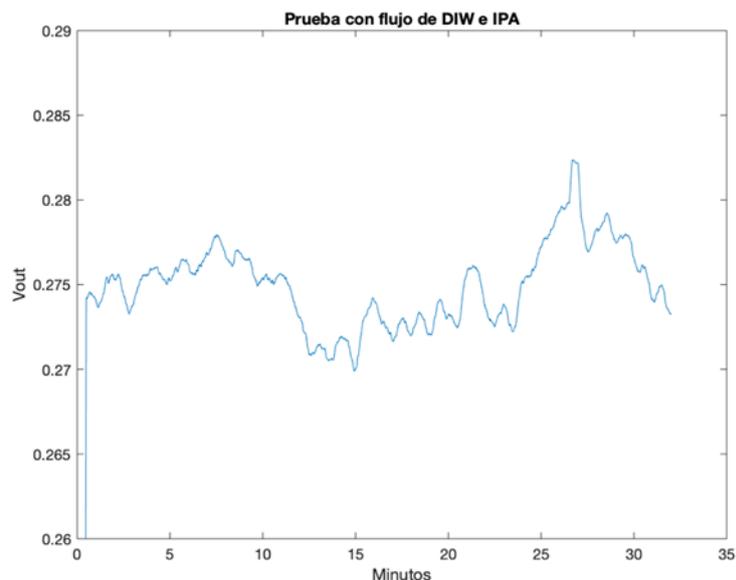
**Figura 58:** Variación de la reflectividad de la capa de silicio poros al fluir DIW y PBS. En este caso, la diferencia en la reflectividad a 650 nm es pequeña.

Una vez tomadas las medidas de referencia con el espectrómetro, se pasó a utilizar el set-up diseñado en este TFG. La primera medida que se tomó fue con flujo de DIW e IPA. Primero se introdujo DIW en el circuito y se mantuvo durante unos 5 minutos para tomar la referencia. Posteriormente se comenzó a fluir IPA durante alrededor de 7 minutos para, finalmente, volver al DIW durante otros 7 minutos.

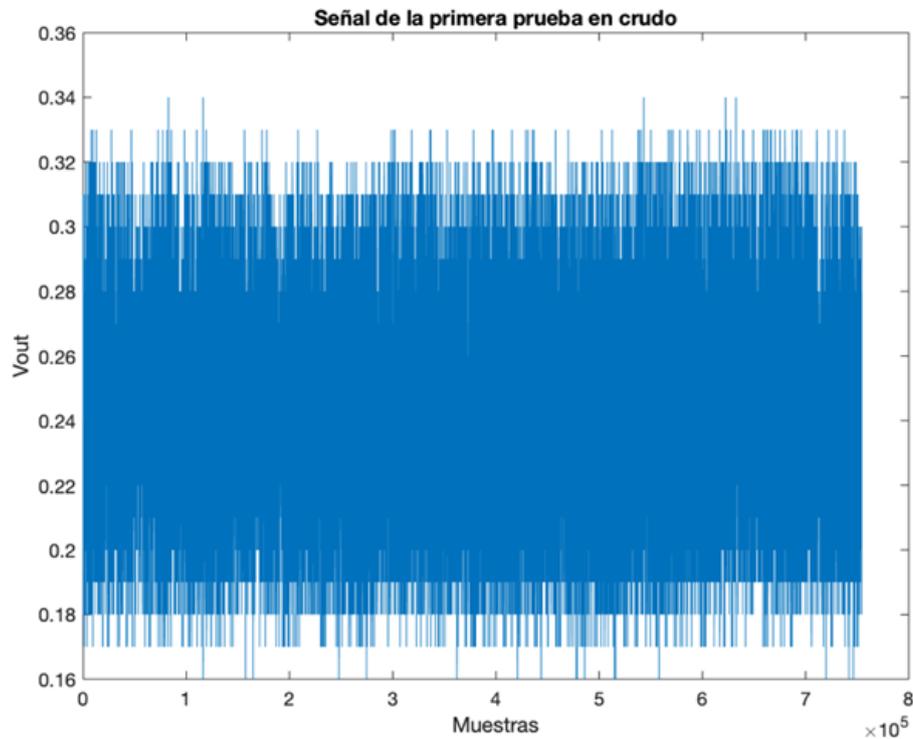
Han sido distintas las pruebas de sensado realizadas fluyendo DIW e IPA. De entre ellas cabe destacar la que se presenta en la figura 59.

La prueba de sensado completa duró 32 minutos aproximadamente, cambiando DIW por IPA a los 13 minutos, y de IPA a DIW a los 23. Los tiempos empleados fueron mayores que los de la prueba realizada con el espectrómetro, para tener aún más seguridad de que la capa porosa alcanza un estado estacionario. Se aprecia claramente un escalón asociado al tiempo durante el que se fluyó IPA. Por otro lado, la potencia de la luz reflejada ha disminuido en lugar de aumentar, como se obtuvo en la medida de sensado realizada con el espectrómetro y representada en la figura 56. Esta variación puede deberse a las faltas de uniformidad en la capa de silicio poroso, dando como resultado que la medida de sensado se haya realizado en un punto distinto.

También se tiene una variación en las tensiones medidas dentro de los ciclos de DIW e IPA. Estas se deben a la baja reflectividad del silicio poroso, la cual sí se ve afectada por el uso de la celda de metacrilato. En este sentido y de cara a obtener la gráfica comentada, ha sido necesario diezmar y filtrar la señal usando factores de reducción muy grandes, pues el ruido que se acumulaba era considerable, tal y como se observa en la figura 60.



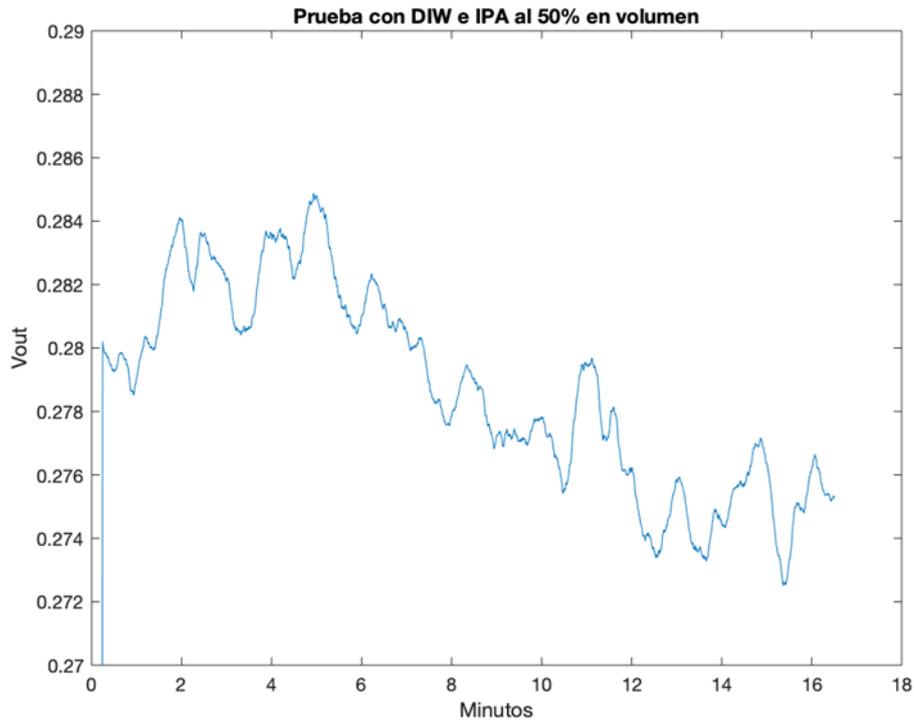
**Figura 59:** Prueba de sensado fluyendo DIW e IPA sobre una capa de silicio poroso.



**Figura 60:** Señal de la prueba de sensado sin procesar.

A continuación, se llevaron a cabo nuevas pruebas empleando concentraciones de IPA del 50 % en volumen. En este caso, debería observarse también un aumento en la reflectividad, aunque menor que en el caso anterior.

La medida duró 16 minutos y medio aproximadamente, y se realizaron los cambios a los 5 minutos (DIW a IPA) y a los 12 (IPA a DIW). Como se puede apreciar en la figura 61, no se detecta en ningún momento un aumento en la tensión de salida, por lo que el dispositivo no está detectando este cambio en la reflectividad. Lo único que se puede ver claramente es una deriva de la señal, que va disminuyendo con el tiempo. Dicha variación se debe a la inestabilidad de la línea base debida a que el circuito electrónico estaba montado en una placa board, y a la alta sensibilidad ante los cambios por parte del fotodiodo.



**Figura 61:** Prueba con DIW e IPA al 50%. Se puede ver como la señal tiene una deriva y que va disminuyendo a lo largo del tiempo, mientras que no se puede apreciar el cambio entre ambos líquidos.

Las medidas con PBS no se han incluido finalmente en este documento pues, si al realizar la prueba de sensado con IPA no es posible detectar un cambio claro en la reflectividad, utilizando PBS esta variación debería ser incluso menor, por lo que no tiene sentido capturar y procesar esa medida ya que no aportará información nueva a las conclusiones de este apartado.

## Capítulo 5. Discusión, conclusiones y líneas futuras

Tras haber diseñado y montado el set-up, las pruebas realizadas nos arrojan dos resultados principales. En primer lugar, ha quedado demostrado que con el cabezal de DVD se pueden caracterizar superficies con distinta reflectividad. Dicha caracterización puede realizarse de forma independiente con los dos láseres que posee el cabezal de DVD, cuyas longitudes de onda son de 650 y 780 nm.

Un problema encontrado ha sido que, debido a su pequeño tamaño, la respuesta de los fotodiodos presentes en el cabezal DVD es sumamente débil. Por ello, la tensión de salida del fotodiodo ha de ser amplificada. En este proyecto y teniendo en cuenta las características del conversor A/D situado a continuación del circuito analógico de acondicionamiento, se utilizó una ganancia en tensión de 21. Dicho valor fue suficiente para distinguir variaciones de reflectividad de solo el 0,35%.

A este inconveniente hay que añadirle el hecho de que el equipo es sumamente sensible a la alineación del láser y la muestra. Si se pretende obtener una medida correcta, dicha alineación ha de ser perfecta. Esto es así debido a que la superficie del fotodiodo es muy pequeña, por lo que una mínima desviación hará que la luz reflejada incida fuera de este. Por ello, también se hace necesario ajustar la alineación antes de hacer cada medida, y es que incluso la pequeña desviación presente en la superficie de una oblea de silicio pulida puede variar la potencia de la luz reflejada que llega al fotodiodo. Se estima que esto se debe a la forma en la que fue diseñado el cabezal para operar en su tarea habitual. Ya se comentó en el capítulo 1 que las muescas que debe leer el reproductor DVD son menores a las 0,5 micras, lo que hace necesaria una elevada sensibilidad a los pequeños cambios en el fotodiodo.

A todo esto, hay que añadir la existencia de un offset de alrededor de 1,6 V a la salida del circuito asociado al fotodiodo. No se conoce la razón de ser de este valor de base, pues el fabricante no lo especifica en ningún momento, y tampoco se menciona su existencia en la hoja de características ni se puede deducir de los esquemas electrónicos que vienen en ella. Este problema fue minimizado gracias a un amplificador diferencial. Si bien no se consiguió eliminar completamente dicha tensión, por no disponer de potenciómetros multivuelta de precisión ni de las resistencias adecuadas para realizar un divisor de tensión, sí que se consiguió que el valor base fuera muy reducido. Este punto es de importancia de cara a aprovechar todo el rango de entrada del posterior conversor A/D.

En línea con lo anterior, otro de los problemas que se encontraron, y que quizá sea el más grave de todos, es que cualquier movimiento de cables en el circuito podía provocar un cambio drástico en la línea base y distorsionar por completo la medida. Esto se puede solucionar realizando un circuito impreso, reduciéndose de este modo la necesidad de cables y conexiones. Sin embargo, debido a las condiciones excepcionales y a las limitaciones provocadas por la pandemia de COVID-19, esto no fue posible, a pesar de que el circuito ha sido diseñado.

Sin embargo, y a pesar de todo lo anterior, el set-up diseñado es capaz de obtener medidas repetitivas al interrogar muestras pulidas, como ya se demostró en apartados anteriores. No obstante, la inestabilidad del circuito sí es capaz de provocar derivas en la respuesta,

especialmente en medidas de larga duración. Asimismo, un pequeño movimiento del set-up diseñado pueden cambiar ligeramente el valor de la medida tomada.

Se ha tratado de realizar una medida de sensado utilizando un sensor basado en una capa de silicio poroso, y fluyendo en tiempo real. La baja componente especular de la luz reflejada por esta muestra, junto con la necesidad de emplear una celda de metacrilato para realizar la medida, hicieron que las variaciones en la tensión del fotodiodo fuesen mínimas.

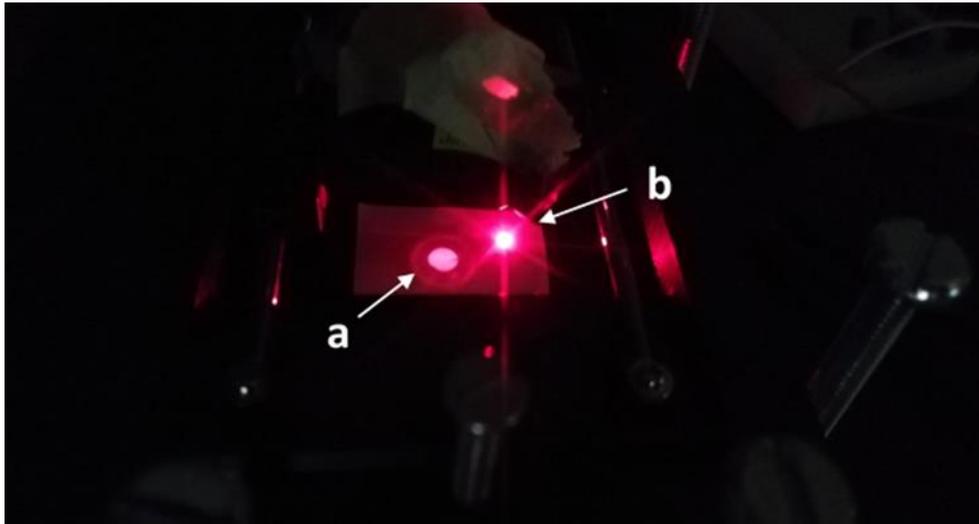
Ahora bien, a la hora de realizar el sensado con flujo en tiempo real, los problemas que se encontraron son aún mayores. Para empezar, el metacrilato que se coloca delante de la muestra produce un descenso de la potencia reflejada que llega al fotodiodo y, por lo tanto, se traduce en un descenso de la tensión de la salida antes y después de amplificar. Para comprobar esto se realizaron una serie de pruebas con multímetro, donde primero se midió el valor de tensión resultante al colocar un espejo de aluminio bajo el láser. Posteriormente se situó la placa de metacrilato encima de este y, para acabar, se volvió a medir la tensión resultante con el espejo, para comprobar que el resultado no hubiese variado por alguna influencia externa al metacrilato. Los resultados que se observan en la tabla 6 muestran como esta pérdida se sitúa en un promedio del 29,28%, cuando anteriormente se determinó que el metacrilato produce un desplazamiento muy pequeño en el espectro. Se estima que esto se debe a que la celda hace que la incidencia de luz no sea del todo perpendicular a la muestra, por lo que el haz de luz reflejado puede sufrir cierta desviación y no incidir correctamente sobre el fotodiodo, produciendo una caída en la tensión de salida.

<b>Determinación de la influencia del metacrilato</b>			
<b>Espejo 1ª medida (mV)</b>	637	621	618
<b>Espejo + metacrilato (mV)</b>	455	441	448
<b>Espejo 2ª medida (mV)</b>	622	671	633
<b>Promedio espejo (mV)</b>	629,5	646	625,5
<b>Diferencia (mV)</b>	174,5	205	177,5
<b>Porcentaje de pérdida (%)</b>	27,72	31,73	28,38

**Tabla 6:** Comparativa entre la respuesta con y sin metacrilato encima de un espejo de aluminio. Las pérdidas que este ocasiona se sitúan en una media de 29,28% menos de tensión de salida.

Además, la potencia del láser ha resultado ser muy pequeña para este cometido, pues se ha comprobado que no es capaz de inducir una variación de tensión notable por parte de los fotodiodos durante las pruebas de sensado en tiempo real. De cara a conocer la potencia del láser, se ha utilizado un medidor de potencia ThorLabs PM100D con un sensor S121C sin calibrar. La calibración no es un punto prioritario en este caso, pues solo se necesitaba comparar la

potencia del láser del cabezal DVD con la de uno procedente por ejemplo de un puntero láser rojo comercial. Las medidas realizadas dieron como resultado que la potencia del láser del cabezal DVD es de  $22,5 \mu\text{W}$ , mientras que para un puntero láser es de  $635 \mu\text{W}$ . Por lo tanto, la primera es 28,2 veces menor que la segunda. La diferencia de intensidad entre ambas fuentes de luz se puede apreciar en la figura 62. Es importante destacar que el fabricante indica que la potencia del láser del cabezal DVD debería ser de 7 mW, no obstante, la potencia en este caso se ha visto reducida porque se ha retirado la lente de enfoque y el haz de luz no se encuentra concentrado.



**Figura 62:** Comparativa entre la intensidad del láser del cabezal de DVD y la del láser de un puntero comercial. (a) Spot de luz del láser del cabezal; (b) Spot de luz del puntero láser.

Por último, a la hora de realizar medidas con flujo constante, no fue posible llegar a un buen resultado. El uso de capas de silicio poroso con una inferior componente especular de la luz reflejada, junto con la elevada sensibilidad a la falta de alineación por parte del cabezal de DVD, hacen que sea complicado obtener una respuesta correcta. Además, las soluciones a caracterizar fueron fluidas durante varios minutos, para asegurar el rellenado de los poros. Estos largos periodos hacen que la medida pueda verse afectada ante cualquier movimiento externo que perturbe al circuito y produzca un cambio en la línea base.

## 5.1. Posibles líneas de trabajo futuras

Los dos elementos que mayor dificultad añadieron a la hora de realizar este proyecto fueron sin duda el láser y el fotodiodo. Ambos están diseñados para un trabajo muy específico, que implica detección de cambios muy pequeños sobre un disco, por lo que no es de extrañar que se adapten peor a un trabajo más macroscópico.

El principal impedimento para conseguir una correcta alineación de forma relativamente sencilla es el reducido tamaño de cada fotodiodo. Sustituir el array de fotodiodos que viene de fábrica

por un fotodiodo comercial con mayor superficie no resulta complicado, y puede salvar satisfactoriamente esta carencia.

Por otro lado, se ha comprobado que la potencia del láser es muy pequeña, lo cual se traduce en una respuesta muy pobre, especialmente al usar muestras de silicio poroso con una baja componente especular de la luz reflejada, y la celda de medida de metacrilato. Esto se podría solventar sustituyendo el láser del cabezal de DVD por un puntero láser comercial.

Además, y relacionado con el circuito de acondicionamiento de las tensiones procedentes del cabezal de DVD, es de suma importancia sustituir la placa board por un circuito impreso. De este modo se reduce el número de cables y conexiones presentes, cuyo movimiento da lugar a errores de medida.

## 5.2. Conclusiones

El presente proyecto ha tenido como objetivo la realización de un set-up de medida de sensores fotónicos basados en un cabezal de DVD. Su bajo coste y alta disponibilidad lo hacen atractivo de cara a la realización de posibles equipos comerciales.

Se ha adquirido y estudiado un cabezal de DVD de la casa Sanyo. Atendiendo a sus características, se ha realizado un circuito analógico de acondicionamiento de las tensiones procedentes de dicho cabezal, para adaptarla al rango de entrada de un convertor A/D. Tras la digitalización, la señal obtenida ha sido procesada y representada empleando un software específico que se ha realizado.

Cabe destacar los buenos resultados obtenidos caracterizando obleas de silicio pulidas. En este sentido, se han podido discriminar de forma correcta diferencias en la reflectividad de distintas muestras de solo el 0,35%. Además, la medida ha sido repetitiva. También se ha obtenido una relación lineal entre las tensiones procedentes del fotodiodo del cabezal de DVD y la reflectividad de las muestras analizadas.

Por otro lado, se han encontrado numerosos problemas durante la realización del set-up. A continuación, se exponen de forma resumida:

En primer lugar, el fotodetector del cabezal tiene una superficie muy pequeña, por lo que el dispositivo es extremadamente sensible a la desalineación. Dicha alineación resulta bastante complicada, lo que hace difícil tener una buena medida. Esto significa que cualquier mínimo movimiento del set-up durante una captura va a distorsionar completamente la medida. Además, antes de cada captura se ha de corregir la orientación del cabezal.

En segundo lugar, la presencia de un offset en la tensión de salida del fotodiodo y la baja variación en dicha tensión empleando muestras con reflectividades próximas al 100% hace necesaria la implementación de un circuito para acondicionar dichas tensiones al rango de entrada del convertor A/D. El circuito se ha basado en un amplificador diferencial. Su montaje se realizó en una placa board, haciendo que la presencia de ruido e inestabilidades en la medida fuese en ocasiones notable. En este sentido, cualquier movimiento en los cables de conexiones de dicho montaje provocaban cambios en la tensión de salida. La solución propuesta a este

inconveniente es la realización de un circuito impreso, el cual no pudo ser llevado a cabo debido a la situación extraordinaria ocasionada por la pandemia de COVID 19.

En tercer lugar, la potencia del láser que utiliza el cabezal es muy pequeña. Además de esto, cuando se pretende analizar una capa de silicio poroso y se sitúa esta en la celda de metacrilato necesaria para realizar medidas fluyendo distintas soluciones en tiempo real, la componente especular de la luz reflejada es extremadamente baja. Por ello, junto al problema de la estabilidad del circuito durante un largo periodo. De medida, hacen muy complicado realizar una medida de sensado de forma correcta.

De cara a reforzar los puntos débiles comentados, se plantea la sustitución del láser del cabezal de DVD por uno más potente, por ejemplo, un puntero comercial; y del fotodiodo por uno de mayor superficie. Ambos componentes son también de bajo coste, y darán una mayor versatilidad y funcionalidad al set-up de medida.

## Bibliografía

- Baaske, M., & Vollmer, F. (2012). Optical resonator biosensors: Molecular diagnostic and nanoparticle detection on an integrated platform. *ChemPhysChem*, 13(2), 427–436. <https://doi.org/10.1002/cphc.201100757>
- Bhalla, N., Jolly, P., Formisano, N., & Estrela, P. (2016). Introduction to biosensors. *Essays in Biochemistry*, 60(1), 1–8. <https://doi.org/10.1042/EBC20150001>
- Campbell, D. P. (2008). Interferometric Biosensors. *Principles of Bacterial Detection: Biosensors, Recognition Receptors and Microsystems*, 169–211. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-75113-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-0-387-75113-9_9)
- Chen, C., & Wang, J. (2020). Optical biosensors: An exhaustive and comprehensive review. *Analyt*, 145(5), 1605–1628. <https://doi.org/10.1039/c9an01998g>
- Chu, C. L., & Chiu, C. Y. (2007). Development of a low-cost nanoscale touch trigger probe based on two commercial DVD pick-up heads. *Measurement Science and Technology*, 18(7), 1831–1842. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/7/006>
- Claes, T., Bogaerts, W., & Bienstman, P. (2010). Experimental characterization of a silicon photonic biosensor consisting of two cascaded ring resonators based on the Vernier-effect and introduction of a curve fitting method for an improved detection limit. *Optics Express*, 18(22), 22747. <https://doi.org/10.1364/oe.18.022747>
- File:LDDVDComparison-mod.png - Wikimedia Commons*. (n.d.). Retrieved August 2, 2020, from <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LDDVDComparison-mod.png>
- Föll, H., Christophersen, M., Carstensen, J., & Hasse, G. (2002). Formation and application of porous silicon. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 39(4), 93–141. [https://doi.org/10.1016/s0927-796x\(02\)00090-6](https://doi.org/10.1016/s0927-796x(02)00090-6)
- Goldwasser, S. (2011). Lasers in Consumer Electronics: The Optical Pickup. *Optics and Photonics News*, 22(2), 12. <https://doi.org/10.1364/opn.22.2.000012>
- Harraz, F. A. (2014). Porous silicon chemical sensors and biosensors: A review. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 202, 897–912. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.06.048>
- Hong, D. H., Kang, M. Il, & Kim, S. W. (2013). Development of a low-cost microscope using a DVD optical pickup head. *Optik*, 124(15), 2089–2092. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.06.052>
- Ismail, N., Kores, C. C., Geskus, D., & Pollnau, M. (2016). Fabry-Pérot resonator: spectral line shapes, generic and related Airy distributions, linewidths, finesses, and performance at low or frequency-dependent reflectivity. *Optics Express*, 24(15), 16366. <https://doi.org/10.1364/oe.24.016366>
- Karunakaran, C., Rajkumar, R., & Bhargava, K. (2015). Introduction to Biosensors. In *Biosensors and Bioelectronics*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803100-1.00001-3>
- Kilian, K. A., Böcking, T., & Gooding, J. J. (2009). The importance of surface chemistry in mesoporous materials: Lessons from porous silicon biosensors. *Chemical Communications*, 6, 630–640. <https://doi.org/10.1039/b815449j>
- Kim, J., Campbell, A. S., de Ávila, B. E. F., & Wang, J. (2019). Wearable biosensors for healthcare monitoring. *Nature Biotechnology*, 37(4), 389–406. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0045-y>
- Kostner, S., & Vellekoop, M. J. (2008). Cell analysis in a microfluidic cytometer applying a DVD

- pickup head. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 132(2), 512–517. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.11.038>
- La *Tecnología del DVD*. (n.d.). Retrieved August 2, 2020, from <https://www.comunidadelectronicos.com/articulos/tecnologia-dvd.htm>
- Lin, V. S. Y., Motesharej, K., Dancil, K. P. S., Sailor, M. J., & Ghadiri, M. R. (1997). A porous silicon-based optical interferometric biosensor. *Science*, 278(5339), 840–843. <https://doi.org/10.1126/science.278.5339.840>
- Martín-Sánchez, D., Ponce-Alcántara, S., Martínez-Pérez, P., & García-Rupérez, J. (2019). Macropore Formation and Pore Morphology Characterization of Heavily Doped p-Type Porous Silicon. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(2), B9–B12. <https://doi.org/10.1149/2.0051902jes>
- Martín Sánchez, D. (2019). *Desarrollo de biosensores fotónicos basados en membranas de silicio poroso*. <https://doi.org/10.4995/THESIS/10251/125695>
- Mayer, K. M., & Hafner, J. H. (2011). Localized surface plasmon resonance sensors. *Chemical Reviews*, 111(6), 3828–3857. <https://doi.org/10.1021/cr100313v>
- Optical Storage*. (n.d.). Retrieved August 1, 2020, from <https://web.archive.org/web/20120201065817/http://www.electronics.dit.ie/staff/tscaarf/DISKS/CD/CD.htm>
- Pérez-Luna, V. P. (2005). Surface plasmon resonance. *Surfaces and Interfaces for Biomaterials*, 248–270. <https://doi.org/10.1533/9781845690809.2.248>
- Piliarik, M., Vaisocherová, H., & Homola, J. (2009). Surface Plasmon Resonance Biosensing. In *Methods in molecular biology (Clifton, N.J.)* (Vol. 503, Issue 5, pp. 65–88). [https://doi.org/10.1007/978-1-60327-567-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-60327-567-5_5)
- Red Bio-Sens. (n.d.). *La tecnología de biosensores*. Retrieved August 2, 2020, from <http://www.imm-cnm.csic.es/redbiosensores/tecnologia-de-biosensores.html>
- Russell-Pavier, F. S., Picco, L., Day, J. C. C., Shatil, N. R., Yacoot, A., & Payton, O. D. (2018). “Hi-Fi AFM”: High-speed contact mode atomic force microscopy with optical pickups. *Measurement Science and Technology*, 29(10). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aad771>
- Sailor, M. J. (2011). Porous Silicon in Practice. *Porous Silicon in Practice*. <https://doi.org/10.1002/9783527641901>
- Shafiee, H., Lidstone, E. A., Jahangir, M., Inci, F., Hanhauser, E., Henrich, T. J., Kuritzkes, D. R., Cunningham, B. T., & Demirci, U. (2014). Nanostructured optical photonic crystal biosensor for HIV viral load measurement. *Scientific Reports*, 4, 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep04116>
- Uhlir, A. (1956). Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon. *Bell System Technical Journal*, 35(2), 333–347. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1956.tb02385.x>
- Watanabe, Y., Arita, Y., Yokoyama, T., & Igarashi, Y. (1975). Formation and Properties of Porous Silicon and Its Application. *Journal of The Electrochemical Society*, 122(10), 1351–1355. <https://doi.org/10.1149/1.2134015>

Documento

# Presupuesto

Estudio del uso de cabezales de lectura de discos  
ópticos para la interrogación de sensores fotónicos  
de silicio poroso

AUTOR: KRISTIAN DAVID ESCALANTE RODRÍGUEZ

TUTOR: ALEJANDRO JOSÉ MARTÍNEZ ABIETAR

Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica, Universidad Politécnica de Valencia

COTUTOR: JAIME GARCÍA RUPÉREZ

Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica, Universidad Politécnica de Valencia

COTUTOR: SALVADOR PONCE ALCÁNTARA

Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica, Universidad Politécnica de Valencia

CURSO 2019-2020

## Índice de presupuestos

1. Introducción .....	1
2. Cuadro de mano de obra.....	2
3. Cuadro de materiales .....	3
4. Cuadro de precios unitarios.....	6
5. Cuadro de precios descompuestos.....	8
6. Cuadro de precios parciales .....	13
7. Presupuesto de ejecución por contrata .....	15

## 1. Introducción

En este nuevo documento del TFG se presenta una valoración de los costes económicos derivados del desarrollo del proyecto. En este apartado se detallarán diversas consideraciones que se han tenido en cuenta a la hora de abordar los presupuestos.

En primer lugar, se abordará el coste de la mano de obra. Para la ejecución de este proyecto ha sido necesario contar con un ingeniero biomédico junior en calidad de estudiante, que ha sido quien ha llevado la mayor parte de la carga en horas de trabajo. Además, también se contó con la colaboración de dos cotutores, que fueron los encargados de supervisar al alumno durante el desarrollo del trabajo.

Los costes de esta mano de obra se han dividido de la siguiente manera:

- Para el ingeniero junior, se ha tenido en cuenta un salario bruto de 20000 euros anuales.
- Para el tutor y ambos cotutores, se fijado la cifra de 40000 euros brutos anuales.

A estos salarios habría que sumarles los cotes asumidos por la empresa que realiza la contratación en concepto de cotizaciones a la seguridad social, que ascienden a un 33,4% sobre el salario bruto anual. Dentro de este porcentaje se encuentran las contingencias comunes, o contribución al programa de pensiones, con un 23,6%; el pago de prestaciones por desempleo, con un 5,5%; las contribuciones por accidentes de trabajo y/o enfermedad del 3,5%; retenciones en concepto de formación del 0,6% y la cobertura de despidos de empresas en quiebra (FOGASA), con un 0,2%.

Este coste total se refleja en el cuadro de mano de obra como coste por hora de trabajo. El cálculo se realizó asumiendo una jornada laboral de 8 horas al día, eliminando del cómputo total del año los fines de semana que, considerando que un año normal (no bisiesto) tiene por lo general 52 semanas, dan un total de 104 días. A esto habría que sumar los 30 días de vacaciones y 15 días festivos. En total, se cuentan 216 día de trabajo efectivo, lo que se traduce en 1728 horas de trabajo al año.

En segundo lugar, a la hora de abordar los costes de material es necesario tener en cuenta tanto los materiales amortizables como los no amortizables. Dentro de los amortizables podemos encontrarnos varios grupos según la vida útil de los mismos:

- **Materiales amortizables con una vida útil de 5 años:** En este grupo entran los materiales tangibles, como el ordenador portátil, pero también se deben incluir los programas instalados, cuya vida útil se asume igual a la del ordenador. El coste de cada material se calculará dependiendo del nivel de uso de este. Para aquellos que fueron utilizados de forma más o menos constante durante los seis meses de duración del proyecto se aplicó un factor de amortización de  $\frac{6 \text{ meses}}{5 \text{ años} * 12 \text{ meses}} = 0,1$ . Algunos materiales solo se emplearon durante el último mes, por lo que se utilizó un factor de amortización de  $\frac{1 \text{ mes}}{5 \text{ años} * 12 \text{ meses}} = 0,017$ . Para los que se usaron de forma puntual se calculó el coste por hora de uso.
- **Materiales amortizables con una vida útil de dos años:** En este caso se procedió de la misma forma que en el apartado anterior, tomando un coeficiente de amortización de

$\frac{6 \text{ meses}}{2 \text{ años} * 12 \text{ meses}}$  para los materiales usados durante los seis meses del proyecto; y calculando el coste por hora de uso para el resto.

- **Materiales amortizables a un año:** en este apartado solo se incluye el programa Google Sketchup, pues la duración de su licencia es de un año. Su coste se calculó como coste por hora de uso.

Fuera de este grupo están los materiales no amortizables, cuyo coste se calcula por unidad utilizada. Es importante destacar que, para los materiales cuyo coste se calcula por hora de uso, se divide el precio total del mismo entre el total de horas contenidas en su periodo de amortización. De este valor obtenido se toma solo el 70%, pues se supone la existencia de un tiempo de descanso para todos los equipos.

Al final, al presupuesto de ejecución material se le deberá sumar un 13% en concepto de gastos generales, un 6% de beneficio de explotación industrial, y la máxima base imponible del IVA de un 21%. Una vez sumados, se obtiene el precio de ejecución por contrata.

## 2. Cuadro de mano de obra

Nº	Código	Denominación de la mano de obra	Precio	Horas	Total
1	MO.ING	Ingeniero biomédico junior	15,4400	318,5000	4917,6400
2	MOCOT1	Primer cotutor encargado de la supervisión del trabajo	39,8900	32,0000	1276,4800
3	MO.COT2	Segundo cotutor encargado de la supervisión del trabajo	39,8900	11,0000	438,7900
4	MO.TUT	Tutor encargado de la supervisión del trabajo	39,8900	0,5000	19,9450
5	MO.OP	Operario de la impresora 3D	18,0000	1,0000	18,0000
Total mano de obra					6670,86

El coste total en mano de obra asciende SEIS MIL SEISCIENTOS SETENTA EUROS CON OCHENTA Y SEIS CÉNTIMOS (**6652,86 €**).

### 3. Cuadro de materiales

#### Material amortizable a 5 años

Dentro de este cuadro se muestra el precio de los materiales amortizables a cinco años. En la primera tabla están aquellos para los que se calculó el coste por hora de uso. En la segunda tabla se encuentran los materiales cuyo coste se fijó usando un coeficiente de amortización de 0,1; pues fueron usados durante los seis meses que duró el proyecto. En la tercera tabla se usó un coeficiente de amortización de 0,017; pues estos materiales solo fueron usados continuamente durante un mes de proyecto.

#### Coste calculado por hora de uso

Nº	Código	Denominación del material	Precio	Coste unitario	Cantidad	Total
1	MA.BOM	Bomba de jeringa TSE Systems NE-1000	665,1700	0,0217	13,5000 h	0,2929
2	MA.FL	Fuente de luz halógena OceanOptics HL-2000-LL	826,7800	0,0270	4,5000 h	0,1213
3	MA.ESP	Espectrómetro OceanOptics FLAME T, VIS-NIR	3095,7600	0,1010	4,5000 h	0,4544
4	MA.SEN	Sensor de potencia ThorLabs S121C	271,8800	0,0089	0,5000 h	0,0044
5	MA.SOL	Soldador de estaño	14,9900	0,0005	2,0000 h	0,0010
6	MA.PRO	Protheus	5314,0000	0,1733	1,0000 h	0,1733
7	MA.MP	Medidor de potencia ThorLabs PM100D	878,9800	0,0287	0,5000 h	0,0143

#### Factor de amortización de 0,1

Nº	Código	Denominación del material	Precio	Coste unitario	Cantidad	Total
8	MA.PC	Ordenador portátil MacBook Pro-Retina 13" - 2015	1300,0000	130,0000	1,0000 u	130,0000
9	MA.MUL	Multímetro	18,9900	1,8990	1,0000 u	1,8990
10	MA.MAT	Matlab 2019a	2000,0000	200,0000	1,0000 u	200,0000
11	MA.AR	Arduino MRK WAM 1300	28,0000	2,8000	1,0000 u	2,8000

**Factor de amortización de 0,017**

Nº	Código	Denominación del material	Precio	Coste unitario	Cantidad	Total
12	MA.PO	Poste óptico Thorlabs 50 mm	4,8600	0,0826	2,0000 u	0,1652
13	MA.SOP	Soporte para poste óptico Thorlabs 50 mm	7,2100	0,1226	2,0000 u	0,2451
14	MA.POS	Posicionador pequeño de un solo eje Thorlabs GN1 24,5 mm 10º	145,0200	2,4653	1,0000 u	2,4653
15	MA.MO	Mesa óptica ThorLabs - Aluminio - 600 mm x 1200 mm x 12,7 mm	898,0700	15,2672	1,0000 u	15,2672
16	MA.DES	Destornilladores	14,9900	0,2548	1,0000 u	0,2548
17	MA.DESP	Destornilladores de precisión	1,9900	0,0338	1,0000 u	0,0338

**Material amortizable a 2 años**

En este caso se incluyen en la primera tabla los materiales cuyo coste se calculó usando un coeficiente de amortización de 0,5; pues fueron usados durante los 6 meses que duró el proyecto. En la segunda tabla están los materiales cuyo coste se calculó por hora de uso.

**Factor de amortización de 0,05**

Nº	Código	Denominación del material	Precio	Coste unitario	Cantidad	Total
18	MA.BC	Cables banana-cocodrilo	5,9900	2,9950	1,0000 h	2,9950

**Coste calculado por hora de uso**

Nº	Código	Denominación del material	Precio	Coste unitario	Cantidad	Total
19	MA.IMP	Impresora León 3D	350,0000	0,0285	1,0000 h	0,0285
20	MA.PL	Puntero laser	19,9900	0,0016	1,0000 h	0,0016

## Material amortizable a un año

En este punto solo se incluye el programa Google Sketchup, pues su licencia tiene un periodo de validez de un año.

### Coste calculado por hora de uso

Num.	Código	Denominación del material	Precio	Coste unitario	Cantidad	Total
21	MA.SK	Google Sketchup	299,0000	0,0488	1,0000 h	0,0488

## Material no amortizable

Nº	Código	Denominación material	del	Coste unitario	Cantidad	Total
22	MA.TOR	Tornillos		1,1000	9,0000 u	9,9000
23	MA.CA	Cinta adhesiva		2,6900	1,0000 u	2,6900
24	MA.RES	Resistencias		0,0500	16,0000 u	0,8000
25	MA.POT	Potenciómetros		0,5400	3,0000 u	1,6200
26	MA.TL	Amplificador operacional TL084		0,4700	1,0000 u	0,4700
27	MA.AMP	Amplificador de instrumentación AMP02		16,8300	1,0000 u	16,8300
28	MA.CAB	Cables		6,9900	1,0000 u	6,9900
29	MA.CLO	Cabezal de lectura óptico		7,3800	2,0000 u	14,7600
30	MA.CP	Cable plano		2,8000	1,0000 u	2,8000
31	MA.CON	Conector para cable plano		0,7300	1,0000 u	0,7300
32	MA.USB	Conector USB		2,3300	2,0000 u	4,6600
33	MA.PCB	Placa Board		5,9900	2,0000 u	11,9800
34	MA.DIW	Agua desionizada 100 mL		0,0784	2,0000 u	0,1568
35	MA.ET	Etanol puro 10 mL		1,8800	1,0000 u	1,8800
36	MA.CM	Canal de microfluídica		5,0000	1,0000 u	5,0000
37	MA.IPA	Isopropanol 100 mL		0,4530	2,0000 u	0,9060
38	MA.PLA	Plástico PLA 80 gr		2,0000	1,0000 u	2,0000
39	MA.IM	Imanes de neodimio		1,0000	2,0000 u	2,0000

El coste total de los materiales asciende a CUATROSCIENTOS CUARENTA Y TRES EUROS CON CUARENTA Y CUATRO CÉNTIMOS (**443,44 €**).

#### 4. Cuadro de precios unitarios

Nº	Designación	Importe	
		En cifra	En letra
1. Planificación y evaluación del proyecto			
1.1	u Reunión inicial	102,94	CIENTO DOS EUROS CON NOVENTA Y CUATRO CÉNTIMOS
1.2	u Reuniones periódicas de evaluación	71,42	SETENTA Y UN EUROS CON CUARENTA Y DOS CÉNTIMOS
2. Diseño del software			
2.1	u Instalación de los programas necesarios	381,45	TRESCIENTOS OCHENTA Y UN EUROS CON CUARENTA Y CINCO CÉNTIMOS
2.2	h Programación y evaluación del código en Python	15,44	QUINCE EUROS CON CUARENTA Y CUATRO CÉNTIMOS
2.3	h Programación y evaluación del código en Arduino	15,44	QUINCE EUROS CON CUARENTA Y CUATRO CÉNTIMOS
3. Caracterización del cabezal óptico			
3.1	u Montaje del set-up para la caracterización	108,31	CIENTO OCHO EUROS CON TREINTA Y UN CÉNTIMOS
3.2	h Caracterización del funcionamiento del cabezal	15,44	QUINCE EUROS CON CUARENTA Y CUATRO CÉNTIMOS
3.3	u Diseño y montaje del circuito provisional de acondicionamiento de la señal	71,53	SETENTA Y UN EUROS CON CINCUENTA Y TRES CÉNTIMOS
3.4	h Caracterización del funcionamiento del montaje provisional	15,44	QUINCE EUROS CON CUARENTA Y CUATRO CÉNTIMOS
4. Diseño y montaje del set-up definitivo			
4.1	u Diseño del montaje	372,33	TRESCIENTOS SETENTA Y DOS EUROS CON TREINTA Y TRES CÉNTIMOS
4.2	u Montaje del set-up	347,31	TRESCIENTOS CUARENTA Y SIETE EUROS CON TREINTA Y UN CÉNTIMOS
5. Caracterización y testeo del set-up definitivo			

ESTUDIO DEL USO DE CABEZALES DE LECTURA DE DISCOS ÓPTICOS PARA LA INTERROGACIÓN DE  
SENSORES FOTÓNICOS DE SILICIO POROSO

5.1	h Caracterización de muestras sencillas con espectrómetro	55,46	CINCUENTA Y CINCO EUROS CON CUARENTA Y CINCO CÉNTIMOS
5.2	h Caracterización de muestras sencillas con el set-up experimental	15,44	QUINCE EUROS CON CUARENTA Y CUATRO CÉNTIMOS
5.3	u Pruebas de sensado con espectrómetro	219,75	DOSCIENTOS DIECINUEVE EUROS CON SETENTA Y CINCO CÉNTIMOS
5.4	u Pruebas de sensado con el set-up experimental	311,43	TRESCIENTOS ONCE EUROS CON CUARENTA Y TRES CÉNTIMOS
5.5	h Medida de la potencia del láser	55,35	CINCUENTA Y CINCO EUROS CON TREINTA Y CINCO CÉNTIMOS
5.6	u Procesado e interpretación de los datos obtenidos	15,44	QUINCE EUROS CON OCHENTA CÉNTIMOS
6. Diseño del circuito impreso			
6.1	u Iniciación al programa Proteus	117,96	CINETO DICISIETE EUROS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS
6.2	h Diseño del circuito impreso	15,61	QUINCE EUROS CON SESENTA Y UN CÉNTIMOS
7. Redacción y defensa del TFG			
7.1	u Redacción del TFG	1389,60	MIL TRESCIENTOS OCHENTA Y NUEVE EUROS CON SESENTA CÉNTIMOS
7.2	u Revisión y corrección del TFG	473,52	CUATROSCIENTOS SETENTA Y TRES EUROS CON CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS
7.3	u Preparación de la defensa del TFG	463,20	CUATROSCIENTSO SESENTA Y TRES EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS

## 5. Cuadro de precios descompuestos

1. Planificación y evaluación del proyecto					
Nº	Código	Ud	Descripción		Total
1.1		u	Reunión inicial		
	MO.ING	1,5000	h Ingeniero biomédico	15,4400	23,1600
	MO.COT1	1,0000	h Primer cotutor	39,8900	39,8900
	MO.TUT	0,5000	h Tutor	39,8900	19,9450
	MO.COT2	0,5000	h Segundo cotutor	39,8900	19,9450
Precio total por u.					102,94
1.2		u	Reuniones periódicas de evaluación		
	MO.ING	0,7500	h Ingeniero biomédico	15,4400	11,5800
	MO.COT1	0,7500	h Primer cotutor	39,8900	29,9175
	MO.COT2	0,7500	h Segundo cotutor	39,8900	29,9175
Precio total por u.					71,42
2. Diseño del software					
Nº	Código	Ud	Descripción		Total
2.1		u	Instalación de los programas necesarios		
	MA.MAT	1,0000	u MatLab 2019a	200,0000	200,0000
	MO.ING	3,0000	h Ingeniero biomédico	15,4400	46,3200
	MA.AR	1,0000	u Arduino MKR WAM 1300	2,8000	2,8000
	MA.USB	1,0000	u Conector USB	2,3300	2,3300
	MA.PC	1,0000	Ordenador portátil MacBook Pro- u Retina 13' - 2015	130,0000	130,0000
Precio total por u.					381,45
2.2		h	Programación y evaluación del código en Python		
	MO.ING	1,0000	h Ingeniero biomédico	15,4400	15,4400
Precio total por h.					15,44
2.3		h	Programación y evaluación del código en Arduino		
	MO.ING	1,0000	h Ingeniero biomédico	15,4400	15,4400
Precio total por h.					15,44
3. Caracterización del cabezal óptico					

ESTUDIO DEL USO DE CABEZALES DE LECTURA DE DISCOS ÓPTICOS PARA LA INTERROGACIÓN DE  
SENSORES FOTÓNICOS DE SILICIO POROSO

Nº	Código	Ud	Descripción		Total
3.1		u	Montaje del set-up para la caracterización		
	MO.ING	5,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400
	MA.MUL	1,0000	u	Multímetro	1,8990
	MA.CLO	1,0000	u	Cabezal de lectura óptico	7,3800
	MA.CAB	1,0000	u	Cables	6,9900
	MA.USB	1,0000	u	Conector USB	2,3300
	MA.CP	1,0000	u	Cable plano	2,8000
	MA.CON	1,0000	u	Conector para cable plano	0,7300
	MA.SOL	2,0000	h	Soldador de estaño	0,0005
	MA.BC	1,0000	u	Cables banana-cocodrilo	2,9950
	MA.PCB	1,0000	u	Placa board	5,9900
Precio total por u.					108,31
3.2		h	Caracterización del funcionamiento del cabezal		
	MO.ING	1,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400
Precio total por h.					15,44
3.3		u	Diseño y montaje del circuito provisional de acondicionamiento de la señal		
	MO.ING	4,5000	h	Ingeniero biomédico	15,4400
	MA.TL	1,0000	u	Amplificador operacional TL084	0,4700
	MA.RES	10,0000	u	Resistencias	0,0500
	MA.POT	2,0000	u	Potenciómetro	0,5400
Precio total por u.					71,53
3.4		h	Caracterización del funcionamiento del montaje provisional		
	MO.ING	1,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400
Precio total por h.					15,44
<b>4. Diseño y montaje del set-up definitivo</b>					
Nº	Código	Ud	Descripción		Total
4.1		u	Diseño del montaje		
	MA.ING	10,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400
	MA.COT1	5,0000	h	Primer cotutor	39,8900

ESTUDIO DEL USO DE CABEZALES DE LECTURA DE DISCOS ÓPTICOS PARA LA INTERROGACIÓN DE  
SENSORES FOTÓNICOS DE SILICIO POROSO

MA.PO	2,0000	u	Poste óptico Thorlabs 50 mm	0,0826	0,1652
			Soporte para poste óptico Thorlabs		
MA.SOP	2,0000	u	50 mm	0,1226	0,2451
			Posicionador pequeño de un solo eje		
			Thorlabs GN1 24,5 mm 10º		
MA.POS	1,0000	u		2,4653	2,4653
MA.DES	1,0000	u	Destornilladores	0,2548	0,2548
MA.SK	1,0000	h	Google Sketchup	0,0488	0,0488
MA.DESP	1,0000	u	Destornilladores de precisión	0,0338	0,0338
			Mesa óptica ThorLabs - Aluminio -		
			600 mm x 1200 mm x 12,7 mm		
MA.MO	1,0000	u		15,2672	15,2672
Precio total por u.					372,33
4.2	u	Montaje del set-up			
MO.ING	5,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400	77,2000
MO.COT1	5,0000	h	Primer cotutor	39,8900	199,4500
MO.OP	1,0000	h	Operario de la impresora 3D	18,0000	18,0000
MA.IMP	1,0000	h	Impresora 3D	0,0285	0,0285
MA.PLA	1,0000	u	Plástico PLA	2,0000	2,0000
MA.TOR	9,0000	u	Tornillos	1,1000	9,9000
MA.CA	1,0000	u	Cinta adhesiva	2,6900	2,6900
MA.RES	6,0000	u	Resistencias	0,0500	0,3000
MA.POT	1,0000	u	Potenciómetro	0,5400	0,5400
			Amplificador de instrumentación		
MA.AMP	1,0000	u	AMP02	16,8300	16,8300
MA.CLO	1,0000	u	Cabezal de lectura óptico	7,3800	7,3800
MA.CM	1,0000	u	Canal de microflídica	5,0000	5,0000
MA.IM	2,0000	u	Imanes de neodimio	1,0000	2,0000
MA.PCB	1,0000	u	Placa board	5,9900	5,9900
Precio total por u.					347,31

#### 5. Caracterización y testeo del set-up definitivo

Nº	Código	Ud	Descripción	Total
5.1		h	Caracterización de muestras sencillas con espectrómetro	

ESTUDIO DEL USO DE CABEZALES DE LECTURA DE DISCOS ÓPTICOS PARA LA INTERROGACIÓN DE  
SENSORES FOTÓNICOS DE SILICIO POROSO

MO.ING	1,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400	15,4400
MO.COT1	1,0000	h	Primer cotutor	39,8900	39,8900
MA.ESP	1,0000	h	Espectrómetro OceanOptics	0,1010	0,1010
MA.FL	1,0000	h	Fuente de luz OceanOptics	0,0270	0,0270
Precio total por h.					55,46
<hr/>					
5.2	h	Caracterización de muestras sencillas con el set-up experimental			
MO.ING	1,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400	15,4400
Precio total por h.					15,44
<hr/>					
5.3	u	Pruebas de sensado con espectrómetro			
MO.ING	5,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400	77,2000
MO.COT1	3,5000	h	Primer cotutor	39,8900	139,6150
MA.ESP	3,5000	h	Espectrómetro OceanOptics	0,1010	0,3534
MA.FL	3,5000	h	Fuente de luz OceanOptics	0,0270	0,0944
MA.BOM	3,5000	h	Bomba de jeringa para microfluídica	0,0217	0,0759
MA.DIW	1,0000	u	Agua desionizada 100mL	0,0784	0,0784
MA.ET	1,0000	u	Etanol puro 10mL	1,8800	1,8800
MA.IPA	1,0000	u	Isopropanol 100mL	0,4530	0,4530
Precio total por u.					219,75
<hr/>					
5.4	u	Pruebas de sensado con el set-up experimental			
MO.ING	20,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400	308,8000
MA.BOM	10,0000	h	Bomba de jeringa para microfluídica	0,0217	0,2170
MA.DIW	1,0000	u	Agua desionizada 100mL	0,0784	0,0784
MA.ET	1,0000	u	Etanol puro 10mL	1,8800	1,8800
MA.IPA	1,0000	u	Isopropanol 100mL	0,4530	0,4530
Precio total por u.					311,43
<hr/>					
5.5	u	Medida de la potencia del láser			
MO.ING	1,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400	15,4400
MO.COT1	1,0000	h	Primer cotutor	39,8900	39,8900
MA.PL	1,0000	h	Puntero láser	0,0016	0,0016

ESTUDIO DEL USO DE CABEZALES DE LECTURA DE DISCOS ÓPTICOS PARA LA INTERROGACIÓN DE  
SENSORES FOTÓNICOS DE SILICIO POROSO

			Medidor de potencia ThorLabs		
MA.MP	0,5000	h	PM100D	0,0287	0,0143
MA.SEN	0,5000	h	Sensor de potencia ThorLabs S121C	0,0089	0,0044
Precio total por h.					55,35

5.6	h	Procesado e interpretación de los datos obtenidos			
MO.ING	1,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400	15,4400
Precio total por u.					15,44

### 6. Diseño del circuito impreso

Nº	Código	Ud	Descripción		Total	
6.1		u	Instalación e iniciación al programa Proteus			
	MO.ING	5,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400	77,2000
	MO.COT1	1,0000	h	Cotutor 1	39,8900	39,8900
	MA.PRO	5,0000	h	Proteus	0,1733	0,8666
Precio total por u.					117,96	

6.2		h	Diseño del circuito impreso			
	MO.PRO	1,0000	h	Proteus	0,1733	0,1733
	MO.ING	1,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400	15,4400
Precio total por h.					15,6133203	

### 7. Redacción y defensa del TFG

Nº	Código	Ud	Descripción		Total	
7.1		u	Redacción del TFG			
	MO.ING	90,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400	1389,6000
Precio total por u.					1389,60	

7.1		u	Revisión y corrección del TFG			
	MO.ING	10,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400	154,4000
	MO.COT1	5,0000	h	Primer cotutor	39,8900	199,4500
	MO.COT2	3,0000	h	Segundo cotutor	39,8900	119,6700
Precio total por u.					473,52	

7.1		u	Preparación de la defensa del TFG			
	MO.ING	30,0000	h	Ingeniero biomédico	15,4400	463,2000

Precio total por u.

463,20

## 6. Cuadro de precios parciales

Capítulo 1. Planificación y evaluación del proyecto					
Nº	U	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
1.1	u	Reunión inicial	1,0000	102,9400	102,9400
1.2	u	Reuniones periódicas de evaluación	10,0000	71,4150	714,1500
Parcial Nº1. Planificación y evaluación del proyecto					817,09
Capítulo 2. Diseño del software					
Nº	U	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
2.1	u	Instalación de los programas necesarios	1,0000	381,4500	381,4500
2.2	h	Programación y evaluación del código en Python	30,0000	15,4400	463,2000
2.3	h	Programación y evaluación del código en Arduino	5,0000	15,4400	77,2000
Parcial Nº2. Planificación y evaluación del proyecto					921,85
Capítulo 3. Caracterización del cabezal óptico					
Nº	U	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
3.1	u	Montaje del set-up para la caracterización	1,0000	108,3150	108,3150
3.2	h	Caracterización del funcionamiento del cabezal	35,0000	15,4400	540,4000
3.3	u	Diseño y montaje del circuito provisional de acondicionamiento de la señal	1,0000	71,5300	71,5300
3.4	h	Caracterización del funcionamiento del montaje provisional	8,0000	15,4400	123,5200
Parcial Nº3. Caracterización del cabezal óptico					843,76
Capítulo 4. Diseño y montaje del set-up definitivo					
Nº	U	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
4.1	u	Diseño del montaje	1,0000	372,3303	372,3303
4.2	u	Montaje del set-up	1,0000	347,3085	347,3085
Parcial Nº4. Diseño y montaje del set-up definitivo					719,64

ESTUDIO DEL USO DE CABEZALES DE LECTURA DE DISCOS ÓPTICOS PARA LA INTERROGACIÓN DE  
SENSORES FOTÓNICOS DE SILICIO POROSO

Capítulo 5. Caracterización y testeo del set-up definitivo					
Nº	U	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
5.1	h	Caracterización de muestras sencillas con espectrómetro	3,0000	55,4579	166,3738
5.2	h	Caracterización de muestras sencillas con el set-up experimental	15,0000	15,4400	231,6000
5.3	u	Pruebas de sensado con espectrómetro	1,0000	219,7501	219,7501
5.4	u	Pruebas de sensado con el set-up experimental	1,0000	311,4284	311,4284
5.5	u	Medida de la potencia del láser	1,0000	55,3504	55,3504
5.6	h	Procesado e interpretación de los datos obtenidos	15,0000	15,4400	231,6000
Parcial Nº5 Caracterización y testeo del set-up definitivo					1216,10
Capítulo 6. Diseño del circuito impreso					
Nº	U	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
6.1	u	Iniciación al programa Proteus	1,0000	117,9566	117,9566
6.2	h	Diseño del circuito impreso	10,0000	15,6133	156,1332
Parcial Nº6. Diseño del circuito impreso					274,09
Capítulo 7. Redacción y defensa del TFG					
Nº	U	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
7.1	u	Redacción del TFG	1,0000	1389,6000	1389,6000
7.2	u	Revisión y corrección del TFG	1,0000	473,5200	473,5200
7.3	u	Preparación de la defensa del TFG	1,0000	463,2000	463,2000
Parcial Nº2. Planificación y evaluación del proyecto					2326,32

## 7. Presupuesto de ejecución por contrata

Capítulo	Importe
Capítulo 1. Planificación y evaluación del proyecto	817,09
Capítulo 2. Diseño del software	921,85
Capítulo 3. Caracterización del cabezal óptico	843,76
Capítulo 4. Diseño y montaje del set-up definitivo	719,64
Capítulo 5. Caracterización y testeo del set-up definitivo	1216,10
Capítulo 6. Diseño del circuito impreso	274,09
Capítulo 7. Redacción y defensa del TFG	2326,32
Presupuesto de ejecución material	7118,86
13% de gastos generales	925,45
6% de beneficio industrial	427,13
Suma	8471,44
21% IVA	1779,00
Presupuesto de ejecución por contrata	10250,44

El total del presupuesto de ejecución por contrata asciende a una cantidad de DIEZ MIL DOSCIENTSO CINCUENTA EUROS CON CUARENTA Y CUATRO CÉNTIMOS **(10205,44 €)**.

Documento  
**ANEXOS**

**Estudio del uso de cabezales de lectura de discos  
ópticos para la interrogación de sensores fotónicos  
de silicio poroso**

AUTOR: KRISTIAN DAVID ESCALANTE RODRÍGUEZ

TUTOR: ALEJANDRO JOSÉ MARTÍNEZ ABIETAR

Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica, Universidad Politécnica de Valencia

COTUTOR: JAIME GARCÍA RUPÉREZ

Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica, Universidad Politécnica de Valencia

COTUTOR: SALVADOR PONCE ALCÁNTARA

Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica, Universidad Politécnica de Valencia

CURSO 2019-2020

**Scripts del programa de medida**

# Código de Python

## Script main.py

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Thu Dec 5 15:47:33 2019

@author: kristian

Script principal de la App

"""

#from tfg import *
from seleccion import *
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

fs = 250 #Frecuencia de muestreo

##### Interfaz gráfica #####

#Funciones de los botones:

#Botón 1: Crea una nueva medida
def nueva_medida():
    setUp()

#Botón 2:
def visualizar_medida():

    root.filename=          filedialog.askopenfilename(initialdir          =
"/Users/kristian/Desktop/TFG/Programa de medida",title = "Seleccionar archivo",filetypes =
(("csv files", "*.csv"),("all files", "*.*")))
    df = pd.read_csv(root.filename)
    aux = True

    try:
        calibracion = df.loc[:, 'Calibrado'].values.tolist()
        medida = df.loc[:, 'Medida'].values.tolist()
        calibracion.pop(0)
        medida.pop(0)
    except:
        medida = df.loc[:, 'Medida'].values.tolist()
        medida.pop(0)
        aux = False
```

```

x = list(range(len(medida)))

if aux == True:
    plt.plot(x,calibracion,'b-',x,medida,'r-')
else:
    plt.plot(x,medida,'r-')

plt.ylim(-0.5,3.5)
plt.title('Medida')
plt.show()

#Botón 3: Cancela la creación de la medida (AÚN POR IMPLEMENTAR)
def salir():
    root.destroy()

#Configuración de la raiz:

root = Tk() #Inicializo mi ventana raiz
root.title("Main") #Nombro mi ventana raiz
root.geometry("200x150") #Defino el tamaño de la ventana raiz
root.resizable(0,0) #La ventana no se podrá reescalar

#Botones:
Button(root,text="Nueva
medida",command=nueva_medida).place(x=40,y=30,height=30,width=120) #Definición del
botón 1
Button(root,text="Visualizar
medida",command=visualizar_medida).place(x=40,y=90,height=30,width=120)
#Button(root,text="Salir",command=salir).place(x=40,y=150,height=30,width=120)
#Definición del botón 2

#Bucle de la app:
root.mainloop()

```

## Script setUp.py

```

#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Wed Jul 15 12:55:23 2020

@author: kristian
"""

from tkinter import *
from tkinter import ttk
from tkinter import messagebox
from tfg import *
from medidaTiempoReal import *

```

```

def setUp():

    def aceptar(): #Leemos los atributos de entrada y creamos la medida

        #Asigno los valores a los atributos:
        nombre = entry_nombre.get()
        tipo = combo.get()

        ventana = int(spinbox_filtrado.get())
        fguardado = int(spinbox_fguardado.get())

        if tipo == "": #El tipo por defecto será CD
            tipo = "CD"

        #messagebox.showinfo("Name!", ""Nombre: {} \n Duración: {} s \n Tipo: {} \n Capturas:
        {}"" .format(nombre,duracion,tipo,num_capturas))
        medida = Medida(nombre,tipo,None,None) #Creamos el objeto medida
        medidaTiempoReal(medida,ventana,fguardado)
        messagebox.showinfo("", "Medida tomada")
        ventanaSetUp.destroy()

    def cancelar(): #Cancela la creación de la medida (AÚN POR IMPLEMENTAR)
        ventanaSetUp.destroy()

##### Interfaz gráfica #####

#Creo una ventana hija de la raíz:
ventanaSetUp = Toplevel()
ventanaSetUp.title("Datos de la medida") #Nombre mi ventana raiz
ventanaSetUp.geometry("410x275") #Defino el tamaño de la ventana raiz
ventanaSetUp.resizable(0,0) #La ventana no se podrá reescalar

#Etiquetas:
Label(ventanaSetUp,text="Nombre").place(x=15,y=45,height=30,width=60)
Label(ventanaSetUp,text="Tipo").place(x=10,y=85,height=30,width=50)
Label(ventanaSetUp,text="Ventana").place(x=17,y=125,height=30,width=60)
Label(ventanaSetUp,text="f. guardado").place(x=21,y=165,height=30,width=70)

Label(ventanaSetUp,text="1.6",relief="sunken").place(x=310,y=45,height=30,width=30)
Label(ventanaSetUp,text="1.6",relief="sunken").place(x=310,y=85,height=30,width=30)
Label(ventanaSetUp,text="1.6",relief="sunken").place(x=350,y=45,height=30,width=30)
Label(ventanaSetUp,text="1.6",relief="sunken").place(x=350,y=85,height=30,width=30)

Label(ventanaSetUp,text='Alineación').place(x=310,y=15,height=30,width=70)

#Entrys:
entry_nombre = Entry(ventanaSetUp,borderwidth=2,relief="groove") #Entrada de texto
para el nombre
entry_nombre.place(x=110,y=45,height=30,width=180)

```

```

#entry_muestras = Entry(ventanaSetUp,borderwidth=2,relief="groove") #Entrada de texto
para el nombre
#entry_muestras.place(x=110,y=45,height=30,width=180)

#Spinbox:
spinbox_filtrado =
Spinbox(ventanaSetUp,borderwidth=2,relief="groove",from_=1,to=100) #Spinbox para el
número de muestras
spinbox_filtrado.place(x=110,y=125,height=30,width=180)
spinbox_fguardado =
Spinbox(ventanaSetUp,borderwidth=2,relief="groove",from_=1,to=100)
spinbox_fguardado.place(x=110,y=165,height=30,width=180)

#ComboBox:
combo = ttk.Combobox(ventanaSetUp)
combo.place(x=110,y=85,height=30,width=180)
combo.config(justify="center")
combo["values"]=["CD","DVD"]

#Botones:
Button(ventanaSetUp,text="Aceptar",command=
aceptar,borderwidth=5,relief="raised").place(x=240,y=215,height=30,width=90)

Button(ventanaSetUp,text="Cancelar",command=cancelar,borderwidth=5,relief="raised").pl
ace(x=80,y=215,height=30,width=90)

```

## Script medidaTiempoReal.py

```

#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Sun Jul 12 14:41:38 2020

@author: kristian

Script para visualizar la medida en tiempo real
"""

##### Importo librerías #####
from tkinter import *
import serial #Comunicación con puerto serie
import time
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.animation as animation
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
import re
import threading
import pandas as pd

```

```

ventana = []

##### Cuerpo principal #####

def medidaTiempoReal(medida,lon_ventana,fguardado):

    gData = []
    datosMedida = []
    gData.append([0])
    gData.append([0])

    #Evento de cierre de gráfico:
    def handle_close(evt):
        dataCollector.do_run = False
        data = {'Medida' : datosMedida}
        df = pd.DataFrame(data,columns=['Medida'])
        if medida.nombre == None:
            df.to_csv('Medida.csv')
        else:
            df.to_csv(medida.nombre + '.csv')

    #Configuramos la gráfica:
    fig = plt.figure()
    fig.canvas.mpl_connect('close_event', handle_close)
    ax = fig.add_subplot(111)
    hl, = plt.plot(gData[0], gData[1])
    plt.ylim(0, 1.5)
    plt.xlim(0,200)

    #Función que ejecutaremos en un hilo paralelo y que recogerá los datos desde el puerto
serie:

    def GetData(out_data):

        with serial.Serial('/dev/cu.usbmodem14101',baudrate=9600,timeout=1) as ser:

            t = threading.currentThread() #Nos referimos al propio hilo en ejecución

            cont = 0

            while getattr(t, "do_run", True): #Suponemos que el hilo tiene el atributo do_run de
valor True

                line = ser.readline().decode('utf-8')

                try:

                    ventana.append(float(line))

                    if len(ventana) > lon_ventana:
                        ventana.pop(0)

```

```

#Aplicamos filtro de mediana:
out_data[1].append(np.median(ventana))

#Esta opción se puede descomentar si se pretende usar la
#funcionalidad de diezmando al guardar los datos:
'''
cont = cont + 1

if cont == int(1196/fguardado):
    datosMedida.append(float(line))
    cont = 0
'''

datosMedida.append(float(line))

if len(out_data[1]) > 200:
    out_data[1].pop(0)

except:
    pass

# Función que actualizará los datos de la gráfica y que se llama periódicamente desde el
'FuncAnimation':

def update_line(num, hl, data):
    hl.set_data(range(len(data[1])), data[1])
    return hl

# Configuramos la función que "animará" nuestra gráfica
line_ani = animation.FuncAnimation(fig, update_line, fargs=(hl, gData), interval=50,
blit=False)

# Configuramos y lanzamos el hilo encargado de leer datos del serial
dataCollector = threading.Thread(target = GetData, args=(gData,))
dataCollector.start()

plt.show()
dataCollector.join()

```

## Script tfg.py

```

#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
'''
Created on Wed Apr 15 18:44:42 2020

```

```
@author: kristian
```

```
"""
```

```
"""
```

```
Created on Thu Dec 5 16:10:43 2019
```

```
@author: kristian
```

Clase medida: servirá para crear objetos de tipo medida, donde se almacenarán tanto los valores recogidos del arduino, como la toma en oscuridad, el nombre, el tipo, la duración y el número de capturas

```
"""
```

```
##### Importo librerías #####
```

```
import serial #Comunicación con puerto serie
import time
import numpy as np
from tkinter import *
from tkinter import ttk
from tkinter import messagebox
import pandas as pd
```

```
##### Cuerpo principal #####
```

```
class Medida:
```

```
    #Atributos:
```

```
    nombre = None
```

```
    tipo = None
```

```
    duracion = None
```

```
    num_capturas = None
```

```
    fs = 250 #Frecuencia de muestreo escogida en Hz
```

```
    medida = []
```

```
    medida_oscuridad = []
```

```
    #Constructor:
```

```
    def __init__(self,nombre,tipo,duracion,num_capturas):
```

```
        #Creamos el objeto
```

```
        print("TOMANDO MEDIDA")
```

```
        self.nombre = nombre
```

```
        self.tipo = tipo
```

```
        self.duracion = duracion
```

```
        self.num_capturas = num_capturas
```

```
    #Funciones propias de la clase:
```

```
    def tomarMedida(self):
```

```

#Se toma la medida leyendo la información que envía el Arduino por el puerto serie USB:
puerto = serial.Serial('/dev/cu.usbmodem14101',baudrate=9600,timeout=1) #Inicializo
el puerto serie
time.sleep(2) #Espero 2 segundos para que el puerto esté correctamente inicializado

#Asigno el laser:
if self.tipo == 'CD':
    laser = '1' #Al pin D3

else:
    laser = '2' #Al pin D6

#Muestras a tomar:
muestras = self.duracion * self.fs

#Comienza el ciclo de medida:
capturas = [] #Lista para guardar todas las capturas

#Hago una medida en oscuridad:

messagebox.showinfo(message='Tomando medida en oscuridad, retire la muestra del
soporte y pulse OK',title='Calibración')
puerto.write('0'.encode())
time.sleep(2)

while (len(self.medida_oscuridad) < muestras):
    arduinoData = puerto.readline().decode('ascii')
    arduinoData = arduinoData.replace("\r\n","")
    self.medida_oscuridad.append(arduinoData)
    time.sleep(1/self.fs) #Espero un tiempo igual al periodo de muestreo

#Comienza el ciclo de medida:
puerto.close()
messagebox.showinfo(message='Iniciando el ciclo de medida, coloque la muestra en el
soporte y pulse OK',title='Iniciando medida')

#Activo el laser:
puerto.open()
puerto.write(laser.encode())
time.sleep(2)

for i in range(self.num_capturas):

    #Capturo la medida:
    captura_prov = [] #Aquí guardaré la captura

    while (len(captura_prov) < muestras):

        arduinoData = puerto.readline().decode('ascii')
        arduinoData = arduinoData.replace("\r\n","")
        captura_prov.append(arduinoData) #Convierto a float (Arduino envía strings)
        time.sleep(1/self.fs) #Espero un tiempo igual al periodo de muestreo

```

```

#print(captura_prov)
capturas.append(captura_prov) #Almaceno en la lista general

time.sleep(2) #Espero 2 segundos antes de tomar una nueva medida

#Apago el laser
puerto.write('0'.encode())
puerto.close()

#Promedio las capturas obtenidas y guardo la medida
capturas = np.asarray(capturas,dtype=float) #Transformo la list a una matriz numpy
self.medida = np.mean(capturas,axis=0) #Hago la media de todas las capturas
self.medida = self.medida.tolist() #Vuelvo a una lista

#Guardo en un DataFrame:
data = {'Calibrado' : self.medida_oscuridad , 'Medida' : self.medida}
df = pd.DataFrame(data,colums=['Calibrado','Medida'])
if self.nombre == None:
    df.to_csv('Medida.csv')
else:
    df.to_csv(self.nombre + '.csv')

```

## 2. Código Arduino

```

int sensorPin = A1;
float valor;

void setup() {

  Serial.begin(9600);
  analogReference(INTERNAL); //Referencia interna de 1.1V

}

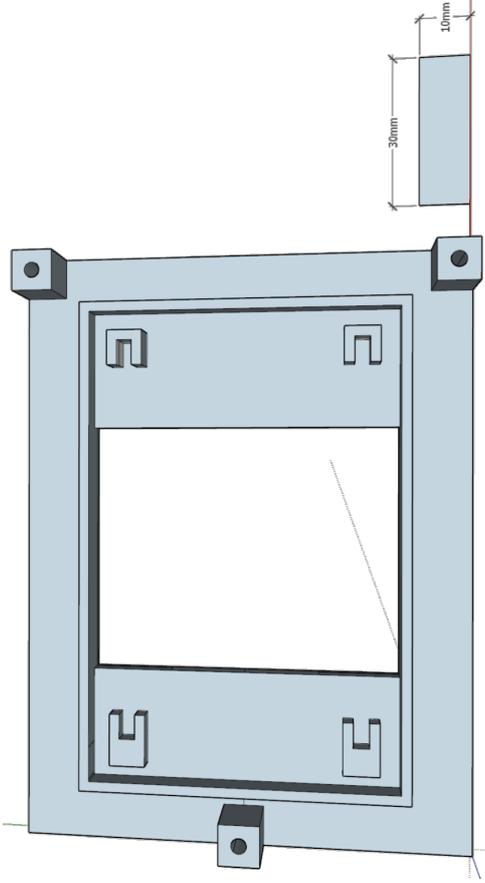
void loop() {

  valor = analogRead(sensorPin);
  valor = (1.1*float(valor))/1023;
  Serial.println(float(valor));
}

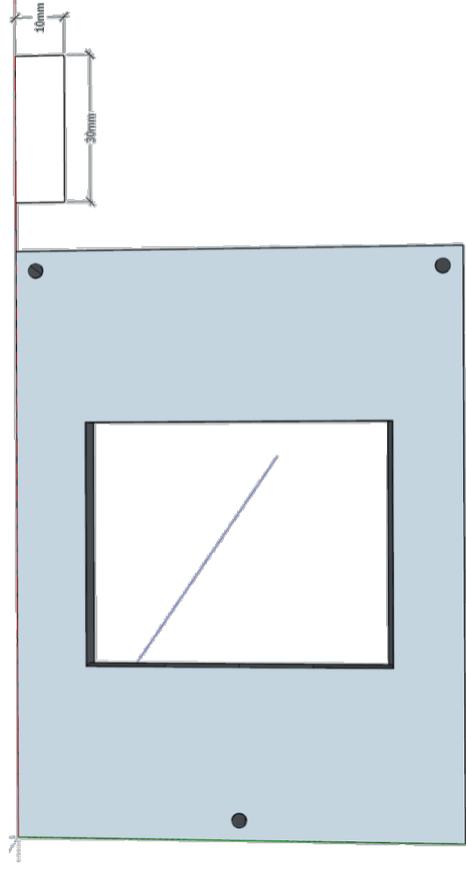
```

**Plano del soporte para el cabezal de DVD**

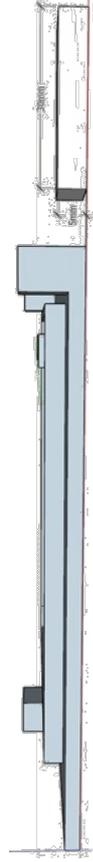
Vista superior



Vista inferior



Vista lateral



## Hojas de Características

仕様書番号 ID NUMBER	14692918
作成年月日 DATE	2006.03.14

# TENTATIVE

OPTICAL DVD PICK-UP
仕 様 書
SPECIFICATIONS
MODEL : SF-HD65

三洋電機株式会社  
電子デバイスカンパニー  
光ビジネスシステムズビジネスユニット  
SANYO Electric Co., Ltd.  
Electronic Device Company  
Optical Business Systems Business Unit

## 目 次 / CONTENTS

---

1. 適用 / SCOPE .....	2
2. 基本仕様 / BASIC SPECIFICATIONS .....	3
3. 標準試験条件 / STANDARD TEST CONDITIONS .....	4
4. 光学性能 / OPTICAL PERFORMANCE .....	4
5. 電気性能 / ELECTRICAL PERFORMANCE .....	5
6. 出力信号特性 / CHARACTERISTICS OF OUTPUT SIGNAL .....	7
7. アクチュエーター性能 / ACTUATOR PERFORMANCE .....	9
8. スキュー特性 / SKEW CHARACTERISTICS .....	11
9. 信頼性試験 / RELIABILITY TEST .....	12
10. 取り扱い注意事項 / PRECAUTIONS IN HANDLING .....	13
11. シリアルナンバー表示 / SERIAL NUMBER INDICATION .....	15
12. 接続仕様 / CONNECTION SPECIFICATIONS .....	16
13. 電気系ブロック図 / ELECTRIC CIRCUIT BLOCK DIAGRAM .....	17
14. 信号の定義 / SIGNAL DEFINITIONS .....	18
15. 梱包仕様 / PACKAGING SPECIFICATIONS .....	19
16. 外形図 / APPEARANCE DRAWING .....	20
17. 部品関連情報 / PARTS RELATED INFORMATION .....	21

補足資料 / APPENDIX

## 1. 適用 / SCOPE

本仕様書は DVD 及び CD 再生用光学ピックアップ「SF - HD65」について適用します。  
These specifications apply to optical pick-up “SF-HD65” for DVD and CD playback.

本仕様書の改変については、双方事前に協議して実施するものとします。  
These specifications are subject to revision by mutual agreement in advance.

不都合事項発生時は、本仕様書記載事項に基づき、双方協議の上解決するものとします。  
If any difficulties arise, the matter shall be settled by mutual agreement under the following guide lines.

本仕様書を満足する範囲内において、改良、性能向上のため、部品等の一部を変更する場合があります。  
Some components may be changed in order to improve performance within the scope of these specifications.

## 2. 基本仕様 / BASIC SPECIFICATIONS

項目 Item		規格 Specifications	
		DVD	CD
半導体レーザー Semiconductor laser		2 波長レーザーダイオード Two wavelength laser diode	
	波長 Wavelength	650 nm	790 nm
高周波重畳回路 High frequency module	発振周波数 Oscillation frequency	390 MHz	390 MHz
対物レンズ Objective lens		1 枚非球面プラスチックレンズ Single-sheet aspherical plastic lens	
	開口数 [NA] Numerical aperture	0.60	0.47
	作動距離 [WD] Working distance	1.67 mm レンズとディスク間の距離 Distance between lens and disc	1.30 mm レンズとディスク間の距離 Distance between lens and disc
検出方式 Detection method	フォーカシング Focusing	非点収差方式 (AD) Astigmatic method	非点収差方式 (AD) Astigmatic method
	トラッキング Tracking	位相差方式 (DPD) Differential phase detection	3 ビーム方式 3-beam method
光検知器 Photo detector		I/V 変換素子内蔵 With I/V AMP	
フォーカシング アクチュエーター Focusing actuator	可動範囲 Working area	+1.1 mm / -0.7 mm 以上 or more (DVD 動作基準位置より from standard operating position of DVD)	±0.8 mm 以上 or more (CD 動作基準位置より from standard operating position of CD)
	コイル直流抵抗 DC resistance of coil	5.0 ±1 コネクタ部で測定 Measured at the connector	
トラッキング アクチュエーター Tracking actuator	可動範囲 Working area	±0.4 mm 以上 (中立位置より) or more (from neutral position)	
	コイル直流抵抗 DC resistance of coil	3.7 ±1 コネクタ部で測定 Measured at the connector	
アクチュエーター Actuator	可動部質量 Mass of moving part	約 0.33 g Approx.	
本体質量 Unit mass		約 16 g Approx.	
動作温度 Operating temperature		0 ~ +60	
保存温度 Storage temperature		-30 ~ +70	

### 3. 標準試験条件 / STANDARD TEST CONDITIONS

(1) 標準試験環境

Standard test environment

通常、常温常湿雰囲気にて行い、疑義が生じた場合は、温度 20～25 湿度 60±5 %RH の雰囲気にて試験を行う。

Usually perform the test in an ambience of normal temperature and humidity. If there is a doubt about the judgement, perform the test at a temperature of (20 to 25) and a relative humidity of (60 ± 5) %.

(2) 標準試験姿勢

Standard test posture

-Z 方向を重力方向とする。

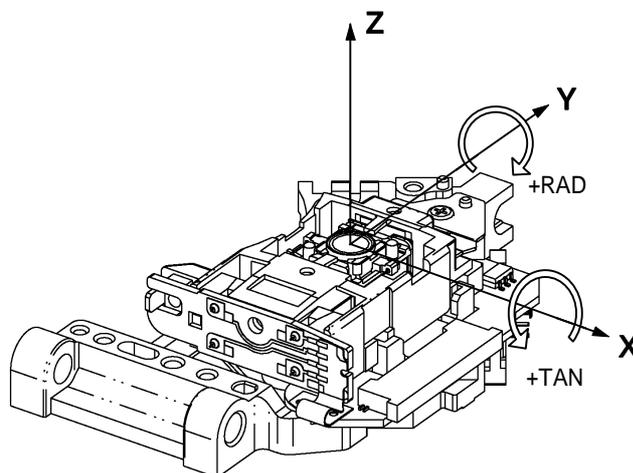
Direction of gravity: -Z direction

(3) 標準テストディスク

Standard test disc

DVD : アルメディオ製 A・BEX TDV-520 または  
ALMEDIO 's TDV-520 or  
三洋マービックメディア製 PDS-5200  
SANYO MAVIC MEDIA 's PDS-5200

CD : アルメディオ製 A・BEX TCD-784 または  
ALMEDIO 's TCD-784 or  
三洋マービックメディア製 PCD-7840  
SANYO MAVIC MEDIA 's PCD-7840



スキュー方向 Skew direction

TAN : タンジェンシャル(ジッター)方向  
Tangential (Jitter) direction

RAD : ラジアル方向

Radial direction

### 4. 光学性能 / OPTICAL PERFORMANCE

項目 Item	規格 Specifications		特記事項 Remarks
	DVD	CD	
対物レンズ (OBL) Objective lens			1 枚非球面プラスチックレンズ Single-sheet aspherical plastic lens
焦点距離 [f] Focal distance	3.05 mm	3.07 mm	
開口数 [NA] Numerical aperture	0.60	0.47	
対物レンズ出射光 Emission power out of objective lens			クラス 2 保証範囲内 Within guarantee of class 2
出射光出力 [Po] Emission power	0.31 mW	0.23 mW	対物レンズ出射光量 (平均) Emission power intensity out of the objective lens (Average)
最大出射光出力 [Pmax] Maximum emission power	0.70 mW	0.70 mW	対物レンズ出射光量 (最大) Emission power intensity out of the objective lens (Max.)
出射光波長 [ ] Wavelength	650 ± 10 nm	790 ± 15 nm	At 25

## 5. 電気性能 / ELECTRICAL PERFORMANCE

## 5.1 レーザーダイオード / Laser Diode

項目 Item		規格 Specifications		特記事項 Remarks
		DVD	CD	
レーザーダイオード (LD) Laser diode				TOLD2000MDA (東芝) or TOLD2000FDA (東芝) (TOSHIBA CORPORATION)
最大定格 Maximum ratings	逆電圧 [VRL] Reverse voltage	2.0 V	2.0 V	
	光出力 Laser power	7 mW	7 mW	
	動作温度 Operating temperature	-10 ~ +70	-10 ~ +70	レーザーダイオードケース温度 (Tc) Temperature on the housing case of laser diode.
電気特性 Electrical characteristics	しきい値電流 [Ith] Threshold current	25 mA (標準) (Typ.)	20 mA (標準) (Typ.)	高周波重畳オフ時 With high frequency module turned off
		45 mA (最大) (Max.)	40 mA (最大) (Max.)	
	動作電流 [Iop] Operating current	35 mA (標準) (Typ.)	35 mA (標準) (Typ.)	Po (LD unit) = 5 mW Tc=25
		90 mA (最大) (Max.)	70 mA (最大) (Max.)	Po (LD unit) = 5 mW Tc=70
APC 回路 APC circuit		無し Without APC		APC 回路基準電圧: 180 mV APC circuit reference voltage
高周波重畳回路 (HFM) High frequency module				
	駆動電圧 [Vcc] Drive voltage	4.5 V ~ 5.5 V		推奨電源電圧: Vcc 5 V Recommended voltage power supply
	発振周波数 Oscillation frequency	390 MHz ± 25%		

## 5.2 フォトダイオード / Photo Diode

項目 Item		規格 Specifications		特記事項 Remarks												
フォトダイオード (PD) Photo diode				I / V 変換素子内蔵, 電圧出力 With I / V AMP, Voltage output												
最大定格 Maximum ratings	電源電圧 [Vcc] Supply voltage	6.0 V														
	許容損失 Allowable power dissipation	130 mW														
動作電源電圧範囲 [Vcc] Range of operating supply voltage		4.5 V ~ 5.5 V		推奨電源電圧: Vcc 5 V Recommended voltage power supply												
基準電圧範囲 [Vc] Range of reference voltage		2.1 V ± 0.1 V														
DVD/CD 切替電圧 DVD/CD switching voltage	DVD 再生モード DVD play mode	0.7 V 以下 or less		CD/DVD SW terminal pin												
	CD 再生モード CD play mode	3.5 V 以上 or more		CD/DVD SW terminal pin												
電気特性 Electrical characteristics	周波数特性 [fc] Frequency characteristic	DVD	CD													
		45 MHz (標準.) (Typ.)		=650 nm, -3 dB, RF Vcc= 5V, RL= 10 k												
			30 MHz (標準.) (Typ.)	=780 nm, -3 dB, RF Vcc= 5V, RL= 10 k												
受光素子配列 Detecting element layout		<p>&lt; DVD &gt;</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>c</td> <td>b</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>a</td> </tr> </table> <p>&lt; CD &gt;</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="width: 40px; height: 40px; text-align: center;">E</td> <td style="width: 40px; height: 40px; text-align: center;">C</td> <td style="width: 40px; height: 40px; text-align: center;">B</td> <td style="width: 40px; height: 40px; text-align: center;">F</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="width: 40px; height: 40px; text-align: center;">D</td> <td style="width: 40px; height: 40px; text-align: center;">A</td> <td></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">受光面から見て As seen from the light receiving side</p>			c	b	d	a	E	C	B	F		D	A	
c	b															
d	a															
E	C	B	F													
	D	A														

## 6. 出力信号特性 / CHARACTERISTICS OF OUTPUT SIGNAL

## 6.1 DVD 再生 / DVD Playback

項目 Item	規格 Specifications	信頼性試験規格 Reliability specs	特記事項 Remarks
HF レベル HF level	880 mVp-p ± 25 %	初期値 ± 30 % Within of initial value	標準測定ゲイン: 1 × (a+b+c+d) Reference gain
RF レベル RF level	1560 mVp-p ± 25 %	初期値 ± 30 % Within of initial value	標準測定ゲイン: 1 × RF Reference gain
ジッター量 Jitter	10.5 % 以下 or less	12 % 以下 or less	Data to clock ジッター(ベストフォーカス点) Data to clock jitter (at the best focal point)
フォーカスエラー (FE) Focusing error	FE 信号 FES = (a+c)-(b+d) FE signal		信号面にて測定。 Measured at the pit area.
S 字レベル (Spp) S-curve level	860 mVp-p ± 35 %	初期値 ± 30 % Within of initial value	FES < 0 の時は合焦点よりディスクが近い状態 When FES output is minus, the disc is closer than the focal point.
S 字バランス (S-R) S-curve balance	± 15 % 以内 Within	初期値 ± 15 % Within of initial value	標準測定ゲイン: 1 × FES Reference gain
S 字 p-p 検出範囲 Detectable area of S-curve p-p	6 μm		設計保証値 Design spec.
合焦ずれ Defocus	± 15 % 以内 Within	初期値 ± 15 % Within of initial value	
トラッキングエラー (TE) Tracking error	TE 信号 TES = (a+c)-(b+d): (位相差) TE signal (Phase difference)		
TE レベル TE level	600 mVp-p ± 35 %	初期値 ± 30 % Within of initial value	測定条件: (a+c) と (b+d) の位相差が ± 180 ° の時、± 1 V 出力 Measurement condition: When the phase difference between (a+c) and (b+d) is ± 180 °, TES output is defined as ± 1 V.
中心ずれ TE offset	± 25 % 以内 Within	初期値 ± 20 % Within of initial value	トラッキングエラー信号の中心と基準電圧 Vc とのずれ。(レンズ中立位置) Deviation of the TE signal center level from the reference voltage (Vc). (at the OBL neutral position)
視野特性 Response to beam spot movement			スポット移動量 ± 0.3 mm での特性 Spot movement offset: ± 0.3 mm
中心ずれ TE offset	± 30 % 以内 Within	初期値 ± 25 % Within of initial value	レンズ中立位置からの中心ずれ変化量 Deviation of the TE offset from the one at the OBL neutral position.

三洋電機(株)標準測定器による。

With SANYO's standard measuring equipment.

## 6.2 CD 再生 / CD Playback

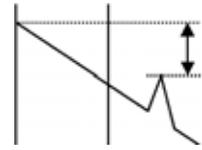
項目 Item	規格 Specifications	信頼性試験規格 Reliability specs	特記事項 Remarks	
HF レベル HF level	1000 mVp-p ± 25 %	初期値 ± 30 % Within of initial value	標準測定ゲイン: 1 × (A+B+C+D) Reference gain	
RF レベル RF level	1760 mVp-p ± 25 %	初期値 ± 30 % Within of initial value	標準測定ゲイン: 1 × RF Reference gain	
ジッター量 Jitter	28 ns 以下 or less	32 ns 以下 or less	3T, ランドジッター (ベストフォーカス点) 3T, Land jitter (at the best focal point)	
フォーカスエラー (FE) Focusing error	FE 信号 FES = (A+C)-(B+D) FE signal		信号面にて測定。 Measured at the pit area.	
S 字レベル (Spp) S-curve level	530 mVp-p ± 40 %	初期値 ± 30 % Within of initial value	FES < 0 の時は合焦点よりディスクが近い状態 When FES output is minus, the disc is closer than the focal point.	
	S 字バランス (S-R) S-curve balance	± 20 % 以内 Within	初期値 ± 17 % Within of initial value	標準測定ゲイン: 0.5 × FES Reference gain
	S 字 p-p 検出範囲 Detectable area of S-curve p-p	6 μm		設計保証値 Design spec.
	合焦ずれ Defocus	± 30 % 以内 Within	初期値 ± 15 % Within of initial value	
トラッキングエラー (TE) Tracking error	TE 信号 TES = E-F TE signal		E: 先行ビームスポットで内周側 E: lead beam spot and located inside of the track	
TE レベル TE level	1400 mVp-p ± 45 %	初期値 ± 30 % Within of initial value	TES > 0 の時は、スポットが内周方向へずれた状態。 When TES output is plus, the spots are shifted toward the disc center. 標準測定ゲイン: 6.1 × TES Reference gain	
	中心ずれ TE offset	± 35 % 以内 Within	初期値 ± 20 % Within of initial value	トラッキングエラー信号の中心と基準電圧 Vc とのずれ。(レンズ中立位置) Deviation of the TE signal center level from the reference voltage (Vc). (at the OBL neutral position)
視野特性 Response to beam spot movement			スポット移動量 ± 0.3 mm での特性 Spot movement offset: ± 0.3 mm	
中心ずれ TE offset	± 25 % 以内 Within	初期値 ± 25 % Within of initial value	レンズ中立位置からの中心ずれ変化量 Deviation of the TE offset from the one at the OBL neutral position.	
E-F 位相差 E-F phase difference	35 ° 以下 or less	60 ° 以下 or less		

三洋電機(株)標準測定器による。

With SANYO's standard measuring equipment.

## 7. アクチュエーター性能 / ACTUATOR PERFORMANCE

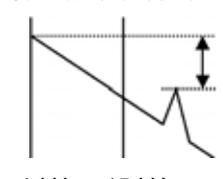
## 7.1 フォーカシングアクチュエーター / Focusing Actuator

項目 Item	規格 Specifications	信頼性試験規格 Reliability specs	特記事項 Remarks	
最大定格 Maximum ratings				
コイル許容電流 Allowable current of coil	220 mA rms		連続 Continuous	
対物レンズ可動範囲 Working area of objective lens	+1.1 mm 以上 or more -0.7 mm 以上 or more		水平状態を基準とする。 With reference to the level posture.	
電気特性 Electrical characteristics				
コイル直流抵抗 DC resistance of coil	5.0 ± 1		コネクタ部で測定 Measured at the connector part	
インダクタンス Inductance of coil	70 μH ± 6 μH		At 1 kHz, 0.1 V	
伝達特性 Transmission characteristics				
感度 Sensitivity	0.80 mm / V ± 3 dB	初期値 ± 2 dB Within of initial value	At 5 Hz, FPC を含む With FPC	
	2.20 μm / V ± 2.5 dB	初期値 ± 2 dB Within of initial value	At 1 kHz, FPC を含む With FPC	
	共振周波数 (f <sub>0</sub> ) Resonance frequency	60 Hz ± 6 Hz	初期値 ± 8 Hz Within of initial value	
	共振ピーク量 (f <sub>0</sub> peak) Resonance peak	16 dB 以下 or less	初期値 ± 8 dB Within of initial value	
	位相遅れ Phase delay	200 ° 以下 or less		At 1 kHz, ピーク点を除く Excluding peak point
	二次共振 Secondary frequency resonance peak	20 kHz 以上 or more  40 dB 以上 or more		1 kHz とのゲイン差 Gain difference to 1 kHz   40 dB 以上 or more  1 kHz 20 kHz
極性 Polarity	F+ 端子に +電位を印加した時、ディスクに近づく方向へ移動。(+Z 方向) When a plus voltage is applied to F + terminal pin, the objective lens approaches the disc (in +Z direction)..			

三洋電機(株)標準測定器による

With SANYO's standard measuring equipment.

## 7.2 トラッキングアクチュエーター / Tracking Actuator

項目 Item	規格 Specifications	信頼性試験規格 Reliability specs	特記事項 Remarks
最大定格 Maximum ratings			
コイル許容電流 Allowable current of coil	220 mA rms		連続 Continuous
対物レンズ可動範囲 Working area of objective lens	± 0.4 mm 以上 or more		
電気特性 Electrical characteristics			
コイル直流抵抗 DC resistance of coil	3.7 ± 1		コネクタ部で測定 Measured at the connector part
インダクタンス Inductance of coil	9 μH ± 6 μH		At 1 kHz, 0.1 V
伝達特性 Transmission characteristics			
感度 Sensitivity	0.60 mm / V ± 3 dB	初期値 ± 2 dB Within of initial value	At 5 Hz, FPC を含む With FPC
	1.62 μm / V ± 2.5 dB	初期値 ± 2 dB Within of initial value	At 1 kHz, FPC を含む With FPC
共振周波数 (f <sub>0</sub> ) Resonance frequency	61 Hz ± 6 Hz	初期値 ± 8 Hz Within of initial value	
共振ピーク量 (f <sub>0</sub> peak) Resonance peak	16 dB 以下 or less	初期値 ± 8 dB Within of initial value	
位相遅れ Phase delay	200 ° 以下 or less		At 1 kHz, ピーク点を除く Excluding peak point
二次共振 Secondary frequency resonance peak	15 kHz 以上 or more  35 dB 以上 or more		1 kHz とのゲイン差 Gain difference to 1 kHz  1 kHz 15 kHz 35 dB 以上 or more
極性 Polarity	T+ 端子に +電位を印加した時、ディスク外周方向へ移動。(+X 方向) When a plus voltage is applied to T + terminal pin, the objective lens moves toward the periphery of the disc (in +X direction)..		

三洋電機(株)標準測定器による

With SANYO 's standard measuring equipment.

## 8. スキュー特性 / SKEW CHARACTERISTICS

項目 Item	規格 Specifications	特記事項 Remarks
タンジェンシャル方向スキュー 精度 Skew accuracy in tangential direction	±0.3 °	DVD
	±0.5 °	CD
ラジアル方向スキュー精度 Skew accuracy in radial direction	±0.4 °	DVD
	±0.6 °	CD
		<p>1. ディスクは標準テストディスクを使用。 Use the standard test disc.</p> <p>2. スキュー精度 (DVD) Skew accuracy of DVD ジッターボトムを取付け基準よりの角度ずれとする。 The angle deviation from the installation standard of the jitter bottom.</p> <p>3. スキュー精度 (CD) Skew accuracy of CD ジッターボトムを取付け基準よりの角度ずれとする。 The angle deviation from the installation standard of the jitter bottom.</p>

信頼性試験においては、ジッター信頼性規格を適用する。  
Jitter spec of reliability test is applied for reliability test.

## 9. 信頼性試験 / RELIABILITY TEST

項目 Item	試験条件 Test conditions
高温動作試験 High temperature operating test	60 の環境下に 2 時間放置後測定。 1) Leave at 60 for 2 hours. 2) Take measurement.
低温動作試験 Low temperature operating test	0 の環境下に 2 時間放置後測定。 1) Leave at 0 for 2 hours. 2) Take measurement.
高温保存試験 High temperature storage test	70 の環境下に 48 時間放置後、常温常湿中に取り出し 24 時間放置後測定。 1) Leave at 70 for 48 hours. 2) Leave at normal temperature and humidity for 24 hours. 3) Take measurement.
低温保存試験 Low temperature storage test	-30 の環境下に 48 時間放置後、常温常湿中に取り出し 24 時間放置後測定。 1) Leave at -30 for 48 hours. 2) Leave at normal temperature and humidity for 24 hours. 3) Take measurement.
高温高湿保存試験 High temperature and high humidity storage test	40 , 90 %RH の環境下に 96 時間放置後、常温常湿中に取り出し 24 時間放置後測定。 1) Leave at 40 and 90 %RH for 96 hours. 2) Leave at normal temperature and humidity for 24 hours. 3) Take measurement.
単体衝撃試験 Unit shock test	980 m/s <sup>2</sup> (100 G), 6 ms, ±X±Y±Z 方向, 各 1 回 980 m/s <sup>2</sup> (100 G), 6 ms, once in each of the ±X, ±Y, ±Z directions.
単体振動試験 Unit vibration test	21.5 m/s <sup>2</sup> (2.2 G) 一定, 10 ~ 55 Hz, Log スイープ片道 5 分, XYZ 方向, 各 20 分 Constant 21.5 m/s <sup>2</sup> (2.2 G), 10 to 55 Hz, log sweep of 5 minutes one way, 20 minutes in each of the X, Y, Z directions.

注意: 上記試験中結露なきこと。

NOTE: No condensation during above tests.

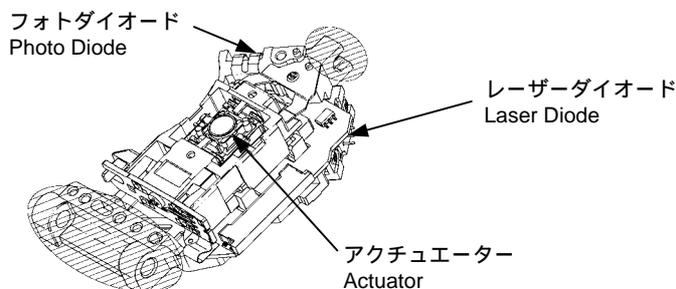
## 10. 取り扱い注意事項 / PRECAUTIONS IN HANDLING

### 10.1 取扱い / Handling

- 光ピックアップをトレイから取り出す際は、下図斜線部に示した箇所を持つようにして下さい。

下図に示すアクチュエーター(OBL)、フォトダイオード、レーザーダイオードを持った場合、性能劣化を起こす可能性がありますので絶対に触れないで下さい。

When removing pick-ups from the tray, be sure only to grasp them by the areas indicated by shading in the figure. Never touch the actuator (OBL), photo diode, laser diodes. Touching them may impair their performance.



- 落下等の衝撃や振動を与えないように取り扱って下さい。

Do not drop or otherwise subject the pick-up to physical shock or vibration.

- 光ピックアップは、出荷時に精密に調整されており、安易に、調整、分解などを行わないで下さい。また、加工などを加えないで下さい。

Do not disassemble or adjust the pick-up. The pick-up is precisely adjusted before delivery, so no adjustment is needed. Never modify the pick-up mechanically in any way.

- アクチュエーター部は強力な磁気を有していますので、鉄片や磁気を帯びたものを近づけると、特性が変化します。また、可動部分につき、隙間から埃やごみなどが入らないよう注意をお願いいたします。

Do not bring magnetic materials near the actuator, which itself is strongly magnetized. This may alter its characteristics. Keep the actuator's moving parts free of dust and other foreign materials.

- フレキシブルプリント基板(FPC)部に異常な外力を加えないで下さい。

Do not subject the FPC to excessive force.

- 対物レンズに塵埃や汚れなどが付着しないようにして下さい。もし塵埃、汚れなどがついて場合にはブロアーできれいな空気を吹き付けて取り去って下さい。

Keep the objective lens free of dust and dirt. If it become dusty or soiled, blow away dust with a blower using clean air.

- 梱包から取り出した後は、高温、高湿、あるいは塵埃の発生する環境に放置しないで下さい。

After unpacking pick-ups, do not leave them where they are exposed to high temperature, humidity, or dust.

### 10.2 レーザーダイオード / Laser Diode

- 光ピックアップに使用しているレーザーダイオードの放射光は「クラス 2a」に値します。レーザー放射光を直接目に受けることは絶対に行わないで下さい。また、皮膚に対しても危険性がありますので、放射光にさらされないように充分注意して下さい。

Laser radiation emitted by the pick-up is classified as CLASS 2a. Never look at the laser light beam or direct the beam at exposed skin. The beam may cause serious eye or skin damage.

- 光ピックアップのレーザーダイオードには GaAs(ガリウム砒素)が使われています。通常条件下での毒性については問題ありませんが、その粉末や蒸気は人体に対して有害ですので、素子を取り出して、破壊、切断、粉碎や、化学処理・熱処理による分解は行わないで下さい。また、口に入れたり、飲み込んだりしないで下さい。光ピックアップを廃棄する場合には充分にご注意下さい。

A GaAs (gallium arsenide) laser diode is used. Under normal conditions, it poses no risk of toxicity. However, gallium arsenide particles and vapor are toxic, so do not remove the component and break, cut, or crush it. Do not disassemble it by chemical or thermal means. Do not put it in your mouth or swallow it. Take adequate precaution when disposing of the pick-up.

### 10.3 取付け / Mounting

- レーザーダイオードは大電流やパルスにより性能劣化や破壊を起こします。LD 駆動回路にスイッチ、その他によるサージ電流を流すことは避けて下さい。

Large currents or electrical pulses may damage the laser diode or impair its performance.

Protect the LD drive circuit from surge current caused by switches or other sources.

- 取り扱い中の静電気による破壊防止のため、光ピックアップを取り扱う製造ライン、検査部門では、作業台、治工具、はんだごて(セラミック含む)、および測定器に確実なアースを取って下さい。また、取り扱う作業者は必ず人体アースを取って下さい。

To protect pick-ups from electrostatic damage, make sure to take grounding precautions for the workbenches, tools, jigs, measuring instruments, and soldering irons (including ceramics) on the production line and in the inspection department. Ensure personnel wear antistatic wrist straps.

- 輸送や保管時の静電気による破壊防止のため、レーザーダイオードの端子(LD と GND 間)は、はんだによりショートされています。レーザーダイオードの破壊や性能劣化の恐れがありますので、ショートはんだ部には直接手を触れないで下さい。また、ショートはんだ部の開放は、LD 駆動回路の接続後、はんだごてで速やかに行ってください。本光ピックアップは鉛フリーはんだを使用しています。ショートはんだ部の開放、あるいはショートは、以下の条件で行ってください。

・はんだごて : 鉛フリーはんだ対応はんだごて 温度 : 350 ± 10

推奨品 白光(株) HAKKO942 相当品

・こて先 : L サイズ 3(mm), 45(deg)

・はんだ : 錫(Sn)-銀(Ag)-銅(Cu)組成で、銅が 2.0%のヤニ入り系はんだ

The laser diode terminals between LD and GND are shorted with solder to protect the laser diode from electrostatic damage during transport and storage. Do not touch the short lands. This may damage the laser diode or impair its performance. Open the short lands promptly with a soldering iron after connecting the LD drive circuit.

The pick-up has short lands of lead-free solder. When soldering or opening the short lands, uphold the following conditions.

・Soldering iron : Use a type that supports lead-free soldering. Temperature of soldering iron tip: 350 ° C ± 10 ° C

Recommended model: Hakko 942 manufactured by Hakko Corporation, or equivalent

・Soldering iron tip: Size L, 3 mm in diameter, at a 45 ° angle

・Solder: Use the resin-cored solder consisting of tin (Sn), silver (Ag), and 2% copper (Cu).

- 光ピックアップの電源は、外部および内部からのノイズ対策を充分行って下さい。

Keep the pick-up power source shielded from internal and external sources of electrical noise.

### 10.4 保管と輸送 / Storage and Transport

- 保管あるいは輸送する場合には、本仕様書記載の梱包状態にして下さい。

Uphold packaging specifications in this manual during storage and transport.

- 回路を接続しないで保管あるいは輸送する場合には、必ず出荷時と同じようなショートはんだを行ってください。

Be sure to short pick-ups (as during delivery) when they are stored or transported.

- 高温、高湿、あるいは塵埃の発生する環境を避けて保管して下さい。

Do not store the packaged pick-ups where they are in a hot, high humid or dusty place.

- 衝撃、振動など過大な外力を与えないように保管して下さい。

Keep pick-ups away from where they might be subjected to excessive force such as impact or vibration.

### 10.5 使用環境 / Environment of Use

- 光ピックアップは精密部品ですので、極端に高温、低温、高湿下あるいは塵埃の多い環境での使用については避けるようお願いいたします。

Do not use the pick-up in extremely hot, cold, humid or dusty places. The pick-up is a high-precision component.

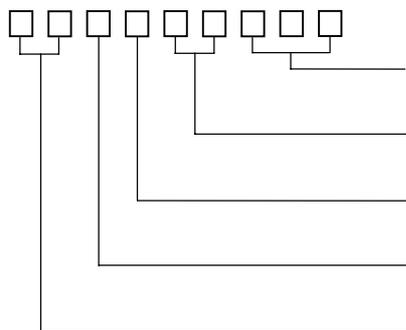
- 腐食性ガス(H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub> 等)や有害なガス雰囲気中、および有害なガスを発生する物質(特に有機シリコン系、シアン系、ホルマリン系、フェノール系等)が存在する場所での使用および保管は避けて下さい。特にセット内においても上記物質が存在しないようにして下さい。

Do not use or store the pick-up where there are corrosive gases (such as H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and Cl<sub>2</sub>) or toxic gases, or substances that emit toxic gases (especially from the organic silicon, cyan, formalin and phenol groups). In particular, prevent these gases from penetrating the unit.

## 11. シリアルナンバー表示 / SERIAL NUMBER INDICATION

### (1) CD シリアルナンバー (9 桁)

CD serial number (9 digits)

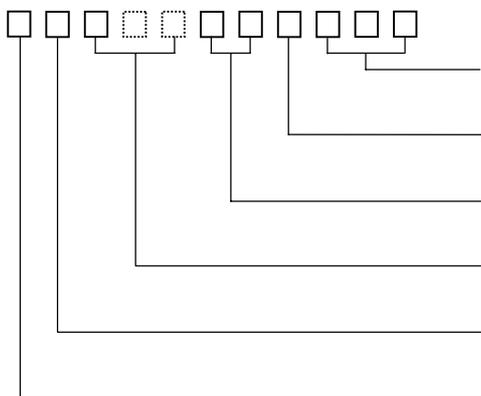


製造通し番号 (20 進法)  
 Manufacturing serial number (base 20)  
 製造日 (01 ~ 31)  
 Production date  
 製造月 (1 ~ 9, A ~ C)  
 Production month  
 製造年 (下 1 桁) 2005 年 5  
 Production year (last 1 digit)  
 電流値表示 (mA)  
 Current value

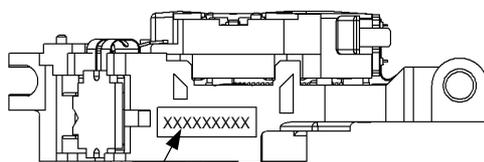
月の 10, 11, 12 月を A, B, C で表す。  
 A, B and C of month represent  
 October, November and December  
 respectively.

### (2) DVD シリアルナンバー (9, 10 または 11 桁)

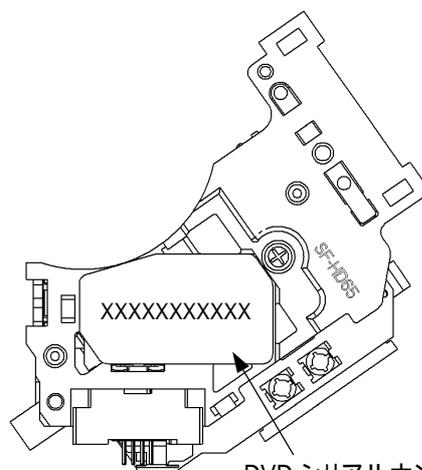
DVD serial number (9, 10, or 11 digits)



製造通し番号 (20 進法)  
 Manufacturing serial number (base 20)  
 評価機記号  
 Evaluation device code  
 電流値表示 (mA)  
 Current value (mA)  
 生産工程記号 (1, 2, または 3 桁)  
 Production line code (1,2,or 3 digits)  
 工場記号  
 Factory code  
 生産管理記号  
 Production control code



CD シリアルナンバーラベル  
 CD serial number label



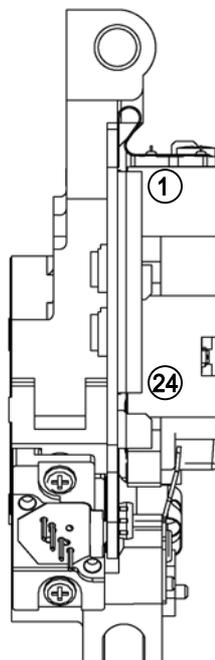
DVD シリアルナンバーラベル  
 DVD serial number label

## 12. 接続仕様 / CONNECTION SPECIFICATIONS

コネクタターミナル配置表

Connector terminal pin assignments

PIN No.	PIN 名前 PIN name	機能区分 Functional unit
1	F-	アクチュエータ- Actuator
2	F+	
3	T+	
4	T-	
5	C/c	受光素子部 Photo detector
6	D/d	
7	CD/DVD SW	
8	RF	
9	A/a	
10	B/b	
11	F	
12	GND-PD	
13	Vc(Vref)	レーザー部 Laser diode
14	Vcc	
15	E	
16	(N.C.)	
17	VR-CD	
18	VR-DVD	
19	CD-LD	
20	MD	
21	HFM	
22	(N.C.)	
23	DVD-LD	
24	GND-LD	



使用コネクタ / Connector used :

住鋳テック(株) / SUMIKO TEC Co., Ltd. LD01T4-24NA-03

Yeon Ho Electronics CO., LTD. 05003HR-24B01S

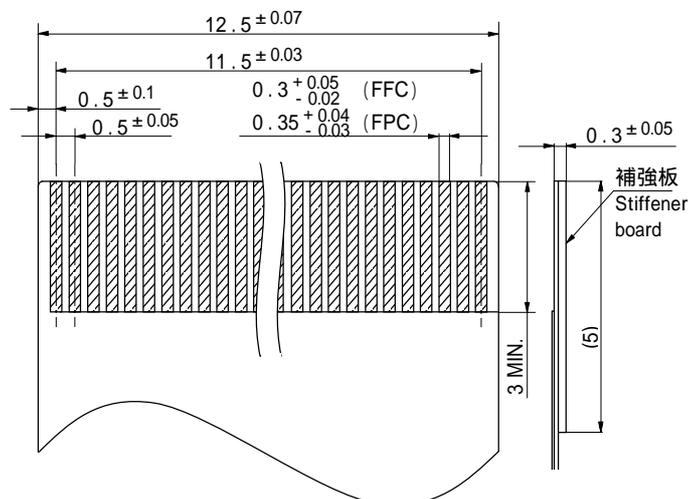
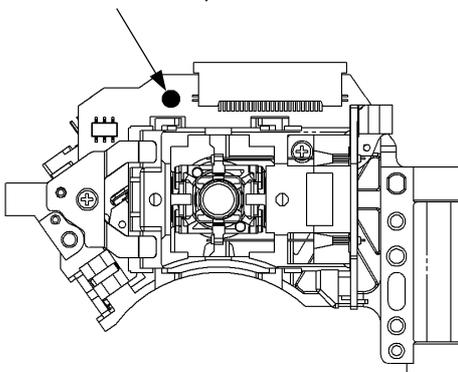
New Jinggui Technology (H.K.) Co., Ltd CF20241D0R0

24pin コネクタ用 0.5mm ピッチ FPC/FFC 推奨寸法

Recommended dimensions of 0.5mm-pitch FPC/FFC for 24 pin connector

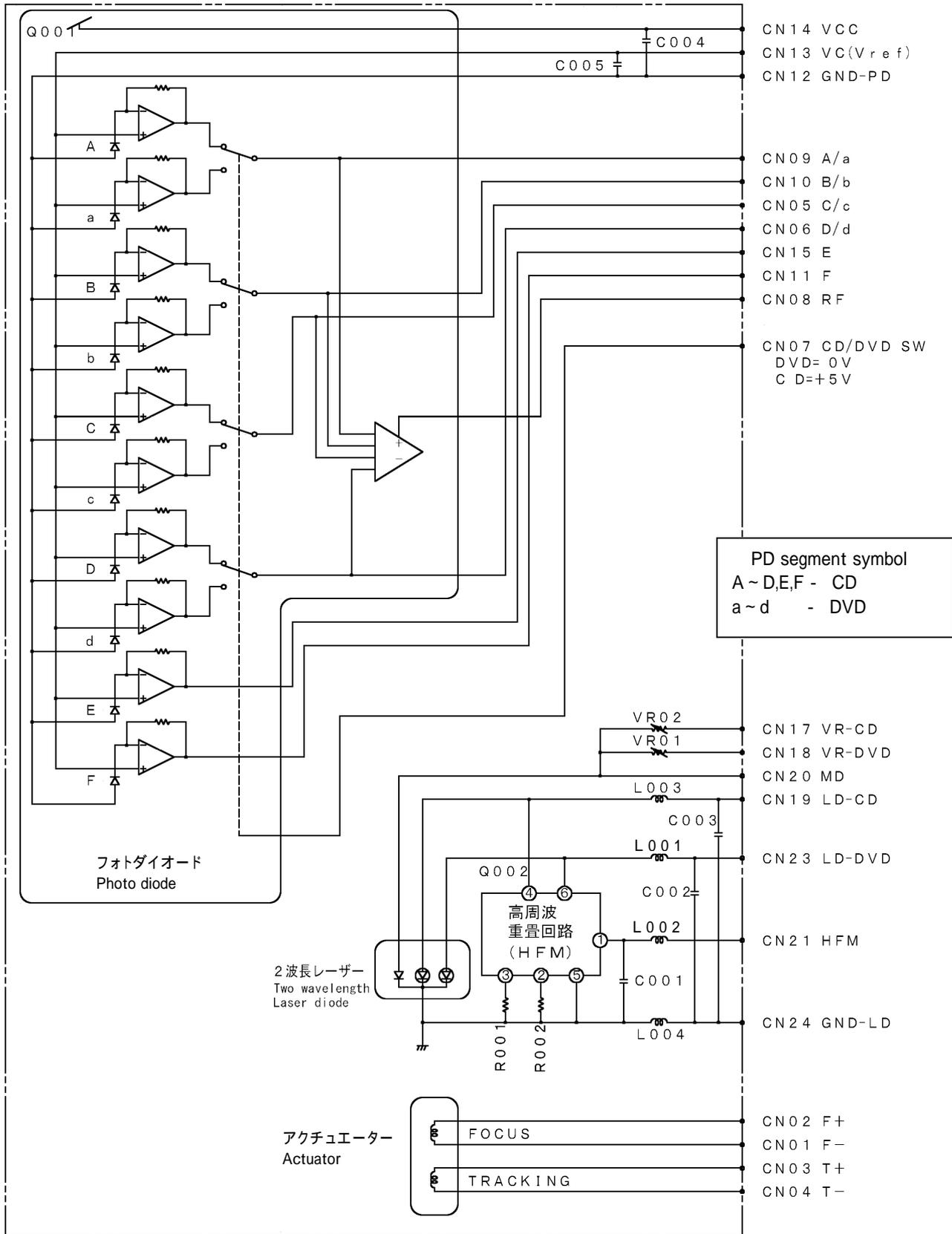
レーザーダイオードショート半田部

Soldered short pattern for laser diode



13. 電気系ブロック図 / ELECTRIC CIRCUIT BLOCK DIAGRAM

PICK-UP UNIT



## 14. 信号の定義 / SIGNAL DEFINITIONS

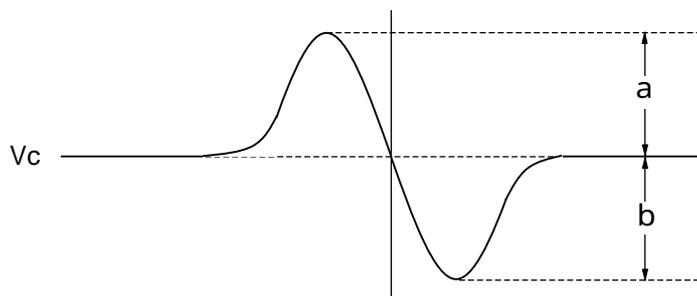
### (1) S字バランス / S-curve balance

フォーカスエラー信号の振幅中心と基準電圧  $V_c$  とのずれの割合

Percentage deviation of the center level of the FE signal with respect to the reference voltage ( $V_c$ ).

$$\text{S字バランス} = \frac{(a - b)/2}{a + b} \times 100 (\%)$$

S-curve balance



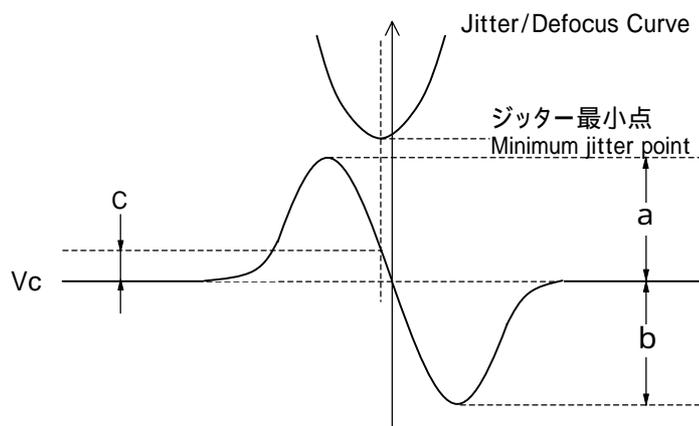
### (2) 合焦ずれ / Defocus

ジッター最小点でのフォーカスエラー信号の振幅と基準電圧  $V_c$  とのずれの割合

Percentage deviation of the level of the FE signal at the minimum jitter point with respect to the reference voltage ( $V_c$ ).

$$\text{合焦ずれ} = \frac{c}{a + b} \times 100 (\%)$$

Defocus



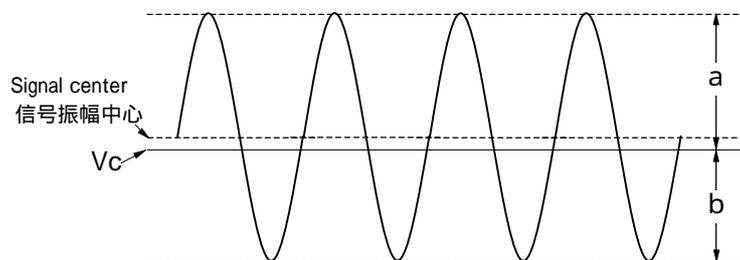
### (3) TE信号の中心ずれ / TE offset

トラッキングエラー信号の振幅中心と基準電圧  $V_c$  とのずれの割合

Percentage deviation of the center level of the TE signal with respect to the reference voltage ( $V_c$ ).

$$\text{TE信号の中心ずれ} = \frac{(a - b)/2}{a + b} \times 100 (\%)$$

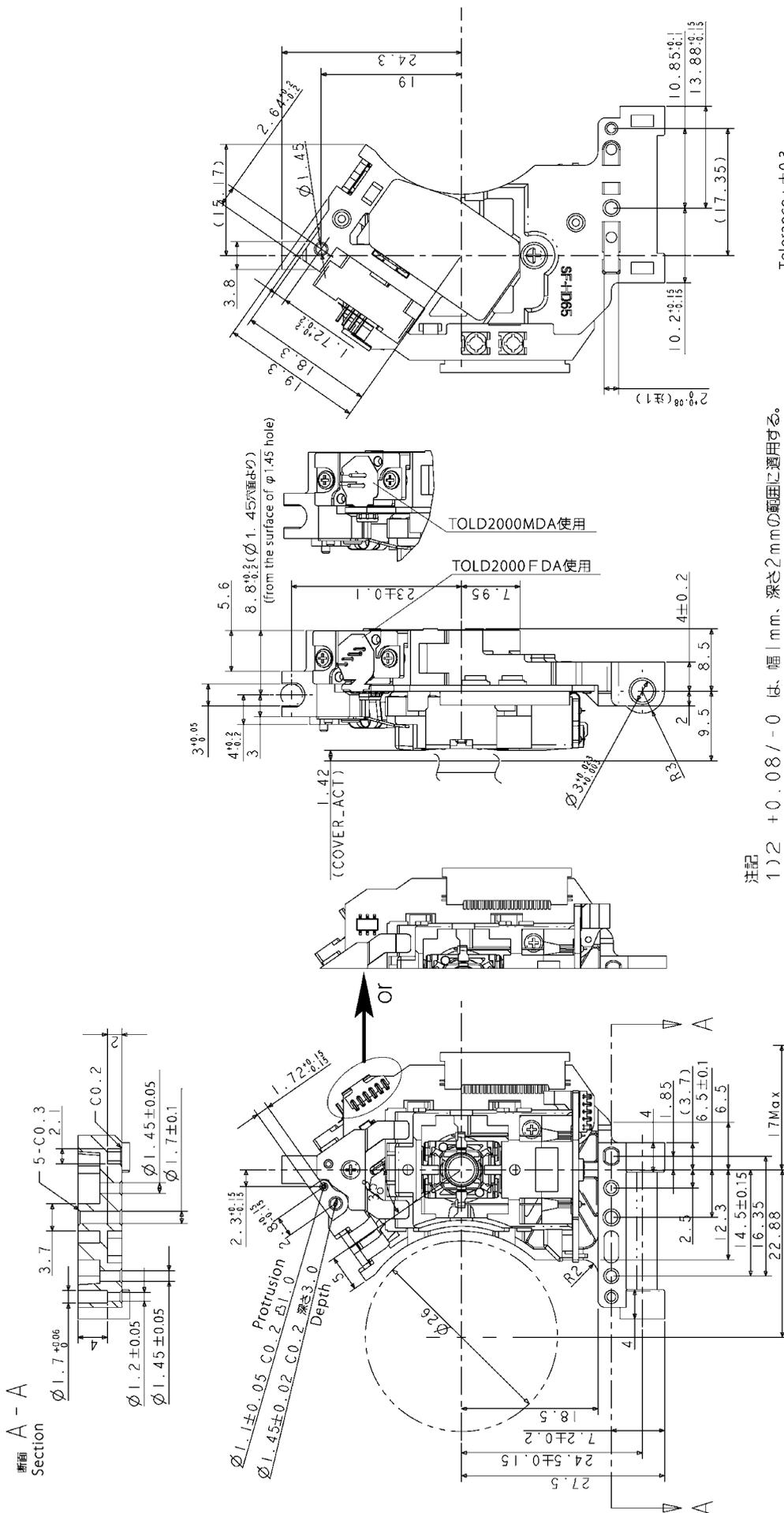
TE offset





16. 外形図 / APPEARANCE DRAWING

SF-HD65  
外形図



## 17. 部品関連情報 / PARTS RELATED INFORMATION

### 17.1 安全規格 / Safety Standard

本光ピックアップは、各国安全規格に準じた設計をしていますが、その使用状態で決定されるため、単体での承認はされていません。必ずセットでの承認申請・確認をお願いいたします。

This pick-up is designed to conform to the safety standards of various countries. However, approval depends on the mode of use, so the pick-up is not certified for use as an independent unit. Thus, check it for safety and apply for certification after the pick-up is mounted.

### 17.2 UL 規格対象主要部品リスト / List of Main Parts Subject to UL Certification

No.	PARTS	GENERIC NAME	TYPE No.	MANUFACTURERS	UL FLAME CLASS	UL FILE No.
1	FPC LD Or Or	FPC	X	SUMITOMO ELECTRIC PRINTED CIRCUITS INC	94V-0	E185407
		FPC	YSSS-1	TOPSUN&FPC TECHNOLOGY CO LTD	94V-0	E216781
		FPC	F5a	SI FLEX CO LTD	94V-0	E112962
	FPC PD Or Or	FPC	X	SUMITOMO ELECTRIC PRINTED CIRCUITS INC	94V-0	E185407
		FPC	YSSS-1	TOPSUN&FPC TECHNOLOGY CO LTD	94V-0	E216781
		FPC	F5a	SI FLEX CO LTD	94V-0	E112962
FPC ACT Or	FPC	YSSS-1	TOPSUN&FPC TECHNOLOGY CO LTD	94V-0	E216781	
	FPC	F5a	SI FLEX CO LTD	94V-0	E112962	
2	PWB-W MAIN Or	PWB	E36	ELEMENT DENSHI CO LTD	94V-0	E69115
		PWB	GB-12	GAINBASE INDUSTRIAL LTD	94V-0	E122351
	PWB ACT Or	PWB	E36	ELEMENT DENSHI CO LTD	94V-0	E69115
		PWB	CC-01	CON CENTRIC CIRCUITS CO LTD	94V-0	E231620
3	HOUSING Or Or	SPS	SS170	IDEMITSU KOSAN CO LTD	94HB	E48268
		PPS	A390M65	TORAY INDUSTRIES INC	94V-0	E41797
		PPS	FZ-3805	DAINIPPON INK & CHEMICALS INC	94V-0	E53829
4	CONNECTOR*1 or	PA4/6	TS250F6D	DSM JAPAN ENGINEERING PLASTICS K K	94V-0	E172082
		PPS	FZ-1140-05	DAINIPPON INK & CHEMICALS INC	94V-0	E53829
	CONNECTOR*2 or	PA4/6	TS250F6D	DSM JAPAN ENGINEERING PLASTICS K K	94V-0	E172082
		PPS	A504X90	TORAY INDUSTRIES INC	94V-0	E41797
	CONNECTOR*3	PA4/6	TE250F8	DSM JAPAN ENGINEERING PLASTICS K K	94V-0	E172082
	5	FRAME ACT	ABS/PBT	VX64G-30	TORAY INDUSTRIES INC	94V-0
6	HOLDER LENS	LCP	E5006L	SUMITOMO CHEMICAL CO LTD	94V-0	E54705

\*1 : 住鋳テック(株)製 / SUMIKO TEC Co., Ltd 's connector

\*2 : Yeon Ho Electronics CO., LTD 's connector

\*3 : New Jinggui Technology (H.K.) Co., Ltd 's connector

補 足 資 料  
APPENDIX

---

MODEL: SF-HD65

---

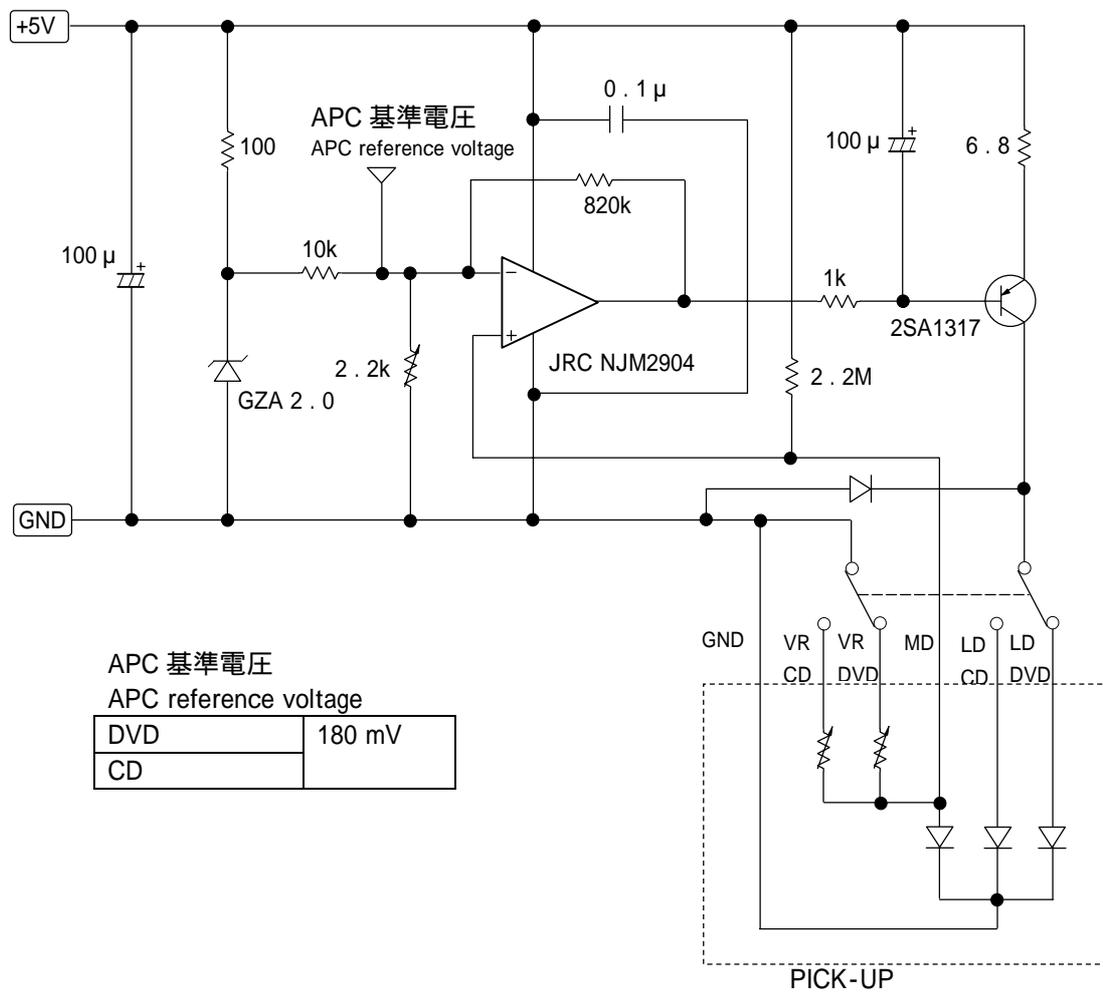
三 洋 電 機 株 式 会 社  
電 子 デ バ イ ス カ ン パ ニ ー  
光 ビ ジ ネ ス シ ス テ ム ビ ジ ネ ス ユ ニ ッ ト  
S A N Y O E l e c t r i c C o . , L t d .  
E l e c t r o n i c D e v i c e C o m p a n y  
O p t i c a l B u s i n e s s S y s t e m s B u s i n e s s U n i t

本補足資料は、納入仕様書の参考資料です。

This appendix serves as a reference material for the specifications document.

#### A.1 標準APC回路図 (参考)

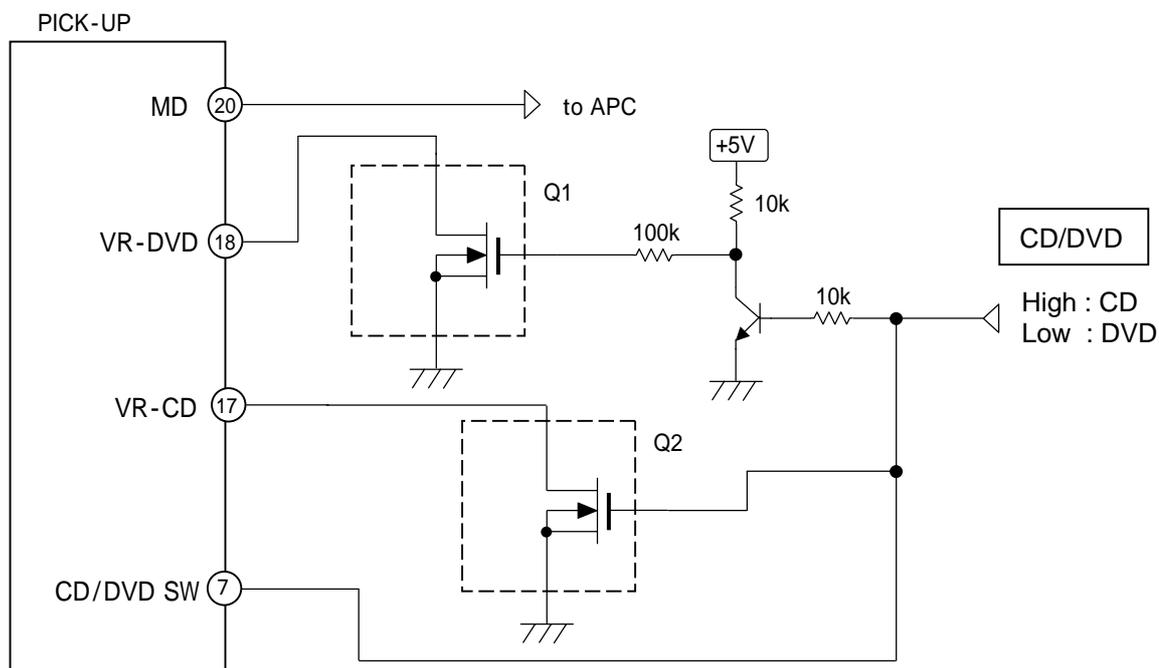
Standard APC Circuit Diagram (reference)



VR-CD、VR-DVD 端子の切替え部分の詳細については、  
次頁を参照してください。

For more details on the switching circuit unit of the VR-CD  
and VR-DVD pins, refer to the next page.

A.2 CD / DVD 切替え回路図 (参考)  
 CD/DVD Switching Circuit Diagram (reference)



## (注意 1)

SF-HD65 のモニターダイオードを使用するためには、CD と DVD の場合で VR-CD ( ) と VR-DVD ( ) を切り替える必要があります。上記回路に信号を印加することで使用可能となります。また、PD-IC も同様に、CD/DVD SW 端子 ( ) で切り替えて使用してください。LD の破壊の防止のため、VR-CD、VR-DVD 端子切り替え完了後、LD 端子へ電源を供給してください。

## (注意 2)

Q1, Q2 の飽和電圧は 50mV 以下を推奨します。

## (Notice 1)

In order for the monitor diode of the SF-HD65 to be used, it is necessary to switch VR-CD (pin ) and VR-DVD (pin ) in the CD mode and DVD mode, respectively. The diode can be used by supplying the signals to the above circuit.

Similarly, the PD-IC is switched and used by setting CD/DVD SW (pin ).

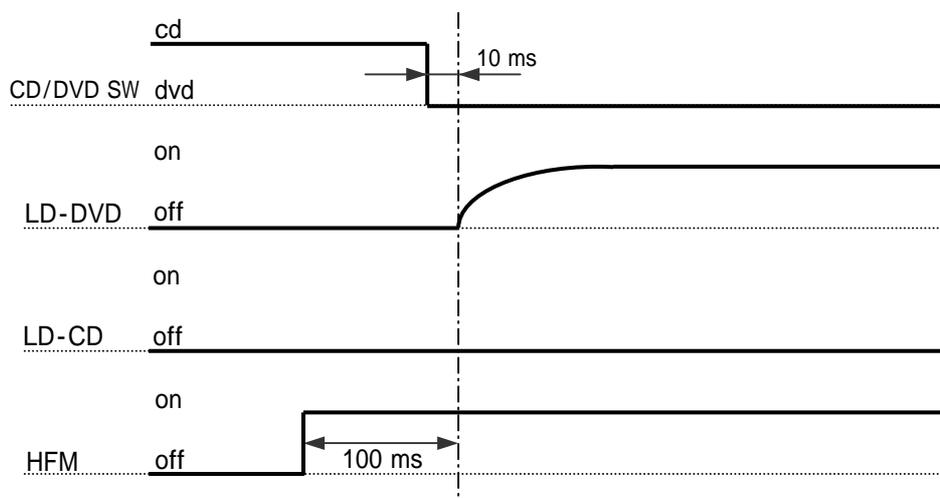
To prevent LD breakdown, supply the power (+5V) to the LD pin after the VR-CD and VR-DVD pins have been switched.

## (Notice 2)

The saturation voltage of Q1 and Q2 should be less than 50mV.

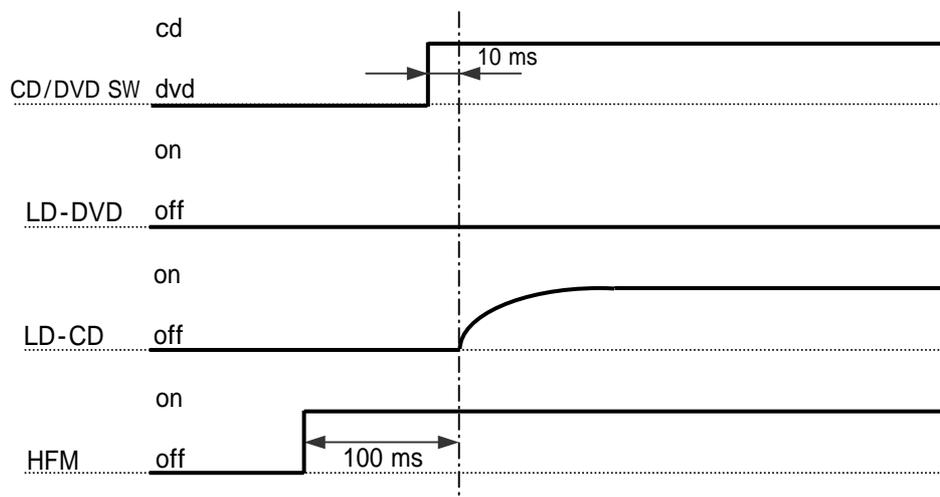
### A.3 CD/DVD の切り替えタイミング図 (参考) CD/DVD switching timing diagrams (reference)

#### (1) DVD ON



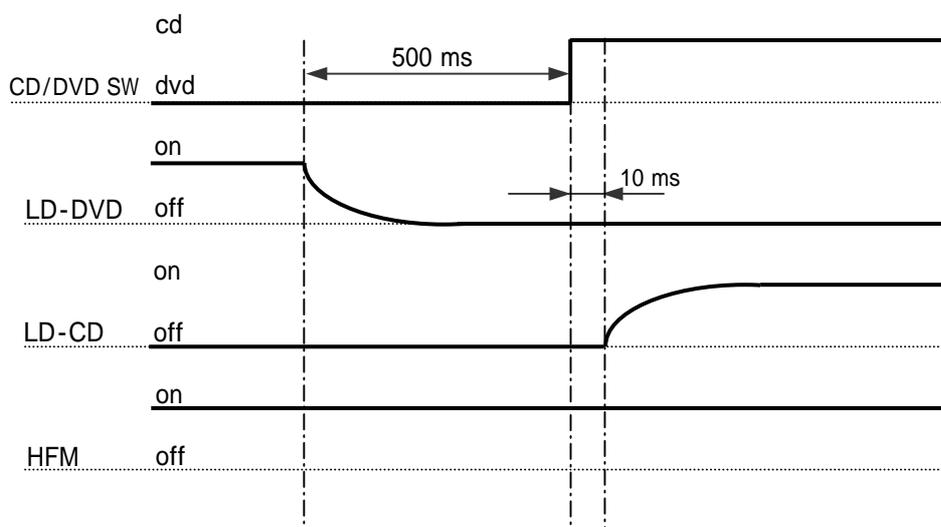
LD-DVD on の 100 ms 前に HFM が on になっていること。  
LD-DVD on の 10 ms 前に CD/DVD SW の切替えが完了していること。  
The HFM signal must be ON 100 ms before the LD-DVD signal turns on.  
The CD/DVD SW signal must be switched to DVD 10 ms before the LD-DVD signal turns on.

#### (2) CD ON



LD-CD on の 100 ms 前に HFM が on になっていること。  
LD-CD on の 10 ms 前に CD/DVD SW の切替えが完了していること。  
The HFM signal must be ON 100 ms before the LD-CD signal turns on.  
The CD/DVD SW signal must be switched to CD 10 ms before the LD-CD signal turns on.

## (3) DVD CD



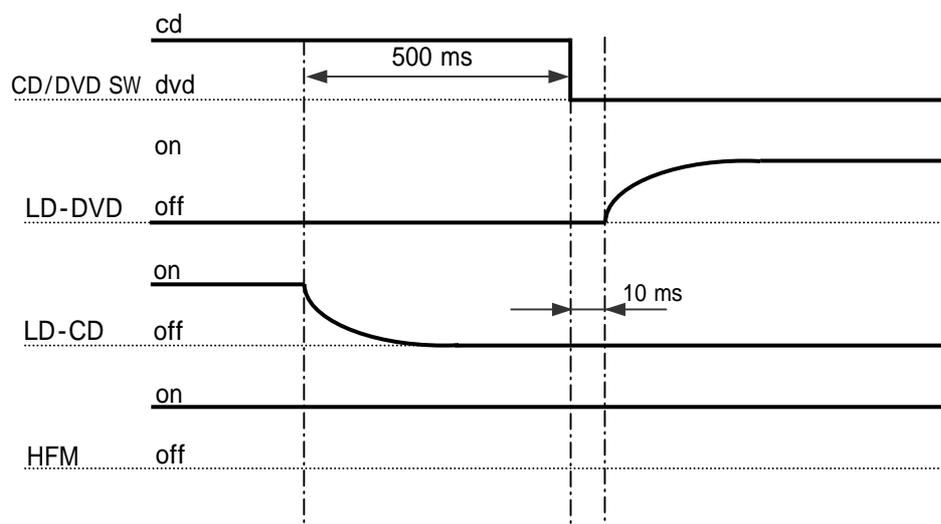
LD-DVD off の後 500 ms 待ってから CD/DVD SW を切替えること。

CD /DVD SW の切替え後 10 ms 待ってから LD-CD を ON すること。

The CD/DVD SW signal must be switched to CD after a wait of 500 ms following the turning off of the LD-DVD signal.

The LD-CD signal must be turned on after a wait of 10 ms following the switching of the CD/DVD SW signal.

## (4) CD DVD



LD-CD off の後 500 ms 待ってから CD/DVD SW を切替えること。

CD/DVD SW の切替え後 10 ms 待ってから LD-DVD を ON すること。

The CD/DVD SW signal must be switched to DVD after a wait of 500 ms following the turning off of the LD-CD signal.

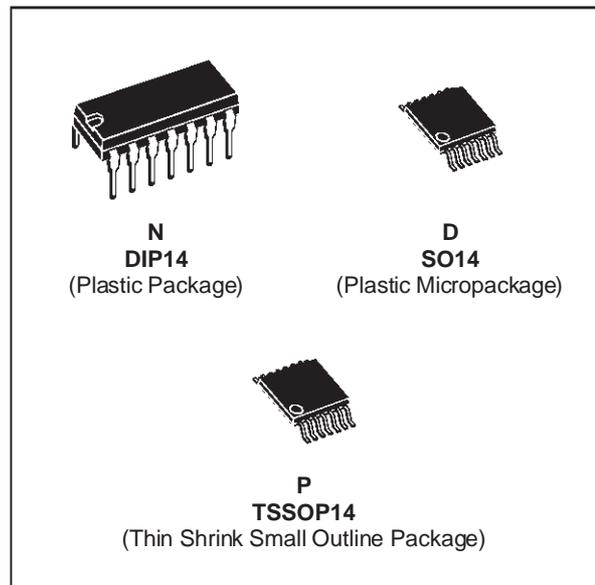
The LD-DVD signal must be turned on after a wait of 10 ms following the switching of the CD/DVD SW signal.



# TL084 TL084A - TL084B

## GENERAL PURPOSE J-FET QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE COMMON-MODE (UP TO  $V_{CC}^+$ ) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE :  $16V/\mu s$  (typ)



### DESCRIPTION

The TL084, TL084A and TL084B are high speed J-FET input quad operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

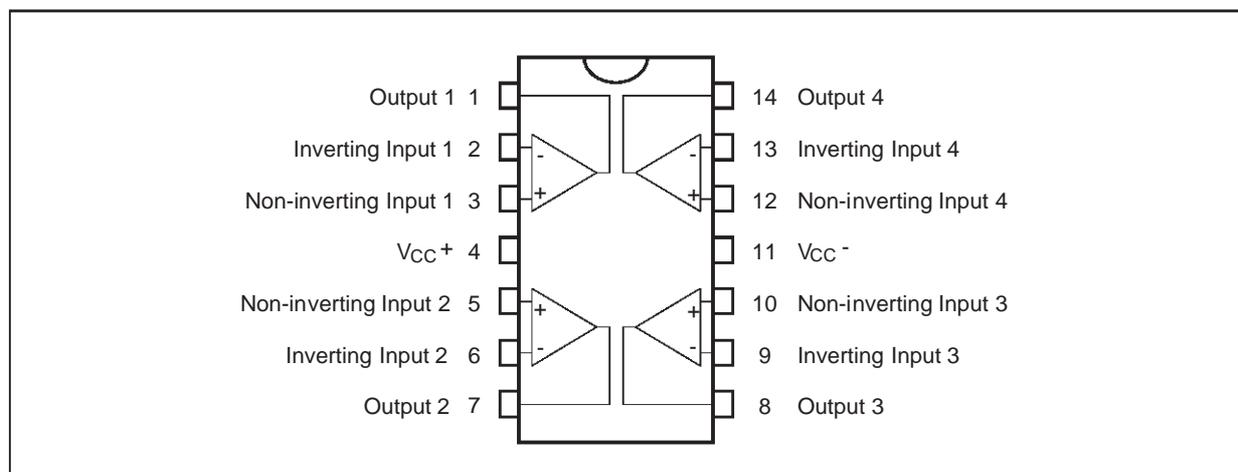
The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

### ORDER CODES

Part Number	Temperature Range	Package		
		N	D	P
TL084M/AM/BM	-55°C, +125°C	•	•	•
TL084I/AI/BI	-40°C, +105°C	•	•	•
TL084C/AC/BC	0°C, +70°C	•	•	•

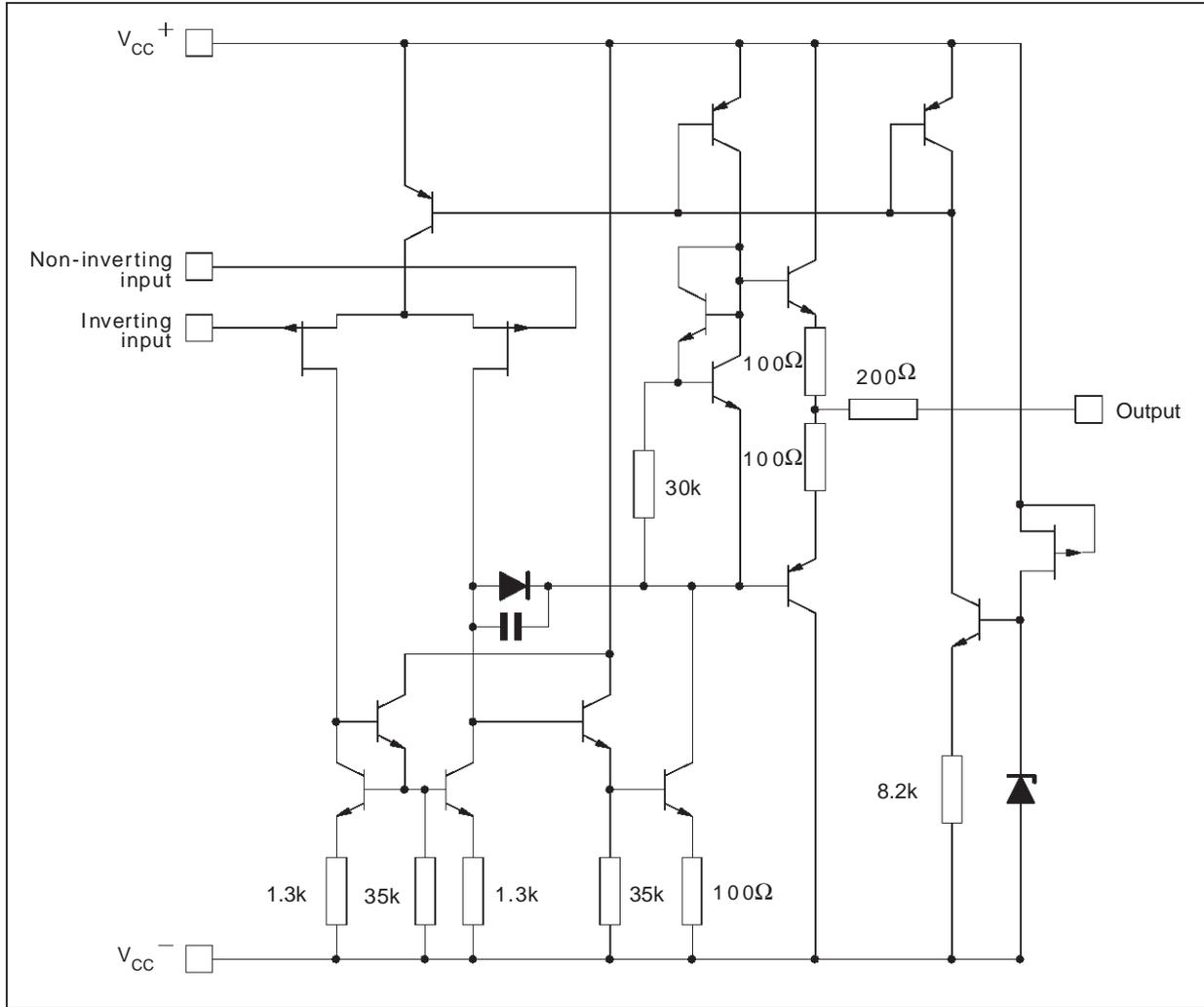
**Examples :** TL084CN, TL084CD

### PIN CONNECTIONS (top view)



# TL084 - TL084A - TL084B

## SCHEMATIC DIAGRAM (each amplifier)



## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit	
$V_{CC}$	Supply Voltage - (note 1)	$\pm 18$	V	
$V_i$	Input Voltage - (note 3)	$\pm 15$	V	
$V_{id}$	Differential Input Voltage - (note 2)	$\pm 30$	V	
$P_{tot}$	Power Dissipation	680	mW	
	Output Short-circuit Duration - (note 4)	Infinite		
$T_{oper}$	Operating Free Air Temperature Range	TL084C,AC,BC TL084I,AI,BI TL084M,AM,BM	$0$ to $70$ $-40$ to $105$ $-55$ to $125$	$^{\circ}C$
$T_{stg}$	Storage Temperature Range		$-65$ to $150$	$^{\circ}C$

- Notes :**
1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between  $V_{CC}^+$  and  $V_{CC}^-$ .
  2. Differential voltages are at the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
  3. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
  4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and /or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

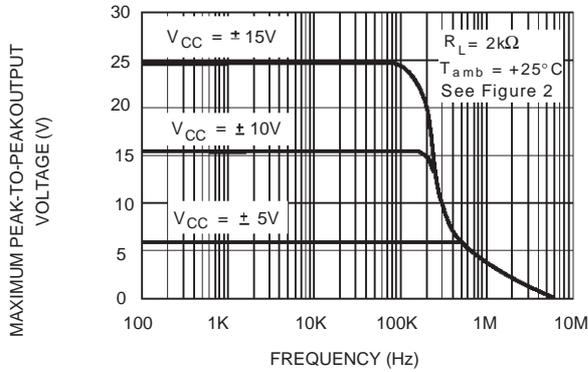
**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

V<sub>CC</sub> = ±15V, T<sub>amb</sub> = 25°C (unless otherwise specified)

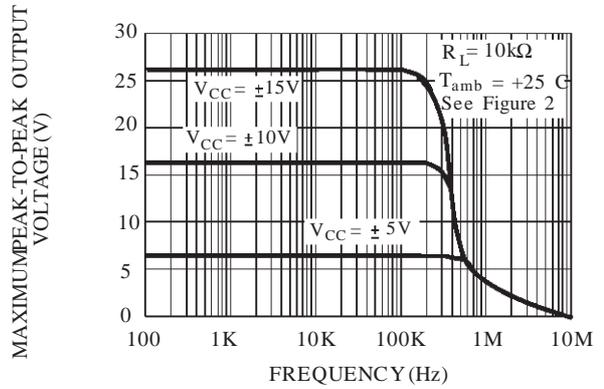
Symbol	Parameter	TL084I,M,AC,AI, AM,BC,BI,BM			TL084C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
V <sub>io</sub>	Input Offset Voltage (R <sub>S</sub> = 50Ω) T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>		3 3 1	10 6 3 13 7 5		3	10 13	mV
DV <sub>io</sub>	Input Offset Voltage Drift		10			10		μV/°C
I <sub>io</sub>	Input Offset Current * T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>		5	100 4		5	100 4	pA nA
I <sub>ib</sub>	Input Bias Current * T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>		20	200 20		30	400 20	pA nA
A <sub>vd</sub>	Large Signal Voltage Gain (R <sub>L</sub> = 2kΩ, V <sub>O</sub> = ±10V) T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>	50 25	200		25 15	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio (R <sub>S</sub> = 50Ω) T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>	80 80	86		70 70	86		dB
I <sub>CC</sub>	Supply Current, per Amp, no Load T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>		1.4	2.5 2.5		1.4	2.5 2.5	mA
V <sub>icm</sub>	Input Common Mode Voltage Range	±11	+15 -12		±11	+15 -12		V
CMR	Common Mode Rejection Ratio (R <sub>S</sub> = 50Ω) T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>	80 80	86		70 70	86		dB
I <sub>os</sub>	Output Short-circuit Current T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>	10 10	40	60 60	10 10	40	60 60	mA
±V <sub>OPP</sub>	Output Voltage Swing T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>							V
SR	Slew Rate (V <sub>in</sub> = 10V, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, T <sub>amb</sub> = 25°C, unity gain)		8	16		8	16	V/μs
t <sub>r</sub>	Rise Time (V <sub>in</sub> = 20mV, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, T <sub>amb</sub> = 25°C, unity gain)			0.1		0.1		μs
K <sub>OV</sub>	Overshoot (V <sub>in</sub> = 20mV, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, T <sub>amb</sub> = 25°C, unity gain)			10		10		%
GBP	Gain Bandwidth Product (f = 100kHz, T <sub>amb</sub> = 25°C, V <sub>in</sub> = 10mV, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF)	2.5	4		2.5	4		MHz
R <sub>i</sub>	Input Resistance		10 <sup>12</sup>			10 <sup>12</sup>		Ω
THD	Total Harmonic Distortion (f = 1kHz, A <sub>V</sub> = 20dB, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, T <sub>amb</sub> = 25°C, V <sub>O</sub> = 2V <sub>PP</sub> )		0.01			0.01		%
e <sub>n</sub>	Equivalent Input Noise Voltage (f = 1kHz, R <sub>S</sub> = 100Ω)		15			15		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
∅ <sub>m</sub>	Phase Margin		45			45		Degrees
V <sub>O1</sub> /V <sub>O2</sub>	Channel Separation (A <sub>V</sub> = 100)		120			120		dB

\* The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature.

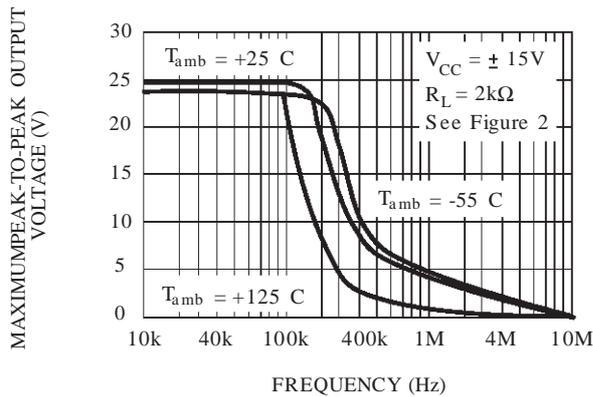
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS FREQUENCY**



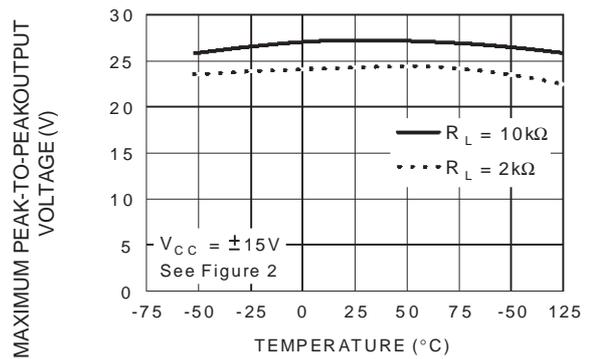
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS FREQUENCY**



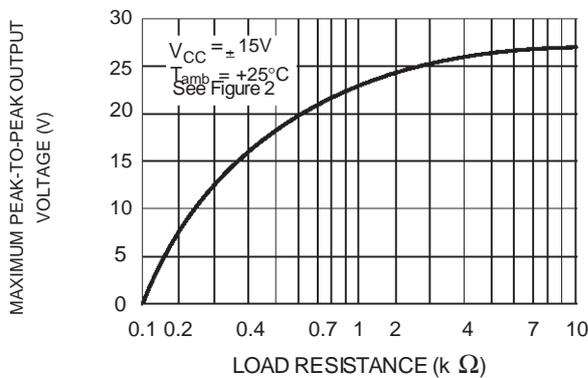
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS FREQUENCY**



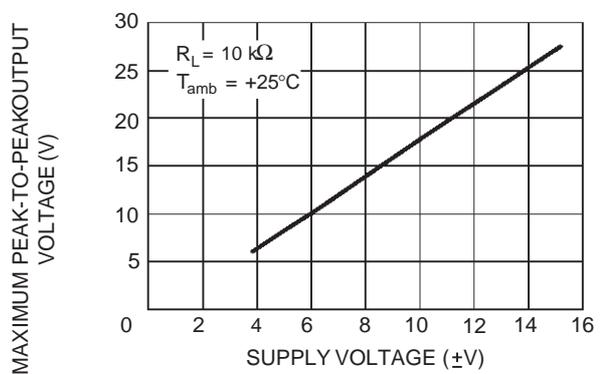
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS FREE AIR TEMP.**



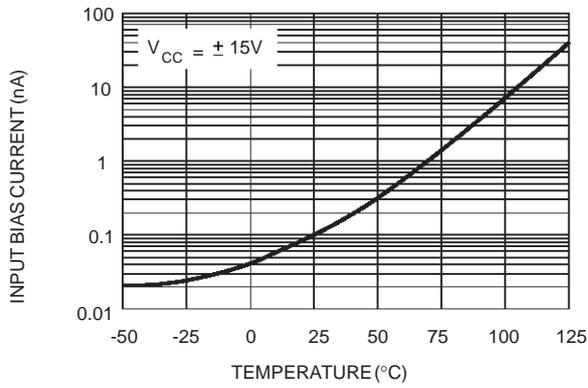
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS LOAD RESISTANCE**



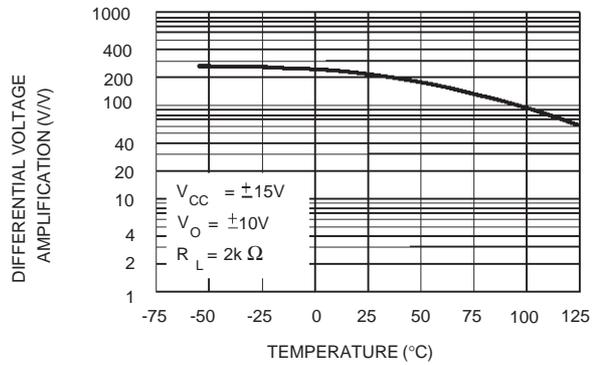
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS SUPPLY VOLTAGE**



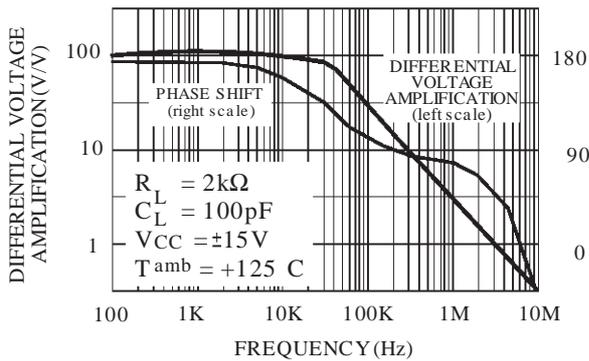
**INPUT BIAS CURRENT VERSUS FREE AIR TEMPERATURE**



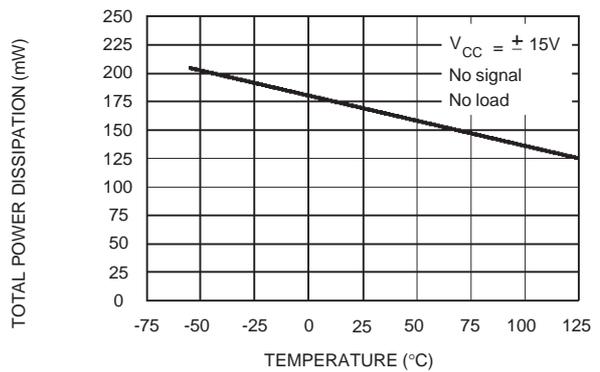
**LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION VERSUS FREE AIR TEMPERATURE**



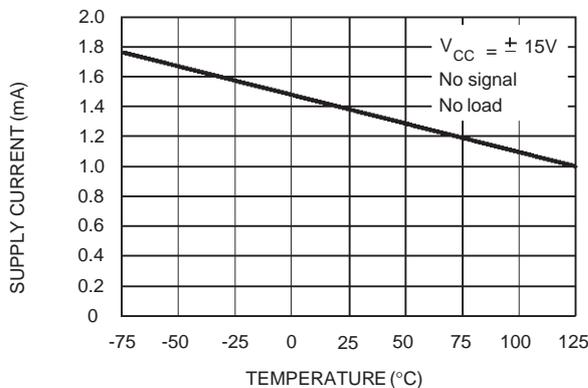
**LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION AND PHASE SHIFT VERSUS FREQUENCY**



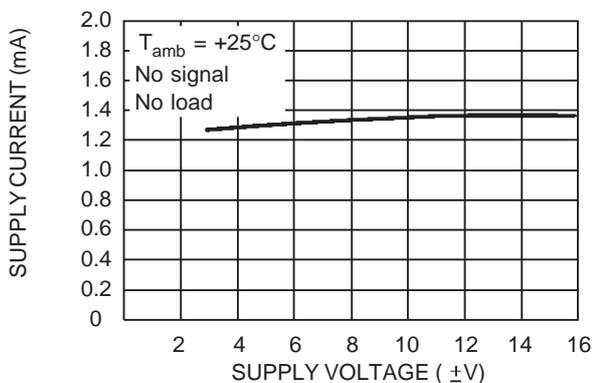
**TOTAL POWER DISSIPATION VERSUS FREE AIR TEMPERATURE**



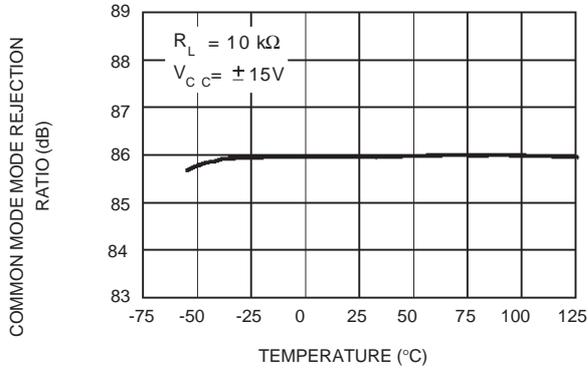
**SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER VERSUS FREE AIR TEMPERATURE**



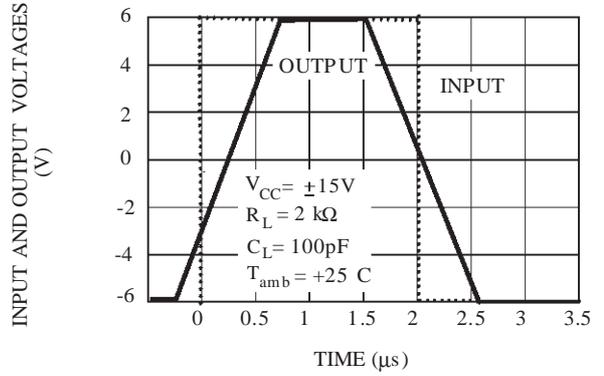
**SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER VERSUS SUPPLY VOLTAGE**



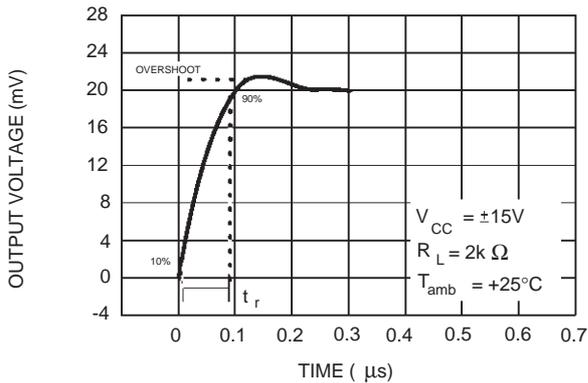
**COMMON MODE REJECTION RATIO VERSUS FREE AIR TEMPERATURE**



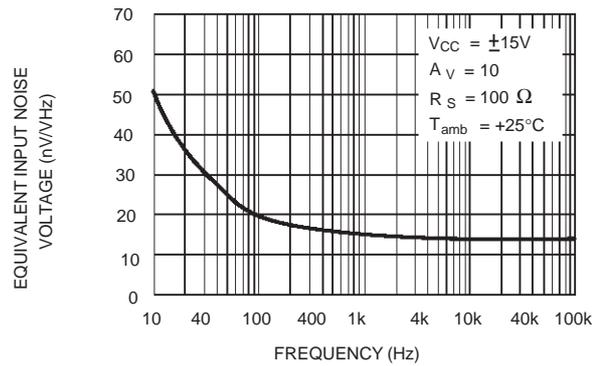
**VOLTAGE FOLLOWER LARGE SIGNAL PULSE RESPONSE**



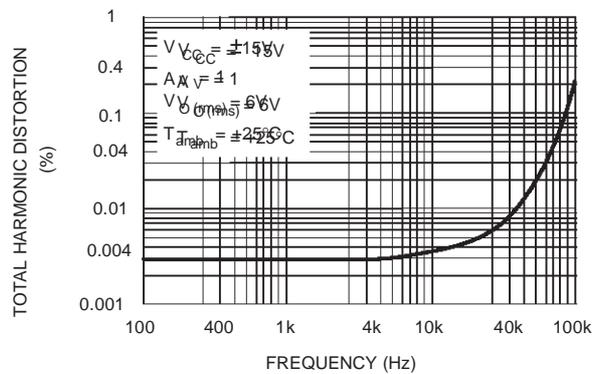
**OUTPUT VOLTAGE VERSUS ELAPSED TIME**



**EQUIVALENT INPUT NOISE VOLTAGE VERSUS FREQUENCY**



**TOTAL HARMONIC DISTORTION VERSUS FREQUENCY**



PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

Figure 1 : Voltage Follower

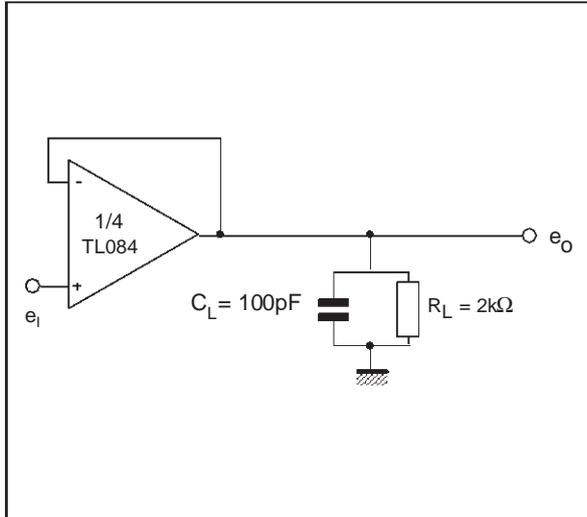
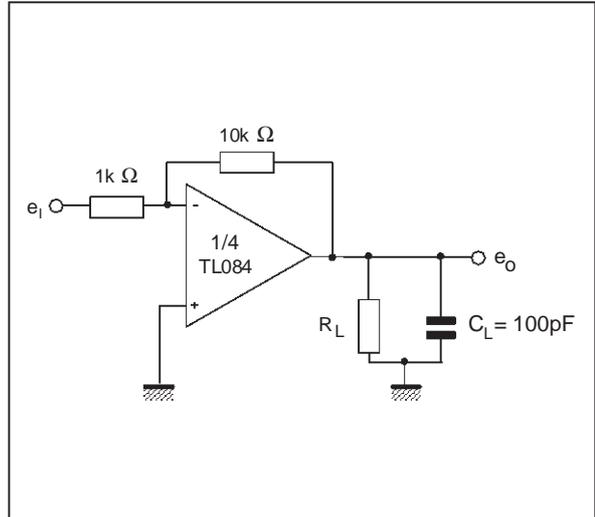
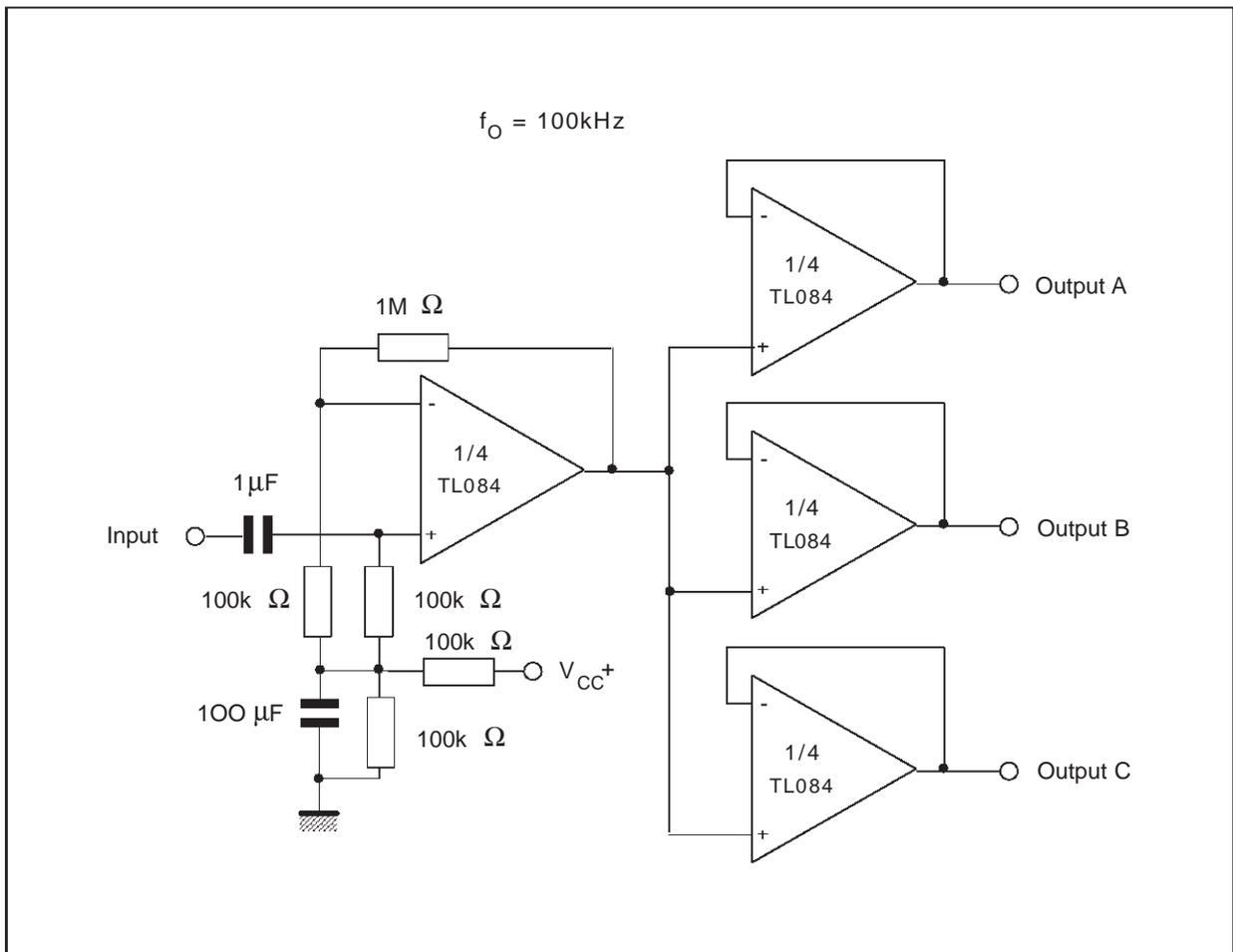


Figure 2 : Gain-of-10 Inverting Amplifier



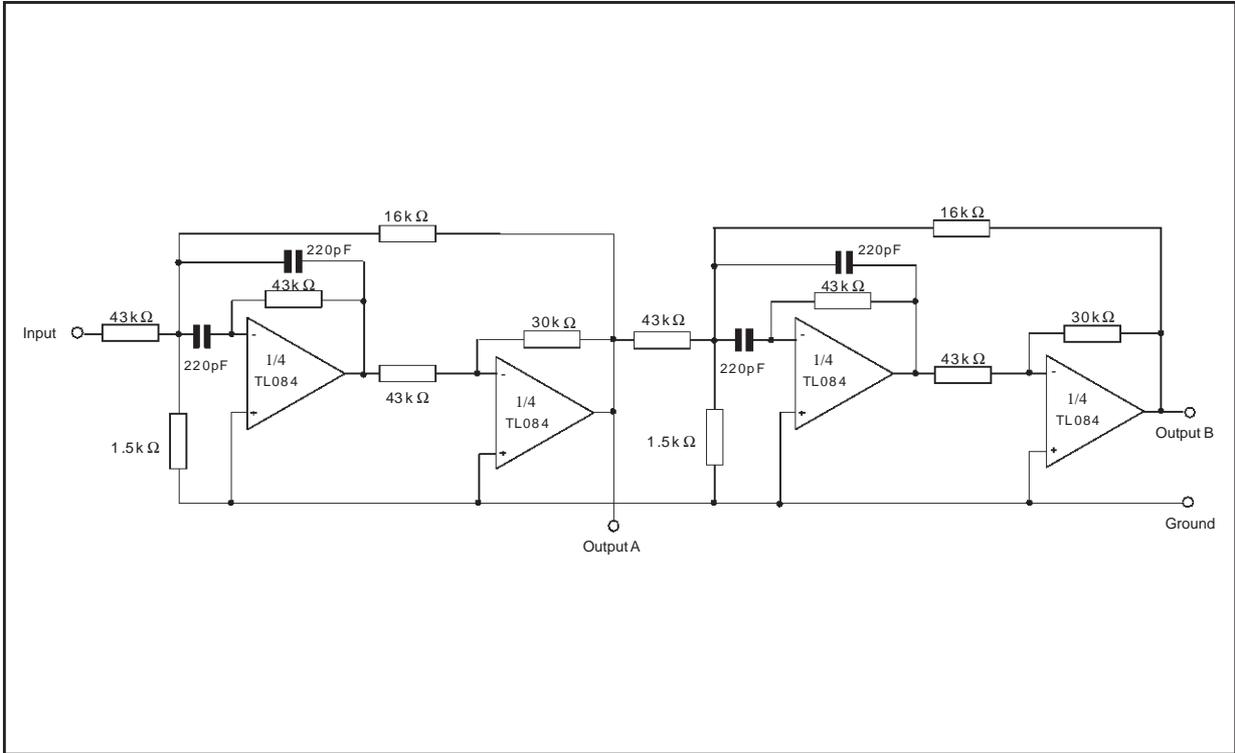
TYPICAL APPLICATIONS

AUDIO DISTRIBUTION AMPLIFIER

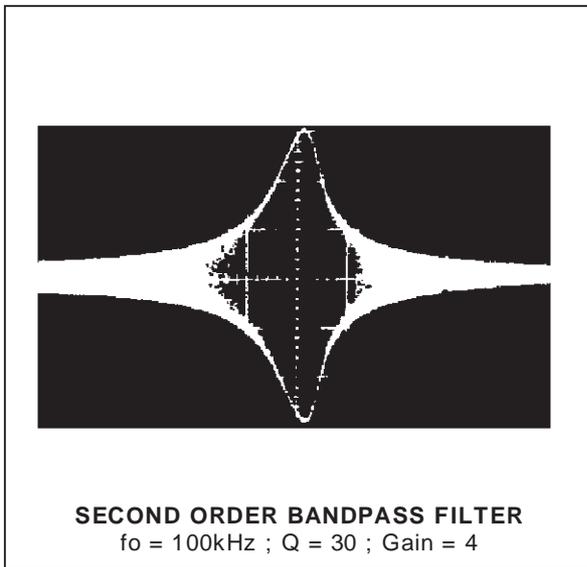


**TYPICAL APPLICATIONS (continued)**

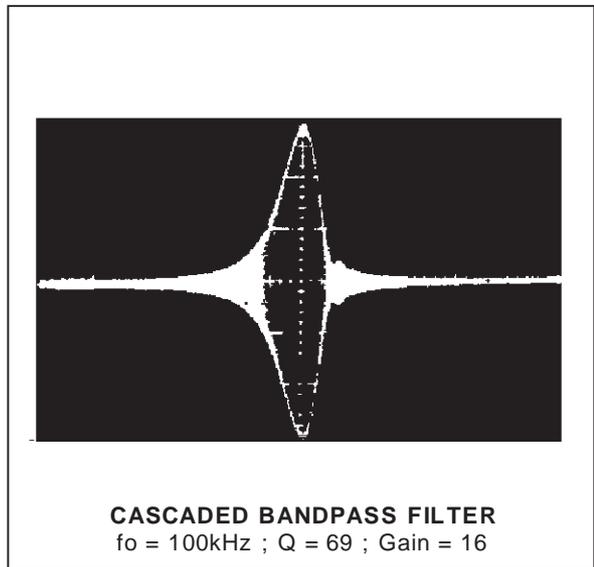
**POSITIVE FEEDBACK BANDPASS FILTER**



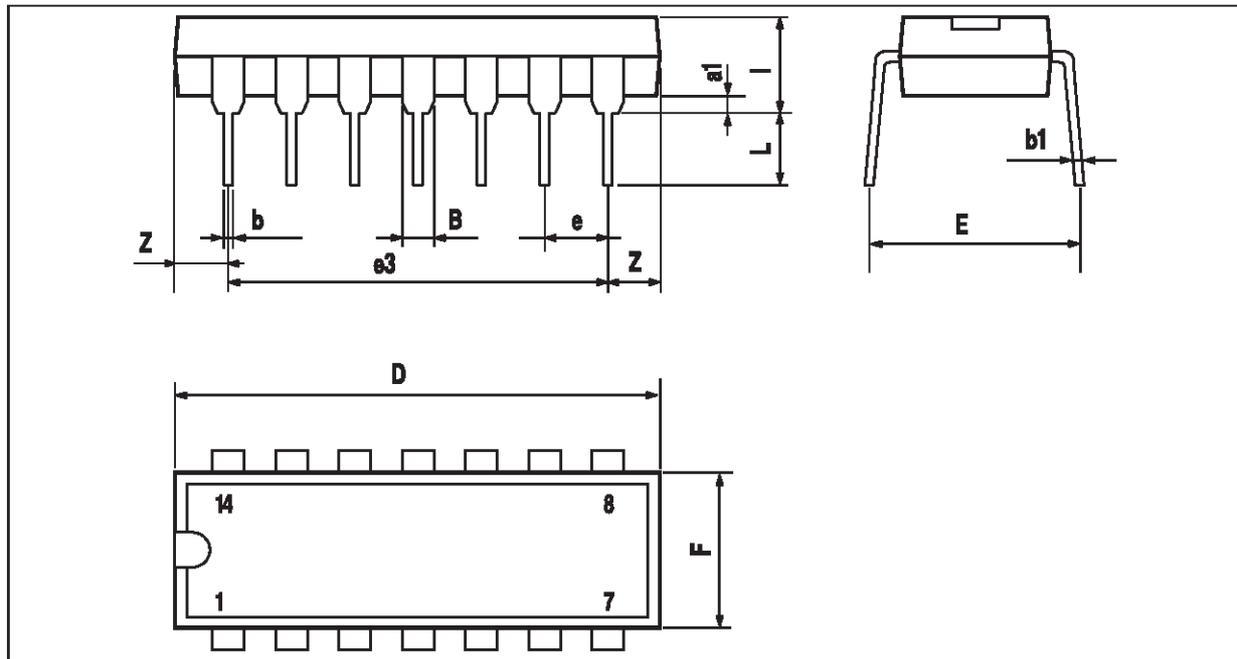
**OUTPUT A**



**OUTPUT B**



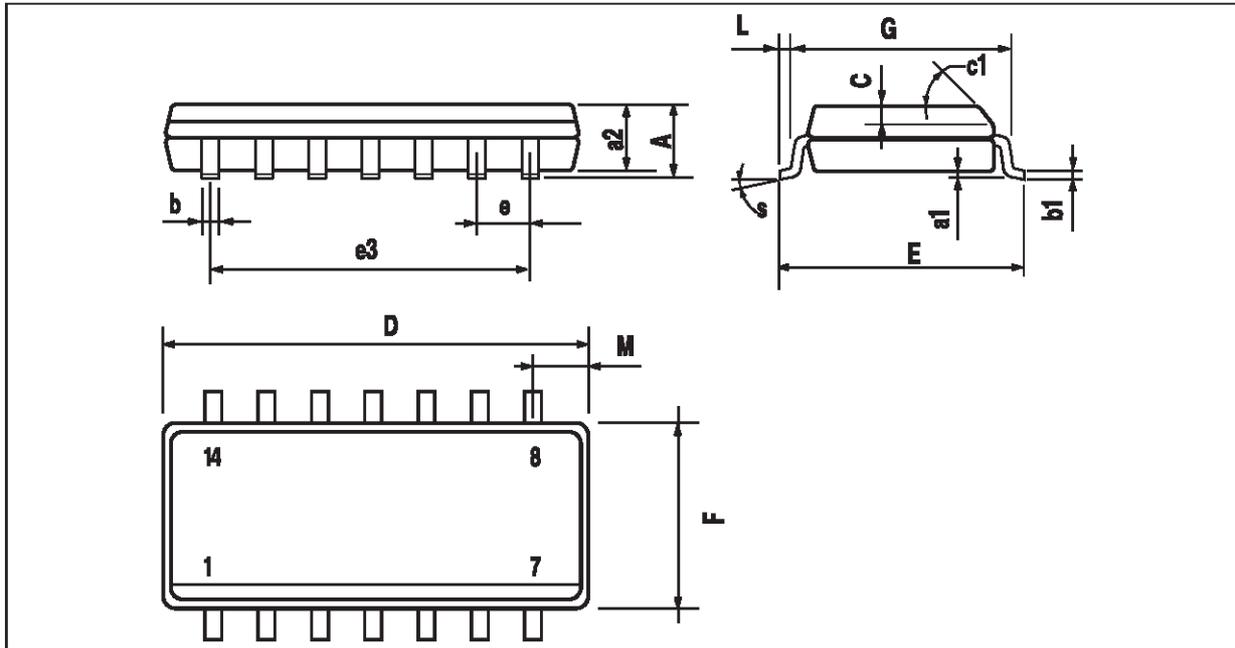
**PACKAGE MECHANICAL DATA**  
14 PINS - PLASTIC DIP



Dimensions	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
a1	0.51			0.020		
B	1.39		1.65	0.055		0.065
b		0.5			0.020	
b1		0.25			0.010	
D			20			0.787
E		8.5			0.335	
e		2.54			0.100	
e3		15.24			0.600	
F			7.1			0.280
i			5.1			0.201
L		3.3			0.130	
Z	1.27		2.54	0.050		0.100

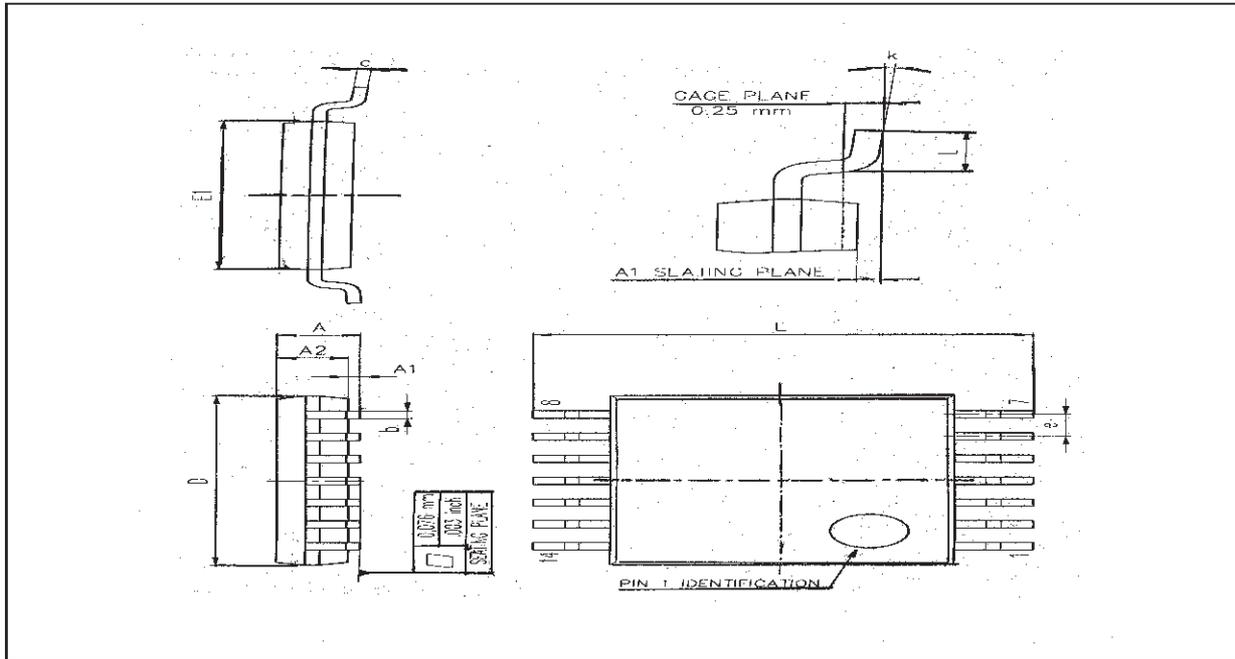
**TL084 - TL084A - TL084B**

**PACKAGE MECHANICAL DATA**  
**14 PINS - PLASTIC MICROPACKAGE (SO)**



Dimensions	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.75			0.069
a1	0.1		0.2	0.004		0.008
a2			1.6			0.063
b	0.35		0.46	0.014		0.018
b1	0.19		0.25	0.007		0.010
C		0.5			0.020	
c1	45° (typ.)					
D	8.55		8.75	0.336		0.334
E	5.8		6.2	0.228		0.244
e		1.27			0.050	
e3		7.62			0.300	
F	3.8		4.0	0.150		0.157
G	4.6		5.3	0.181		0.208
L	0.5		1.27	0.020		0.050
M			0.68			0.027
S	8° (max.)					

**PACKAGE MECHANICAL DATA**  
**14 PINS - THIN SHRINK SMALL OUTLINE PACKAGE**



Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.20			0.05
A1	0.05		0.15	0.01		0.006
A2	0.80	1.00	1.05	0.031	0.039	0.041
b	0.19		0.30	0.007		0.15
c	0.09		0.20	0.003		0.012
D	4.90	5.00	5.10	0.192	0.196	0.20
E		6.40			0.252	
E1	4.30	4.40	4.50	0.169	0.173	0.177
e		0.65			0.025	
k	0°		8°	0°		8°
l	0.50	0.60	0.75	0.09	0.0236	0.030

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

© The ST logo is a trademark of STMicroelectronics

© 1999 STMicroelectronics – Printed in Italy – All Rights Reserved

**STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES**

Australia - Brazil - Canada - China - France - Germany - Italy - Japan - Korea - Malaysia - Malta - Mexico - Morocco  
 The Netherlands - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - Taiwan - Thailand - United Kingdom - U.S.A.

© <http://www.st.com>



### FEATURES

**Low Offset Voltage:** 100  $\mu\text{V}$  max  
**Low Drift:** 2  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  max  
**Wide Gain Range:** 1 to 10,000  
**High Common-Mode Rejection:** 115 dB min  
**High Bandwidth (G = 1000):** 200 kHz typ  
**Gain Equation Accuracy:** 0.5% max  
**Single Resistor Gain Set**  
**Input Overvoltage Protection**  
**Low Cost**  
**Available in Die Form**

### APPLICATIONS

**Differential Amplifier**  
**Strain Gage Amplifier**  
**Thermocouple Amplifier**  
**RTD Amplifier**  
**Programmable Gain Instrumentation Amplifier**  
**Medical Instrumentation**  
**Data Acquisition Systems**

### GENERAL DESCRIPTION

The AMP02 is the first precision instrumentation amplifier available in an 8-lead package. Gain of the AMP02 is set by a single external resistor and can range from 1 to 10,000. No gain set resistor is required for unity gain. The AMP02 includes an input protection network that allows the inputs to be taken 60 V beyond either supply rail without damaging the device.

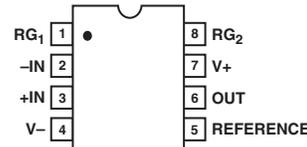
Laser trimming reduces the input offset voltage to under 100  $\mu\text{V}$ . Output offset voltage is below 4 mV, and gain accuracy is better than 0.5% for a gain of 1000. ADI's proprietary thin-film resistor process keeps the gain temperature coefficient under 50 ppm/ $^\circ\text{C}$ .

### REV. E

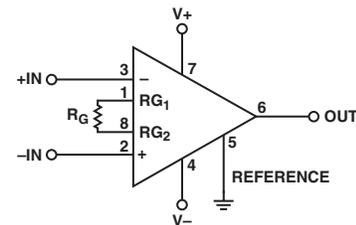
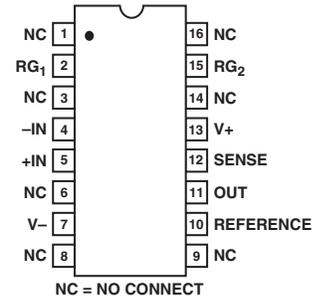
Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective companies.

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

#### 8-Lead PDIP and CERDIP



#### 16-Lead SOIC



$$G = \frac{V_{\text{OUT}}}{(+\text{IN}) - (-\text{IN})} = \left( \frac{50\text{k}\Omega}{R_G} \right) + 1$$

FOR SOL CONNECT SENSE TO OUTPUT

Figure 1. Basic Circuit Connections

Due to the AMP02's design, its bandwidth remains very high over a wide range of gain. Slew rate is over 4 V/ $\mu\text{s}$ , making the AMP02 ideal for fast data acquisition systems.

A reference pin is provided to allow the output to be referenced to an external dc level. This pin may be used for offset correction or level shifting as required. In the 8-lead package, sense is internally connected to the output.

For an instrumentation amplifier with the highest precision, consult the AMP01 data sheet.

# AMP02—SPECIFICATIONS

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS (@ $V_S = \pm 15\text{ V}$ , $V_{CM} = 0\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	AMP02E			AMP02F			Unit
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>OFFSET VOLTAGE</b>									
Input Offset Voltage	$V_{IOS}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$		20	100		40	200	$\mu\text{V}$
Input Offset Voltage Drift	$TCV_{IOS}$	$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$		0.5	2		1	4	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Output Offset Voltage	$V_{OOS}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$		1	4		2	8	mV
Output Offset Voltage Drift	$TCV_{OOS}$	$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$		4	10		9	20	mV
Power Supply Rejection	PSR	$V_S = \pm 4.8\text{ V to } \pm 18\text{ V}$ $G = 100, 1000$ $G = 10$ $G = 1$	115 100 80	125 110 90		110 95 75	115 100 80		dB dB dB
		$V_S = \pm 4.8\text{ V to } \pm 18\text{ V}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $G = 1000, 100$ $G = 10$ $G = 1$	110 95 75	120 110 90		105 90 70	110 95 75		dB dB dB
<b>INPUT CURRENT</b>									
Input Bias Current	$I_B$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		2	10		4	20	nA
Input Bias Current Drift	$TCI_B$	$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$		150			250		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current	$I_{OS}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1.2	5		2	10	nA
Input Offset Current Drift	$TCI_{OS}$	$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$		9			15		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
<b>INPUT</b>									
Input Resistance	$R_{IN}$	Differential, $G \leq 1000$ Common Mode, $G = 1000$		10			10		$\text{G}\Omega$
Input Voltage Range	IVR	$T_A = 25^\circ\text{C}^1$	$\pm 11$	16.5		$\pm 11$	16.5		$\text{G}\Omega$ V
Common-Mode Rejection	CMR	$V_{CM} = \pm 11\text{ V}$ $G = 1000, 100$ $G = 10$ $G = 1$	115 100 80	120 115 95		110 95 75	115 110 90		dB dB dB
		$V_{CM} = \pm 11\text{ V}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $G = 100, 1000$ $G = 10$ $G = 1$	110 95 75	120 110 90		105 90 70	115 105 85		dB dB dB
<b>GAIN</b>									
Gain Equation Accuracy	$G = \frac{50\text{ k}\Omega}{R_G} + 1$	$G = 1000$ $G = 100$ $G = 10$ $G = 1$			0.50 0.30 0.25 0.02			0.70 0.50 0.40 0.05	% % % %
Gain Range	G	$G = 1$ to 1000	1		10k	1		10k	V/V
Nonlinearity		$G = 1$ to 1000		0.006			0.006		%
Temperature Coefficient	$G_{TC}$	$1 \leq G \leq 1000^{2,3}$		20	50		20	50	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
<b>OUTPUT RATING</b>									
Output Voltage Swing	$V_{OUT}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $R_L = 1\text{ k}\Omega$ $R_L = 1\text{ k}\Omega$ , $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$	$\pm 12$ $\pm 11$	$\pm 13$ $\pm 12$		$\pm 12$ $\pm 11$	$\pm 13$ $\pm 12$		V V
Positive Current Limit		Output-to-Ground Short		22			22		mA
Negative Current Limit		Output-to-Ground Short		32			32		mA
<b>NOISE</b>									
Voltage Density, RTI	$e_n$	$f_o = 1\text{ kHz}$ $G = 1000$ $G = 100$ $G = 10$ $G = 1$		9 10 18 120			9 10 18 120		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Noise Current Density, RTI	$i_n$	$f_o = 1\text{ kHz}$ , $G = 1000$		0.4			0.4		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Input Noise Voltage	$e_n$ p-p	0.1 Hz to 10 Hz $G = 1000$ $G = 100$ $G = 10$		0.4 0.5 1.2			0.4 0.5 1.2		$\mu\text{V}$ p-p $\mu\text{V}$ p-p $\mu\text{V}$ p-p
<b>DYNAMIC RESPONSE</b>									
Small-Signal Bandwidth (-3 dB)	BW	$G = 1$ $G = 10$		1200 300			1200 300		kHz kHz
Slew Rate	SR	$G = 100, 1000$		200			200		kHz
Settling Time	$t_s$	$G = 10$ , $R_L = 1\text{ k}\Omega$ To 0.01% $\pm 10\text{ V}$ Step $G = 1$ to 1000	4	6 10		4	6 10		V/ $\mu\text{s}$ $\mu\text{s}$
<b>SENSE INPUT</b>									
Input Resistance	$R_{IN}$			25			25		k $\Omega$
Voltage Range				$\pm 11$			$\pm 11$		V
<b>REFERENCE INPUT</b>									
Input Resistance	$R_{IN}$			50			50		k $\Omega$
Voltage Range				$\pm 11$			$\pm 11$		V
Gain to Output				1			1		V/V

Parameter	Symbol	Conditions	AMP02E			AMP02F			Unit
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
POWER SUPPLY									
Supply Voltage Range	$V_S$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$	$\pm 4.5$		$\pm 18$	$\pm 4.5$		$\pm 18$	V
Supply Current	$I_{SY}$			5	6		5	6	mA
				5	6		5	6	mA

### NOTES

<sup>1</sup>Input voltage range guaranteed by common-mode rejection test.

<sup>2</sup>Guaranteed by design.

<sup>3</sup>Gain tempo does not include the effects of external component drift.

Specifications subject to change without notice.

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS<sup>1, 2</sup>

Supply Voltage	$\pm 18$ V
Common-Mode Input Voltage	$[(V-) - 60 \text{ V}]$ to $[(V+) + 60 \text{ V}]$
Differential Input Voltage	$[(V-) - 60 \text{ V}]$ to $[(V+) + 60 \text{ V}]$
Output Short-Circuit Duration	Continuous
Operating Temperature Range	$-40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$-65^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$
Function Temperature Range	$-65^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$
Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	$300^\circ\text{C}$

Package Type	$\theta_{JA}$ <sup>3</sup>	$\theta_{JC}$	Unit
8-Lead Plastic DIP (P)	96	37	$^\circ\text{C}/\text{W}$
16-Lead SOIC (S)	92	27	$^\circ\text{C}/\text{W}$

### NOTES

<sup>1</sup>Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those listed in the operational sections of this specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

<sup>2</sup>Absolute maximum ratings apply to both DICE and packaged parts, unless otherwise noted.

<sup>3</sup> $\theta_{JA}$  is specified for worst case mounting conditions, i.e.,  $\theta_{JA}$  is specified for device in socket for P-DIP package;  $\theta_{JA}$  is specified for device soldered to printed circuit board for SOIC package.

### ORDERING GUIDE

Model	$V_{IOS} \text{ max @ } T_A = 25^\circ\text{C}$	$V_{OOS} \text{ max @ } T_A = 25^\circ\text{C}$	Temperature Range	Package Description
AMP02EP	100 $\mu\text{V}$	4 mV	$-40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$	8-Lead Plastic DIP
AMP02FP	200 $\mu\text{V}$	8 mV	$-40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$	8-Lead Plastic DIP
AMP02AZ/883C	200 $\mu\text{V}$	10 mV	$-55^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$	8-Lead CERDIP
AMP02FS	200 $\mu\text{V}$	8 mV	$-40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$	16-Lead SOIC
AMP02GBC				Die
AMP02FS-REEL	200 $\mu\text{V}$	8 mV	$-40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$	16-Lead SOIC

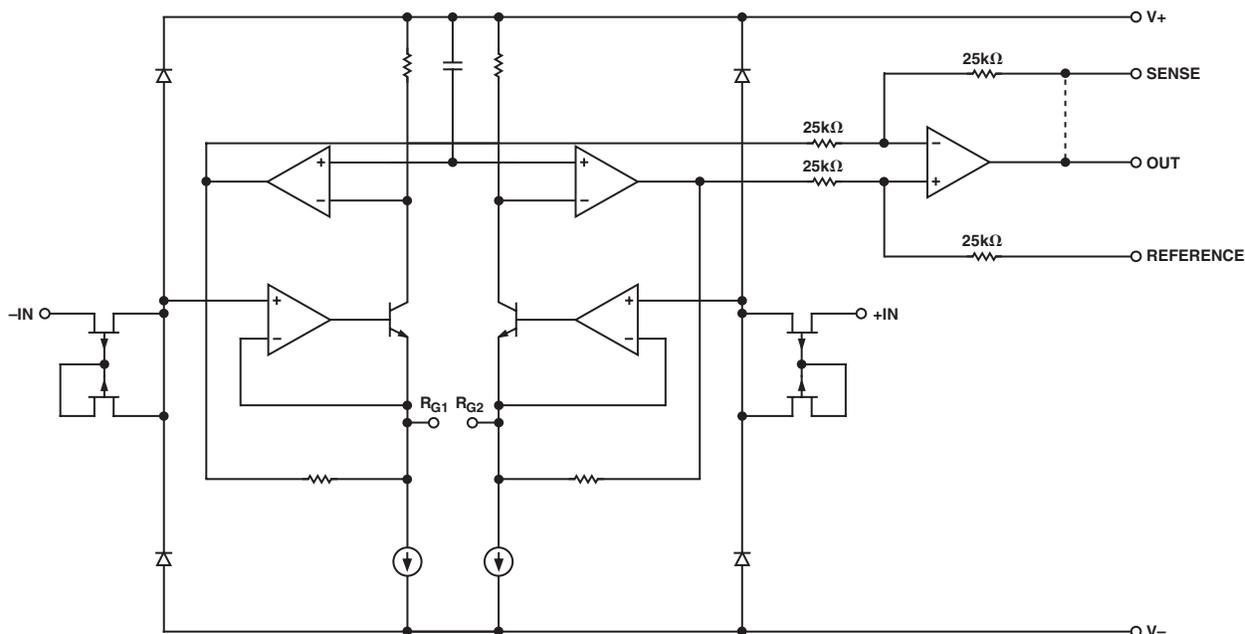
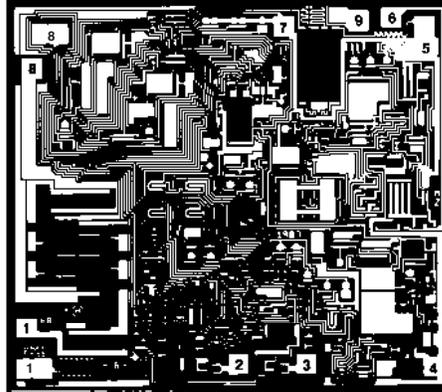


Figure 2. Simplified Schematic

# AMP02



- 1. RG<sub>1</sub>
  - 2. -IN
  - 3. +IN
  - 4. V-
  - 5. REFERENCE
  - 6. OUT
  - 7. V+
  - 8. RG<sub>2</sub>
  - 9. SENSE
- CONNECT SUBSTRATE TO V-

DIE SIZE 0.103 inch × 0.116 inch, 11,948 sq. mils  
(2.62 mm × 2.95 mm, 7.73 sq. mm)  
NOTE: PINS 1 and 8 are KELVIN CONNECTED

## Die Characteristics

## WAFER TEST LIMITS\* (@ V<sub>S</sub> = ±15 V, V<sub>CM</sub> = 0 V, T<sub>A</sub> = 25°C, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	AMP02 GBC Limits	Unit
Input Offset Voltage	V <sub>IOS</sub>		200	μV max
Output Offset Voltage	V <sub>OOS</sub>		8	mV max
Power Supply Rejection	PSR	V <sub>S</sub> = ±4.8 V to ±18 V		
		G = 1000	110	dB
		G = 100	110	
		G = 10	95	
		G = 1	75	
Input Bias Current	I <sub>B</sub>		20	nA max
Input Offset Current	I <sub>OS</sub>		10	nA max
Input Voltage Range	IVR	Guaranteed by CMR Tests	±11	V min
Common-Mode Rejection	CMR	V <sub>CM</sub> = ±11 V		
		G = 1000	110	dB
		G = 100	110	
		G = 10	95	
		G = 1	75	
Gain Equation Accuracy		$G = \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1, G = 1000$	0.7	% max
Output Voltage Swing	V <sub>OUT</sub>	R <sub>L</sub> = 1 kΩ	±12	V min
Supply Current	I <sub>SY</sub>		6	mA max

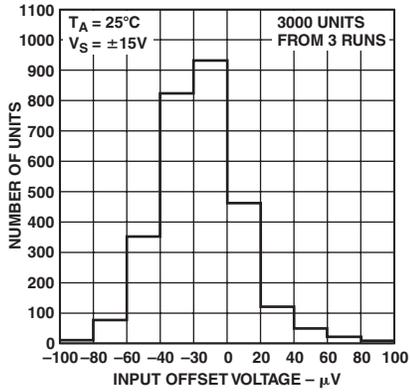
\*Electrical tests are performed at wafer probe to the limits shown. Due to variations in assembly methods and normal yield loss, yield after packaging is not guaranteed for standard product dice. Consult factory to negotiate specifications based on dice lot qualifications through sample lot assembly and testing.

### CAUTION

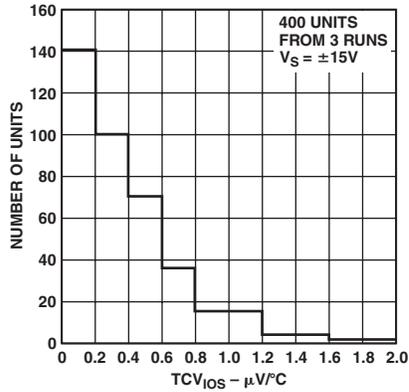
ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the AMP02 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



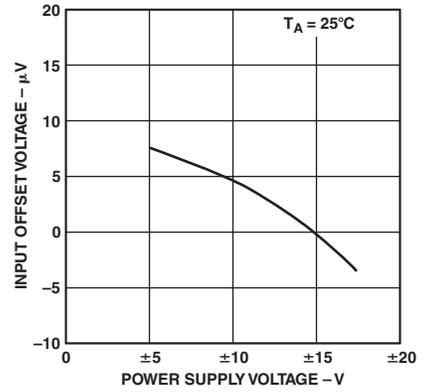
# Typical Performance Characteristics—AMP02



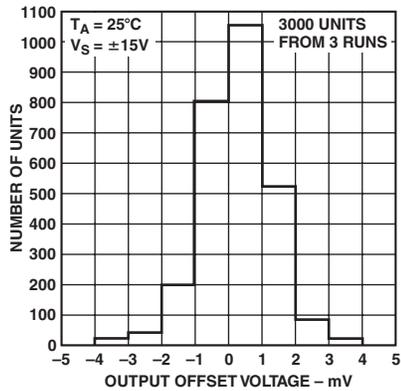
TPC 1. Typical Distribution of Input Offset Voltage



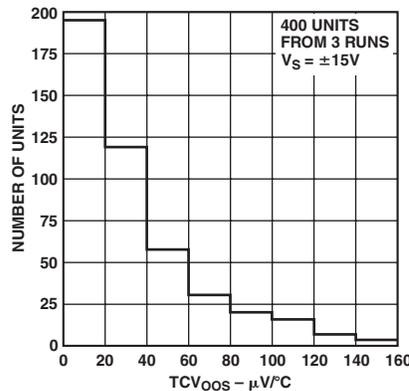
TPC 2. Typical Distribution of  $TCV_{IOS}$



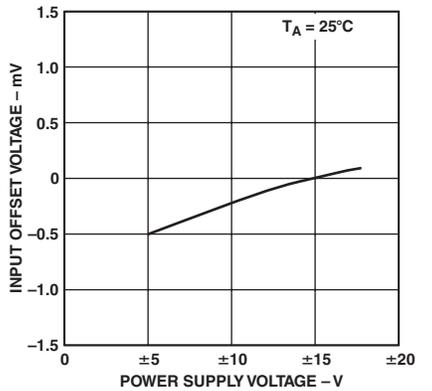
TPC 3. Input Offset Voltage Change vs. Supply Voltage



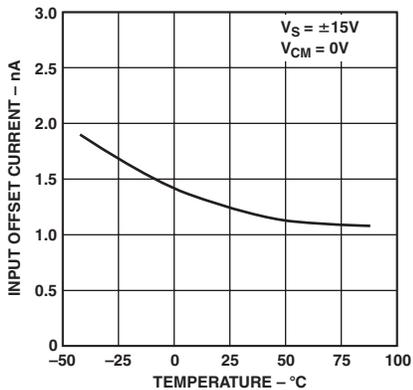
TPC 4. Typical Distribution of Output Offset Voltage



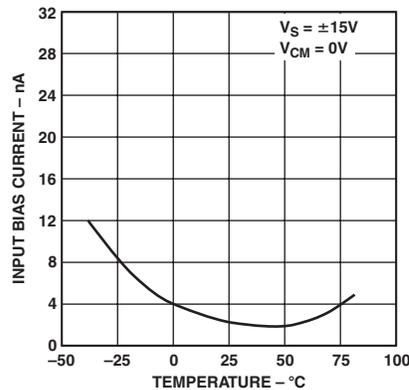
TPC 5. Typical Distribution of  $TCV_{OOS}$



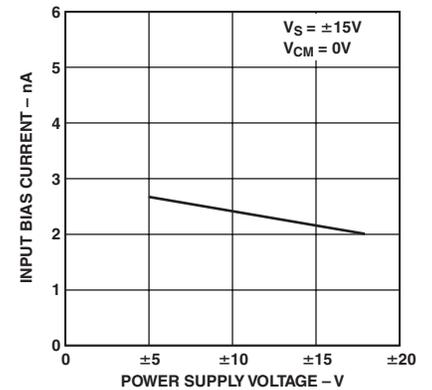
TPC 6. Output Offset Voltage Change vs. Supply Voltage



TPC 7. Input Offset Current vs. Temperature

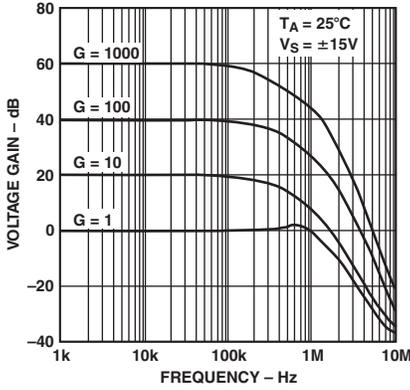


TPC 8. Input Bias Current vs. Temperature

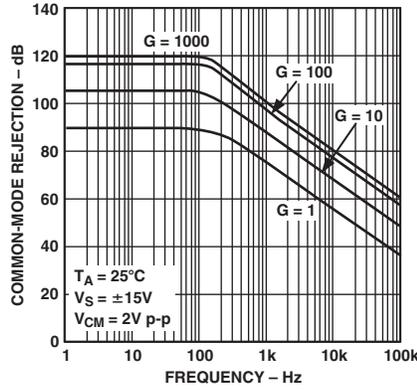


TPC 9. Input Bias Current vs. Supply Voltage

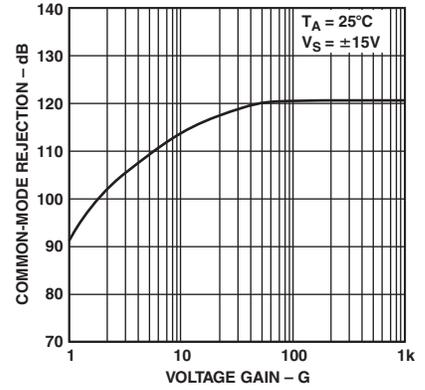
# AMP02



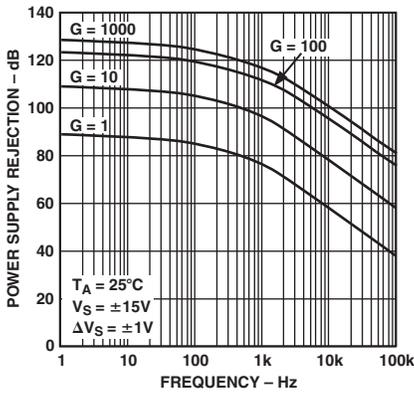
TPC 10. Closed-Loop Voltage Gain vs. Frequency



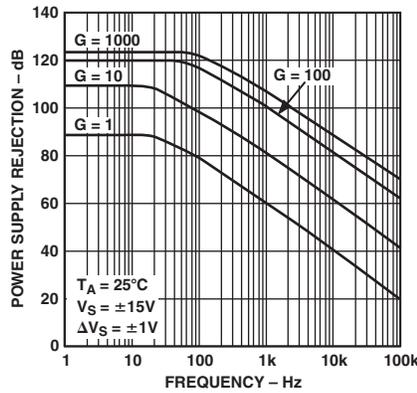
TPC 11. Common-Mode Rejection vs. Frequency



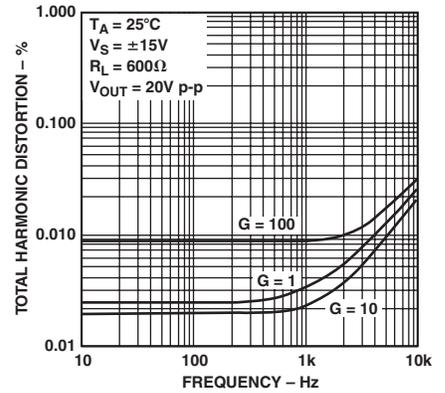
TPC 12. Common-Mode Rejection vs. Voltage Gain



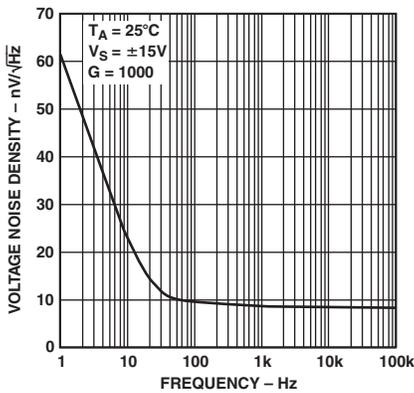
TPC 13. Positive PSR vs. Frequency



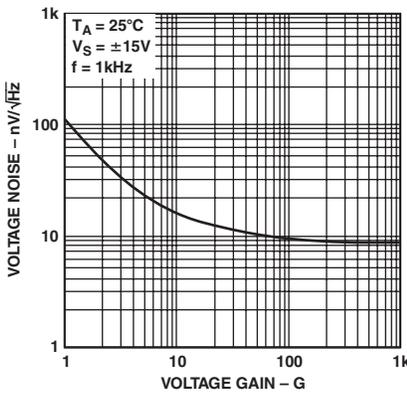
TPC 14. Negative PSR vs. Frequency



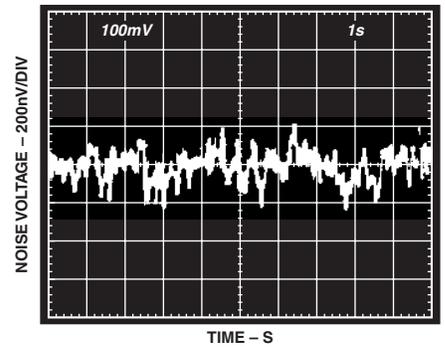
TPC 15. Total Harmonic Distortion vs. Frequency



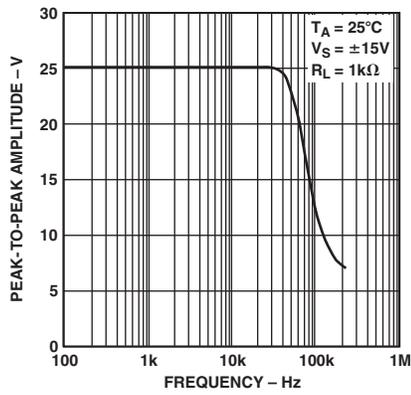
TPC 16. Voltage Noise Density vs. Frequency



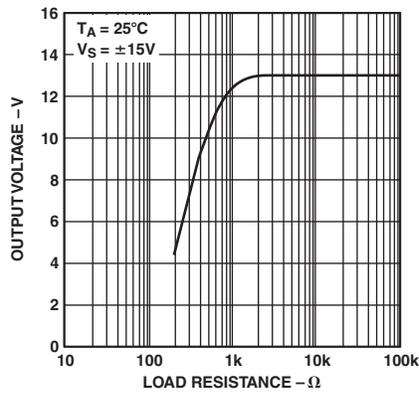
TPC 17. RTI Voltage Noise Density vs. Gain



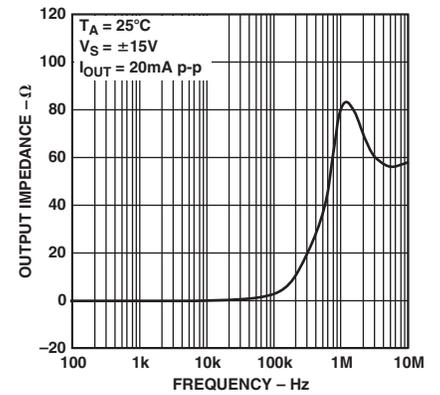
TPC 18. 0.1 Hz to 10 Hz Noise  $A_V = 1000$



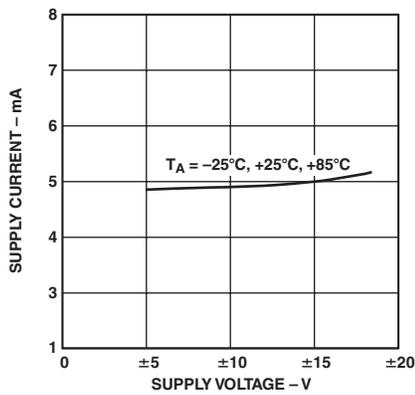
TPC 19. Maximum Output Swing vs. Frequency



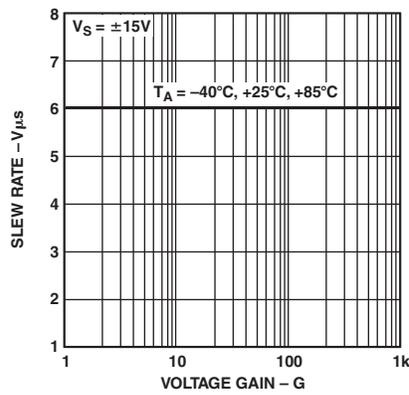
TPC 20. Maximum Output Voltage vs. Load Resistance



TPC 21. Closed Loop Output Impedance vs. Frequency



TPC 22. Supply Current vs. Supply Voltage



TPC 23. Slew Rate vs. Voltage Gain

# AMP02

## APPLICATIONS INFORMATION

### Input and Output Offset Voltages

Instrumentation amplifiers have independent offset voltages associated with the input and output stages. The input offset component is directly multiplied by the amplifier gain, whereas output offset is independent of gain. Therefore at low gain, output-offset errors dominate while at high gain, input-offset errors dominate. Overall offset voltage,  $V_{OS}$ , referred to the output ( $RTO$ ) is calculated as follows:

$$V_{OS} (RTO) = (V_{IOS} \times G) + V_{OOS}$$

where  $V_{IOS}$  and  $V_{OOS}$  are the input and output offset voltage specifications and  $G$  is the amplifier gain.

The overall offset voltage drift  $TCV_{OS}$ , referred to the output, is a combination of input and output drift specifications. Input offset voltage drift is multiplied by the amplifier gain,  $G$ , and summed with the output offset drift:

$$TCV_{OS} (RTO) = (TCV_{IOS} \times G) + TCV_{OOS}$$

where  $TCV_{IOS}$  is the input offset voltage drift, and  $TCV_{OOS}$  is the output offset voltage drift. Frequently, the amplifier drift is referred back to the input ( $RTI$ ), which is then equivalent to an input signal change:

$$TCV_{OS} (RTI) = TCV_{IOS} + \frac{TCV_{OOS}}{G}$$

For example, the maximum input-referred drift of an AMP02EP set to  $G = 1000$  becomes:

$$TCV_{OS} (RTI) = 2 \mu V/^{\circ}C + \frac{100 \mu V/^{\circ}C}{1000} = 2.1 \mu V/^{\circ}C$$

### Input Bias and Offset Currents

Input transistor bias currents are additional error sources that can degrade the input signal. Bias currents flowing through the signal source resistance appear as an additional offset voltage. Equal source resistance on both inputs of an IA will minimize offset changes due to bias current variations with signal voltage and temperature; however, the difference between the two bias currents (the input offset current) produces an error. The magnitude of the error is the offset current times the source resistance.

A current path must always be provided between the differential inputs and analog ground to ensure correct amplifier operation. Floating inputs such as thermocouples should be grounded close to the signal source for best common-mode rejection.

### Gain

The AMP02 only requires a single external resistor to set the voltage gain. The voltage gain,  $G$ , is:

$$G = \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1$$

and

$$R_G = \frac{50 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

The voltage gain can range from 1 to 10,000. A gain set resistor is not required for unity-gain applications. Metal-film or wirewound resistors are recommended for best results.

The total gain accuracy of the AMP02 is determined by the tolerance of the external gain set resistor,  $R_G$ , combined with the gain equation accuracy of the AMP02. Total gain drift combines the mismatch of the external gain set resistor drift with that of the internal resistors (20 ppm/ $^{\circ}C$  typ). Maximum gain drift of the AMP02 independent of the external gain set resistor is 50 ppm/ $^{\circ}C$ .

All instrumentation amplifiers require attention to layout so thermocouple effects are minimized. Thermocouples formed between copper and dissimilar metals can easily destroy the  $TCV_{OS}$  performance of the AMP02, which is typically 0.5  $\mu V/^{\circ}C$ . Resistors themselves can generate thermoelectric EMFs when mounted parallel to a thermal gradient.

The AMP02 uses the triple op amp instrumentation amplifier configuration with the input stage consisting of two transimpedance amplifiers followed by a unity-gain differential amplifier. The input stage and output buffer are laser-trimmed to increase gain accuracy. The AMP02 maintains wide bandwidth at all gains as shown in Figure 3. For voltage gains greater than 10, the bandwidth is over 200 kHz. At unity gain, the bandwidth of the AMP02 exceeds 1 MHz.

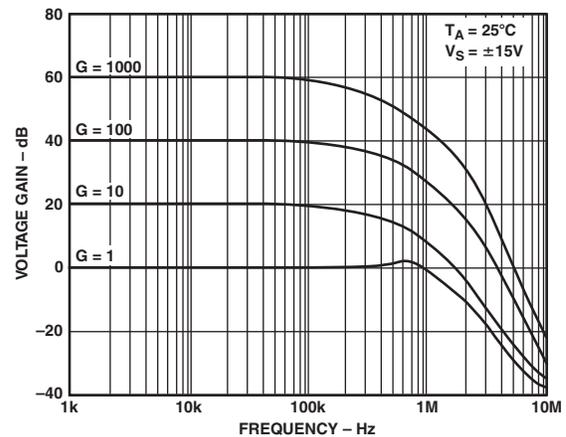


Figure 3. The AMP02 Keeps Its Bandwidth at High Gains

### Common-Mode Rejection

Ideally, an instrumentation amplifier responds only to the difference between the two input signals and rejects common-mode voltages and noise. In practice, there is a small change in output voltage when both inputs experience the same common-mode voltage change; the ratio of these voltages is called the common-mode gain. Common-mode rejection (CMR) is the logarithm of the ratio of differential-mode gain to common-mode gain, expressed in dB. Laser trimming is used to achieve the high CMR of the AMP02.

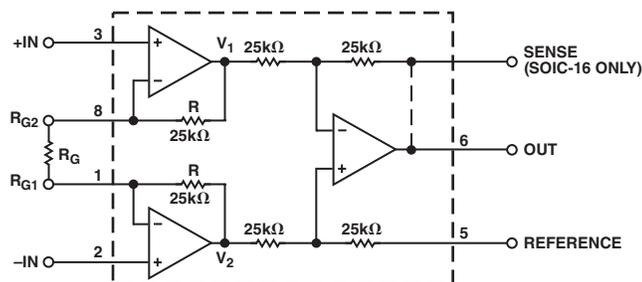


Figure 4. Triple Op Amp Topology

Figure 4 shows the triple op amp configuration of the AMP02. With all instrumentation amplifiers of this type, it is critical not to exceed the dynamic range of the input amplifiers. The amplified differential input signal and the input common-mode voltage must not force the amplifier's output voltage beyond  $\pm 12$  V ( $V_S = \pm 15$  V) or nonlinear operation will result.

The input stage amplifier's output voltages at  $V_1$  and  $V_2$  equal:

$$V_1 = -\left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \frac{V_D}{2} + V_{CM}$$

$$= -G \frac{V_D}{2} + V_{CM}$$

$$V_2 = \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \frac{V_D}{2} + V_{CM}$$

$$= G \frac{V_D}{2} + V_{CM}$$

where:

$V_D$  = Differential input voltage  
 $= (+IN) - (-IN)$

$V_{CM}$  = Common-mode input voltage

$G$  = Gain of instrumentation amplifier

If  $V_1$  and  $V_2$  can equal  $\pm 12$  V maximum, the common-mode input voltage range is:

$$CMVR = \pm \left(12 V - \frac{GV_D}{2}\right)$$

### Grounding

The majority of instruments and data acquisition systems have separate grounds for analog and digital signals. Analog ground may also be divided into two or more grounds that will be tied together at one point, usually at the analog power supply ground. In addition, the digital and analog grounds may be joined—normally at the analog ground pin on the A/D converter. Following this basic practice is essential for good circuit performance.

Mixing grounds causes interactions between digital circuits and the analog signals. Since the ground returns have finite resistance and inductance, hundreds of millivolts can be developed between the system ground and the data acquisition components. Using separate ground returns minimizes the current flow in the sensitive analog return path to the system ground point. Consequently, noisy ground currents from logic gates interact with the analog signals.

Inevitably, two or more circuits will be joined together with their grounds at differential potentials. In these situations, the differential input of an instrumentation amplifier, with its high CMR, can accurately transfer analog information from one circuit to another.

### Sense and Reference Terminals

The sense terminal completes the feedback path for the instrumentation amplifier output stage and is internally connected directly to the output. For SOIC devices, connect the sense terminal to the output. The output signal is specified with respect to the reference terminal, which is normally connected to analog ground. The reference may also be used for offset correction level shifting. A reference source resistance will reduce the common-mode rejection by the ratio of  $25 \text{ k}\Omega/R_{REF}$ . If the reference source resistance is  $1 \Omega$ , the CMR will be reduced 88 dB ( $25 \text{ k}\Omega/1 \Omega = 88 \text{ dB}$ ).

# AMP02

## Overvoltage Protection

Instrumentation amplifiers invariably sit at the front end of instrumentation systems where there is a high probability of exposure to overloads. Voltage transients, failure of a transducer, or removal of the amplifier power supply while the signal source is connected may destroy or degrade the performance of an unprotected device. A common technique is to place limiting resistors in series with each input, but this adds noise. The AMP02 includes internal protection circuitry that limits the input current to  $\pm 4$  mA for a 60 V differential overload (see Figure 5) with power off,  $\pm 2.5$  mA with power on.

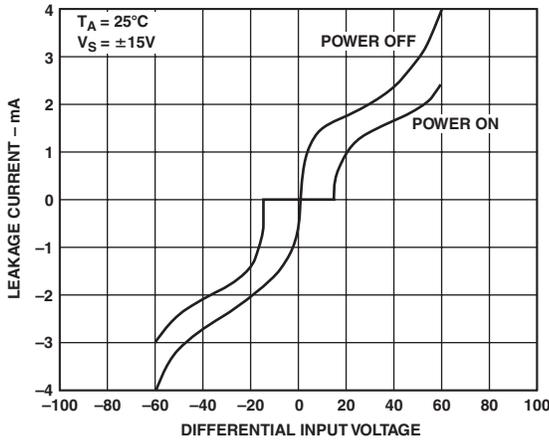


Figure 5. AMP02's Input Protection Circuitry Limits Input Current During Overvoltage Conditions

## Power Supply Considerations

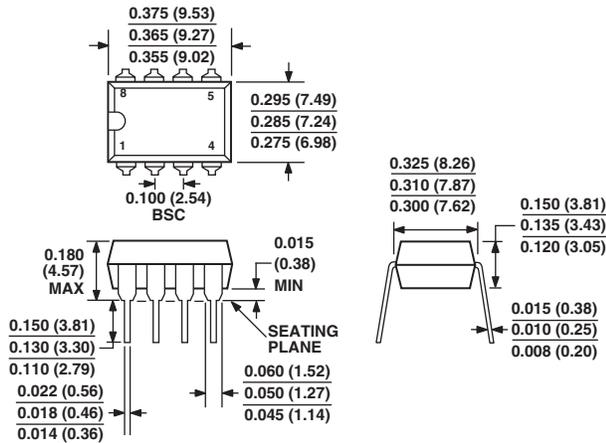
Achieving the rated performance of precision amplifiers in a practical circuit requires careful attention to external influences. For example, supply noise and changes in the nominal voltage directly affect the input offset voltage. A PSR of 80 dB means that a change of 100 mV on the supply (not an uncommon value) will produce a  $10 \mu\text{V}$  input offset change. Consequently, care should be taken in choosing a power unit that has a low output noise level, good line and load regulation, and good temperature stability. In addition, each power supply should be properly bypassed.

## OUTLINE DIMENSIONS

### 8-Lead Plastic Dual-in-Line Package [PDIP]

(N-8)

Dimensions shown in inches and (millimeters)



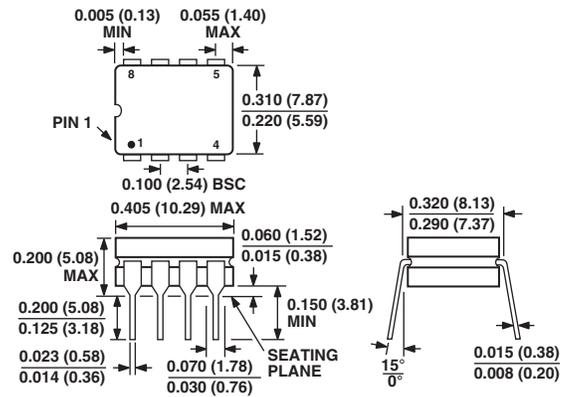
COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MO-095AA

CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN INCHES; MILLIMETER DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF INCH EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN

### 8-Lead Ceramic DIP - Glass Hermetic Seal [CERDIP]

(Q-8)

Dimensions shown in inches and (millimeters)



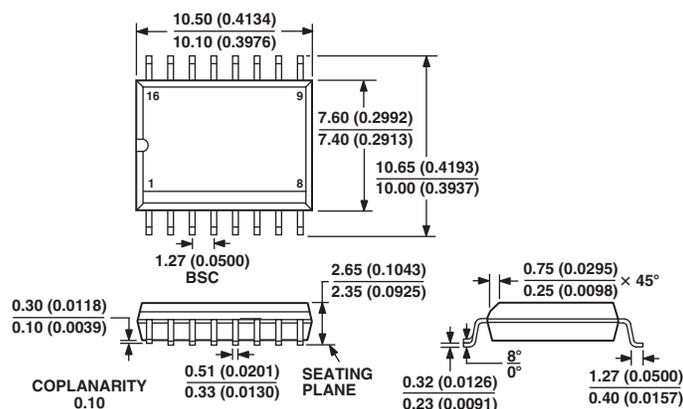
CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN INCHES; MILLIMETERS DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF INCH EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN

### 16-Lead Standard Small Outline Package [SOIC]

Wide Body

(R-16)

Dimensions shown in millimeters and (inches)



COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MS-013AA

CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS; INCH DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF MILLIMETER EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN

# AMP02

## Revision History

<b>Location</b>	<b>Page</b>
<b>1/03—Data Sheet changed from REV. D to REV. E.</b>	
Edits to Figure 2 .....	3
Edits to Die Characteristics .....	4
Updated OUTLINE DIMENSIONS.....	11

C00248-0-1/03(E)

PRINTED IN U.S.A.