



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Sistema de Caracterización de Sensores Fotónicos basado
en medidas de la intensidad de la luz reflejada

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR/A: Sánchez Ribes, Sergio

Tutor/a: Ponce Alcántara, Salvador

Cotutor/a: García Rupérez, Jaime

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE SENSORES FOTÓNICOS BASADO EN MEDIDAS DE LA INTENSIDAD DE LA LUZ REFLEJADA

Trabajo final de grado
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: Sánchez Ribes, Sergio

Tutor: Ponce Alcántara, Salvador

Cotutor: García Rupérez, Jaime

Curso académico: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Resumen

En las últimas dos décadas se han desarrollado sensores fotónicos y sistemas de detección que dan lugar a sistemas de medida con altas sensibilidades y bajos límites de detección. Por ello se les considera un firme candidato para realizar medidas de alta precisión en la detección química y biológica. Sin embargo, los equipos para caracterizar los sensores fotónicos suelen ser costosos, voluminosos, y complejos. Esto dificulta su utilización fuera de un laboratorio. Para extender el uso de los sensores fotónicos se necesita un sistema de caracterización portátil, fácil de utilizar, de bajo coste y compacto. El presente Trabajo de Final de Grado se centra en diseño de un sistema de caracterización que cumpla estos requerimientos.

Dicho sistema está basado en la medición de la intensidad de la luz reflejada en el sensor fotónico. Está formado por un emisor láser y dos fotodiodos. El haz láser incide sobre el sensor y se refleja hacia uno de los fotodiodos. De esta forma, se mide la intensidad de luz reflejada, que es función de la reflectividad de la muestra. Dicha reflectividad varía durante la prueba de sensado. Como el láser es un componente no muy estable, se dispone de otro fotodiodo que mide la intensidad del haz láser en tiempo real. De esta forma se puede corregir las derivas en la potencia del láser, obteniendo como resultado la variación real de la luz reflejada en las pruebas de sensado.

El desarrollo del proyecto se ha llevado a cabo en el laboratorio del Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica (NTC) de la Universitat Politècnica de València (UPV). Allí se han analizado los componentes y las etapas del sistema para lograr el diseño óptimo. También se han realizado pruebas de sensado con el fin de verificar el correcto funcionamiento del *setup* de medida. En este sentido, se ha combinado un sistema de medida de altas prestaciones con un sensor fotónico de alta sensibilidad optimizado para dicho sistema de medida. De acuerdo con la bibliografía consultada, el resultado obtenido ha sido el *setup* fotónico portátil con la mayor sensibilidad del mundo.

Resum

En les últimes dos dècades s'han desenrotllat sensors fotònics i sistemes de detecció que donen lloc a sistemes de mesura amb altes sensibilitats i baixos límits de detecció. Per això se'ls considera un ferm candidat per a realitzar mesures d'alta precisió en la detecció química i biològica. No obstant això, els equips per a caracteritzar els sensors fotònics solen ser costosos, voluminosos, i complexos. Açò dificulta la seua utilització fora d'un laboratori. Per a estendre l'ús dels sensors fotònics es necessita un sistema de caracterització portàtil, fàcil d'utilitzar, de baix cost i compacte. El present Treball de Final de Grau se centra en disseny d'un sistema de caracterització que complisca estos requeriments.

El dit sistema està basat en el mesurament de la intensitat de la llum reflectida en el sensor fotònic. Està format per un emissor làser i dos fotodíodes. La llum làser incideix sobre el sensor i es reflectix cap a un dels fotodíodes. D'esta manera, es mesura la intensitat de llum reflectida, que és funció de la reflectivitat de la mostra. Aquesta reflectivitat varia durant la prova de sensat. Com el làser és un component no molt estable, es disposa d'un altre fotodíode que mesura la intensitat de la llum làser en temps real. D'esta manera es pot corregir les derives en la potència del làser, obtenint com resultat la variació real de la llum reflectida en les proves de sensat.

El desenrotllament del projecte s'ha dut a terme en el laboratori de l'Institut Universitari de Tecnologia Nanofotònica (NTC) de la Universitat Politècnica de València (UPV). Allí s'han analitzat els components i les etapes del sistema per a aconseguir el disseny òptim. També s'han realitzat proves de sensat a fi de verificar el funcionament correcte del *setup* de mesura. En este sentit, s'ha combinat un sistema de mesura d'altas prestacions amb un sensor fotònic d'alta sensibilitat optimitzat per a aquest sistema de mesura. D'acord amb la bibliografia consultada, el resultat obtingut ha sigut el *setup* fotònic portàtil amb la major sensibilitat del món.

Abstract

Over the last two decades, photonic sensors and detection systems have been developed that result in measurement systems with high sensitivities and low detection limits. They are therefore considered a strong candidate for high-precision measurements in chemical and biological detection. However, equipment to characterise photonic sensors is often expensive, bulky, and complex. This makes it difficult to use them outside the laboratory. To extend the use of photonic sensors, a portable, easy-to-use, low-cost and compact characterisation system is needed. This thesis focuses on the design of a characterisation system that meets these requirements.

This system is based on the measurement of the intensity of the light reflected from the photonic sensor. It consists of a laser emitter and two photodiodes. The laser beam is incident on the sensor and reflected towards one of the photodiodes. In this way, the reflected light intensity is measured, which is a function of the reflectivity of the sample. This reflectivity varies during the sensing test. As the laser is not a very stable component, another photodiode is available to measure the intensity of the laser beam in real time. In this way, drifts in the laser power can be corrected, resulting in the actual variation of the reflected light in the sensing tests.

The development of the project has been carried out in the laboratory of the University Institute of Nanophotonic Technology (NTC) of the Polytechnic University of Valencia (UPV). There, the components and stages of the system have been analysed to achieve the optimal design. Sensing tests have also been carried out in order to verify the correct operation of the measurement setup. In this sense, a high-performance measurement system has been combined with a high-sensitivity photonic sensor optimised for this measurement system. According to the bibliography consulted, the result obtained was the portable photonic setup with the highest sensitivity in the world.



Contenido

| | |
|--|----|
| DOCUMENTO Nº1: MEMORIA TÉCNICA..... | 7 |
| DOCUMENTO Nº2: PLANOS..... | 59 |
| DOCUMENTO Nº3: PLIEGO DE CONDICIONES | 65 |
| DOCUMENTO Nº4: PRESUPUESTO | 73 |



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE SENSORES FOTÓNICOS BASADO EN MEDIDAS DE LA INTENSIDAD DE LA LUZ REFLEJADA

DOCUMENTO Nº1: MEMORIA TÉCNICA

Trabajo final de grado
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: Sánchez Ribes, Sergio

Tutor: Ponce Alcántara, Salvador

Cotutor: García Rupérez, Jaime

Curso académico: 2021/2022

Índice

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1: OBJETIVOS Y ANTECEDENTES..... | 13 |
| 1.1 Objeto..... | 13 |
| 1.2 Antecedentes..... | 13 |
| 1.2.1 Sensor fotónico..... | 13 |
| 1.2.2 Láser | 16 |
| 1.2.3 Fotodiodo | 16 |
| 1.2.4 Estado del arte | 17 |
| CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO | 19 |
| 2.1 Diagrama de bloques..... | 19 |
| 2.2 Parte óptica | 20 |
| 2.3 Parte electrónica..... | 21 |
| 2.4 Modo de empleo..... | 21 |
| CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL DISPOSITIVO | 23 |
| 3.1 Láser | 23 |
| 3.1.1 Observaciones teóricas | 23 |
| 3.1.2 Observaciones experimentales..... | 24 |
| 3.1.3 Solución adoptada..... | 27 |
| 3.2 Sensor fotónico..... | 27 |
| 3.3 Fotodiodo | 29 |
| 3.3.1 Observación teórica..... | 29 |
| 3.3.2 Observación experimental | 30 |
| 3.3.3 Fotodiodo utilizado | 31 |
| 3.4 Amplificador de transimpedancia | 31 |
| 3.4.1 Observaciones teóricas | 31 |
| 3.4.2 Cálculo del amplificador de referencia | 34 |
| 3.4.3 Cálculo del amplificador principal..... | 36 |
| 3.4.4 Solución adoptada..... | 38 |
| 3.5 Filtro paso bajo | 39 |
| 3.5.1 Observaciones teóricas | 39 |
| 3.5.2 Observaciones experimentales..... | 41 |
| 3.5.3 Cálculos del filtro paso bajo..... | 42 |
| 3.5.4 Solución adoptada..... | 43 |
| 3.6 Microcontrolador..... | 44 |
| 3.7 Procesamiento digital | 44 |
| 3.8 Interfaz de usuario..... | 44 |



| | | |
|--|-------------------------------------|-----------|
| 3.8.1 | Marcador de saturación | 44 |
| 3.8.2 | Marcador de ganancia correcta | 46 |
| 3.8.3 | Visualización de medidas | 46 |
| 3.9 | Alimentación | 46 |
| 3.9.1 | Cálculo del regulador de 3,3 V..... | 47 |
| 3.9.2 | Cálculo del regulador de 2,7 V..... | 48 |
| CAPÍTULO 4: ESTUDIO EXPERIMENTAL..... | | 49 |
| CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES | | 55 |
| REFERENCIAS | | 57 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 Sensor fotónico..... | 13 |
| Figura 2 Reflectividad de capas porosas realizadas con distintos espesores, diámetro y densidad de poros. | 14 |
| Figura 3 Espectro al fluir DIW y etanol 5% en un mismo sensor de silicio poroso..... | 15 |
| Figura 4 Esquema del principio de funcionamiento de un fotodiodo [4]..... | 16 |
| Figura 5. Diagrama de bloques del dispositivo..... | 19 |
| Figura 6 Esquema del sistema de caracterización de sensores fotónico..... | 20 |
| Figura 7 Curva característica de un diodo láser [2]..... | 23 |
| Figura 8 Medición espectro del haz láser..... | 24 |
| Figura 9 Espectro haz láser Gated Cameo..... | 25 |
| Figura 10 Longitud de onda de emisión del láser Gated Cameo en función del tiempo. | 25 |
| Figura 11 Medición de la estabilidad del láser Gated Cameo..... | 26 |
| Figura 12. (a) Evolución de la respuesta del fotodiodo según la tensión de alimentación del láser. (b) Corriente que circula por el láser al ser alimentado con 2,7 V..... | 26 |
| Figura 13. Comparación de la estabilidad del láser Gated Cameo alimentado con una fuente de corriente o de tensión constantes..... | 27 |
| Figura 14 Comportamiento del espectro del sensor fotónico al fluir distintas concentraciones de etanol..... | 28 |
| Figura 15 Comparación de utilizar un sensor con un flanco de subida y una cresta en 657 nm..... | 28 |
| Figura 16 Curva característica de un fotodiodo [7]..... | 29 |
| Figura 17 Medición de la estabilidad del fotodiodo..... | 30 |
| Figura 18 Resultados de la medida de estabilidad del fotodiodo..... | 31 |
| Figura 19 Esquema electrónico del amplificador de transimpedancia..... | 32 |
| Figura 20 Ejemplo de corriente de fuga a través de la PCB [10]..... | 33 |
| Figura 21 Conexión correcta de un potenciómetro..... | 34 |
| Figura 22 Sensibilidad relativa del fotodiodo BPW34..... | 35 |
| Figura 23 Diagrama de bloques del circuito de acondicionamiento principal..... | 36 |
| Figura 24 Esquema electrónico del amplificador de transimpedancia principal..... | 37 |
| Figura 25 Amplificadores de transimpedancia de ambos circuitos de acondicionamiento..... | 39 |
| Figura 26 Filtro paso bajo de segundo orden Sallen-Key..... | 40 |
| Figura 27 Tipos de filtros según el factor de amortiguamiento..... | 40 |
| Figura 28 comparación de la señal de salida sin filtro y con filtro..... | 41 |
| Figura 29 Comparación de la salida con filtro y promediado, y solo con promediado.. | 42 |
| Figura 30 Esquema eléctrico del filtro paso bajo..... | 43 |
| Figura 31 Comparador basado en un amplificador operacional..... | 45 |
| Figura 32 Esquema de la conexión de las baterías y de un regulador de tensión con el LM317T..... | 47 |
| Figura 33 Prototipo empleado para medida experimental..... | 49 |
| Figura 34 Medida de ambos fotodiodos..... | 49 |
| Figura 35 Medida relativa..... | 50 |
| Figura 36 Medida normalizada..... | 50 |
| Figura 37 Medida filtrada mediante un filtro de Matlab..... | 51 |
| Figura 38 Gráfica de la relación entre variaciones de índice de refracción frente a variaciones de la tensión de salida..... | 52 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Clasificación del silicio poroso..... | 14 |
| Tabla 2 Comparación entre luz ordinaria y luz láser | 16 |
| Tabla 3 Sistemas portátiles de caracterización de sensores fotónicos..... | 17 |
| Tabla 4 Clasificación de los emisores láser según su peligrosidad | 23 |
| Tabla 5 Materiales de construcción de los fotodiodos y su respectivo rango de medida | 30 |
| Tabla 6 Valor de salida promedio por cada muestra | 51 |
| Tabla 7 Índice de refracción de cada muestra | 52 |
| Tabla 8 Variación de índice de refracción y de tensión de salida | 52 |



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

CAPÍTULO 1: OBJETIVOS Y ANTECEDENTES

1.1 Objeto

El presente proyecto se refiere al diseño de un sistema de caracterización de sensores fotónicos basado en medidas de la intensidad de la luz reflejada. Dicho sistema utiliza un emisor láser y fotodetectores para llevar a cabo la medida de la variación de tensión en función de la reflectividad de la muestra a caracterizar. La fiabilidad, sensibilidad, portabilidad y el bajo coste son los principales objetivos que debe cumplir.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Sensor fotónico

Los sensores fotónicos utilizan la interacción entre la luz y la materia para cuantificar magnitudes físicas, químicas y biológicas. Se basan en medir la variación de alguna propiedad de la luz y relacionarla con el cambio de la magnitud a medir.

Estos sensores pueden estar formados por una capa de silicio poroso por la que se fluye una muestra gaseosa o líquida como se ve en la Figura 1. La celda de medida dispone de un canal de entrada por la que se introduce la solución a sensar, un canal de salida, y un sensor fotónico basado en nuestro caso en una capa de silicio poroso.

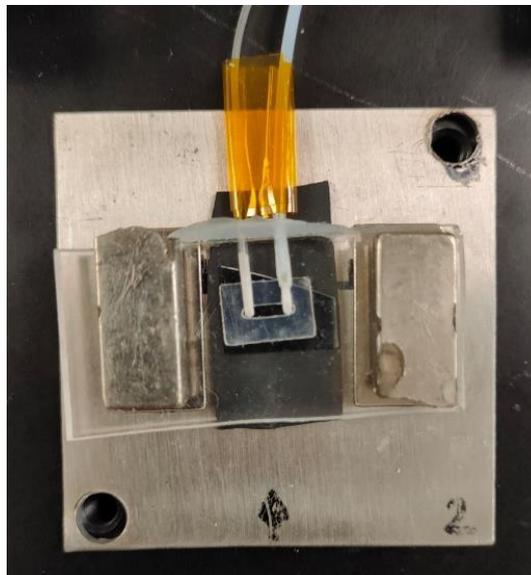


Figura 1 Sensor fotónico

El silicio poroso se realiza mediante un ataque electroquímico de una oblea de Silicio (Si) en una solución de ácido fluorhídrico (HF). La estructura porosa dependerá de las condiciones asociadas al proceso de ataque (concentración de HF, temperatura), del dopado de la oblea de silicio, de la densidad de corriente y del voltaje aplicados. Por lo que, dependiendo de estos factores, se obtendrán capas porosas con distintas

características. Según el tamaño de los poros, se tendrán propiedades morfológicas, electrónicas y ópticas singulares.

Su gran superficie específica le proporciona una gran reactividad química. Además, su proceso de fabricación es sencillo. En este sentido, es posible realizar modificaciones en el tamaño y densidad de los poros, así como en los espesores de las capas. Por su biocompatibilidad, hacen de este sustrato pueda emplearse en una gran cantidad de aplicaciones como: sensores de gas, biosensores para diagnósticos médicos basados en las propiedades ópticas y de transporte, cristales fotónicos, células solares, filtros, microcavidades ópticas, redes de difracción, biocápsulas, reflectores de Bragg, etc.

Según el tamaño del poro, el silicio poroso se puede clasificar como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Clasificación del silicio poroso [1]

| Nombre | Diámetro de los poros | Aplicaciones |
|-------------|-----------------------|---------------------------------|
| Microporoso | Menor a 2 nm | Microfiltros y microcapacitores |
| Mesoporoso | Entre 2 nm y 50 nm | Sensores |
| Macroporoso | Mayores a 50 nm | Materiales fotónicos |

Los poros hacen que la superficie específica del material aumente notablemente. Está puede llegar a ser de 500 m²/g [1], es decir, en un pequeño volumen se concentra una gran cantidad de superficie. Por este motivo se utiliza en la fabricación de sensores fotónicos.

El equipo de caracterización tradicional se basa en una fuente de luz blanca y un espectrómetro. Como se muestra en la Figura 2, las propiedades ópticas del material varían significativamente en función de las características geométricas de la capa porosa.

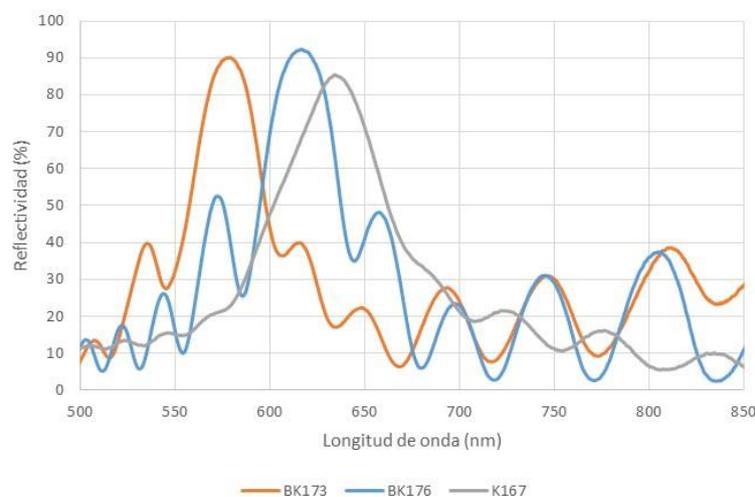


Figura 2 Reflectividad de capas porosas realizadas con distintos espesores, diámetro y densidad de poros.

Al fluir una muestra líquida o gaseosa por la superficie del sensor, los poros se rellenan. Se modifica por ello las propiedades ópticas de la capa porosa. En particular, dicha variación se traduce en un aumento del índice de refracción efectivo de la estructura, produciendo un desplazamiento del espectro. Mayor desplazamiento implica mayor sensibilidad de la estructura. En este sentido, la Figura 3 se muestra la respuesta al fluir agua desionizada (DIW), y al fluir una disolución de un 5% de etanol en DIW.

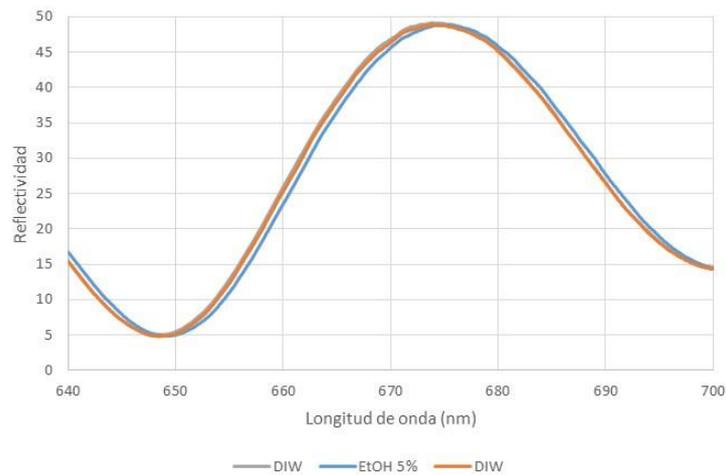


Figura 3 Espectro al fluir DIW y etanol 5% en un mismo sensor de silicio poroso

Se puede ver como sufre un leve desplazamiento, que es proporcional a la variación del índice de refracción del medio que se esté fluyendo. Así que, midiendo la variación de reflectividad se puede cuantificar la concentración de un químico determinado.

Los sistemas de caracterización tradicionales se basan en la medida del desplazamiento del espectro mediante el seguimiento de un punto máximo o mínimo de reflectividad. Se basan en una fuente de luz blanca y un espectrómetro, y permiten obtener la reflectividad de la muestra en un notable rango del espectro. En el caso del setup disponible en el Laboratorio de Biofotónica del Instituto de Tecnología Nanofotónica, el rango del espectro caracterizado es entre 500 y 850 nm. Esto permite el uso de una amplia variedad de sensores fotónicos, con independencia de la posición que tomen los lóbulos presentes en la reflectividad.

Pero también se puede analizar la respuesta del sensor para una longitud de onda determinada, caracterizando la diferencia de la reflectividad en función del índice de refracción del medio fluido. En este sentido, el dispositivo planteado en este proyecto utiliza un láser rojo como fuente de luz, y un fotodiodo de silicio como receptor de la luz reflejada. De esta forma, se puede medir las variaciones de reflectividad del sensor a 657 nm, y posteriormente, cuantificar la concentración de la solución a caracterizar.

Este nuevo sistema de medida tiene la ventaja de que es de pequeño tamaño y económico. Pero tiene el inconveniente de que es necesario que la reflectividad de la muestra tenga un flanco de subida o bajada para la longitud de onda del láser. Por lo tanto, requiere de un sensor fotónico particularizado para el setup de medida.

1.2.2 Láser

El término “láser” viene del acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa, amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación.

Según el artículo de Keyence Corporation, Principio del láser [2], este consiste en un material emisor de luz, puede ser un gas, un líquido o un sólido. Cuando se estimula este material mediante una corriente eléctrica, los átomos absorben la energía y pasan a un estado de alta energía. En este estado los átomos son inestables, por lo que, algunos volverán a un estado de baja energía emitiendo un fotón. Si dicho fotón colisiona con otro átomo en estado alto, este pasará a estado bajo más fácilmente, produciendo así una reacción en cadena. Mediante un sistema de espejos se canalizan los fotones en una sola dirección, generando el haz láser.

En la Tabla 2 se muestran las principales características de la luz láser, comparándola con la luz ordinaria.

Tabla 2 Comparación entre luz ordinaria y luz láser [2]

| | Luz ordinaria | Luz laser |
|-------------------------|--|--|
| Directividad (rectitud) |  Bombilla |  Láser |
| Monocromaticidad |  Longitudes de onda no uniformes |  Longitudes de onda uniformes |
| Coherencia |  Fase no uniforme |  Los picos y valles están alineados. |

1.2.3 Fotodiodo

El principio físico que siguen los fotodiodos es el efecto fotoeléctrico. Si una radiación ioniza una zona donde existe una barrera de potencial se genera una corriente.

El fotodiodo está formado por la unión de un semiconductor P con un semiconductor N. En las uniones P-N, algunos electrones pasan a la zona P, creando una zona intermedia sin portadores de carga y un campo eléctrico que se opone a la difusión de más portadores. Si un haz de luz incide en esta zona, aparecen pares electrón-hueco. La llegada de electrones a la zona N y de huecos a la zona P genera una corriente [3], como se muestra en la Figura 4.

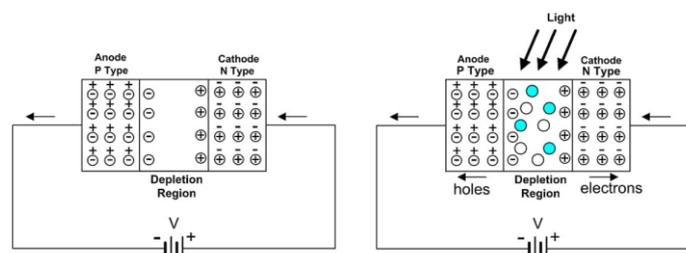


Figura 4 Esquema del principio de funcionamiento de un fotodiodo [4]

La corriente generada es proporcional a la luz que incide sobre la superficie fotosensible. Por tanto, se puede cuantificar la potencia óptica del haz láser midiendo la corriente del fotodiodo.

1.2.4 Estado del arte

En las últimas dos décadas se han desarrollado sensores fotónicos que han alcanzado un alto nivel de rendimiento. Sus sensibilidades son cada vez más altas y sus límites de detección más bajos, por lo que, se les considera un firme candidato para sensores de alta precisión en la detección química y biológica. Sin embargo, los equipos para realizar las mediciones de los sensores fotónicos son voluminosos, caros y requieren de expertos para operarlos. Por este motivo su aplicación fuera de un laboratorio está bastante limitada. Para conseguir utilizar los sensores fotónicos en más aplicaciones se necesita un sistema de caracterización portátil, de bajo coste y compacto.

Los sistemas de caracterización de sensores fotónicos portátiles se han empezado a desarrollar en los últimos años. Debido a esto, es complicado encontrar dispositivos similares al que trata este trabajo.

En la Tabla 3 se muestran distintos sistemas de medición, que, aunque no todos utilizan la misma tecnología, se han diseñado para un objetivo similar.

Tabla 3 Sistemas portátiles de caracterización de sensores fotónicos [5]

| Dispositivo | Implementación | Analito | Sensibilidad óptica | Salida del sistema integrado | Límite de detección |
|--|----------------|---------------------|--|---|--------------------------------|
| <i>Gold nanodiscs integrated with bulk PD</i> | Integrado | Glicerol | 133 nm/RIU | 0,008 V entre la referencia y el analito | 0,01 RIU |
| <i>Gold nanohole array integrated with Si photodetector</i> | Integrado | Etanol | N.A. | 0,8 V/RIU | $1,75 \times 10^{-4}$ |
| <i>Gold wire gratings integrated with Si photodetector</i> | Integrado | Dodecanotiol | N.A. | 2,94 a.u/RIU | $2,2 \times 10^{-4}$ |
| <i>Silver coated polymer gratings</i> | Integrado | Disolución NaCl | N.A. | 0,6 mA/RIU | N.A. |
| <i>luminum hole array integrated with Ge PD</i> | Integrado | DI, agua, IPA | N.A. | 1180 nm/RIU | N.A. |
| <i>Gold nanodiscs and silicon nitride gratings integrated with CMOS PD</i> | Integrado | Glicerol y proteína | Nanodiscos de oro: 270 nm /RIU, Rejillas de nitruro de silicio: 160 nm/RIU | Nanodiscos de oro: 5,6 V/RIU, Rejillas de nitruro de silicio: 6,75 V/RIU | 3×10^{-3} RIU |
| <i>Gold nanohole array readout with CMOS imager</i> | No integrado | Proteína | 621 nm/RIU | 0,024 intensidad relativa debido al cambio del patrón de difracción | 1 μ g/mL |
| <i>Chirped resonance gratings read by camera</i> | No integrado | Glicerol y IgG | 137 nm/RIU | 3469 μ m/RIU desplazamiento espacial (no desplazamiento de la longitud de onda) | $2,37 \times 10^{-4}$ 40 ng/mL |



La sensibilidad del setup de medida que se trata en este Trabajo de Fin de Grado tiene las unidades de voltio por unidad de índice de refracción (V/RIU), ya que lo que se mide es la variación en la tensión del fotodiodo en función del índice de refracción del medio empleado en el paso de sensado. A modo de referencia, el setup de medida del artículo '*Gold nanodiscs and silicon nitride gratings integrated with CMOS PD*' [5] tiene la sensibilidad más alta publicada utilizando las mismas unidades. En concreto, su sensibilidad utilizando un sensor basado en rejillas de nitruro de silicio es de 6,75 V/RIU.

Otra característica significativa de estos dispositivos es el límite de detección. Cuando menor sea este límite, el sistema va a ser capaz de detectar menores concentraciones de la sustancia a detectar. Continuando con el sistema de detección similar al que se plantea en este TFG, y ya comentado en el párrafo anterior, dicho límite de detección es de 3×10^{-3} RIU.

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO

2.1 Diagrama de bloques

El dispositivo está formado por una parte óptica y otra electrónica. El láser, el divisor de haz, el sensor fotónico y los fotodiodos constituyen la parte óptica. Dichas etapas aparecen en azul en la Figura 5. Su principal función es generar un haz de luz, modificar sus cualidades y medir la luz resultante.

Por otro lado, está la parte electrónica. Está formada por los amplificadores de transimpedancia, los filtros paso bajo, el microcontrolador y el interfaz de usuario. Dichas etapas aparecen en naranja en la Figura 5. La función principal de estas etapas es acondicionar la señal de los fotodiodos y transformar dicha señal en información útil para el usuario.

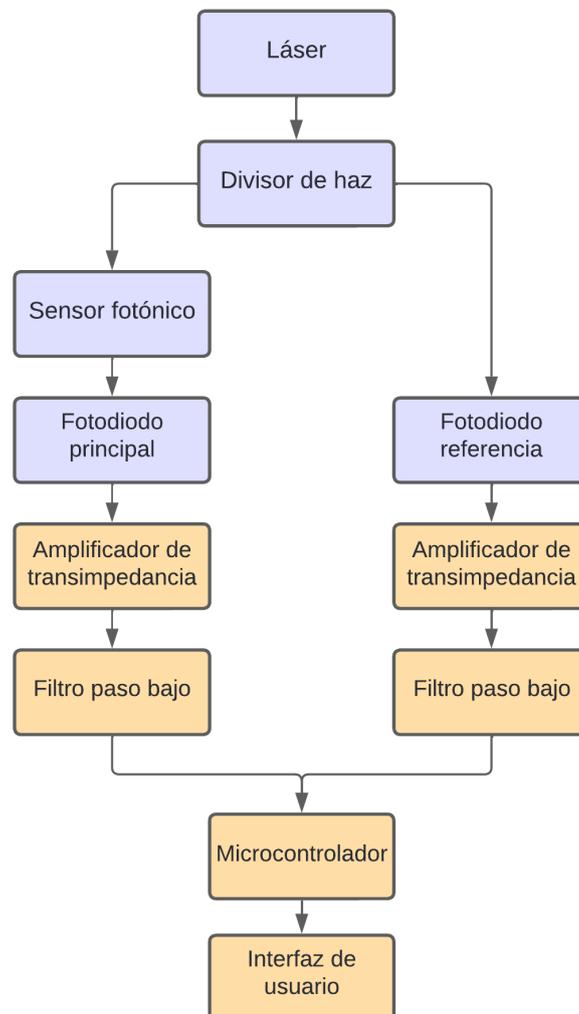


Figura 5. Diagrama de bloques del dispositivo

2.2 Parte óptica

En la Figura 6 se muestra un esquema de la parte óptica del dispositivo.

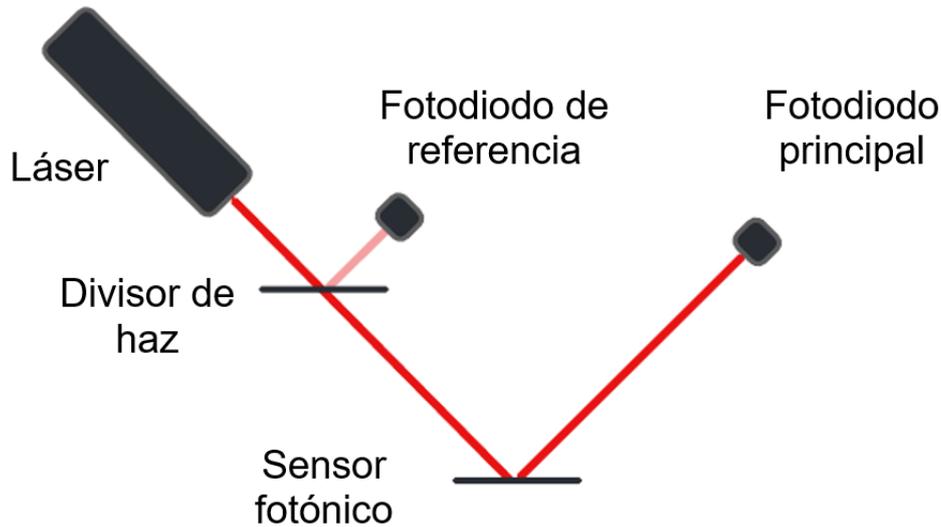


Figura 6 Esquema del sistema de caracterización de sensores fotónico

Los componentes principales son el láser y los fotodiodos. El láser actúa como emisor, generando un haz de luz colimada cuya potencia es ajustada según la alimentación, y medida por los fotodiodos.

Un elemento importante es el sensor fotónico. Al incidir el haz láser sobre la capa de silicio poroso, un porcentaje de fotones se reflejarán y llegarán al fotodiodo principal. Este porcentaje se relaciona con la reflectividad de la muestra, y se rige por la siguiente expresión:

$$Reflectividad (\%) = \frac{P_{reflejada}(W)}{P_{incidente}(W)} \cdot 100 \quad (1)$$

El otro elemento intermedio es el divisor de haz. Su función es reflejar un pequeño porcentaje del haz láser hacia el fotodiodo de referencia, y refractar el resto hacia el sensor fotónico. Este componente es necesario porque, como posteriormente se explica en el apartado 2.1, la intensidad del láser no es estable con el tiempo. Por tanto, es necesario tomar una muestra de la luz láser antes de llegar al sensor, para después corregir el efecto de esta inestabilidad en la medida. De lo contrario, una variación en la potencia del haz podría interpretarse como una variación en la reflectividad de la muestra, proporcionando una medida incorrecta.

2.3 Parte electrónica

La parte electrónica es la encargada de transformar la pequeña corriente generada por los fotodiodos en datos que, después de analizarlos, sirvan para sacar conclusiones acerca de la solución a caracterizar.

El amplificador de transimpedancia convierte la corriente procedente del fotodiodo en una tensión amplificada. La ganancia del amplificador del fotodiodo principal es variable, de forma el rango de medida de reflectividad va del 0% al valor deseado por el usuario. La modificación de la ganancia permite aprovechar todo el rango de entrada del conversor analógico/digital (ADC), consiguiendo con ello una mayor sensibilidad para muestras de baja reflectividad, y no tener el problema de la saturación de dicho conversor si el sensor posee una alta reflectividad.

El amplificador del fotodiodo de referencia tiene una ganancia fija. A él le llega un bajo porcentaje de la señal láser, cuyas variaciones si bien no son nulas, son bajas.

El filtro paso bajo es el mismo para los dos fotodiodos y su función es atenuar el ruido de 50 Hz de la red eléctrica, así como el de la señal medida.

El microcontrolador lee los valores de tensión a la salida de cada filtro. Estos se promedian y se transfieren a un ordenador vía Wifi o USB.

El interfaz de usuario se compone por un led rojo, uno verde y un potenciómetro. El potenciómetro sirve para ajustar la ganancia del dispositivo. Y los leds sirven para indicar que la ganancia es correcta, el led rojo marca que el ADC está próximo al nivel de saturación, y el verde que la ganancia es la indicada. La tensión de referencia del led verde se ha fijado a 2,90 V, y la del led rojo a 3,20 V.

2.4 Modo de empleo

El modo de empleo del dispositivo es el siguiente:

1. Primero, se coloca el sensor fotónico y se alinea de forma que el haz laser reflejado incida en el fotodiodo.
2. Se fluye DIW a modo de referencia, y se ajusta la ganancia del fotodiodo hasta que este encendido el led verde y no el rojo.
3. Sin variar la ganancia se fluyen todas las soluciones presentes en la prueba de sensado.
4. Finalmente, se exportan los datos a una hoja de cálculo y se analizan.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL DISPOSITIVO

3.1 Láser

3.1.1 Observaciones teóricas

El láser debe emitir una luz de frecuencia y potencia constante para que una variación de estos factores no se interprete como una variación en la reflectividad de muestra.

La potencia óptica del láser interesa que sea elevada, de forma que el error debido a la luz interferente tenga menos importancia. Sin embargo, si se incrementa la potencia del láser, su consumo energético también aumenta, reduciéndose así la duración de la batería del dispositivo.

También hay que tener en cuenta el grado de peligrosidad del láser. La Tabla 4^a, muestra la clasificación de los láseres en función de su peligrosidad.

Tabla 4 Clasificación de los emisores láser según su peligrosidad [6]

| | |
|-----------------|---|
| Clase 1 | Seguros en condiciones razonables de utilización |
| Clase 1M | Como la Clase 1, pero no seguros cuando se miran a través de instrumentos ópticos como lupas o binoculares. |
| Clase 2 | Láseres visibles (400 a 700 nm). Los reflejos de aversión protegen el ojo aunque se utilicen con instrumentos ópticos. |
| Clase 2M | Como la Clase 2, pero no seguros cuando se utilizan instrumentos ópticos. |
| Clase 3R | Láseres cuya visión directa es potencialmente peligrosa pero el riesgo es menor y necesitan menos requisitos de fabricación y medidas de control que la Clase 3B. |
| Clase 3B | La visión directa del haz es siempre peligrosa, mientras que la reflexión difusa es normalmente segura. |
| Clase 4 | La exposición directa de ojos y piel siempre es peligrosa y la reflexión difusa normalmente también. Pueden originar incendios. |

Teniendo en cuenta que la finalidad del dispositivo de medida es ser utilizado por personas inexpertas, el láser debe pertenecer a la clase 2 o inferior, ya que estos no son dañinos para los ojos y la piel en cortas exposiciones.

La potencia óptica del láser sigue la curva característica que se muestra en la Figura 7.

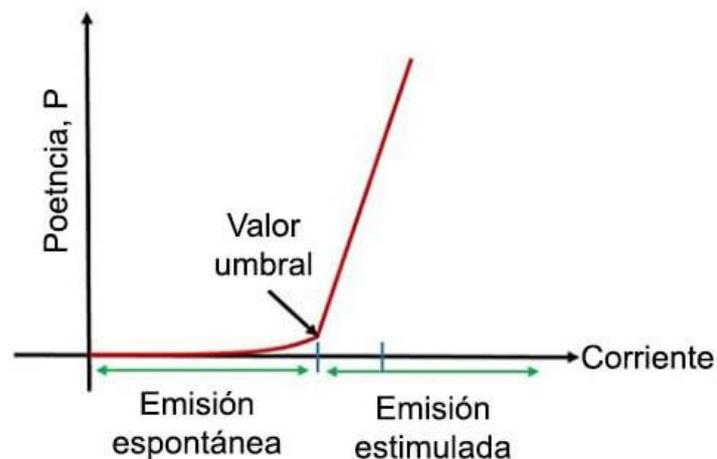


Figura 7 Curva característica de un diodo láser [2]

El láser entra en funcionamiento cuando se sobrepasa una tensión umbral. A partir de aquí, una ligera variación en la corriente se va a traducir en una gran variación de potencia. Por tanto, para tener un láser estable la corriente con la que se alimenta debe ser estable.

3.1.2 Observaciones experimentales

Las primeras experiencias se realizaron con láseres económicos, con el fin de cumplir el objetivo de construir un dispositivo de bajo coste. Dichos láseres se adquirieron en Aliexpress, con un precio de en torno a 6 €. Un inconveniente de estos componentes es la escasa información que da el fabricante sobre ellos, dificultando así los ajustes del *setup*. Por ello, la información necesaria para el diseño se obtuvo de manera experimental. Considerando que se va a trabajar en una región próxima al límite del láser, el principal problema es su corta vida útil. En el mejor de los tres componentes analizados, es de 40 horas. Por tanto, su uso quedó totalmente descartado.

Finalmente, se opta por el módulo láser GatedCameo650nm1mW del fabricante Global Laser Ltd (Abertillery, Gales, Reino Unido). Este componente es menos económico, pero está testado por el fabricante y tiene más garantías que los anteriores. Además, posee una lente de enfoque accesible por el usuario, que permite conseguir puntos de luz inferiores a 1 mm. Al concentrar el láser en una pequeña superficie, la potencia por unidad de área es elevada. Por ello, se mejora la relación señal – ruido.

Para analizar la longitud de onda de emisión y la estabilidad, se utilizó un espectrómetro, como se muestra en la Figura 8.

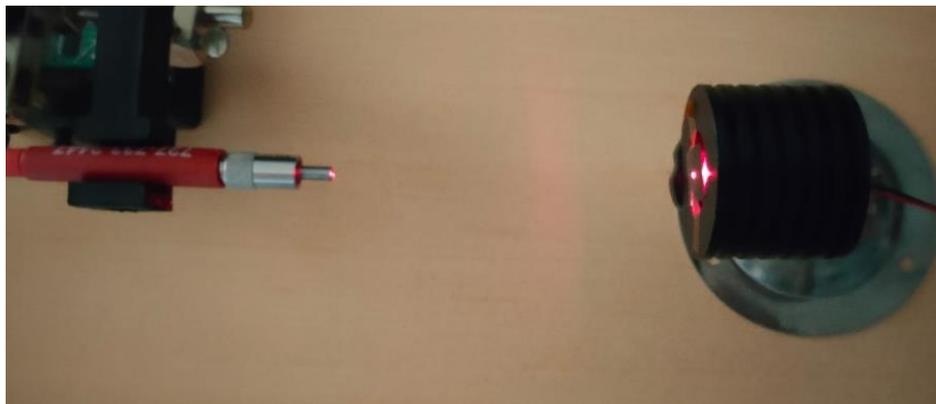


Figura 8 Medición espectro del haz láser

En la Figura 9 se aprecia el espectro del láser.

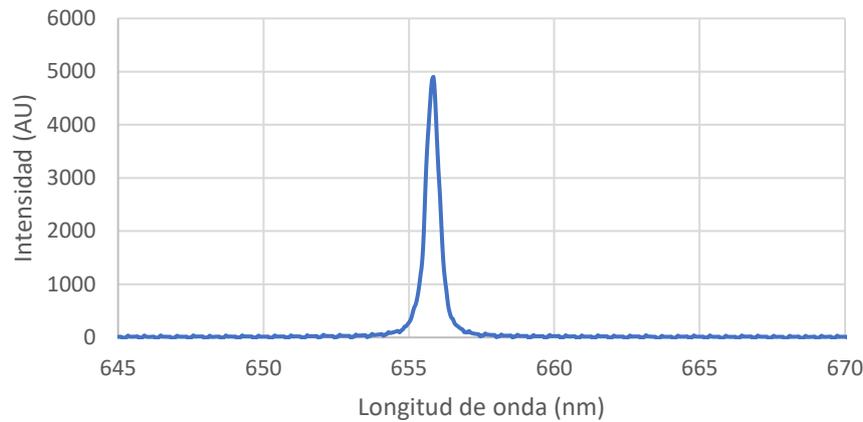


Figura 9 Espectro haz láser Gated Cameo

La longitud de onda del láser es de 657,5 nm aproximadamente, y apenas emite luz a otras longitudes de onda. La anchura de la gráfica a media altura es de 0,55 nm.

Mediante la toma de valores de la longitud de onda con más intensidad durante un periodo de tiempo se obtiene la gráfica de la Figura 10.

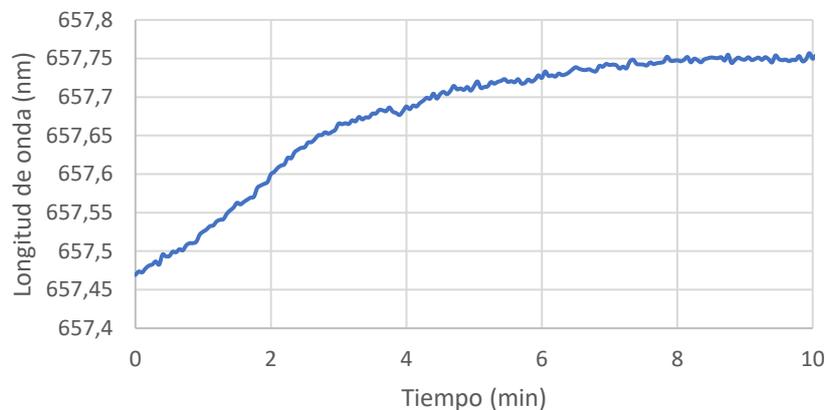


Figura 10 Longitud de onda de emisión del láser Gated Cameo en función del tiempo.

La longitud de onda varía 0,290 nm en los primeros minutos de funcionamiento y posteriormente se estabiliza. Tras 6 minutos de funcionamiento, la máxima variación que sufre es de 0,034 nm. Por lo tanto, el comportamiento del láser en este aspecto es adecuado, ya que sus variaciones en la longitud de onda son insignificantes.

La característica más importante del láser, para el dispositivo que trata el trabajo, es su potencia óptica. Para analizar su estabilidad en condiciones reales de operación, y empleando un fotodiodo como elemento receptor de la luz reflejada, se utiliza el prototipo con una capa de silicio poroso, como se muestra en la Figura 11.

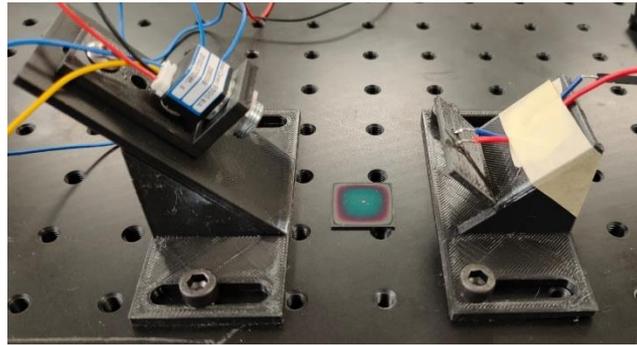
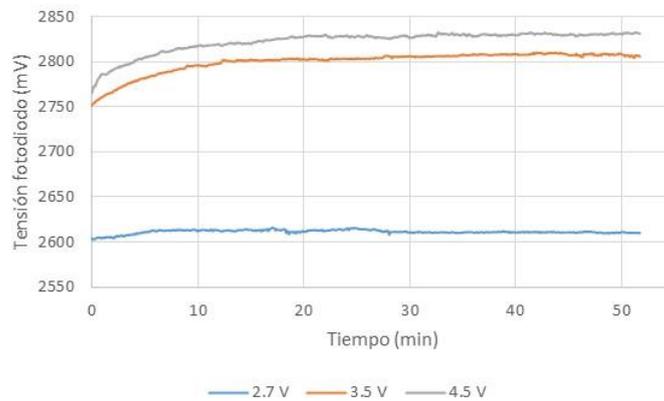
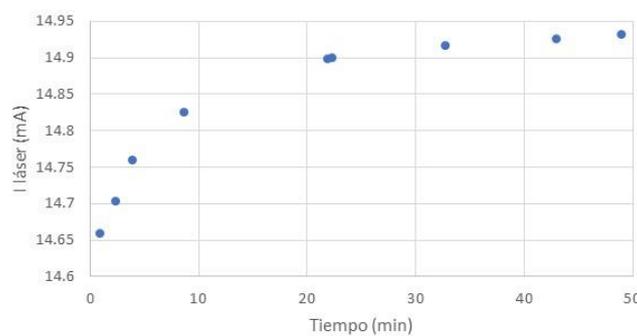


Figura 11 Medición de la estabilidad del láser Gated Cameo

Experimentalmente se observa que el láser entra en conducción a partir de 2,7 V. Según la hoja de características, se puede alimentar hasta con 5 V. Por ello, se han realizado pruebas alimentando el láser con distintas tensiones. La respuesta más estable se ha tenido con una tensión de 2,7 V. Por este motivo, si se alimenta con una fuente de tensión, debe ser con ese voltaje. La Figura 12 (a) muestra la evolución de la tensión del fotodiodo que recoge la luz reflejada en la muestra de test en función del tiempo, para tres tensiones de alimentación del láser distintas. En la Figura 12 (b), se muestra la evolución de la corriente por el láser alimentándolo a dicha tensión.



(a)



(b)

Figura 12. (a) Evolución de la respuesta del fotodiodo según la tensión de alimentación del láser. (b) Corriente que circula por el láser al ser alimentado con 2,7 V

La corriente inicial es de 14,65 mA y se estabiliza en 14,95 mA. La corriente de alimentación adecuada, en caso de utilizar una fuente de corriente, debe estar entre los dichos valores extremos. Por tanto, se decide que sea 14,8 mA.

Por otro lado, la respuesta de un láser genérico depende de la corriente suministrada. Por ello, en la Figura 13 se muestra la estabilidad del láser según si se alimenta con corriente o con tensión constantes.

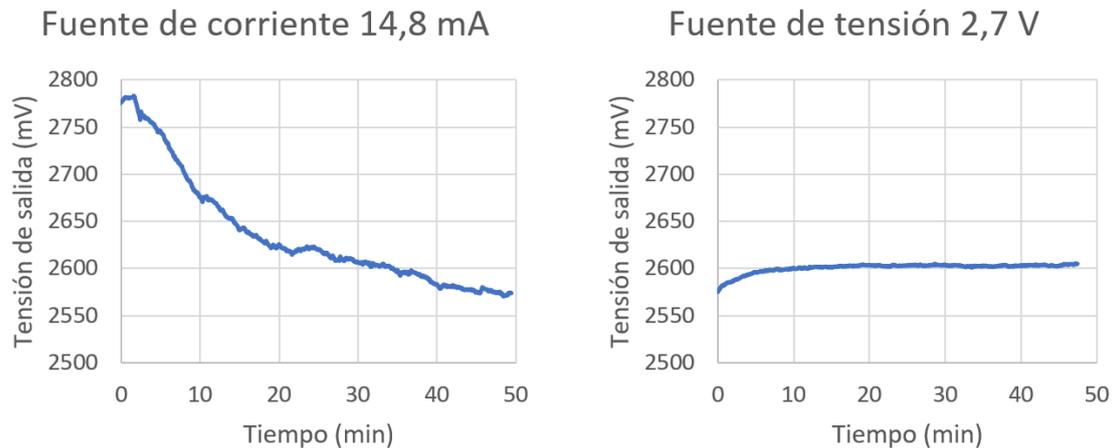


Figura 13. Comparación de la estabilidad del láser Gated Cameo alimentado con una fuente de corriente o de tensión constantes.

La alimentación del láser está directamente relacionada con su estabilidad. Como se explica en el apartado 3.1.1, la corriente de alimentación debe ser lo más estable posible. Por tanto, utilizando una fuente de corriente, la intensidad del láser debe ser más estable que con una fuente de tensión. En las medidas tomadas en los láseres económicos, esto se cumple. Pero con el láser Gated Cameo, tal y como se comprueba en la Figura 13, pasa lo contrario. Esto seguramente es debido a los circuitos de estabilización incorporados en el componente.

3.1.3 Solución adoptada

Finalmente, se opta por un módulo láser GatedCameo650nm1mW del fabricante Global Laser Ltd (Abertillery, Gales, Reino Unido), ya que es el componente que mejor cumple las especificaciones explicadas en el apartado 3.1.1. Este se alimenta con una fuente de tensión de 2,7 V, como se explica en el apartado 3.1.2.

3.2 Sensor fotónico

La principal condición de diseño del sensor fotónico está relacionada con su espectro. Como se explica en el apartado 1.2.1, al fluir diferentes disoluciones, el espectro se desplaza ligeramente en longitud de onda. Para una longitud de onda, el espectro puede tener un flanco de subida o bajada, un máximo o un mínimo. La Figura 14 muestra lo explicado de forma esquemática.

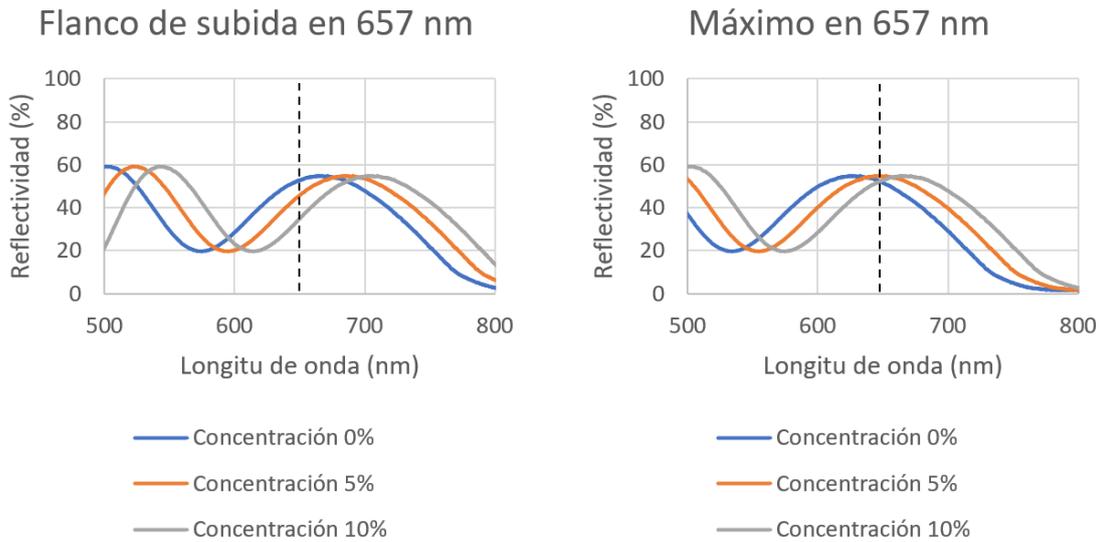


Figura 14 Comportamiento del espectro del sensor fotónico al fluir distintas concentraciones de etanol

Lo que se va a medir es una variación en la potencia de la luz reflejada. Por ello, el sensor fotónico ha de tener un flanco de subida o bajada en la longitud de onda del láser.

Como se ve en la gráfica derecha de la Figura 14, si el espectro posee un máximo o mínimo de reflectividad en la longitud de onda del láser, la diferencia en la reflectividad al desplazarse el espectro debido a la presencia de una disolución determinada es mínima. Además, el aumento de la concentración de la sustancia a medir no va a causar un cambio proporcional en la intensidad de la luz reflejada. La Figura 15 muestra la relación entre la concentración y la reflectividad en cada uno de los casos.

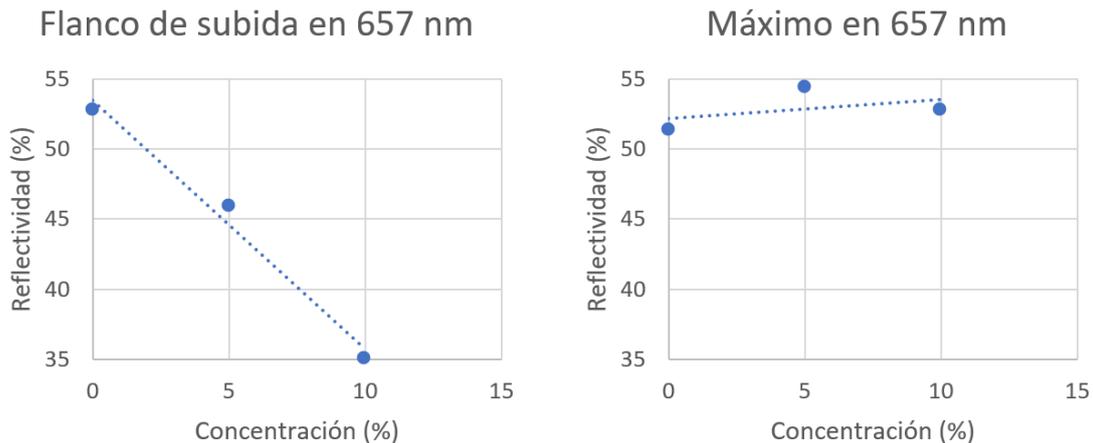


Figura 15 Comparación de utilizar un sensor con un flanco de subida y una cresta en 657 nm

En caso de estar en un flanco de subida o de bajada se tiene una mayor variación de potencia y de linealidad. Por tanto, los sensores fotónicos para este *setup* de medida han de ser diseñados para que tengan un flanco de subida o de bajada a 657 nm.

3.3 Fotodiodo

3.3.1 Observación teórica

La principal condición de diseño de un fotodiodo es su modo de funcionamiento. Por un lado, si no se aplica una diferencia de potencial entre cátodo y ánodo, el diodo está funcionando en modo fotovoltaico. Por otro lado, si se polariza inversamente, está funcionando en modo fotoconductor.

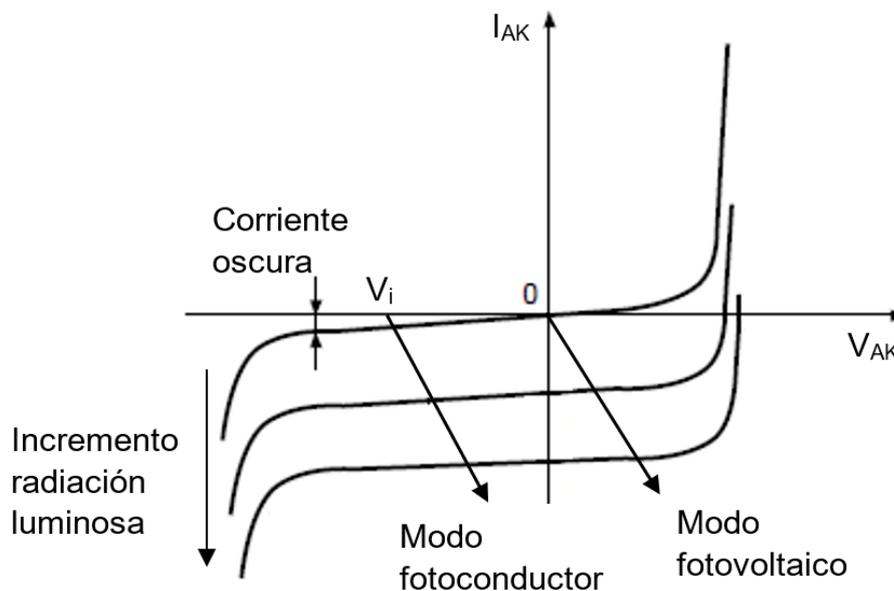


Figura 16 Cuerva característica de un fotodiodo [7]

Como se observa en la Figura 16, el modo fotoconductor tiene una mayor corriente en oscuridad, que aumenta en función de la tensión de polarización inversa. Sin embargo, tiene más sensibilidad. En este sentido, para un mismo valor de radiación luminosa genera más corriente, y dicha corriente es proporcional a la comentada radiación luminosa. En este modo de funcionamiento, la respuesta dinámica del fotodiodo es más rápida, pero causa más ruido *Shot* [8].

El sistema de caracterización no necesita tener una respuesta rápida y debe tener el menor ruido posible. Por tanto, el modo fotovoltaico es el más adecuado.

El material de construcción del fotodiodo es fundamental para definir sus propiedades. Solo los fotones con energía suficiente para excitar electrones a través de la banda prohibida del dispositivo semiconductor producirán corrientes. Los substratos más comunes utilizados en la realización de fotodiodos se enumeran en la Tabla 5.

Tabla 5 Materiales de construcción de los fotodiodos y su respectivo rango de medida [9]

| Material | Longitud de onda (nm) |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Silicio (Si) | 190-1100 |
| Germanio (Ge) | 400-1700 |
| Arseniuro de galio indio (InGaAs) | 800-2600 |
| Sulfuro de plomo (II) | 1000–3500 |
| Telururo de mercurio y cadmio | 400–14000 |

La longitud de onda del haz laser es de 657 nm. Por tanto, podría utilizarse un fotodiodo de silicio, de germanio y de telururo de mercurio y cadmio. Sin embargo, cuanto menor sea su rango de medición, menos sensible será a las interferencias. Por esto y por que son los más comunes, económicos y fáciles de encontrar, el substrato más indicado para la realización de fotodiodos es el silicio.

3.3.2 Observación experimental

El fotodiodo debe ser estable a lo largo del tiempo para tener un dispositivo fiable. Para comprobarlo, se utilizó una fuente de luz blanca halógena (Halogen Lightsource HL-2000, de Ocean Optics). Ésta es la utilizada en el setup de medida tradicional, ya que es más estable y fiable que el láser. Por otro lado, su precio está por encima de los 1000 €.

Se coloca el fotodiodo en frente de la fuente de luz y se mide la salida del amplificador de transimpedancia, como se muestra en la Figura 17.



Figura 17 Medición de la estabilidad del fotodiodo

Los resultados se muestran en la Figura 18.

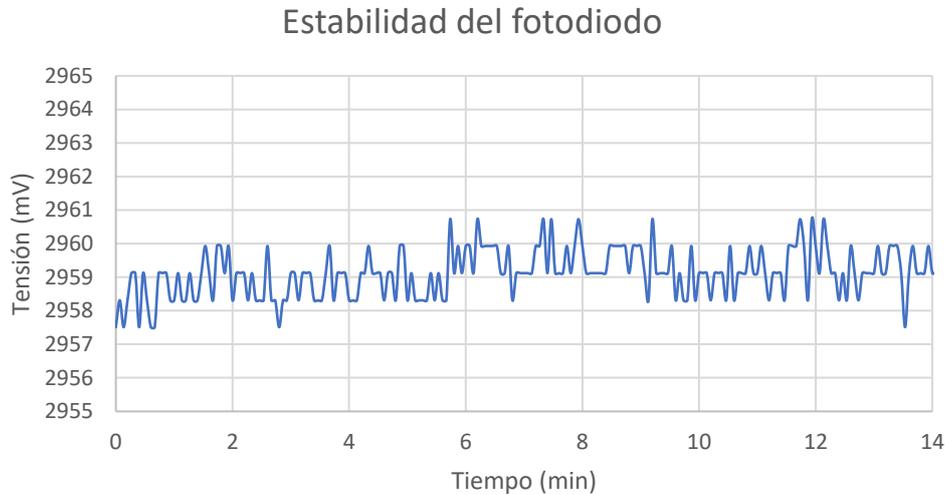


Figura 18 Resultados de la medida de estabilidad del fotodiodo

En conclusión, la respuesta del fotodiodo es estable en el tiempo. La señal tiene una desviación de 3 mVpp. Parte de esta desviación se debe a ruido presente en la medida. Para mejorarla, y tal y como se indicará en el apartado 3, es necesario implementar un filtro paso bajo.

3.3.3 Fotodiodo utilizado

El componente seleccionado es el fotodiodo BPW 34 del fabricante Vishay Intertechnology (Malvern, Pensilvania, Estados Unidos). Este cumple todo lo especificado en el apartado 3.4.1 y como se ha comprobado en el laboratorio, tiene un comportamiento adecuado para nuestro propósito. Además, la potencia equivalente al ruido es bastante inferior al de otros modelos. En concreto, es de $4 \times 10^{-4} W/\sqrt{Hz}$.

3.4 Amplificador de transimpedancia

3.4.1 Observaciones teóricas

El fotodiodo genera una corriente proporcional a la potencia de luz que incide en su superficie fotosensible. Por tanto, el primer paso para acondicionar la señal es convertir esa corriente en tensión. Para ello se debe usar un amplificador de transimpedancia. Como se observa en la Figura 19, el circuito se compone de un amplificador operacional y una resistencia de realimentación que define la ganancia de la etapa.

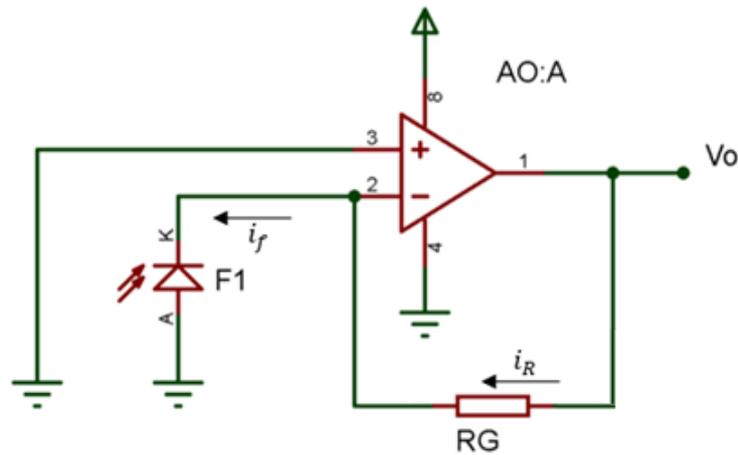


Figura 19 Esquema electrónico del amplificador de transimpedancia

La corriente generada por el fotodiodo es aproximadamente la que atraviesa la resistencia R_g . Puesto que la impedancia de entrada del amplificador operacional tiende a infinito, se realiza el diseño considerando que la corriente que entre por el terminal inversor es nula, por tanto:

$$i_f = i_R \quad (2)$$

donde i_f es la corriente generada por el fotodiodo y i_R la que pasa por la resistencia R_g .

La corriente i_R , por la ley de Ohm, es la caída de tensión en R_g dividido su valor ohmico:

$$i_R = \frac{V_o - V_-}{R_g} \quad (3)$$

Puesto que el AO está realimentado, la tensión en su pin inversor y el no inversor debe ser la misma. Como el terminal no inversor está conectado a la referencia, se obtiene:

$$V_+ = V_- = 0 \text{ V} \quad (4)$$

A partir de la ecuación 3 y 4 se tiene la siguiente expresión:

$$i_R = \frac{V_o}{R_g} \quad (5)$$

Substituyendo la corriente i_R de la ecuación 5, a partir de la ecuación 2:

$$i_f = \frac{V_o}{R_g} \quad (6)$$

Finalmente, reordenando los términos de la ecuación 5:

$$V_o = R_g \cdot i_f \rightarrow G_{TIA} = R_g \quad (7)$$

siendo G_{TIA} la ganancia del amplificador en V/A.

La primera condición de diseño del circuito es el offset de entrada del AO. Este parámetro influye en que la ecuación 4 no sea del todo cierta, ya que esta pequeña tensión aparece en los pines de entrada del amplificador. Esto aumenta la corriente oscura del fotodiodo y, por tanto, provoca un aumento en el error de offset del sistema. La tensión de offset de entrada varía con la temperatura, causando que el error no sea constante y, por tanto, no sea fácil de corregir. En resumen, el AO debe tener el menor offset de entrada posible.

Otra problemática que afecta a la precisión de la medida es la corriente de fuga de entrada del AO, también llamada i_{BIAS} . Este parámetro afecta a la consideración tomada en la ecuación 2. Cualquier corriente generada por el fotodiodo que no pase por la resistencia de realimentación causa un error. Como la corriente del fotodiodo es baja, del orden de microamperios, la corriente i_{BIAS} debe ser mínima para no afectar a la salida. Igual que la tensión de offset de entrada, la corriente i_{BIAS} causa un error que varía con la temperatura. Por este motivo, se debe utilizar un amplificador de entrada CMOS o JFET, que tienen i_{BIAS} del orden de picoamperios.

Además, se debe minimizar las rutas externas de fuga de corriente, también para tratar de cumplir la igualdad de la ecuación 2. Si en la PCB los bornes del fotodiodo están cerca de pistas con diferente tensión, una pequeña corriente circulará hacia estas pistas. Como se observa en la Figura 20.

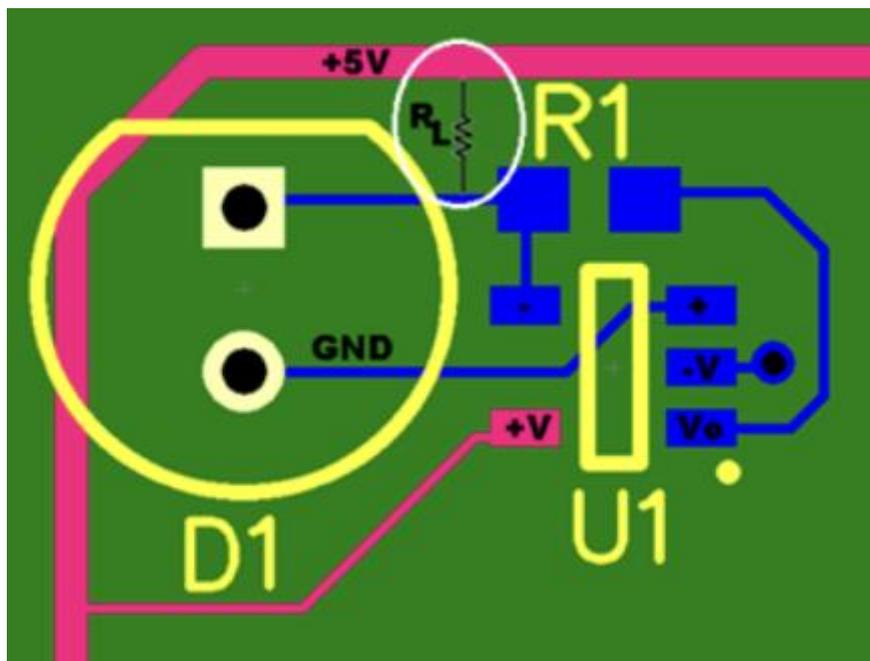


Figura 20 Ejemplo de corriente de fuga a través de la PCB [10]

Para minimizar este efecto se debe situar el fotodiodo lo más alejado posible de otras pistas.

La elección de la ganancia de la etapa y, por tanto, de R_g también es importante para reducir el ruido. Por una parte, cuando menor es la resistencia, más fácilmente pasa la corriente del fotodiodo por la resistencia de realimentación. Se disminuye así la

importancia de las corrientes de fuga. Además, el ruido Johnson es proporcional a la resistencia, por tanto, interesa que R_g no sea muy elevada.

En la etapa de amplificación del circuito de acondicionamiento principal, R_g está formada por una resistencia en serie con un potenciómetro. Para evitar que se acoplen interferencias, la conexión del potenciómetro debe ser la que se muestra en la Figura 21, sin dejar ningún pin sin conectar.

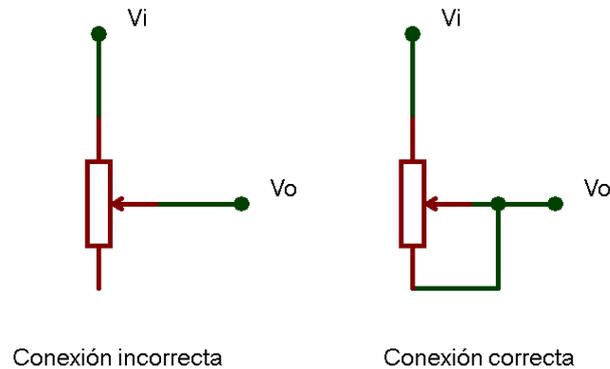


Figura 21 Conexión correcta de un potenciómetro

3.4.2 Cálculo del amplificador de referencia

El amplificador del fotodiodo de referencia debe tener una ganancia fija, de forma que su salida promedio se sitúe en torno a los 3,0 V. De esta forma, por mucho que varíe la potencia del láser, la salida siempre estará dentro del rango del ADC.

La luz láser incide sobre el divisor de haz, reflejando una parte de la luz y dejando pasar el resto. La potencia de la luz reflejada, P_{ref} , es:

$$P_{ref} = P_l \cdot \rho_d \quad (8)$$

Siendo P_l la potencia del láser y ρ_d la reflectividad del divisor de haz en tanto por cien.

Según la hoja de características del láser, este tiene una potencia óptica de 0,8 mW, y emite a 650 nm. La reflectividad del divisor de haz, deducida experimentalmente, es de 6%. Mediante la ecuación 8 se puede calcular la potencia que incide en el fotodiodo de referencia:

$$P_{ref} = P_l \cdot \rho_d = 0,8 \times 0,06 = 0,048 \text{ mW} \quad (9)$$

Según la hoja de características del fotodiodo BWP34, este tiene una sensibilidad máxima a la longitud de onda de 850 nm de 0,62 A/W. En la Figura 22 se observa que la sensibilidad relativa en 650 nm es el 70% de la máxima.

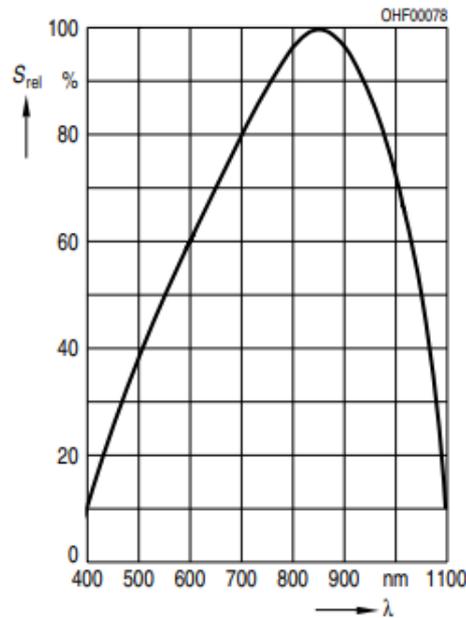


Figura 22 Sensibilidad relativa del fotodiodo BPW34

A partir de los datos obtenidos se calcula la sensibilidad del fotodiodo a el haz láser.

$$S_{650 \text{ nm}} = S_{\text{max}} \cdot S_{\text{rel}} = 0,62 \times 0,7 = 0,434 \text{ A/W} \quad (10)$$

La corriente que genera el fotodiodo va a ser de 0,434 A por cada vatio de luz roja, de 650 nm. Con el valor de potencia calculado en la ecuación 9 se calcula la corriente en el fotodiodo.

$$i_{f,ref} = S_{650 \text{ nm}} \cdot P_{ref} = 0,434 \times 0,048 = 0,0208 \text{ mA} \quad (11)$$

A partir de este valor y el de la salida deseada, $V_{o,ref}$, se calcula la ganancia.

$$G_{ref} = \frac{V_{o,ref}}{i_{f,ref}} = \frac{3 \text{ V}}{0,000208 \text{ A}} = 144230 \text{ V/A} \quad (12)$$

Siendo esta la ganancia del circuito de acondicionamiento del fotodiodo de referencia. La cual es el producto de la ganancia del filtro y del amplificador.

$$G_{ref} = G_{TIA,ref} \cdot G_{Filtro} \quad (13)$$

Como el filtro es de tipo Butterworth, la ganancia es de 1,6 V/V, asegurando una respuesta máximamente plana en la banda de paso. Por tanto, la ganancia del amplificador de transimpedancia resultante es:

$$G_{TIA,ref} = \frac{G_{ref}}{G_{Filtro}} = \frac{144230}{1,6} = 90144 \text{ V/A} \quad (14)$$

Como se ve en la ecuación 7, R_g es igual a la ganancia del amplificador operacional, por tanto:

$$R_{g,ref} = 90,144 \text{ k}\Omega \quad (15)$$

El valor óhmico de $R_{g,ref}$ se consigue con una resistencia de $82\text{ k}\Omega$ y otra de $8,2\text{ k}\Omega$ en serie.

3.4.3 Cálculo del amplificador principal

Para calcular los valores de R_g , primero debemos conocer que rango de entrada y de salida del circuito de acondicionamiento. El rango de salida debe ser de 0 a $3,3\text{ V}$, que es el que admite el ADC. El rango de entrada es variable como se explicó en el apartado 2.3, para disponer de una alta tensión de salida con independencia de la reflectividad del sensor, tal y como se muestra en la Figura 23.

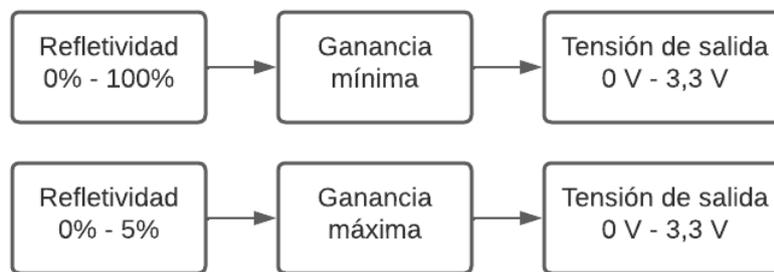


Figura 23 Diagrama de bloques del circuito de acondicionamiento principal

La potencia de luz que incide sobre el sensor fotónico, P_{sensor} , es la del láser menos la reflejada por el divisor de haz.

$$P_{sensor} = P_l - P_{ref} = 0,8 - 0,064 = 0,736\text{ mW} \quad (16)$$

La potencia del haz que incide en el fotodiodo principal, P_{foto} , es la potencia reflejada por el sensor. Por tanto:

$$P_{foto} = P_{sensor} \cdot \rho_{muestra} \quad (17)$$

Donde $\rho_{muestra}$ es la reflectividad del sensor fotónico. A partir de esta expresión y el rango de reflectividades se puede calcular la potencia máxima y mínima que incide en el receptor.

$$P_{foto,max} = 0,736 \times 1 = 0,736\text{ mW} \quad (18)$$

$$P_{foto,min} = 0,736 \times 0,05 = 0,0368\text{ mW} \quad (19)$$

Mediante el valor obtenido en la expresión 10 y los valores obtenidos en las ecuaciones 18 y 19, se calcula la corriente máxima y mínima que genera el fotodiodo.

$$i_{foto} = S_{650\text{ nm}} \cdot P_{foto} \quad (20)$$

$$i_{foto,max} = 0,434 \times 0,736 = 0,319\text{ mA} \quad (21)$$

$$i_{foto,min} = 0,434 \times 0,0368 = 0,0160\text{ mA} \quad (22)$$

Con estos valores y el rango de salida, se calcula la ganancia máxima y mínima:

$$G = \frac{V_o}{i_{foto}} \quad (23)$$

$$G_{max} = \frac{3,3 V}{0,0000160 A} = 206250 V/A \quad (24)$$

$$G_{min} = \frac{3,3 V}{0,000319 A} = 10345 V/A \quad (25)$$

Siendo esta la ganancia total del circuito de acondicionamiento principal. A partir de la ecuación 14 y de la ganancia del filtro, que es 1,6 V/V, se obtiene la ganancia máxima y mínima del amplificador.

$$G_{TIA,max} = \frac{206250}{1,6} = 128906 V/A \quad (26)$$

$$G_{TIA,min} = \frac{10345}{1,6} = 6465 V/A \quad (27)$$

Como se ve en la ecuación 7, R_g es igual a la ganancia del amplificador operacional, por tanto:

$$R_{g,max} = 128,906 k\Omega \quad (28)$$

$$R_{g,min} = 6,465 k\Omega \quad (29)$$

Para conseguir este valor óhmico variable, se utiliza una resistencia en serie con un potenciómetro, como se muestra en la Figura 24.

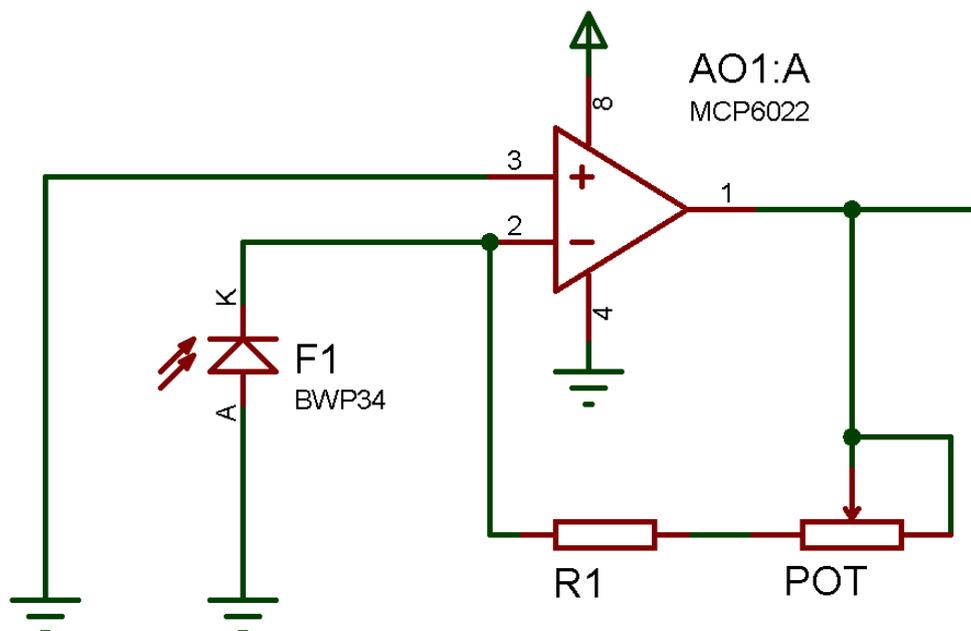


Figura 24 Esquema electrónico del amplificador de transimpedancia principal

De forma que:

$$R_{g,min} = R1 \quad (30)$$

$$R_{g,max} = R1 + POT \quad (31)$$

La ganancia mínima debe ser más baja que la calculada para que se pueda medir reflectividades altas sin riesgo de que el ADC sature. Por tanto, R1 debe ser menor que $R_{g,min}$. El valor normalizado menor y más próximo a $R_{g,min}$ es 5,6 k Ω .

El valor óhmico del potenciómetro debe ser:

$$POT = R_{g,max} - R1 = 128,906 - 5,6 = 123,306 \text{ k}\Omega \quad (32)$$

El valor comercial más similar al calculado es de 100 k Ω . A partir de los componentes seleccionados se calcula la mínima reflectividad que se puede medir con la máxima sensibilidad. Substituyendo P_{foto} de la ecuación 17 en la ecuación 20:

$$i_{foto} = S_{650 \text{ nm}} \cdot P_{sensor} \cdot \rho_{muestra} \quad (33)$$

Substituyendo el valor de P_{sensor} , calculado en la ecuación 16; y de $S_{650 \text{ nm}}$, calculado en la ecuación 10.

$$i_{foto} = 0,434 \cdot 0,736 \cdot \rho_{muestra} \quad (34)$$

A partir de las ecuaciones 23 y 34, se calcula la expresión de la tensión de salida en función de la reflectividad y la ganancia.

$$V_o = 0,434 \cdot 0,736 \cdot \rho_{muestra} \cdot G_{TIA} \cdot G_{filtro} \quad (35)$$

Substituyendo V_o por la tensión máxima y las ganancias por los valores calculados, se obtiene la mínima reflectividad que se podría caracterizar utilizando todo el rango de entrada del ADC.

$$\rho_{muestra} = \frac{3,3}{(100 + 5,6) \cdot 1,6 \cdot 0,434 \cdot 0,736} = 0,061 \quad (36)$$

De acuerdo con lo indicado, la reflectividad mínima para la cual se tendrá una tensión igual al rango de entrada del ADC es de 6.1%.

3.4.4 Solución adoptada

El circuito electrónico de ambos amplificadores, basándose en el apartado 3.5.2 y 3.5.3, se muestra en la Figura 25.

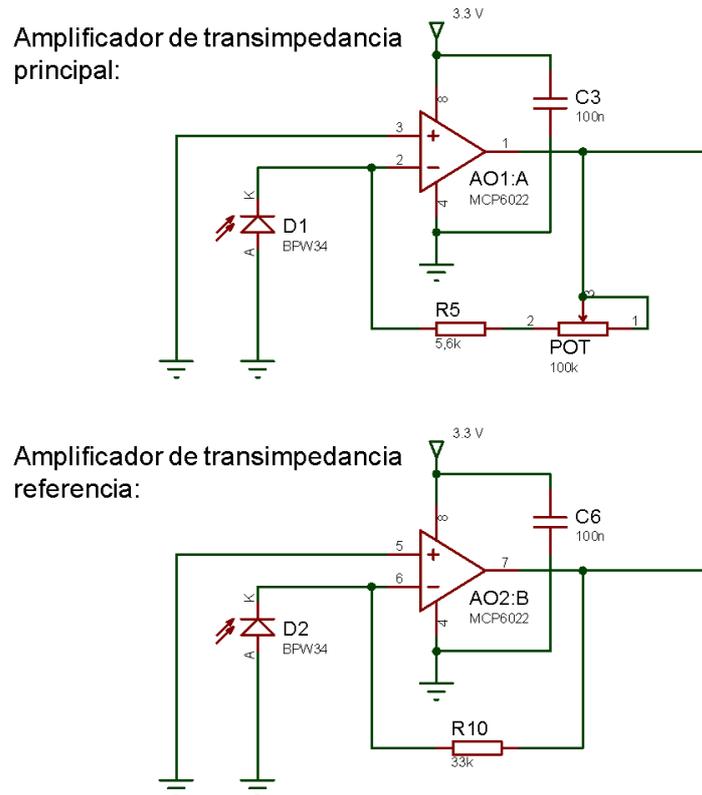


Figura 25 Amplificadores de transimpedancia de ambos circuitos de acondicionamiento

El amplificador operacional seleccionado es el MCP6022 del fabricante Microchip Technology (Chandler, Arizona, Estados Unidos). Este cumple lo especificado en el apartado 3.5.1. Tiene una corriente de entrada de 1 pA y un offset máximo de $\pm 250 \mu\text{V}$.

El potenciómetro seleccionado es el Serie RK11K de 100 k Ω del fabricante Alps Alpine (Ota, Tokio, Japón), ya que está diseñado para montaje en panel y además es económico.

3.5 Filtro paso bajo

3.5.1 Observaciones teóricas

La señal a medir es continua, y solo varía con la reflectividad de la muestra. Por lo tanto, su frecuencia es prácticamente nula. Cuando más baja es la frecuencia de corte más se pueden atenuar las interferencias, pero el tiempo de establecimiento aumenta. Con estas valoraciones se define una frecuencia de corte de 5 Hz.

No es posible acoplar un filtro al amplificador de transimpedancia e implementarlo todo en un solo AO, reduciendo así los costes y el consumo eléctrico. Además, como la resistencia de realimentación del amplificador principal es variable y la frecuencia de corte depende de ella, el filtro debe implementarse en un AO diferente.

El filtro paso bajo elegido es de segundo orden, cuya pendiente en la banda de atenuación es de -40 dB/dec . La etapa debe ser no inversora, por lo que se utiliza la configuración Sallen-Key. En la Figura 26, se muestra el circuito del filtro.

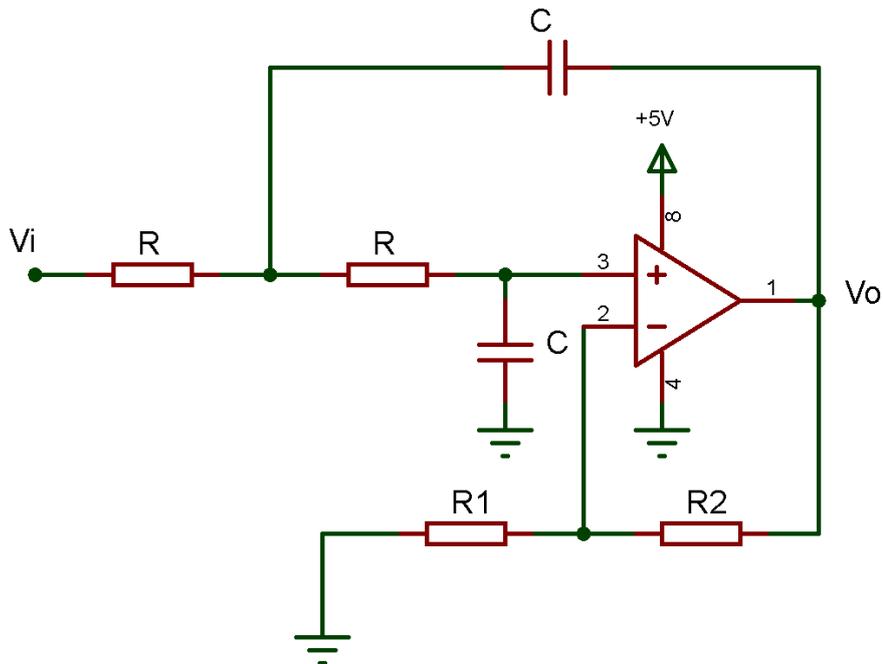


Figura 26 Filtro paso bajo de segundo orden Sallen-Key

La ganancia máxima en este tipo de filtros es de 3 V/V , porque si se supera, el filtro se vuelve inestable. Al mismo tiempo cuando más se acerca a ese valor el pico de resonancia aumenta. En función del factor de amortiguamiento, del que depende la ganancia, encontramos varios tipos de filtros como se observa en la Figura 27.

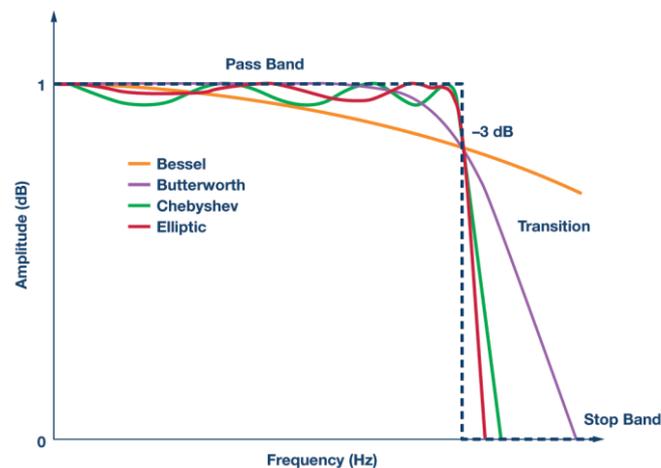


Figura 27 Tipos de filtros según el factor de amortiguamiento

El indicado para este sistema es el de Butterworth. Este minimiza el pico de resonancia y tiene una respuesta plana en la banda pasante.

3.5.2 Observaciones experimentales

Mediante mediciones experimentales se ve la importancia y el correcto funcionamiento del filtro. Todas las pruebas se realizan utilizando de muestra una oblea de silicio poroso.

Haciendo uso de un osciloscopio y de la herramienta de la transformada rápida de Fourier, se puede analizar el espectro en frecuencias de la señal. En la Figura 28, se muestran las medidas sin el filtro y con el filtro.

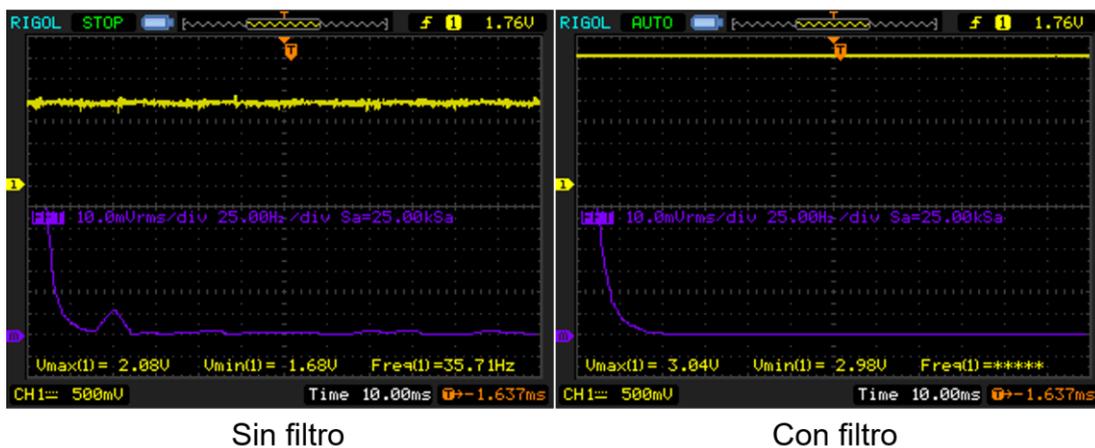


Figura 28 comparación de la señal de salida sin filtro y con filtro

En la señal (grafica amarilla) se nota una reducción del ruido a simple vista. Y en la FFT (grafica morada) se ve el correcto funcionamiento del filtro, sobre todo para la interferencia de 50 Hz, la cual es eliminada.

Se comprueba también la influencia del filtro trabajando junto al promediado digital para comprobar si se puede prescindir de él. La Figura 29, muestra los resultados.

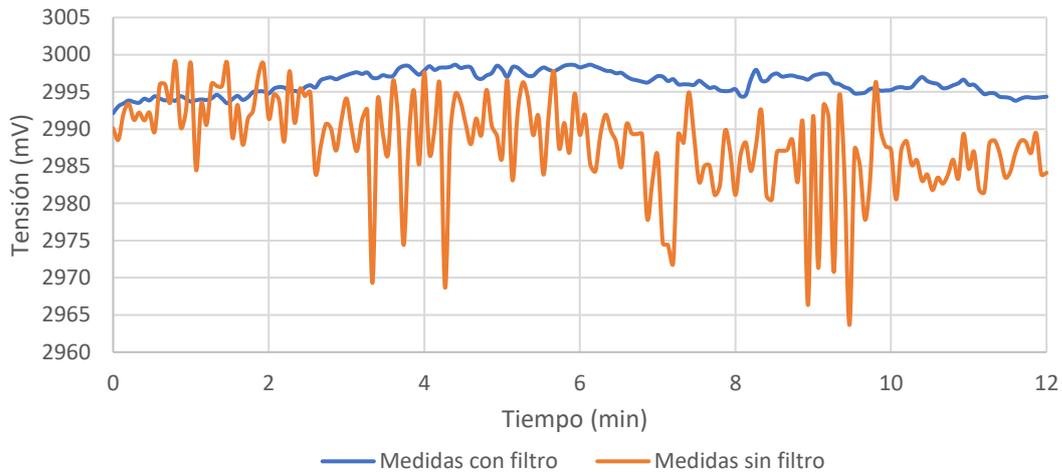


Figura 29 Comparación de la salida con filtro y promediado, y solo con promediado

Se observa claramente que, aunque se haga un promediado digital, el filtro analógico es necesario.

3.5.3 Cálculos del filtro paso bajo

La función de transferencia de un filtro de segundo orden paso bajo es:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K}{1 + 2a \cdot j \frac{\omega}{2\pi f_c} + \left(j \frac{\omega}{2\pi f_c}\right)^2} \quad (37)$$

Calculando la función de transferencia del circuito de la figura X, se obtiene:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \left(3 - \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\right) \cdot R \cdot C\omega j + (R \cdot C\omega j)^2} \quad (38)$$

Comparando el numerador de la ecuación 37 con el de la ecuación 38, se obtienen las ecuaciones de diseño del filtro:

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (39)$$

$$a = \frac{3 - K}{2} \quad (40)$$

$$2\pi f_c = \frac{1}{RC} \rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (41)$$

Donde f_c es la frecuencia de corte, a es el coeficiente de amortiguamiento y K la ganancia del filtro.

Substituyendo la frecuencia de corte de 5 Hz en la ecuación 41:

$$5 = \frac{1}{2\pi RC} \rightarrow R = \frac{1}{10\pi C} \quad (42)$$

Asignando a C el valor de $10\mu F$:

$$R = \frac{1}{10\pi \cdot 10 \times 10^{-6}} = 3,18 \text{ k}\Omega \rightarrow R = 3,3 \text{ k}\Omega \quad (43)$$

Como el filtro es de Butterworth, el coeficiente de amortiguamiento vale aproximadamente 0,7. Substituyendo en la ecuación 40, se calcula la ganancia:

$$0,7 = \frac{3 - K}{2} \rightarrow K = 1,6 \text{ V/V} \quad (44)$$

A partir del valor de la ganancia y la ecuación 39:

$$1,6 = 1 + \frac{R_2}{R_1} \rightarrow R_1 = \frac{R_2}{0,6} \quad (45)$$

Asignando a R_2 el valor de $3,3\text{k}\Omega$:

$$R_1 = \frac{3300}{0,6} = 5,5 \text{ k}\Omega \rightarrow R_1 = 5,6 \text{ k}\Omega \quad (46)$$

3.5.4 Solución adoptada

En resumen, el esquema eléctrico del filtro paso bajo se muestra en la Figura 30.

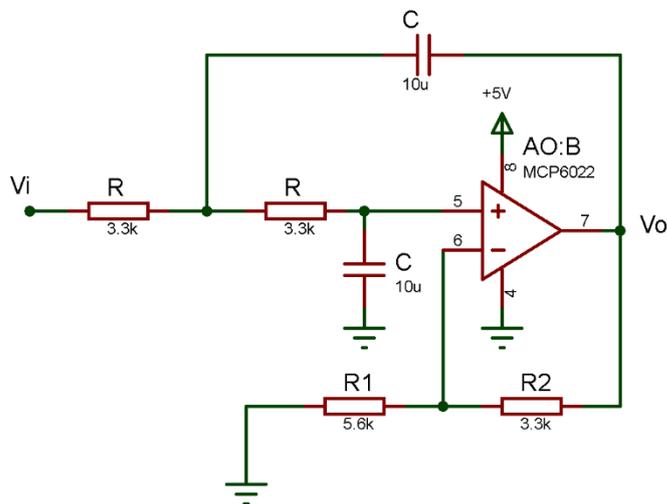


Figura 30 Esquema eléctrico del filtro paso bajo

El amplificador operacional es el MCP6022 del fabricante Microchip Technology (Chandler, Arizona, Estados Unidos), ya que es de bajo ruido. Tanto el circuito de acondicionamiento principal como el de referencia utilizan el mismo filtro.

3.6 Microcontrolador

El microcontrolador debe tener un alto número de bits en su ADC, de forma que su resolución permita medir los valores deseados. También debe tener módulos de comunicación *Wifi* o *Bluetooth* para poder transferir datos de forma inalámbrica.

El Arduino MKR WIFI 1010 cumple estas características, tiene un ADC de 12 bits y dispone de un módulo Wifi. Además, los microcontroladores de Arduino son sencillos de programar, y su entorno de desarrollo es *software* libre.

Con el ADC de 12 bits se pueden obtener las siguientes resoluciones:

$$\text{resolución máxima} = \frac{5\%}{2^{12} - 1} = 0,00122\% \text{ de reflectividad} \quad (47)$$

$$\text{resolución mínima} = \frac{100\%}{2^{12} - 1} = 0,0244\% \text{ de reflectividad} \quad (48)$$

La resolución va a depender de la ganancia del amplificador del circuito de acondicionamiento principal. El rango de la entrada analógica del controlador es de 3,3 V, por tanto, el factor de escala del convertidor es:

$$\text{factor de escala} = \frac{3,3}{2^{12} - 1} = 805,86 \mu V \quad (49)$$

Como se ve en el apartado 4, el ruido de la señal es mayor que el factor de escala del ADC. Es decir, el factor limitante en la resolución del equipo no es el convertidor, sino el ruido generado por los demás componentes.

3.7 Procesamiento digital

Los datos que toma el Arduino son procesados para reducir el ruido. Se hace un promediado de 200 medidas para suavizar la señal. El valor de cada promediado se imprime en pantalla cada 4 segundos.

3.8 Interfaz de usuario

3.8.1 Marcador de saturación

El primer indicador que tiene el dispositivo es un led que marca la saturación del conversor analógico digital. Es importante conocer si la tensión resultante de la reflectividad de la muestra a caracterizar supera el rango de entrada del ADC. Y es que, si se satura, se tendrán medidas incorrectas. Para ello se utiliza el circuito de la Figura 31.

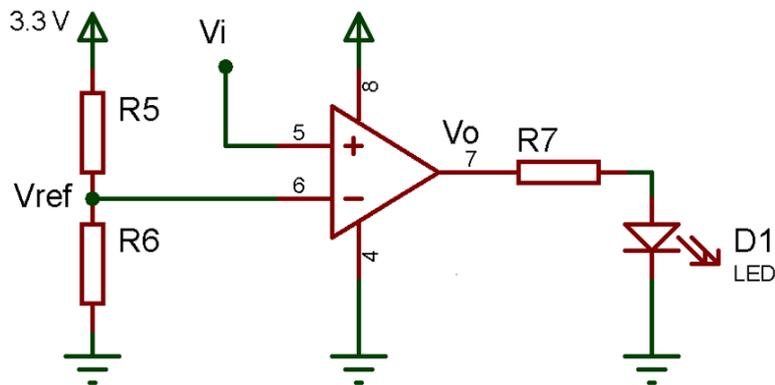


Figura 31 Comparador basado en un amplificador operacional

El circuito es un comparador basado en un amplificador operacional. En la entrada inversora está a la tensión de referencia (V_{ref}), y en la no inversora está conectada a la entrada del conversor analógico digital (V_i). De esta forma, cuando V_i supera V_{ref} la salida tiene una tensión $+V_{sat}$ y cuando no la supera, la salida es 0 V.

Para dejar un pequeño margen entre la saturación del ADC y la tensión umbral del comparador, se asigna a V_{ref} una tensión de 3,2 V. Dicho valor está marcado por el divisor de tensión formado con R_5 y R_6 :

$$V_{ref} = \frac{R_6}{R_5 + R_6} \cdot V_{cc} \rightarrow 3,2 = \frac{R_6}{R_5 + R_6} \cdot 3,3 \quad (50)$$

Dando un valor a R_6 de 100 k Ω y substituyendo:

$$3,2 = \frac{100}{R_5 + 100} \cdot 3,3 \rightarrow R_5 \approx 3,3 \text{ k}\Omega \quad (51)$$

El amplificador operacional necesario para el comparador debe ser de alimentación única, pero no es necesario que sea tan preciso como el MCP6022. Por tanto, se escoge un AO de uso general, en concreto el LM358 de Texas Instruments (Dallas, Texas, Estados Unidos).

La función de la resistencia R_7 es limitar la corriente del diodo led. El valor de esta va a depender de la tensión de salida del AO. Como se explica posteriormente en el apartado 3.10, la alimentación del amplificador operacional es de 7,4 V. En la hoja de características del LM358, indica que la tensión de saturación es 1,5 V inferior a la alimentación. Por tanto, la tensión de saturación es 5,9 V.

La caída de tensión en el led es de 2 V aproximadamente. Como la corriente del diodo es la misma que la de la resistencia R_7 :

$$i_{led} = \frac{V_{sat} - V_{led}}{R_7} = \frac{3,9}{R_7} \quad (52)$$

La corriente del led debe estar sobre los 20 mA. Despejando y substituyendo en la ecuación 52 se obtiene R_7 :

$$R_7 = \frac{3,9}{0,020} = 195 \Omega \rightarrow R_7 = 220\Omega \quad (53)$$

3.8.2 Marcador de ganancia correcta

La función de esta etapa es marcar que la ganancia está en el rango correcto para realizar una medida. La ganancia debe ser lo más alta posible, pero sin llegar a superar el rango de entrada del ADC. Se diseña con un margen de 0,5 V, por tanto, el marcador verde debe encenderse cuando la tensión de salida del circuito principal supere los 2,7 V. Los cambios observados experimentalmente han sido menores de 100 mV, por tanto, si se ajusta bien la ganancia el ADC no debería de alcanzar su máximo durante una medida de sensado.

El circuito utilizado para realizar el marcador es el mismo que el del apartado anterior. Los únicos componentes que varían son las resistencias R5 y R6 de la Figura 31.

Siguiendo el mismo procedimiento que en el apartado anterior:

$$V_{ref} = \frac{R6}{R5 + R6} \cdot V_{cc} \rightarrow 2,7 = \frac{R6}{R5 + R6} \cdot 3,3 \quad (54)$$

Dando un valor a R6 de 100 kΩ y substituyendo:

$$2,7 = \frac{100}{R5 + 100} \cdot 3,3 \rightarrow R5 \approx 22 \text{ k}\Omega \quad (55)$$

3.8.3 Visualización de medidas

Las medidas se visualizan mediante un ordenador. No se realiza mediante un *display* conectado a Arduino debido a que las medidas posteriormente hay que analizarlas, y almacenarlas en un ordenador. El usuario tiene la posibilidad de transferir los datos al por Wifi o por cable USB. Como este proyecto se centra en el diseño del *hardware* no se ha desarrollado la comunicación por Wifi. Todas las medidas se han realizado mediante la comunicación por USB.

3.9 Alimentación

La alimentación del Arduino MKR WIFI 1010 debe ser de 3,3 V según su hoja de características.

Los amplificadores operacionales utilizados en el acondicionamiento de la señal deben tener una alimentación de forma que su tensión de saturación sea 3,3 V, que es el valor de tensión de entrada máxima del microcontrolador. Como el MCP6022 es *rail-to-rail* la tensión de saturación es igual a la de alimentación, por tanto, se deben alimentar con 3,3 V.

Los amplificadores operacionales utilizados en las etapas de interfaz de usuario deben tener una tensión de saturación suficiente para encender los leds. Como el LM358 puede alimentarse desde 3 a 30 V, su alimentación será directamente la tensión de la batería.

El láser debe alimentarse a 2,7 V. Como se explica en el apartado 3.1.2, experimentalmente se ha comprobado que es como mejor se comporta.

Para conseguir esos valores de tensión es necesario alimentar el dispositivo con dos baterías de 3,7 V en serie, sumando una tensión de alimentación total de 7,4 V. Se ha realizado así porque el regulador de tensión empleado para la alimentación de Arduino

tiene una caída de potencial entre la entrada y la salida, y experimentalmente se ha comprobado que con una alimentación de 3,7 V no era capaz de entregar los 3,3 V requeridos.

Para obtener la alimentación de 2,7 V y 3,3 V se utiliza el regulador de tensión LM317 del fabricante STMicroelectronics (Ginebra, Suiza), en la configuración que se muestra en la Figura 32.

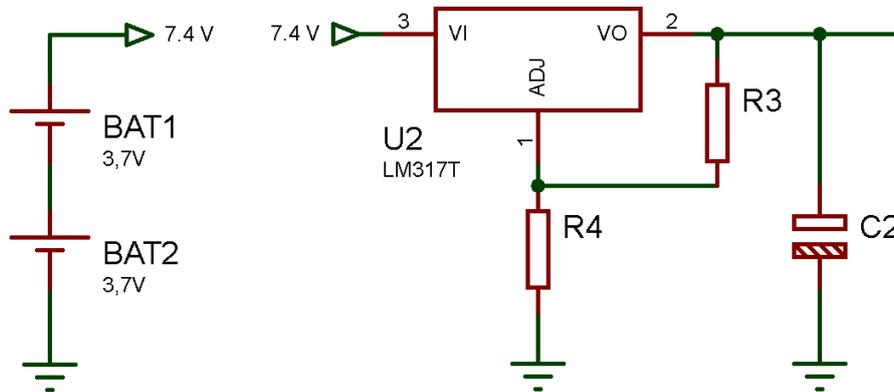


Figura 32 Esquema de la conexión de las baterías y de un regulador de tensión con el LM317T

La ecuación de diseño de las resistencias R3 y R4, obtenida de la hoja de características, es:

$$V_o = V_{REF} \left(1 + \frac{R4}{R3} \right) + I_{ADJ} \cdot R4 \quad (56)$$

De la hoja de características se obtiene también el valor de V_{REF} , que es 1,25 V, y el valor de I_{ADJ} que es de 50 μ A.

3.9.1 Cálculo del regulador de 3,3 V

Para calcular el valor de las resistencias para el regulador de 3,3 V, se substituyen los valores conocidos en la ecuación 56.

$$3,3 = 1,25 \left(1 + \frac{R4}{R3} \right) + 50 \cdot 10^{-6} \cdot R4 \quad (57)$$

$$R3 = \frac{1,25 \cdot R4}{3,3 - 1,25 - 50 \cdot 10^{-6} \cdot R4} \quad (58)$$

Las resistencias deben ser bajas, del orden de centenares de Ohm. Se asigna a R4 el valor óhmico de 390 Ω , y se calcula R3.

$$R3 = \frac{1,25 \times 390}{3,3 - 1,25 - 50 \cdot 10^{-6} \times 390} = 240 \Omega \quad (59)$$

3.9.2 Cálculo del regulador de 2,7 V

Siguiendo el mismo procedimiento se obtienen los valores de R3 y R4 para el regulador de 2,7 V. Substituyendo valores en la ecuación 56.

$$2,7 = 1,25 \left(1 + \frac{R4}{R3} \right) + 50 \cdot 10^{-6} \cdot R4 \quad (60)$$

$$R3 = \frac{1,25 \cdot R4}{2,7 - 1,25 - 50 \cdot 10^{-6} \cdot R4} \quad (61)$$

Se asigna a R4 el valor óhmico de 390 Ω , y se calcula R3.

$$R3 = \frac{1,25 \times 390}{2,7 - 1,25 - 50 \cdot 10^{-6} \times 390} = 340 \Omega \rightarrow R3 = 330 \Omega \quad (62)$$

Como la discrepancia entre el valor calculado y el normalizado es mayor, se comprueba cuanto afecta a la tensión de salida. Substituyendo valores en la ecuación 56.

$$V_o = 1,25 \left(1 + \frac{390}{330} \right) + 50 \times 10^{-6} \times 390 = 2,75 V \quad (63)$$

La diferencia es de 50 mV, los cuales no repercuten en la estabilidad del láser.

CAPÍTULO 4: ESTUDIO EXPERIMENTAL

Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del dispositivo se ha realizado una medida, sensando distintas concentraciones de etanol disueltas en agua desionizada (DIW).

La medida se basa en fluir las distintas disoluciones durante 10 o 15 minutos aproximadamente. Entre cada disolución de etanol se fluye un líquido de referencia, en este caso agua desionizada. De esta forma, lo que se mide es la diferencia de reflectividad entre el agua y las distintas concentraciones de etanol.

Debido a la falta de recursos y de tiempo, esta medida experimental se realizó en ausencia del filtro paso bajo.

Para fluir las muestras se utiliza una bomba de jeringa. La velocidad de la succión fue fijada a 20 $\mu\text{l}/\text{min}$. En la Figura 33 muestra una fotografía de la prueba realizada.

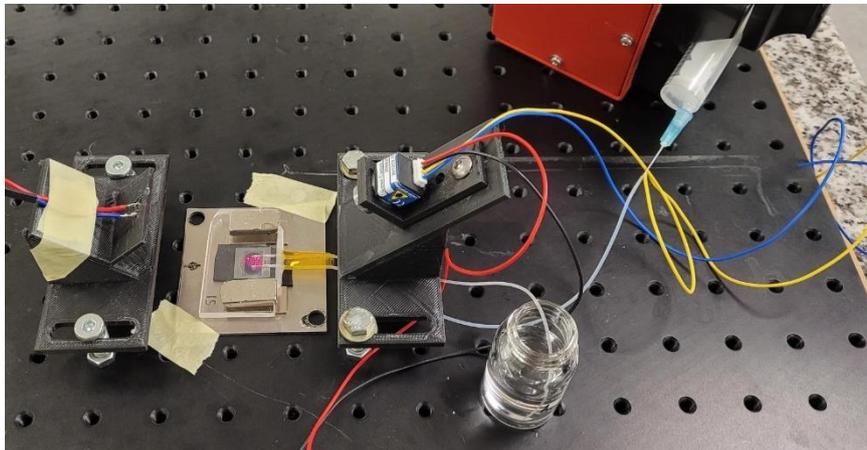


Figura 33 Prototipo empleado para medida experimental

Los datos obtenidos por el fotodiodo de referencia y el fotodiodo principal se muestran en la Figura 34.

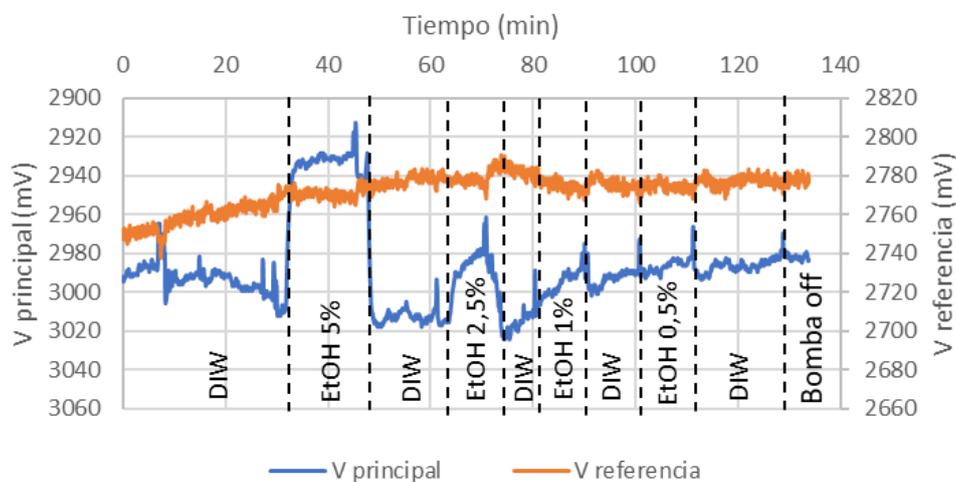


Figura 34 Medida de ambos fotodiodos

Como el circuito de acondicionamiento principal y el de referencia tienen distintas ganancias, la forma de corregir la inestabilidad del láser es dividiendo la medida principal entre la referencia:

$$V_{relativa} = \frac{V_{principal}}{V_{referencia}} \quad (64)$$

La señal relativa se muestra en la Figura 35.

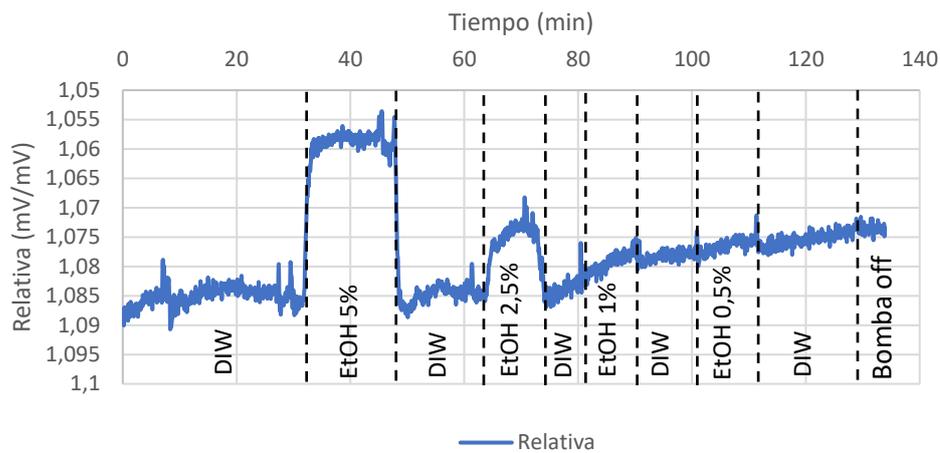


Figura 35 Medida relativa

Escalando la señal, de forma que el primer valor de la señal relativa sea igual al primer valor de la señal del fotodiodo principal, se obtiene la gráfica de la Figura 36.

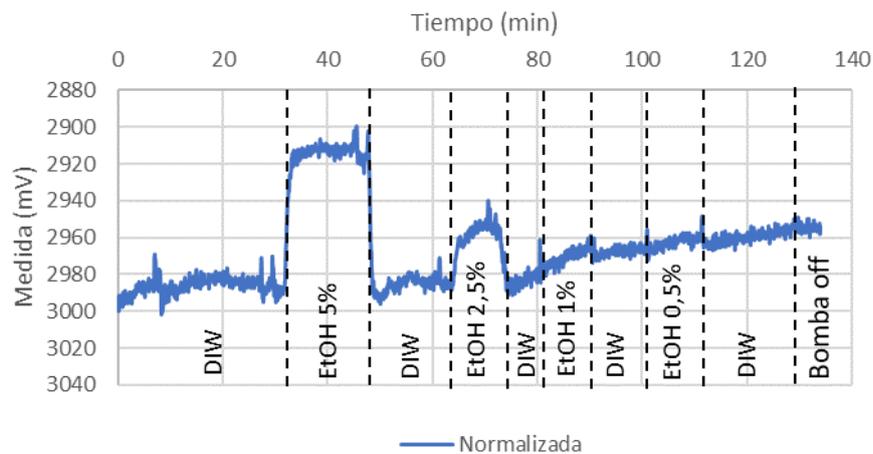


Figura 36 Medida normalizada

Finalmente, procesando la señal mediante un filtrado en Matlab, se consigue atenuar el ruido y obtener la señal mostrada en la Figura 37.

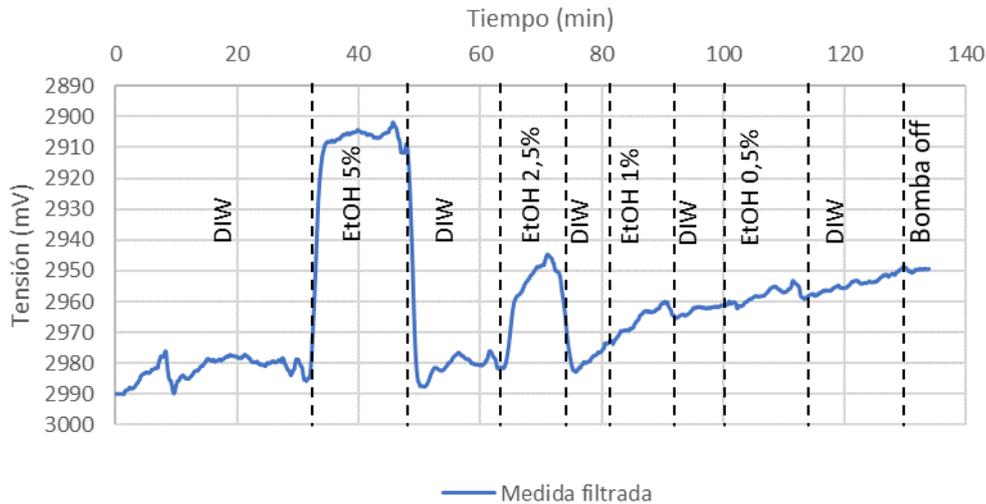


Figura 37 Medida filtrada mediante un filtro de Matlab

El dispositivo es capaz de detectar concentraciones inferiores al 1% de etanol, aunque incorporando los últimos avances del prototipo se estima una mejora más significativa.

Para continuar analizando los datos obtenidos se calcula la tensión promedio para paso de la prueba de sensado, omitiendo las transiciones. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Valor de salida promedio por cada muestra

| Inicio (min) | Fin (min) | Muestra | Promedio (mV) |
|--------------|-----------|-----------|---------------|
| 0 | 32 | DIW | 2981,96 |
| 34 | 48 | EtOH 5% | 2906,52 |
| 50 | 64 | DIW | 2980,75 |
| 66 | 73 | EtOH 2,5% | 2950,65 |
| 75 | 80 | DIW | 2979,55 |
| 82 | 90 | EtOH 1% | 2966,27 |
| 92 | 100 | DIW | 2962,79 |
| 102 | 111 | EtOH 0,5% | 2958,09 |

Según el libro *CRC Handbook of Chemistry and Physics* [11], los índices de refracción de cada disolución de etanol son los que se indican en la Tabla 7

Tabla 7 Índice de refracción de cada muestra [11]

| Muestra | índice de refracción |
|-----------|----------------------|
| DIW | 1,3330 |
| EtOH 5% | 1,3360 |
| EtOH 2,5% | 1,3345 |
| EtOH 1% | 1,3336 |
| EtOH 0,5% | 1,3333 |

A partir de la Tabla 6 y 7, se puede calcular la variación de voltaje y de índice de refracción en cada transición. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8 Variación de índice de refracción y de tensión de salida

| Transición | Variación índice de refracción | Variación V (mV) |
|---------------------|--------------------------------|------------------|
| DIW (1) → EtOH 5% | 0,0030 | 75,44 |
| DIW (2) → EtOH 2,5% | 0,0015 | 30,10 |
| DIW (3) → EtOH 1% | 0,0006 | 13,28 |
| DIW (4) → EtOH 0,5% | 0,0003 | 4,70 |

A partir de la Tabla 8, se obtiene la gráfica de la Figura 38.

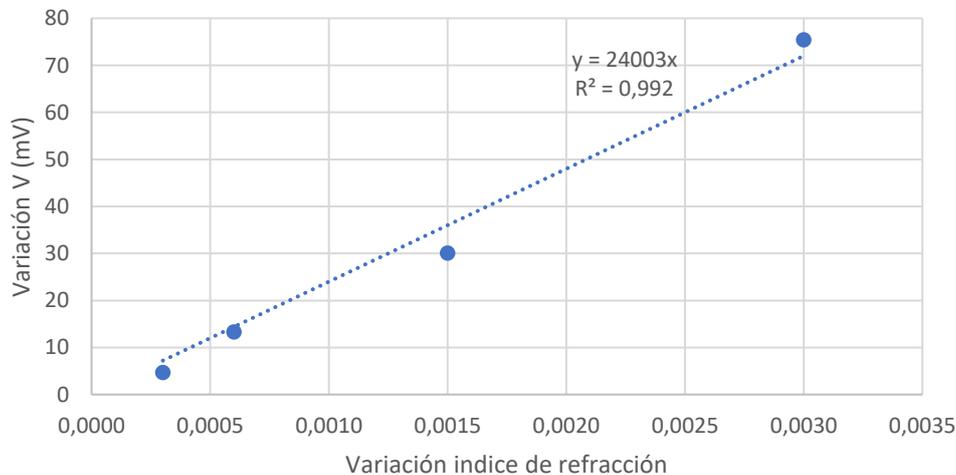


Figura 38 Gráfica de la relación entre variaciones de índice de refracción frente a variaciones de la tensión de salida

A partir de la ecuación de ajuste de la gráfica anterior, se obtiene que la sensibilidad del dispositivo. Ésta es de aproximadamente 24 V/RIU.

También es importante obtener el límite de detección (LOD). Para ello se utilizando la siguiente expresión:

$$LOD = 3 \cdot \varepsilon / S \quad (65)$$

Donde ε es la desviación estándar de la medida y S es la sensibilidad. Ambos valores se calculan utilizando Microsoft Excel. Substituyendo dichos valores en la ecuación 65:

$$LOD = 3 \cdot \frac{3,65}{24003} = 4,57 \times 10^{-4} RIU \quad (65)$$

Tanto la sensibilidad obtenida como el límite de detección alcanzan mejores valores que los encontrados en la bibliografía, y presentados en la Tabla 3. En este sentido, la sensibilidad indicada en dicha Tabla es de 6,75 V/RIU. En este TFG, la sensibilidad alcanzada ha sido de 24,00 V/RIU. Además, el límite de detección presente en la bibliografía es de $3,00 \times 10^{-3}$ RIU. En el estudio aquí presentado, dicho límite de detección se reduce a $4,57 \times 10^{-4}$ RIU. Por lo tanto, el *setup* de medida realizado junto con el uso de un sensor fotónico acondicionado para dicho *setup*, han dado lugar a los mejores resultados asociados a un sistema de medida de sensores fotónicos portátil y de bajo coste. Estos resultados están pendientes de ser publicados.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

El objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado ha sido el diseño y la realización de un *setup* de medida de sensores fotónicos que sea portátil, de bajo coste y con altas prestaciones. Para ello se han analizado distintos láseres, estudiado su estabilidad, fotodiodos, un circuito de conversión corriente-tensión, etapas de filtrado y acondicionamiento, y un microcontrolador encargado de realizar la medida.

Tras los ensayos con los fotodiodos, se concluye, que son un componente fiable. Tanto midiendo el haz láser como luz blanca se ha comportado según lo esperado. El ruido observado ha sido de solo 0.001% de la señal.

La mayoría de ruido que presentaba la señal de salida era debido a interferencias externas. La más notable era la de 50 Hz causada por la red eléctrica. Mediante el uso de un filtro paso bajo de segundo orden se han atenuado dichas interferencias y la señal se ha suavizado.

El láser ha sido el componente más problemático. No es estable en el tiempo, y la intensidad de su haz variaba considerablemente con variaciones pequeñas de la corriente de alimentación. Los primeros láseres de bajo coste utilizados en el prototipo tenían problemas de estabilidad y una vida útil muy corta. Los ensayos con estos componentes ralentizaron el desarrollo del dispositivo. Cuando se rompía uno, había que realizar las mismas pruebas con otro modelo. Finalmente, se optó por un módulo láser más costoso, pero con un precio inferior a 100 € y un mejor comportamiento.

El sistema en su conjunto funciona correctamente, ha sido capaz de detectar variaciones en el cuarto decimal del índice de refracción. Se ha conseguido obtener una sensibilidad de 24,00 V/RIU, notablemente superior a 6,75 V/RIU presente en la bibliografía. Junto con el uso de un mejor sensor fotónico, basado en nuestro caso en capas de silicio poroso, queda comprobada la fiabilidad del *setup* de medida realizado.

Pese a lo comentado, es conveniente continuar trabajando en la reducción del ruido para reducir el límite de detección y mejorar por lo tanto las características del *setup* de medida. El primer punto por tratar es el montaje del circuito. Las medidas experimentales se han realizado con el circuito montado en una placa de pruebas. Los contactos eléctricos en este tipo de placa producen ruido. Este se reduciría realizando una placa de circuito impreso con los componentes soldados. Para reducir las interferencias externas es conveniente situar el *setup* de medida en una jaula de Faraday.

Otra forma de mejorar el dispositivo es tratando reducir el efecto de la inestabilidad del láser en la medida. Aunque se utiliza el fotodiodo de referencia con el fin de eliminar la indicada falta de estabilidad en la medida final, se estudiarán otros métodos que puedan actuar de forma complementaria.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

REFERENCIAS

[1] Francisco Ramírez González, Godofredo García Salgado, Héctor Juárez, Enrique Rosendo, Tomás Díaz, Mauricio Pacio, Crisóforo Morales, Fabiola G. Nieto C. EL SILICIO POROSO. Investigadores de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Disponible en: <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=107>

Fecha de consulta: 02/03/2022

[2] Keyence Corporation. PRINCIPIOS DEL LÁSER. Disponible en:

<https://www.keyence.com.mx/ss/products/marketing/lasermarker/knowledge/principle.jsp>

Fecha de consulta: 11/02/2022

[3] Salvador Coll Arnau, Álvaro Tormos Ferrando, Roberto Capilla Lladró. SENSORES ÓPTICOS. Universitat Politècnica de València. Temario de 2021 de la asignatura Sensores e Instrumentación Virtual.

Fecha de consulta: 10/05/2022

[4] Arthur Pini. THE BASICS OF PHOTODIODES AND PHOTOTRANSISTORS AND HOW TO APPLY THEM. Editor en Digi-Key Electronics. Disponible en:

<https://www.digkey.com/en/articles/the-basics-of-photodiodes-and-phototransistors-and-how-to-apply-them>

Fecha de consulta: 5/03/2022

[5] Shakoar, A.; Grant, J.; Grande, M.; Cumming, D.R.S. TOWARDS PORTABLE NANOPHOTONIC SENSORS. Sensors 2019, 19,1715. Disponible en:

<https://doi.org/10.3390/s19071715>

Fecha de consulta: 04/06/2022

[6] UNE EN 60825-1/A2

Fecha de consulta: 07/06/2022

[7] Fotodiodo. Disponible en: <https://tallerelectronica.com/fotodiodo/>

Fecha de consulta: 22/05/2022

[8] OSI Optoelectronics. PHOTODIODE CHARACTERISTICS AND APPLICATIONS. Disponible en:

<http://www.osioptoelectronics.com/application-notes/an-photodiode-parameters-characteristics.pdf>

Fecha de consulta: 22/05/2022

[9] Principios del fotodiodo. Disponible en:

<https://hmong.es/wiki/Photodiode>

Fecha de consulta: 05/03/2022



[10] Luis Orozco. OPTIMIZING PRECISION PHOTODIODE SENSOR CIRCUIT DESIGN. Analog Devices Inc. Disponible en:

<https://www.analog.com/en/technical-articles/optimizing-precision-photodiode-sensor-circuit-design.html>

Fecha de consulta: 27/04/2022

[11] CRC Handbook of Chemistry and Physics, 87th ed Editor-in-Chief: David R. Lide (National Institute of Standards and Technology). CRC Press/Taylor and Francis Group:

Boca Raton. ISBN 0-8493-0487-3.

Fecha de consulta: 10/06/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE SENSORES FOTÓNICOS BASADO EN MEDIDAS DE LA INTENSIDAD DE LA LUZ REFLEJADA

DOCUMENTO N°2: PLANOS

Trabajo final de grado
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: Sánchez Ribes, Sergio

Tutor: Ponce Alcántara, Salvador

Cotutor: García Rupérez, Jaime

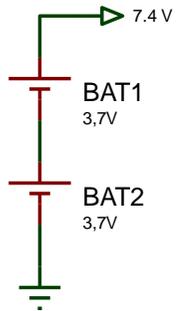
Curso académico: 2021/2022



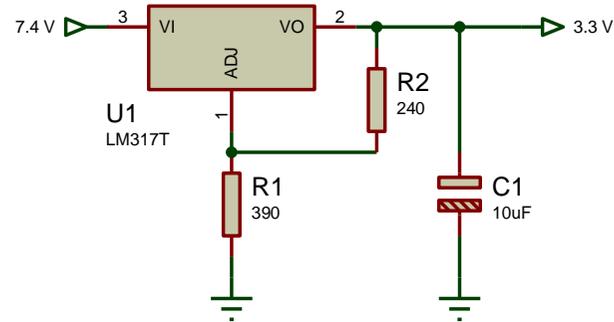
Índice

| | |
|--|----|
| Alimentación del dispositivo..... | 61 |
| Circuitos de acondicionamiento | 62 |
| Microcontrolador y señales de aviso..... | 63 |

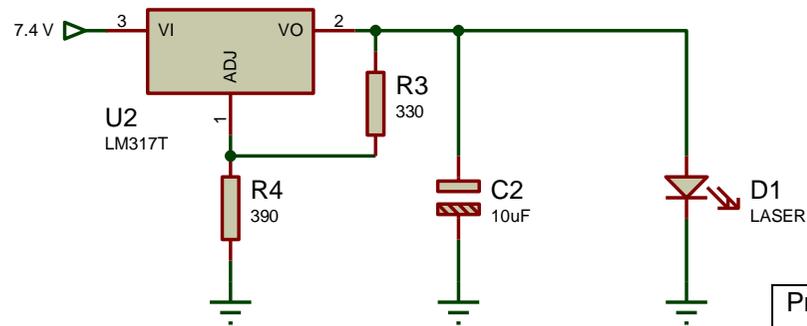
Batería:



Alimentación general:



Alimentación láser:

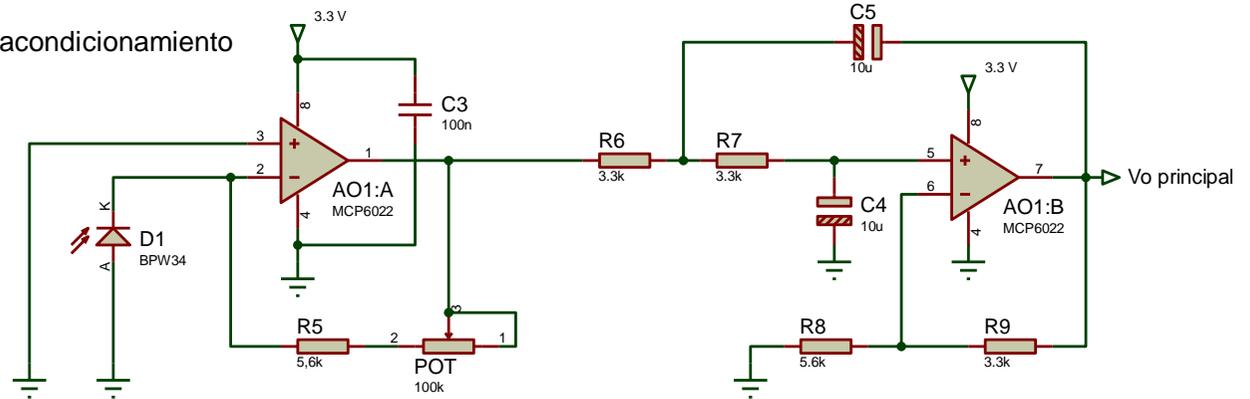


| Nombre | Descripción |
|--------|----------------------------------|
| D1 | Gated Cameo 650nm 1mW, A Lens |
| BAT1 | Batería Li-Po 3,7 V |
| BAT2 | Batería Li-Po 3,7 V |
| U1 | LM317T |
| U2 | LM317T |
| R1 | 390 Ω ± 5%, 1/4 W |
| R2 | 240 Ω ± 5%, 1/4 W |
| R3 | 330 Ω ± 5%, 1/4 W |
| R4 | 390 Ω ± 5%, 1/4 W |
| C1 | Electrolítico, 10 µF ± 20%, 16 V |
| C2 | Electrolítico, 10 µF ± 20%, 16 V |

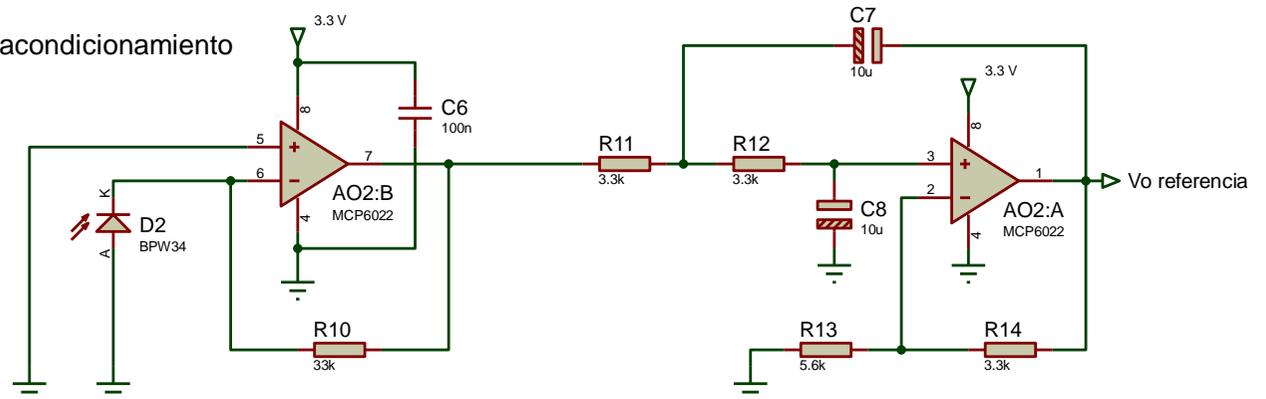
| | | |
|--|---|--|
| Proyecto: Sistema de caracterización de sensores fotónicos basado en medidas de la intensidad de la luz reflejada | | |
| Fecha: 24/06/2022 |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño |
| Autor: Sánchez Ribes, Sergio | Denominación del plano: Alimentación del dispositivo | Nº del plano: 1 |

| Nombre | Descripción |
|--------|---------------------------------|
| D1 | Fotodiodo BPW34 |
| D2 | Fotodiodo BPW34 |
| AO1 | MCP6022 |
| AO2 | MCP6022 |
| POT | 100 kΩ |
| R5 | 5,6 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R6 | 3,3 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R7 | 3,3 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R8 | 5,6 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R9 | 3,3 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R10 | 33 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R11 | 3,3 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R12 | 3,3 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R13 | 5,6 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R14 | 3,3 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| C3 | Cerámico, 100 nF ± 20%, 25 V |
| C4 | Electrolítico, 10μF ± 20%, 16 V |
| C5 | Electrolítico, 10μF ± 20%, 16 V |
| C6 | Cerámico, 100 nF ± 20%, 25 V |
| C7 | Electrolítico, 10μF ± 20%, 16 V |
| C8 | Electrolítico, 10μF ± 20%, 16 V |

Circuito de acondicionamiento principal:



Circuito de acondicionamiento referencia:



Proyecto:

Sistema de caracterización de sensores fotónicos basado en medidas de la intensidad de la luz reflejada

Fecha:

24/06/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Autor:

Sánchez Ribes, Sergio

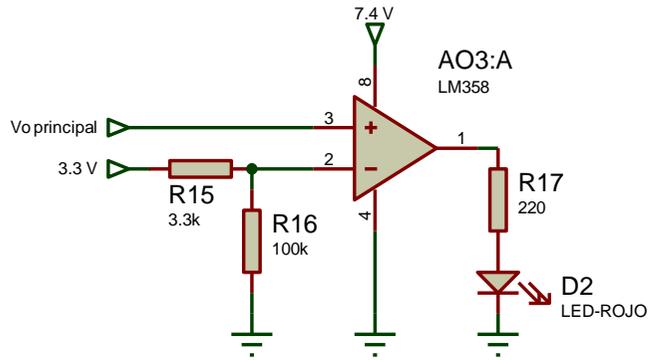
Denominación del plano:

Circuitos de acondicionamiento

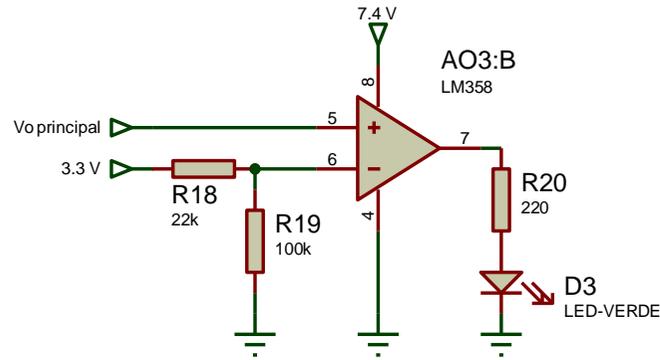
Nº del plano:

2

Marcador de saturación:

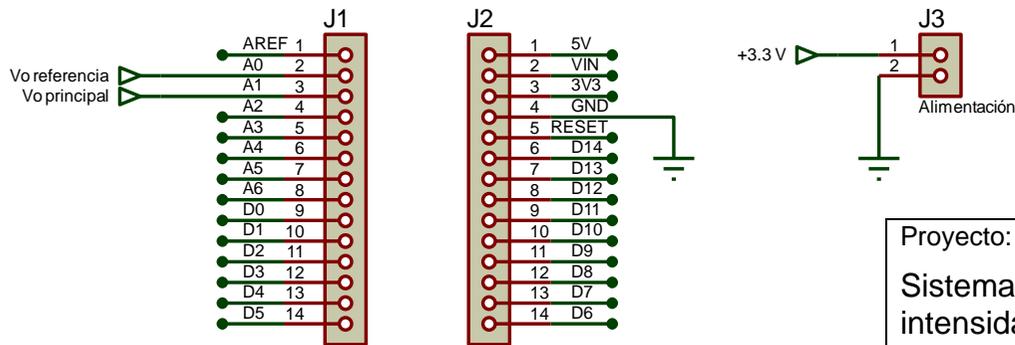


Marcador de ganancia correcta:



| Nombre | Descripción |
|-------------|-----------------------|
| J1, J2 y J3 | Arduino MKR WIFI 1010 |
| AO3 | LM358 |
| D2 | Led rojo |
| D3 | Led verde |
| R15 | 3,3 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R16 | 100 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R17 | 220 Ω ± 5%, 1/4 W |
| R18 | 22 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R19 | 100 kΩ ± 5%, 1/4 W |
| R20 | 220 Ω ± 5%, 1/4 W |

Arduino MKR WIFI 1010:



Proyecto:

Sistema de caracterización de sensores fotónicos basado en medidas de la intensidad de la luz reflejada

Fecha:

24/06/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Autor:

Sánchez Ribes, Sergio

Denominación del plano:

Microcontrolador y señales de aviso

Nº del plano:

3



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE SENSORES FOTÓNICOS BASADO EN MEDIDAS DE LA INTENSIDAD DE LA LUZ REFLEJADA

DOCUMENTO N°3: PLIEGO DE CONDICIONES

Trabajo final de grado
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: Sánchez Ribes, Sergio

Tutor: Ponce Alcántara, Salvador

Cotutor: García Rupérez, Jaime

Curso académico: 2021/2022



Índice

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Condiciones generales..... | 67 |
| 1.1 | Vigencia..... | 67 |
| 1.2 | Descripción..... | 67 |
| 1.3 | Pliegos oficiales..... | 67 |
| 1.4 | Modificaciones..... | 67 |
| 1.5 | Dirección e inspección..... | 67 |
| 2 | Condiciones facultativas..... | 68 |
| 3 | Condiciones de los materiales..... | 68 |
| 3.1 | Descripción..... | 68 |
| 3.1.1 | Láser | 68 |
| 3.1.2 | Divisor de haz..... | 68 |
| 3.1.3 | Fotodiodo | 68 |
| 3.1.4 | Resistencias | 68 |
| 3.1.5 | Condensadores | 69 |
| 3.1.6 | Amplificadores operacionales | 69 |
| 3.1.7 | Microcontrolador..... | 69 |
| 3.1.8 | Reguladores de tensión..... | 69 |
| 3.1.9 | Batería..... | 69 |
| 3.2 | Controles de calidad | 69 |
| 3.2.1 | Láser | 69 |
| 3.2.2 | Resistencias | 70 |
| 3.2.3 | Condensadores | 70 |
| 3.2.4 | Amplificadores operacionales | 70 |
| 3.2.5 | Microcontrolador..... | 70 |
| 3.2.6 | Reguladores de tensión..... | 70 |
| 3.2.7 | Batería..... | 70 |
| 4 | Condiciones de la ejecución..... | 70 |
| 4.1 | Descripción..... | 70 |
| 4.2 | Controles de calidad | 71 |
| 5 | Pruebas y ajustes finales o de servicio..... | 71 |



1 Condiciones generales

1.1 Vigencia

El presente pliego de condiciones técnicas tiene carácter de obligado cumplimiento una vez sellado y legalizado. Estará en vigor durante la producción de dispositivo electrónico. En caso de posibles discrepancias entre los distintos documentos que conforman el proyecto, el orden de prioridad es el siguiente:

- 1) Planos
- 2) Pliego de Condiciones
- 3) Presupuesto
- 4) Memoria

1.2 Descripción

El presente proyecto se refiere al diseño de un sistema de caracterización de sensores fotónicos basado en medidas de la intensidad de la luz reflejada. Dicho sistema utiliza un emisor láser y fotodetectores para llevar a cabo su función. La portabilidad y el bajo coste son las principales propiedades que posee.

1.3 Pliegos oficiales

El contratista es responsable, en el aspecto laboral, del cumplimiento del Real Decreto 486/2010, de 23 de abril, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a radiaciones ópticas artificiales. Respecto a la gestión de residuos generados en la fabricación del dispositivo, es de obligado cumplimiento el Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

1.4 Modificaciones

Todas las modificaciones durante la ejecución del proyecto deben ser revisadas y aprobadas por el responsable de la dirección del proyecto.

1.5 Dirección e inspección

El responsable de la dirección del proyecto es el responsable de la correcta fabricación del dispositivo, pudiendo éste delegar en personal a cargo de la ejecución del proyecto.



2 Condiciones facultativas

El director del proyecto debe revisar el trabajo realizado y los materiales empleados para ello. En caso de que los materiales no sean los indicados, estos deben estar aprobados por el director de proyecto. Todas las modificaciones o aclaraciones del proyecto deben constar en un documento redactado por la parte contratista. La fabricación del dispositivo se hará siguiendo estrictamente el proyecto que ha servido de base a la contratación y a las modificaciones que hayan sido aprobadas. En caso de dudas se formará un comité entre el director de la obra y el proyectista para aclararlas.

3 Condiciones de los materiales

3.1 Descripción

3.1.1 Láser

El módulo láser debe emitir un haz de luz roja entorno a los 650 nm y de una potencia óptica entre 0,6 y 1 mW. El componente debe ser de clase de seguridad 2 o inferior. La tensión de alimentación debe ser de 2,7 V. Sus dimensiones deben ser como máximo 29x14x14 mm y se tiene que poder montar en panel con una rosca de métrica 12. Se recomienda el uso del láser GatedCameo650nm1mW del fabricante Global Laser Ltd (Abertillery, Gales, Reino Unido).

3.1.2 Divisor de haz

Debe tener unas dimensiones de 20x20x1 mm. Debe ser de vidrio, de forma que tenga aproximadamente un 5% de reflectividad, y transmita la mayoría de luz hacia el sensor.

3.1.3 Fotodiodo

El fotodiodo debe ser de tipo PIN, de montaje en orificio pasante con distancia entre pines de 0,2 pulgadas. La sensibilidad a haces de 650 nm debe ser 0,434 A/W o similar. La potencia equivalente *de ruido* debe ser $4 \times 10^{-4} W/\sqrt{Hz}$ o inferior. Se recomienda el uso del fotodiodo BPW34 del fabricante Vishay Intertechnology (Malvern, Pensilvania, Estados Unidos).

3.1.4 Resistencias

El valor óhmico de cada resistencia se indica en los planos. Deben ser de película de carbón, de montaje en orificio pasante con una separación entre sus bornes de 0.4 pulgadas. Deben pertenecer a la serie E24, con una tolerancia del 1%, y en su defecto a una serie con una tolerancia inferior. Su potencia nominal debe ser la indicada en los planos o superior.



3.1.5 Condensadores

El valor de capacitancia de cada componente se indica en los planos. Los electrolíticos deben ser de aluminio. Los condensadores no electrolíticos, deben ser cerámicos, o en su defecto, podrán ser de tántalo. Todos los condensadores deben ser de montaje en orificio pasante, con una distancia entre bornes de 0,1 pulgadas. Sus tolerancias nunca deben superar el 20 % y sus tensiones nominales deben ser las indicadas en los planos o superiores.

3.1.6 Amplificadores operacionales

Los amplificadores operacionales deben ser de montaje en orificio pasante en encapsulado PDIP. La distribución de pines debe ser la misma de los componentes indicados en los planos.

Las características eléctricas de los amplificadores utilizados en el acondicionamiento de la señal deben *rail-to-rail* y llegar a ser alimentados con 3,3 V. La corriente de entrada debe ser menor o igual a 1 pA y el offset debe ser menor o igual a $\pm 250 \mu\text{V}$. A modo de referencia, un amplificador operacional que cumple estas características es el MCP6022 del fabricante Microchip Technology (Chandler, Arizona, Estados Unidos).

Las características de los amplificadores utilizados en los marcadores deben ser como las del LM358 de Texas Instruments (Dallas, Texas, Estados Unidos), o similares. Ha de permitir ser alimentado con 7,4 V.

3.1.7 Microcontrolador

El microcontrolador debe ser el MKR WIFI 1010, o de características similares. Debe poder alimentarse con 3,3 V y tener un rango de 0 V a 3,3 V en las entradas analógicas. Ha de disponer de al menos 3 entradas analógicas, y el ADC del microcontrolador debe ser de 12 bits o más.

3.1.8 Reguladores de tensión

Los reguladores de tensión deben ser LM317 del fabricante STMicroelectronics (Ginebra, Suiza), o de características similares. Debe tener el encapsulado TO-220, con la misma distribución de pines que el componente mencionado. Debe poder suministrar una tensión mínima estable de 2,7 V, y una corriente de 0,1 A o superior.

3.1.9 Batería

Las baterías deben ser Li-Po de 3,7 V. Su capacidad debe ser igual o superior a 1100 mAh.

3.2 Controles de calidad

3.2.1 Láser

Para comprobar el correcto funcionamiento del láser se debe alimentar y ver que a simple vista no varíe la intensidad del haz. Posteriormente al montaje, se comprobará la



señal del fotodiodo de referencia para ver que su salida es adecuada, tal y como se explica en la memoria.

3.2.2 Resistencias

Se deben medir con un óhmetro y comprobar que su valor óhmico es correcto y no sobrepasa los valores de tolerancia.

3.2.3 Condensadores

Se deben medir con un medidor de capacitancia y comprobar que su capacitancia es correcta y no sobrepasa los valores de tolerancia.

3.2.4 Amplificadores operacionales

Se deberá montar un circuito en configuración *buffer* y medir la salida para entradas en continua de 0 a 3 V, la salida debe ser igual a la entrada.

3.2.5 Microcontrolador

Se debe alimentar y comprobar que se enciende el led verde de la placa.

3.2.6 Reguladores de tensión

Se debe montar un circuito como el de los planos y comprobar que la tensión de salida es similar a la detallada en la memoria. No debe variar más de 100 mV.

3.2.7 Batería

Se deben cargar totalmente las baterías y medir su tensión. Posteriormente dejarlas sin conectar unas tres horas y comprobar que su tensión no ha bajado más de 100 mV.

4 Condiciones de la ejecución

4.1 Descripción

Para el montaje de la placa del circuito impreso se deben soldar los componentes electrónicos siguiendo los esquemas de los planos. Comprobar que los condensadores electrolíticos están conectados teniendo en cuenta su polaridad. Para poder substituir los amplificadores operacionales o el microcontrolador, estos deben montarse en zócalos. Debe soldarse de manera que la soldadura aplicada fluya a través del agujero metalizado asegurando una buena conexión. Los terminales de componentes deberán cortarse a una longitud que permita sobresalir un mínimo de 0,8 mm y un máximo de 1,6 mm por el extremo opuesto de la placa.



El montaje de los componentes ópticos se debe realizar en un lugar libre de polvo y suciedad. Para manipular dichos componentes se debe usar guantes de látex, y en caso de ensuciar la superficie útil de alguno de estos componentes se debe limpiar cuidadosamente con alcohol.

4.2 Controles de calidad

Se debe medir con un multímetro que los componentes y las pistas hacen buen contacto y no existe ningún cortocircuito. Antes de montar el dispositivo completo, se debe comprobar que tanto el microcontrolador y el láser se alimentan correctamente una vez se conecten las baterías.

5 Pruebas y ajustes finales o de servicio.

Se debe comprobar que los valores obtenidos al poner de muestra una oblea de silicio porosos son similares a los expuestos en la memoria. Se debe comprobar también que el dispositivo cumple lo establecido en el Real Decreto 186/2016, de 6 de mayo, por el que se regula la compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos y electrónicos.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE SENSORES FOTÓNICOS BASADO EN MEDIDAS DE LA INTENSIDAD DE LA LUZ REFLEJADA

DOCUMENTO Nº4: PRESUPUESTO

Trabajo final de grado
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: Sánchez Ribes, Sergio

Tutor: Ponce Alcántara, Salvador

Cotutor: García Rupérez, Jaime

Curso académico: 2021/2022



| Ref | Ud | Descripción | Precio | Cantidad | Total |
|-----------------|----|--|---------|----------|-----------------|
| Material | | | | | |
| m1 | ud | Láser Gated Cameo 650nm 1mW, A Lens | 78,65 € | 1 | 78,65 € |
| m2 | ud | Fotodiodo PIN BWP34 | 1,28 € | 2 | 2,56 € |
| m3 | ud | Bateria Li-Po 3,7 V 1100 mAh | 8,56 € | 2 | 17,12 € |
| m4 | ud | Regulador de tensión LM317T, 1.5A TO-220 | 0,65 € | 2 | 1,30 € |
| m5 | ud | Arduino MKR WIFI 1010 | 33,00 € | 1 | 33,00 € |
| m6 | ud | Amplificador operacional MCP6022-I/P, PDIP | 2,55 € | 2 | 5,10 € |
| m7 | ud | Amplificador operacional LM358APE4, PDIP | 0,525 € | 1 | 0,525 € |
| m8 | ud | LED Rojo, encapsulado 5 mm (T-1 3/4) | 0,382 € | 1 | 0,382 € |
| m9 | ud | LED Verde, encapsulado 5 mm (T-1 3/4) | 0,521 € | 1 | 0,521 € |
| m10 | ud | Resistencia, serie E24, 1/4 W, 220 Ω | 0,225 € | 2 | 0,450 € |
| m11 | ud | Resistencia, serie E24, 1/4 W, 240 Ω | 0,165 € | 1 | 0,165 € |
| m12 | ud | Resistencia, serie E24, 1/4 W, 330 Ω | 0,211 € | 1 | 0,211 € |
| m13 | ud | Resistencia, serie E24, 1/4 W, 390 Ω | 0,164 € | 2 | 0,328 € |
| m14 | ud | Resistencia, serie E24, 1/4 W, 3,3 kΩ | 0,211 € | 7 | 1,477 € |
| m15 | ud | Resistencia, serie E24, 1/4 W, 5,6 kΩ | 0,155 € | 3 | 0,465 € |
| m16 | ud | Resistencia, serie E24, 1/4 W, 22 kΩ | 0,217 € | 1 | 0,217 € |
| m17 | ud | Resistencia, serie E24, 1/4 W, 33 kΩ | 0,124 € | 1 | 0,124 € |
| m18 | ud | Resistencia, serie E24, 1/4 W, 100 kΩ | 0,233 € | 2 | 0,466 € |
| m19 | ud | Potenciometro de 100kΩ, ±20%, 0.05W | 2,030 € | 1 | 2,030 € |
| m20 | ud | Condensador de aluminio, 10μF, ±20%, 16V | 0,069 € | 6 | 0,414 € |
| m21 | ud | Condensador cerámico, 100 nF ± 20%, 25 V | 0,094 € | 2 | 0,188 € |
| m22 | ud | Circuito impreso | 3,210 € | 1 | 3,210 € |
| Subtotal | | | | | 148,90 € |

| Ref | Descripción | Vida útil (años) | Horas de uso | Factor de amortización | Precio | Total |
|---------------------|------------------------|------------------|--------------|------------------------|------------|-----------------|
| Herramientas | | | | | | |
| e1 | Osciloscopio | 4 | 2 | 0,000260 | 537,86 € | 0,14 € |
| e2 | Fuente de alimentación | 6 | 200 | 0,017361 | 328,61 € | 5,71 € |
| e3 | Ordenador | 4 | 320 | 0,041667 | 604,76 € | 25,20 € |
| e4 | Fuente SMU | 5 | 200 | 0,020833 | 8.240,10 € | 171,67 € |
| e5 | Espectroscopio | 4 | 5 | 0,000651 | 976,00 € | 0,64 € |
| e6 | Fuente halogena | 6 | 6 | 0,000521 | 693,00 € | 0,36 € |
| Subtotal | | | | | | 203,71 € |

| Ref | Ud | Descripción | Precio | Cantidad | Total |
|---------------------|----|---------------------|---------|----------|-------------------|
| Mano de obra | | | | | |
| h1 | h | Técnico cualificado | 30,00 € | 200 | 6.000,00 € |
| h2 | h | Ayudante | 20,00 € | 100 | 2.000,00 € |
| Subtotal | | | | | 8.000,00 € |



| Ud | Descripción | Porcentaje | Cantidad | Total |
|---|---|------------|------------|--------------------|
| Medios auxiliares | | | | |
| % | Medios auxiliares sobre costes directos | 10% | 8.352,61 € | 835,26 € |
| Total presupuesto de ejecución material | | | | 9.187,87 € |
| 21% IVA | | | | 1.929,45 € |
| TOTAL | | | | 11.117,33 € |