



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO, CARACTERIZACIÓN Y FABRICACIÓN DE  
UN FOTODETECTOR DE ALTA VELOCIDAD Y BAJO  
RUIDO PARA EXPERIMENTOS DE FÍSICA  
CUÁNTICA.

Autor: Miguel Naranjo Ruiz-Socolado

Director: Nathan Schine

Madrid



### Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **Diseño, caracterización y fabricación de un fotodetector de alta velocidad y bajo ruido para experimentos de física cuántica** de la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2025-2026 es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

### Uso de Inteligencia Artificial<sup>1</sup>

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.

He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): *“La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”*. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

La inteligencia artificial ha sido utilizada para la estructuración del documento y para realizar una revisión final del documento tras la revisión final del autor, para verificar que no hay errores en la memoria. **No** ha sido utilizada para el desarrollo técnico del fotodetector ni para la redacción de esta memoria.




Firmado (alumno): Miguel Naranjo Ruiz-Socolado

Fecha: 9/05/2026

<sup>1</sup> Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)

**Autorización para la entrega del Proyecto**

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
	
Fdo: Nathan Schine	Fdo:
Fecha: 9/05/2026	Fecha:



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO, CARACTERIZACIÓN Y FABRICACIÓN DE  
UN FOTODETECTOR DE ALTA VELOCIDAD Y BAJO  
RUIDO PARA EXPERIMENTOS DE FÍSICA  
CUÁNTICA.

Autor: Miguel Naranjo Ruiz-Socolado

Director: Nathan Schine

Madrid



# Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer al director de este trabajo, Nathan Schine. Gracias por darme la oportunidad de poder trabajar en este laboratorio y de hacer este proyecto en el. He aprendido mucho durante el proceso y me ha ayudado en cada paso. También gracias a mis compañeros del laboratorio por ayudarme en todo momento.

También quiero dedicar un agradecimiento especial a mis padres, a mi novia y a mis amigos. Gracias por haberme apoyado tanto durante estos cuatro años de carrera.



# **DISEÑO, CARACTERIZACIÓN Y FABRICACIÓN DE UN FOTODETECTOR DE ALTA VELOCIDAD Y BAJO RUIDO PARA EXPERIMENTOS DE FÍSICA CUÁNTICA.**

Autor: Naranjo Ruiz-Socolado, Miguel.

Director: Schine, Nathan.

Entidad Colaboradora: University of Maryland (EEUU)

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Este proyecto cubre el desarrollo integral de un fotodetector de alta velocidad y bajo ruido logrando más de 300MHz de ancho de banda y  $61,8\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  de NEP para aplicaciones en experimentos universitarios de física cuántica en enfriamiento de átomos. Este fotodetector solventa la necesidad de detectar señales ópticas de baja potencia y con alta velocidad, además logrando una gran reducción de coste del 85% frente a las soluciones comerciales.

**Palabras clave:** Fotodetector, amplificador transimpedancia, ancho de banda

### **1. Introducción**

Este proyecto se sitúa en el contexto del experimento de física cuántica en la Universidad de Maryland centrado en el enfriamiento láser de átomos neutros dirigido por el profesor Nathan Schine. En este experimento precisan de material preciso y estable pero también buscando no tener un coste muy alto.

En los experimentos de enfriamiento de átomos necesitan tener ramas de realimentación que “cierren” lazos de control de la frecuencia y la amplitud de la señal óptica. Estas ramas de realimentación habitualmente implementadas con controles PID requieren sensores que puedan convertir señales ópticas en señales eléctricas con la mayor fidelidad posible.

Las soluciones comerciales disponibles superan los 1000\$ de coste por unidad y presentan el inconveniente de ser "cajas cerradas" con una difícil reparación y sin posibilidad de personalización. Por otro lado, las alternativas existentes de código abierto (*open-source*) carecen de salidas mecánicamente robustas (conectores SMA) y del factor de forma requerido para las monturas ópticas del laboratorio.

### **2. Definición del Proyecto**

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un fotodetector que obtenga un ancho de banda superior a 100 MHz y un nivel de ruido lo suficientemente bajo como para detectar

señales ópticas con una potencia óptica incidente baja llegando a nanovatios y picovatios. A nivel físico y de integración se tienen los siguientes requisitos:

- Diámetro de 1 pulgada (2,54cm).
- Salida SMA.
- Puerto de alimentación compatible con las fuentes Thorlabs RSMV3
- Coste inferior a soluciones comerciales.

### **3. Descripción de la solución**

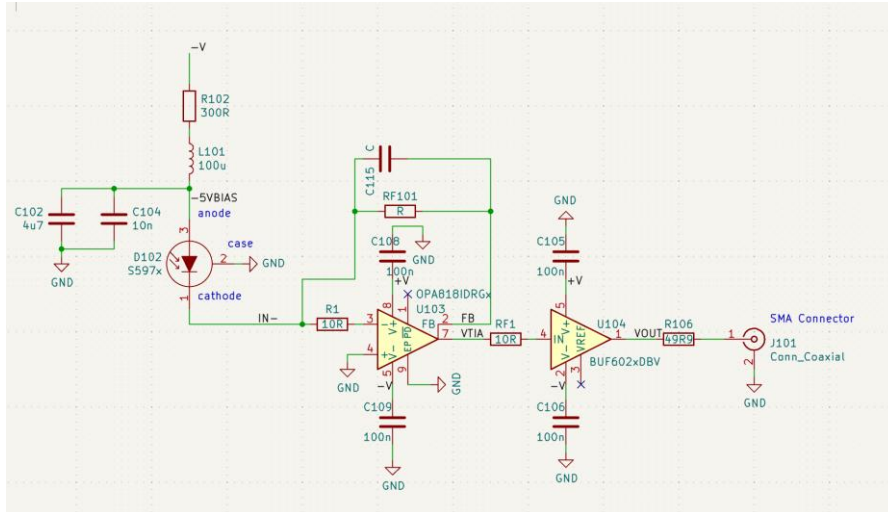
La solución consiste en una placa de 1 pulgada de diámetro en la cual hay contenidos 2 circuitos. Un circuito de alimentación para obtener el voltaje necesario para alimentar los componentes del circuito principal, pero con muy poco ruido y el circuito principal el cual consiste en 3 etapas: la detección de la señal óptica, amplificación transimpedancia y salida.

El circuito de alimentación es necesario porque se necesita una alimentación muy estable y para alimentar el detector elegimos utilizar las fuentes de alimentación LDS12B de Thorlabs ya que el laboratorio ya contaba con varias de ellas previamente. El circuito necesita 5 voltios de alimentación tanto positiva como negativa por tanto el circuito de alimentación consiste de unos reguladores de potencia de poco ruido para reducir de los 12 voltios que alimenta el LDS12B a los 5 voltios que se necesitan para alimentar el circuito.

Para la detección de la señal óptica se utiliza un fotodiodo con un área activa muy pequeña y una capacitancia muy pequeña para poder obtener el mayor ancho de banda posible. El fotodiodo elegido es el FDS015 de Thorlabs ya que cumple con las características deseadas.

Para la etapa de amplificación del circuito principal se utiliza el amplificador operacional OPA818 fabricado por Texas Instruments, este se eligió por su pequeño tamaño, bajo ruido y gran ancho de banda. Este amplificador también contiene una red de realimentación en la cual se eligen los valores de la resistencia de realimentación y del condensador de realimentación para caracterizar la respuesta en frecuencia y la ganancia.

Para la etapa de salida se utiliza un buffer de salida BUF602 de Texas instruments, con una pista de impedancia controlada de  $50\Omega$  para la salida SMA. Con esto se asegura de que si el cable conectado a la salida de nuestro circuito fuera demasiado largo no tengamos pérdidas por carga capacitiva.

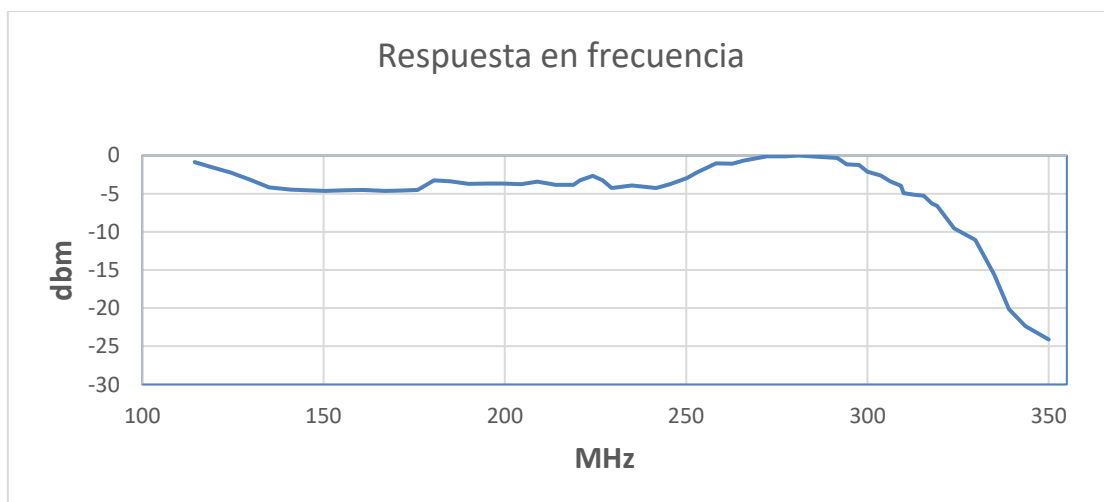


*Ilustración 1 – Esquemático del circuito principal.*

En la ilustración 1 se puede observar el esquemático final del circuito principal con sus diferentes etapas mencionadas anteriormente.

#### 4. Resultados

En cuanto a las características finales del sensor se ha obtenido un ancho de banda superior al deseado, teniendo un ancho de banda final de 300 MHz como se puede ver en la ilustración 2 por tanto, se ha superado con creces el requisito inicial de superar los 100 MHz de ancho de banda. En cuanto al ruido se ha obtenido unos valores de ruido muy bajos, obteniendo una potencia mínima detectable de  $61,8 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  lo cual es muy similar a detectores con características similares comercializados por grandes fabricantes como Thorlabs que es la referencia del mercado.



*Ilustración 2 – Caracterización de la respuesta en frecuencia.*

Como resultados hemos obtenido un sensor que cumple con las características deseadas inicialmente. Se ha conseguido un ahorro de costes significativo ya que el coste final por unidad es de unos 155\$ lo cual puede significar un ahorro de hasta 845\$ por unidad frente a las soluciones comerciales que pueden tener un coste de 500\$ a 1000\$.

Finalmente, tras ver que el detector cumplía con todas las características deseadas se procedió a la fabricación de 10 unidades. Además, para garantizar que si en el futuro el laboratorio necesitara más sensores se ha elaborado una guía para que cualquier persona del laboratorio pueda replicar este sensor.

## **5. Conclusiones**

El Proyecto cumple con los objetivos iniciales tanto en las características del sensor como en los requisitos económicos. Se ha desarrollado un sensor que cumple con las características iniciales deseadas y se ha conseguido un gran ahorro de costes frente a comprar modelos comerciales.

# DESIGN CHARACTERIZATION AND FABRICATION OF A HIGH-SPEED LOW NOISE PHOTODETECTOR FOR QUANTUM PHYSICS EXPERIMENTS

**Author: Naranjo Ruiz-Socolado, Miguel.**

Supervisor: Schine, Nathan.

Collaborating Entity: University of Maryland

## ABSTRACT

This project covers the comprehensive development of a high-speed, low-noise photodetector, achieving a bandwidth of over 300 MHz and an NEP of  $61 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  for applications in university quantum physics experiments involving atom cooling. This photodetector solves the need to detect low-power optical signals at high speeds, while also achieving a significant cost reduction of 85% compared to commercial solutions.

**Keywords:** Photodetector, transimpedance amplifier, bandwidth.

## 1. Introduction

This project is situated within the context of the quantum physics experiment at the University of Maryland focused on the laser cooling of neutral atoms, directed by Professor Nathan Schine. This experiment requires precise and stable equipment but also seeks to avoid excessively high costs.

Atom cooling experiments require feedback loops to "close" control loops for the frequency and amplitude of the optical signal. These feedback loops, typically implemented with PID controllers, require sensors capable of converting optical signals into electrical signals with the highest possible fidelity.

Available commercial solutions exceed a cost of \$1000 per unit and present the drawback of being "closed boxes" that are difficult to repair and lack customization options. On the other hand, existing open-source alternatives lack mechanically robust output (SMA connectors) and the form factor required for the laboratory's optical mounts.

## 2. Project definition

The main objective of this project is to develop a photodetector that achieves a bandwidth greater than 100 MHz and a noise level low enough to detect optical signals with low incident

optical power, down to nanowatts and picowatts. At the physical and integration level, the following requirements must be met:

- 1-inch (2.54 cm) diameter.
- SMA output.
- Power port compatible with Thorlabs RSMV3 power supplies.
- Lower cost than commercial solutions.

### **3. Description of the solution**

The solution consists of a 1-inch diameter board containing two circuits: a power supply circuit to obtain the necessary voltage to power the main circuit components with very low noise, and the main circuit itself, which consists of 3 stages: optical signal detection, transimpedance amplification, and output.

The power supply circuit is necessary because a highly stable power source is required. To power the detector, we chose to use Thorlabs LDS12B power supplies, as the laboratory already had several of them. The circuit requires both a positive and negative 5-volt supply; therefore, the power circuit utilizes low-noise power regulators to step down the 12 volts supplied by the LDS12B to the 5 volts needed for the circuit.

For the optical signal detection, a photodiode with a very small active area and very low capacitance is used to achieve the highest possible bandwidth. The chosen photodiode is the Thorlabs FDS015, as it meets the desired characteristics.

For the amplification stage of the main circuit, the OPA818 operational amplifier manufactured by Texas Instruments is used. This was chosen for its small footprint, low noise, and high bandwidth. This amplifier also contains a feedback network where the values of the feedback resistor and feedback capacitor are selected to characterize the frequency response and gain.

For the output stage, a BUF602 output buffer from Texas Instruments is used, featuring a  $50\Omega$  impedance-controlled track for the SMA output. This ensures that if the cable connected to our circuit's output is too long, we will not experience losses due to capacitive loading.

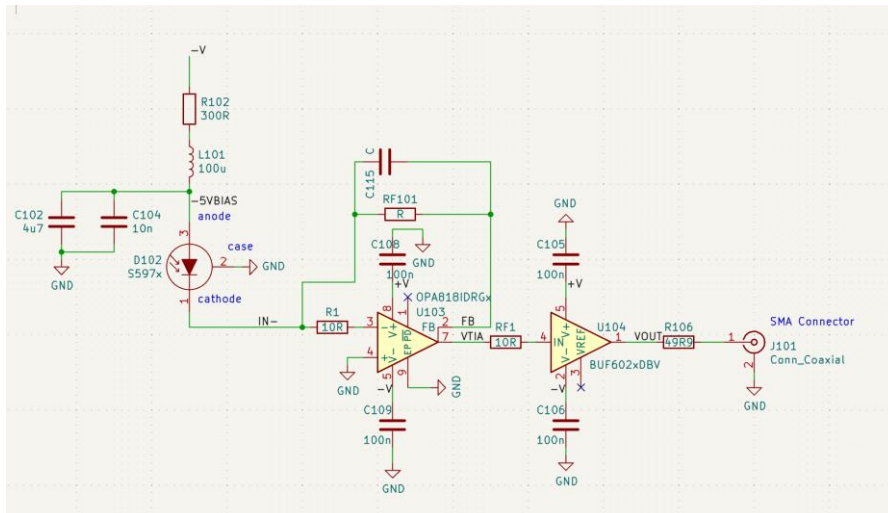


Figure 1- Main circuit schematic.

Figure 1 shows the final schematic of the main circuit with the different stages mentioned above.

#### 4. Resultados

Regarding the sensor's final characteristics, a bandwidth higher than desired has been achieved, reaching a final bandwidth of 300 MHz as can be seen in Figure 2. Therefore, the initial requirement of exceeding a 100 MHz bandwidth has been far surpassed. In terms of noise, very low values have been obtained, achieving a minimum detectable power of  $61,8 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ . This is highly comparable to detectors with similar characteristics sold by major manufacturers like Thorlabs, which serves as the market reference.

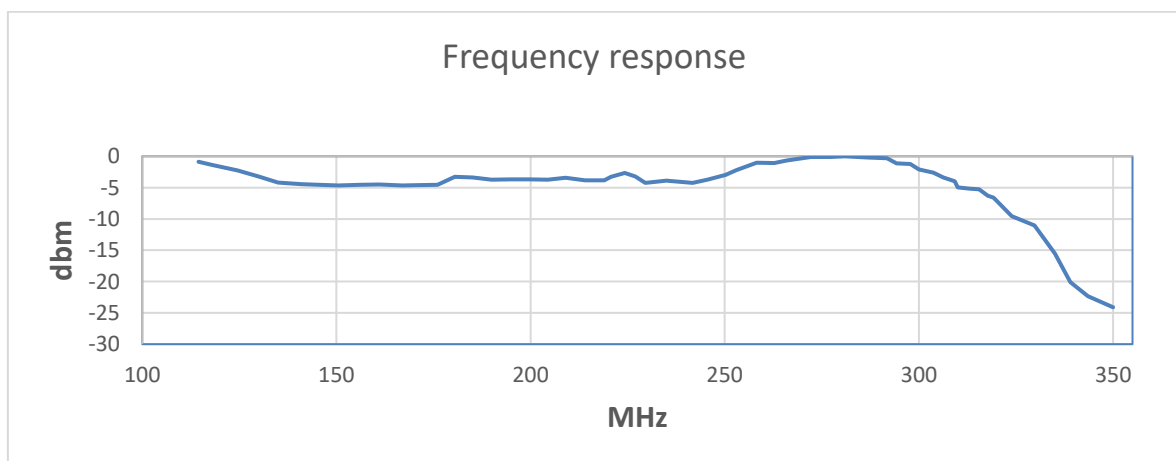


Figure 2 – Frequency response

As a result, we have obtained a sensor that meets all the initially desired characteristics. Significant cost savings have been achieved, as the final cost per unit is about \$155. This

can represent savings of up to \$845 per unit compared to commercial solutions, which can cost anywhere from \$500 to \$1000.

Finally, after verifying that the detector met all the required characteristics, 10 units were manufactured. Furthermore, to ensure the laboratory can acquire more sensors in the future if needed, a guide has been created so that anyone in the lab can replicate this device.

## **5. Conclusions**

The project successfully meets the initial objectives regarding both the sensor's technical characteristics and the economic requirements. A sensor has been developed that fulfills the initial design goals, and a substantial cost reduction has been achieved compared to purchasing commercial models.



## Índice de la memoria

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>6</b>
1.1 Contexto del proyecto .....	6
1.2 Planteamiento del problema .....	6
1.3 Motivación y justificación del proyecto .....	7
<b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....</b>	<b>8</b>
2.1 Tecnologías ópticas .....	8
2.1.1 Moduladores acusto-ópticos (aom).....	8
2.1.2 Moduladores electro-ópticos(eom).....	8
2.1.3 Cubos divisores de haz .....	9
2.1.4 Divisores de haz polarizadores .....	9
2.1.5 Placas de media onda.....	9
2.2 Herramientas de diseño y simulación.....	10
2.2.1 LTSpice.....	10
2.2.2 KiCad.....	10
2.3 Tecnologías de fabricación y ensamblaje.....	10
2.3.1 Pasta para soldar y dispensador.....	10
2.3.2 Horno de reflujo .....	10
<b>Capítulo 3. Estado de la Cuestión .....</b>	<b>11</b>
3.1 Revisión de soluciones comerciales .....	11
3.2 Revisión de soluciones open-source.....	11
<b>Capítulo 4. Definición del Trabajo .....</b>	<b>13</b>
4.1 Justificación.....	13
4.1.1 Justificación económica y de escalabilidad .....	13
4.1.2 Justificación técnica .....	13
4.2 Objetivos .....	14
4.3 Metodología.....	15
4.4 Planificación.....	16
4.5 Estimación económica.....	16
4.5.1 Presupuesto de ingeniería (Recursos humanos) .....	16

4.5.2	Coste de materiales .....	17
4.5.3	Estimación total de costes .....	18
<b>Capítulo 5. Diseño, Simulación y Ensamblado del prototipo .....</b>		<b>19</b>
5.1	Definición de los requisitos .....	19
5.2	Selección de componentes principales .....	20
5.2.1	Amplificador operacional.....	20
5.2.2	Fotodiodo .....	20
5.2.3	Buffer de salida.....	21
5.2.4	Reguladores de alimentación y conector de alimentación .....	21
5.3	Diseño de los esquemas electrónicos .....	22
5.3.1	Circuito de alimentación .....	22
5.3.2	Circuito principal.....	24
5.4	Simulación en LTSpice .....	27
5.4.1	Modelado del circuito en LTSpice.....	28
5.4.2	Simulación de la respuesta en frecuencia .....	28
5.4.3	Simulación del ruido.....	30
5.5	Diseño de la placa PCB en KiCad.....	32
5.5.1	Consideraciones geométricas y de las dimensiones.....	32
5.5.2	Emplazamiento de componentes.....	32
5.5.3	Verificación de errores.....	33
5.6	Implementación física (Montaje del prototipo).....	34
5.6.1	Pedido de componentes .....	34
5.6.2	Proceso de ensamblaje.....	36
5.6.3	Inspección técnica .....	37
<b>Capítulo 6. Pruebas y Análisis de Resultados .....</b>		<b>38</b>
6.1	Configuración general del entorno de pruebas y pruebas básicas .....	38
6.1.1	Configuración general del entorno de pruebas.....	38
6.1.2	Prueba básica de respuesta del sensor.....	38
6.2	Análisis de la responsividad .....	39
6.2.1	Medida de la responsividad.....	39
6.2.2	Análisis de la medida de la responsividad .....	40
6.3	Caracterización del ancho de banda .....	41

6.3.1 Configuración del set-up de doble paso por AOM.....	41
6.3.2 Medida, ajuste de datos y resultado.....	45
6.3.3 Análisis del resultado de la respuesta en frecuencia.....	48
6.4 Análisis del ruido y de la potencia óptica incidente equivalente al ruido (NEP) .....	48
6.4.1 Medida del suelo de ruido y del NEP.....	48
6.4.2 Análisis del resultado del suelo de ruido y del NEP .....	51
<b>Capítulo 7. Producción en Serie y Balance Económico .....</b>	<b>52</b>
7.1 Proceso de fabricación en serie .....	52
7.2 Balance económico final .....	53
7.2.1 Coste de piezas y materiales.....	54
7.2.2 Coste de recursos humanos (ingeniería y ensamblaje) .....	55
7.2.3 Comparativa con estimación inicial y ahorro conseguido.....	55
7.3 Documentación, replicabilidad y adaptabilidad .....	56
7.3.1 Documentación y replicabilidad .....	56
7.3.2 Adaptabilidad.....	56
<b>Capítulo 8. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</b>	<b>57</b>
8.1 Conclusiones técnicas y cumplimiento de objetivos .....	57
8.2 Impacto económico y transferencia de la tecnología.....	58
8.3 Líneas de trabajo futuro.....	58
<b>Capítulo 9. Bibliografía.....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS .....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO II</b>	<b>63</b>
Guía de uso y replicación en inglés .....	63

## *Índice de figuras*

Ilustración 1 – Esquemático del circuito principal. ....	11
Ilustración 2 – Caracterización de la respuesta en frecuencia. ....	11
Ilustración 3 - Cronograma de trabajo .....	16
Ilustración 4 - Responsividad del fotodiodo FDS015 Fuente: Thorlabs (2017) .....	21
Ilustración 5 - Esquema del Circuito de alimentación.....	22
Ilustración 6 - Esquema del circuito principal.....	24
Ilustración 7 - Etapa de detección.....	24
Ilustración 8 - Etapa de amplificación transimpedancia.....	26
Ilustración 9 - Etapa de salida.....	27
Ilustración 10 - Esquema LTSpice .....	28
Ilustración 11 - Respuesta en frecuencia simulación.....	29
Ilustración 12 - Zoom en la simulación de la respuesta en frecuencia .....	29
Ilustración 13 - Simulación del ruido .....	31
Ilustración 14 - Imagen del diseño de la PCB .....	33
Ilustración 15 - Grafico de la responsividad.....	40
Ilustración 16 - Imagen del montaje para respuesta en frecuencia.....	43
Ilustración 17 - Diagrama montaje doble paso por AOM .....	44
Ilustración 18 - Diagrama de bode respuesta en frecuencia .....	47
Ilustración 19 - Densidad espectral del ruido .....	49
Ilustración 20 – NEP .....	50

## *Índice de tablas*

Tabla 1 - Coste estimado de recursos humanos.....	17
Tabla 2 - Estimación de costes de material .....	17
Tabla 3 - Componentes por sensor .....	36
Tabla 4 - Coste de materiales .....	54

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

### *1.1 CONTEXTO DEL PROYECTO*

Este trabajo de fin de grado se sitúa en un contexto de investigaciones desarrolladas en un laboratorio de la Universidad de Maryland (UMD), dirigido por el profesor Nathan Schine. Este laboratorio es un laboratorio de física cuántica centrado en la investigación en el enfriamiento láser de átomos neutros concretamente en enfriar iterbio (Yb). En este contexto de física experimental se requiere una infraestructura óptica robusta, estable y con una velocidad de respuesta muy alta.

Estos experimentos con átomos fríos requieren de tener la capacidad técnica de poder “cerrar” lazos de control de la frecuencia y de la amplitud de los láseres utilizados para enfriar átomos. Para esto se requiere establecer una red de realimentación precisa y rápida controlada por controladores PID en su mayoría. Para esto además del controlador se necesita un sensor que sea capaz de convertir una señal óptica en una señal eléctrica, siendo capaz de detectar señales ópticas muy pequeñas y teniendo una muy alta velocidad.

### *1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA*

El problema que aborda este proyecto es la necesidad de detectar señales ópticas muy débiles comprendidas entre nanovatios o hasta picovatios. Esta detección además debe ser muy rápida por ello se necesita un gran ancho de banda. Esto impone 2 necesidades principales:

- **Elevado ancho de banda (superior a 100 MHz):** Es necesario que el tiempo de respuesta del sensor sea muy bajo y también es necesario detectar señales de alta frecuencia.
- **Bajo ruido:** Al tener que detectar señales ópticas muy pequeñas se necesita que el ruido introducido por nuestro detector sea el mínimo posible para poder detectar señales pequeñas.

Además de estas 2 necesidades principales hay otras características deseables en un fotodetector para este uso:

- El sensor debe tener 1 pulgada de diámetro y forma circular. Que el sensor tenga estas dimensiones es muy conveniente ya que se podría situar en los soportes que tienen los laboratorios para las lentes de 1 pulgada y de esta forma el sensor es mucho más fácil de alinear.
- Salida SMA, es un estándar dentro de los cables que se usan en el laboratorio por tanto es un requisito importante que el puerto de salida sea SMA.
- Bajo coste, debido a que se necesitaran decenas de sensores se tiene que intentar mantener el coste lo más bajo posible.

### ***1.3 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO***

El diseño de fotodetectores es un campo maduro en la ingeniería y ya existen muchos de ellos que buscan ese equilibrio entre alta velocidad y bajo ruido. Sin embargo, no se ha encontrado ninguna solución que satisfaga las necesidades del laboratorio. Por esto se justifica el desarrollo de un sensor personalizado que supere las limitaciones que tienen otros sensores comercializados en este campo. Este documento detalla todo el proceso de desarrollo de este sensor personalizado para obtener todas las características deseadas.

Este proyecto se justifica por la falta de soluciones de sensores que cumplan con las características deseadas y mantengan un bajo coste.

## **Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS**

En este capítulo se exponen las herramientas y las tecnologías utilizadas en el desarrollo del proyecto. Se describen algunas herramientas de modulación óptica, software de diseño y simulación y herramientas para la fabricación y el montaje de los detectores.

### **2.1 TECNOLOGÍAS ÓPTICAS**

Para la manipulación de láseres se ha necesitado principalmente 2 dispositivos específicos aparte de elementos genéricos como espejos o lentes.

#### **2.1.1 MODULADORES ACUSTO-ÓPTICOS (AOM)**

Principio Físico: "La difracción acusto-óptica se basa en la interacción de la luz con ondas sonoras en un medio material. Una onda acústica viajera actúa como una rejilla de difracción de fase, cuya periodicidad es igual a la longitud de onda acústica. En el régimen de Bragg, la luz incidente se difracta principalmente en un solo orden cuando el ángulo de incidencia satisface la condición de Bragg" (*Acousto-optic Diffraction*, s. f.).

Estos AOM se utilizan principalmente para actuar como un actuador de alta velocidad sobre el haz del láser.

#### **2.1.2 MODULADORES ELECTRO-ÓPTICOS (EOM)**

Principio Físico: "El efecto electroóptico lineal, o efecto Pockels, consiste en el cambio del índice de refracción de un medio proporcionalmente a la magnitud de un campo eléctrico aplicado. En materiales no centro simétricos, la aplicación de una tensión eléctrica induce una birrefringencia que altera la fase de la onda óptica" (Paschotta, 2005).

La finalidad de los EOM es la modulación de la fase de la luz en velocidades que superen a las que pueden manejar los AOM.

### **2.1.3 CUBOS DIVISORES DE HAZ**

"Un divisor de haz cúbico es, esencialmente, un dispositivo óptico que divide un haz de luz incidente en dos secciones. Un divisor de haz cúbico típico consta de dos prismas con caras perpendiculares unidas por sus hipotenusas. Se aplica un recubrimiento dieléctrico especial a una de estas superficies, lo que influye en el funcionamiento general del dispositivo. Este recubrimiento está diseñado para reflejar un cierto porcentaje de la luz incidente, permitiendo el paso del resto y dividiendo así el haz de luz." (Noy, 2023).

### **2.1.4 DIVISORES DE HAZ POLARIZADORES**

"Los divisores de haz polarizadores están diseñados para dividir la luz en haces reflejados con polarización S y transmitidos con polarización P. Se pueden usar para dividir la luz no polarizada en una proporción de 50/50, o para aplicaciones de separación de polarización, como el aislamiento óptico" (Edmund optics, 2026).

### **2.1.5 PLACAS DE MEDIA ONDA**

"Una placa de media onda es un retardador óptico fabricado con material birrefringente que introduce una diferencia de fase de  $\pi$  (o medio ciclo) entre las componentes del campo eléctrico. Al orientar el eje óptico de la placa con respecto a la polarización lineal incidente, se logra rotar el plano de polarización en un ángulo igual al doble del ángulo entre la polarización inicial y el eje de la placa, permitiendo un control continuo de la potencia en combinación con un polarizador" (Edmund optics, 2026).

## **2.2 HERRAMIENTAS DE DISEÑO Y SIMULACIÓN**

### **2.2.1 LTSPICE**

LTSpice es un software de simulación de circuitos de alto rendimiento la cual permite hacer análisis en el tiempo y en frecuencia precisos que pueden ayudar a predecir como se comportará el circuito tanto en la respuesta en frecuencia como en ruido y sensibilidad.

### **2.2.2 KICAD**

KiCad es una herramienta software open-source para la creación de diagramas electrónicos y diseño de placas de circuito impreso (PCB). (*KICAD | 5.1 | Español | Documentation | KICAD*, s. f.)

## **2.3 TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE**

### **2.3.1 PASTA PARA SOLDAR Y DISPENSADOR**

La pasta para soldar es una pasta utilizada para soldar en estas placas tan pequeñas, es dispensada por una máquina de aire comprimido que empuja un émbolo y sale por una jeringuilla con una punta extremadamente fina. Esta pasta está compuesta por estaño y flux.

### **2.3.2 HORNO DE REFLUJO**

El horno de reflujo es un horno en el cual se mete la placa con la pasta para soldar y los componentes colocados en sus correspondientes sitios y este horno sigue un proceso de precalentado, activación y reflujo para soldar todos los componentes al mismo tiempo y de una mejor manera.

## Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El diseño de amplificadores para fotodiodos es un campo maduro en la ingeniería electrónica, sin embargo, la intersección de alta velocidad, bajo ruido y bajo coste presenta desafíos específicos que las soluciones actuales no resuelven simultáneamente.

### 3.1 REVISIÓN DE SOLUCIONES COMERCIALES

El mercado de la optoelectrónica de laboratorio está dominado por fabricantes de prestigio como Thorlabs (series PDA y DET) o Newport. Sus fotodetectores amplificados son el estándar en la industria, el laboratorio ya cuenta con algunos de ellos, pero se quiere tener uno personalizado por las siguientes limitaciones:

**Limitaciones Económicas:** El coste unitario de un fotodetector con ancho de banda de 150 MHz y ganancia ajustable (ej. Thorlabs PDA015C) oscila entre los 500\$ y 1.000\$. Dado que un experimento complejo de física atómica requiere monitorizar decenas de haces ópticos simultáneamente, el coste de equipar el laboratorio con estas unidades es demasiado alto para el presupuesto operativo.

**Limitaciones Técnicas:** Estos dispositivos son soluciones cerradas. El usuario no tiene acceso al circuito de compensación ni puede modificar la ganancia de transimpedancia  $R_f$  para optimizarla a una longitud de onda o intensidad específica. Además, su reparación es imposible, un daño común por sobreexposición o descarga electrostática implica el reemplazo total de la unidad.

### 3.2 REVISIÓN DE SOLUCIONES OPEN-SOURCE

En la comunidad científica existe una tendencia creciente hacia el "Open Hardware" para democratizar el acceso a instrumentación de alto nivel. Referentes notables en el campo de los fotodetectores incluyen el proyecto One-Inch Photodetector (Aewallin, s. f.) y los diseños

desarrollados por la Technische Universität Darmstadt (TU Darmstadt), específicamente los repositorios SFH203\_photodetector (Tu-Darmstadt-Apq, s. f.) y PDH\_photodiode (Tu-Darmstadt-Apq, s. f.-a). Estos proyectos ofrecen bases compactas y funcionales que han servido de inspiración inicial.

**Análisis de Deficiencias:** Tras evaluar en profundidad estos diseños frente a los requisitos específicos del proyecto, se identificaron carencias críticas que impiden su implementación directa:

**Gestión de Impedancia y Carga:** Tanto el diseño de AEwalling como las variantes de TU Darmstadt carecen frecuentemente de una etapa de salida (buffer) robusta dedicada a manejar líneas de transmisión largas. La falta de una adaptación estricta a  $50 \Omega$  y de capacidad de corriente para llevar cables coaxiales largos provoca reflexiones de señal y limitaciones de ancho de banda por carga capacitiva, problemas inaceptables para la distribución de señales a través de los racks del laboratorio.

**Fragilidad Mecánica:** La tendencia en estos diseños compactos es el uso de conectores MMCX o pines directos para ahorrar espacio. En un entorno experimental dinámico donde las conexiones se reconfiguran constantemente, estos conectores son propensos a fallos mecánicos y desgaste prematuro, haciendo imperativo el uso de conectores SMA roscados.

**Especificidad Limitante:** Diseños como el *PDH\_photodiode* están optimizados para aplicaciones de bloqueo muy concretas o fotodiodos específicos, limitando su flexibilidad para ser reconfigurados como detectores de propósito general con la ganancia variable y el ruido ultra-bajo que se requiere para cumplir con las características deseadas.

## **Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO**

En este capítulo se detalla el alcance del proyecto, estableciendo las razones de su ejecución, los objetivos técnicos a alcanzar, la metodología a seguir y la planificación temporal y económica necesaria para completarlo.

### **4.1 JUSTIFICACIÓN**

La ejecución de este proyecto responde ante la necesidad del laboratorio dirigido por Nathan Schine de tener en posesión y utilizar fotodetectores con ciertas características. La justificación de este proyecto se basa en 2 pilares principales.

#### **4.1.1 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA Y DE ESCALABILIDAD**

Para el experimento de enfriamiento de átomos se requiere de una gran cantidad de sensores, además de los que ya se tenía en uso se necesitaban unos 10 más y en un futuro es más que probable que se necesiten más.

En el mercado comercial el referente para este tipo de sensores es el fabricante Thorlabs que ofrece modelos como el PDA015C que asciende a cerca de los 1.000\$. Por tanto, si el laboratorio quisiera adquirir 10 detectores de este modelo ascendería a 10.000\$, una cifra exageradamente alta. En cambio, un diseño como el desarrollado en este proyecto reduce el coste de los componentes, sin tener en cuenta la mano de obra a unos 125\$ por unidad por tanto el coste para obtener 10 unidades sería de 1.250\$ lo cual supone un gran ahorro de coste y permite una mayor escalabilidad.

#### **4.1.2 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA**

Además del factor económico, el dispositivo personalizado da unas ventajas que son inalcanzables por dispositivos comerciales. Estos dispositivos comerciales son de “caja cerrada” lo que quiere decir que en caso de fallo de un componente no son fáciles de reparar o habría que reemplazar el dispositivo completo, en cambio con el diseño de PCB abierta

que se ha hecho en este proyecto en caso de fallo de algún componente es posible sustituir solo el componente defectuoso.

También hay que tener en cuenta que al ser fácilmente sustituibles todos los componentes en caso de que un detector en concreto se quisiera priorizar más la ganancia que el ancho de banda sería posible ajustar los valores de la resistencia de realimentación y el condensador de realimentación para variar la respuesta y las características del sensor.

Frente a otros modelos de open-source que también tienen la ventaja de no ser una “caja cerrada” la mayoría de estos no cumplen con los otros 2 requisitos importantes, salida SMA y que tenga un tamaño de 1 pulgada de diámetro y forma circular.

## **4.2 OBJETIVOS**

Se definen los siguientes objetivos principales:

**Modelado y simulación:** Desarrollar y modelar un circuito en LTSpice para ajustar todos los valores de los distintos componentes para obtener la respuesta deseada. Este objetivo busca saber cómo se va a comportar el sensor antes de construirlo.

**Diseño del hardware:** Hacer un BOM (Bill of materials) que consiste en una lista con todos los componentes necesarios y diseñar en KiCad la placa PCB.

**Fabricación de prototipo:** Se fabricará un prototipo para más tarde caracterizarlo y comprobar todas las características.

**Caracterización y validación:** Someter el prototipo a una serie de pruebas distintas para cuantificar sus características (ancho de banda, ruido).

**Producción en serie:** Fabricar y verificar un lote de 10 sensores pasando un control de calidad a todos ellos para que los investigadores del laboratorio los tengan a su disposición.

### **4.3 METODOLOGÍA**

El camino a seguir para conseguir los objetivos previamente mencionados está compuesto por las siguientes fases:

Fase de investigación: primero se investigarán las opciones similares al objetivo que ya existen en el mercado y se investigará que componentes conviene utilizar.

Diseño y simulación: se modelará un circuito con los componentes seleccionados y se simulará en LTSpice hasta que el modelado sea el necesario para obtener la salida que queremos. Después se diseñará la placa PCB en KiCad para conseguir las características deseadas.

Fabricación y montaje: se fabricará un prototipo inicial para hacer pruebas sobre él.

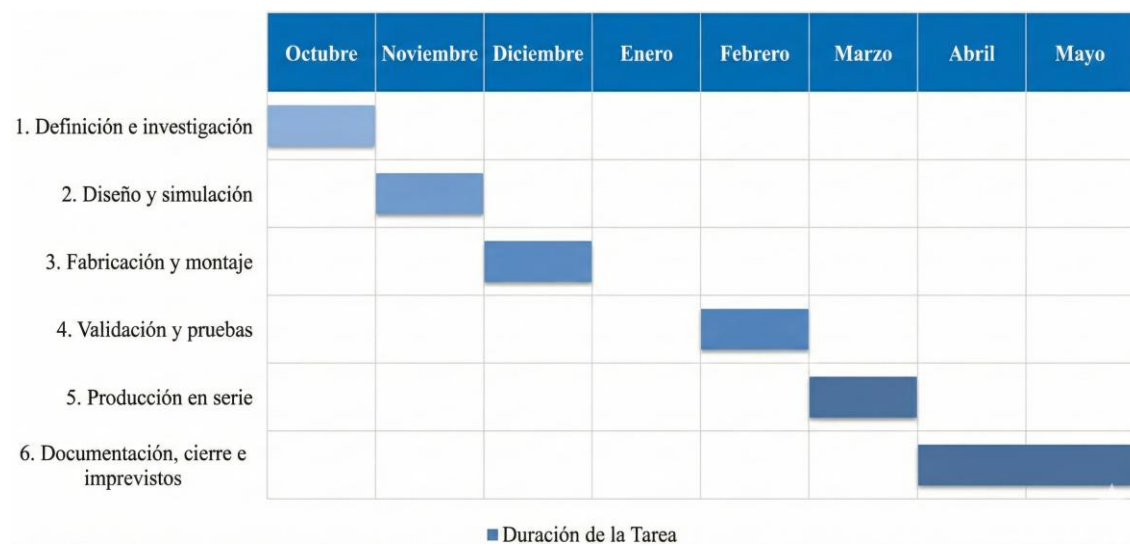
Validación y pruebas: se probará el prototipo fabricado y se caracterizará para ver que realmente tiene las características simuladas.

Producción en serie: se producirán 10 unidades para que se puedan utilizar en el experimento.

Documentación: se redactará esta memoria del proyecto.

## 4.4 PLANIFICACIÓN

La planificación temporal se puede observar en la Ilustración 3 abarca desde octubre hasta mayo con una pausa en enero debido a que el autor de este proyecto no estuvo en la Universidad de Maryland durante el mes de enero.



*Ilustración 3 - Cronograma de trabajo*

## 4.5 ESTIMACIÓN ECONÓMICA

En este apartado se detalla el presupuesto total estimado para la realización de este proyecto. Este presupuesto se divide en 2 partes, coste de recursos humanos y coste de material.

### 4.5.1 PRESUPUESTO DE INGENIERÍA (RECURSOS HUMANOS)

El coste de recursos humanos es el principal del proyecto, este deriva de las horas dedicadas por el autor a este proyecto. Siguiendo el cronograma se estima unas 28 semanas de trabajo y se estima que el autor dedicará unas 10 horas semanales al proyecto. La tarifa por hora que la Universidad de Maryland paga a los estudiantes no graduados es de 15\$/h. El coste total estimado de recursos humanos se puede ver en Tabla 1.

<i>Semanas</i>	<i>Horas por semana</i>	<i>Horas totales</i>	<i>Tarifa por hora</i>	<i>Coste estimado total</i>
28	10	280	15\$	4200\$

*Tabla 1 - Coste estimado de recursos humanos*

#### **4.5.2 COSTE DE MATERIALES**

En esta parte del coste total se estima el coste de adquisición de material para los prototipos, el objetivo es construir 2 prototipos. También se incluye el coste estimado de los componentes para fabricar 10 sensores una vez las características del sensor sean validadas.

Para el material de los prototipos el director recomendó que se comprara el doble de componentes de los necesarios, es decir si se quiere tener 2 prototipos se comprara como si se fueran a fabricar 4 así en caso de dañarlos, tener repuestos.

El coste estimado de componentes para un detector es de 125\$, esto incluye todos los componentes electrónicos y la placa PCB.

	<i>Unidades</i>	<i>Coste unitario</i>	<i>Total</i>
Prototipo	4	125\$	500\$
Producción	10	125\$	1250\$
Total	14	125\$	1750\$

*Tabla 2 - Estimación de costes de material*

Como se puede ver en la Tabla 2 el coste total de los materiales para construir los detectores es de 1750\$.

### **4.5.3 ESTIMACIÓN TOTAL DE COSTES**

Sumando las estimaciones de costes de recursos humanos y materiales obtenidas en los apartados 4.5.1 y 4.5.2 se obtiene un coste total estimado de 5950\$.

Este coste proporciona al laboratorio 12 fotodetectores (2 prototipos y 10 de la producción) y también dota al laboratorio de la capacidad de poder construir más fotodetectores con un coste total de 155\$ por unidad. Este coste total estimado por detector está dividido en 2 partes, coste de materiales que es 125\$ y un coste de ensamblado de 30\$ al estimarse 2 horas de trabajo para el ensamblado de un fotodetector lo cual hace un coste total estimado por detector de 155\$.

Esta estimación de costes se alinea con el objetivo de ahorro de costes de este proyecto ya que el ahorro estimado total, teniendo en cuenta el coste de ingeniería que incluye el diseño y la validación del fotodetector es de unos 6000\$ respecto a obtener detectores comerciales ya que obtener 12 detectores comerciales tendría un coste de unos 12000\$.

Además, una vez asumido el coste de ingeniería, si al finalizar este proyecto el laboratorio necesitara más sensores, su coste unitario será de tan solo 155\$ lo que supone un ahorro de hasta el 85% sobre la compra de modelos comerciales con costes de hasta 1000\$.

Una vez finalizado el proyecto, en la sección 7.2 se analiza el coste total final y se compara con la estimación inicial.

## Capítulo 5. DISEÑO, SIMULACIÓN Y ENSAMBLADO DEL PROTOTIPO

En este capítulo se detalla el proceso de ingeniería que abarca desde la definición de los requisitos y selección de componentes hasta el ensamblado de un prototipo de pruebas.

### 5.1 DEFINICIÓN DE LOS REQUISITOS

La primera fase del diseño es la definición de los requisitos que tiene que cumplir el fotodetector, estos requisitos deben ser muy concretos y son los siguientes:

- **Rápida respuesta:** Se requiere un ancho de banda superior a 100MHz. Este gran ancho de banda es necesario para poder medir altas frecuencias y capturar transitorios rápidos.
- **Bajo ruido y sensibilidad de detección:** Se necesita medir señales con muy poca potencia incluso llegando al rango de picovatios o nanovatios. Para esto es necesario tener unos niveles de ruido extremadamente bajos y una ganancia relativamente alta pero que no comprometa el ancho de banda.
- **Forma y dimensiones:** Se establece como requisito que el detector tenga forma circular y su diámetro sea de 1 pulgada o 2,54 centímetros. Esto se debe a que en el laboratorio tienen a su disposición soportes de 1 pulgada de diámetro para lentes por tanto es muy conveniente que los detectores tengan esta forma y tamaño para poder usar esos soportes de lentes para colocar y alinear los detectores.
- **Salida:** La salida debe ser con un puerto SMA ya que es el más utilizado dentro del laboratorio y aporta robustez al sistema.
- **Alimentación:** El sensor debe estar alimentado por un cable con un conector RSMV3 ya que es un conector compatible con muchas fuentes LDS12B del fabricante Thorlabs de las cuales el laboratorio ya tiene muchas en posesión.

- **Coste:** El coste de los componentes del detector sin tener en cuenta el coste del montaje debe rondar los entre 100\$ y 140\$ para obtener un ahorro significativo sobre los modelos comerciales.

## **5.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES**

Los componentes principales como el amplificador operacional, el fotodiodo, el buffer de salida o los reguladores de alimentación deben ser elegidos previamente a el diseño y la simulación del circuito para diseñar el sensor partiendo de estos componentes principales. La selección de estos componentes se basa en tratar de cumplir con todos los requisitos detallados anteriormente en la sección 5.1.

### **5.2.1 AMPLIFICADOR OPERACIONAL**

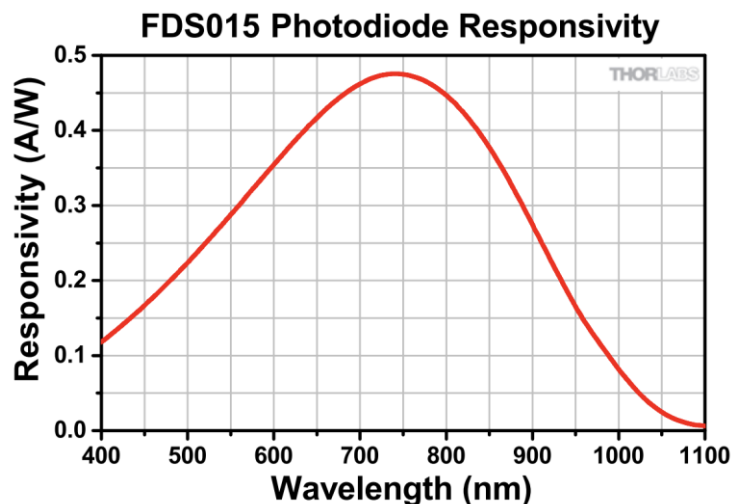
Se ha elegido el OPA818 de Texas instruments. Este componente ha sido elegido porque es un amplificador operacional de muy bajo ruido ( $2\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) y el cual permite tener una ganancia alta manteniendo un gran ancho de banda al tener un producto ganancia-ancho de banda de 2,7GHz. Además es un componente con un coste reducido unos 10\$ y un tamaño muy pequeño.

### **5.2.2 FOTODIODO**

Para el fotodiodo se ha elegido el FDS015 de Thorlabs, este modelo se ha elegido por varias razones:

- **Diodo de silicio:** En el mercado hay 2 materiales distintos con los que se hacen los fotodiodos, los fotodiodos de arseniuro de galio e indio los cuales se utilizan en casos de uso para detectar luz infrarroja y los diodos de silicio, que sirven para el espectro de luz visible que es el tipo de luz utilizado en el laboratorio por tanto había que elegir un fotodiodo de silicio.
- **Baja capacitancia:** Con tan solo 0,65pF de capacitancia es uno de los más bajos del mercado y apenas limitará el ancho de banda.

- **Buena responsividad:** Llegando a 0,5 A/W de responsividad a 750 nm de longitud de onda de la luz incidente tiene una responsividad suficiente para el fotodetector. Esta responsividad depende de la longitud de onda de la luz incidente como se puede observar en la Ilustración 4.



*Ilustración 4 - Responsividad del fotodiodo FDS015 Fuente: Thorlabs (2017)*

### 5.2.3 BUFFER DE SALIDA

Con el propósito de aislar la etapa de amplificación de la salida y de poder mandar la salida por cables largos sin tener limitaciones por la carga capacitiva de estos cables se eligió el buffer de salida BUF602 de Texas instruments. Este buffer tiene un ancho de banda de 1 GHz por tanto no supone ninguna limitación para el circuito.

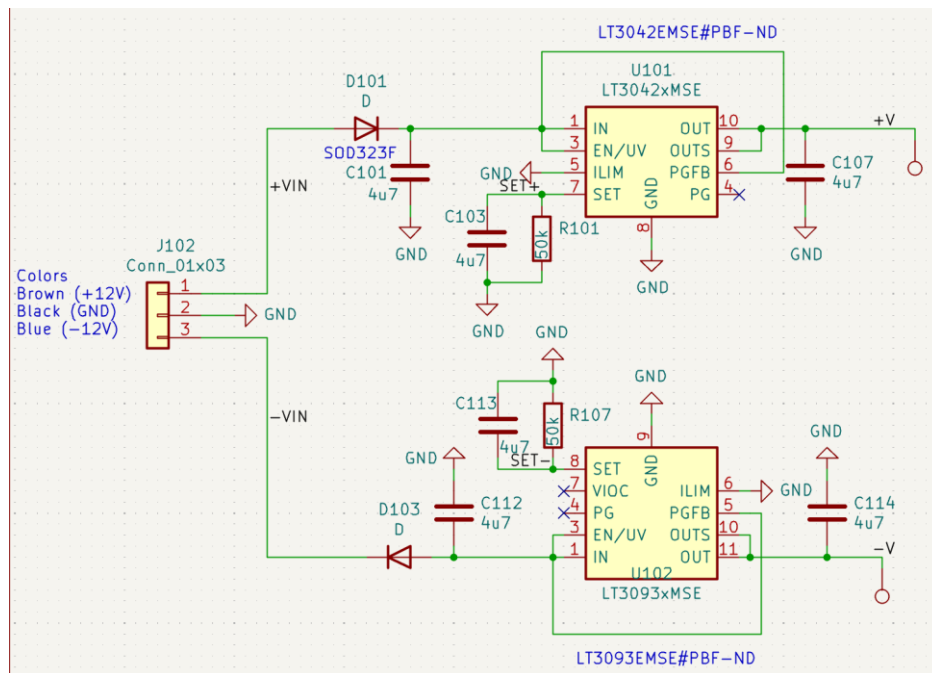
### 5.2.4 REGULADORES DE ALIMENTACIÓN Y CONECTOR DE ALIMENTACIÓN

Para la estabilidad de la alimentación del sensor sin ruido, se eligieron los reguladores LT3042 y LT3093 para las alimentaciones positiva y negativa respectivamente. Para el conector de alimentación se eligió un cable que en un extremo tuviera el conector RSMV3 y en el otro extremo 3 cables para soldar a la placa PCB: +12V, -12V y tierra.

### 5.3 DISEÑO DE LOS ESQUEMAS ELECTRÓNICOS

El diseño del fotodetector se divide en 2 esquemas principales:

#### 5.3.1 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN



*Ilustración 5 - Esquema del Circuito de alimentación*

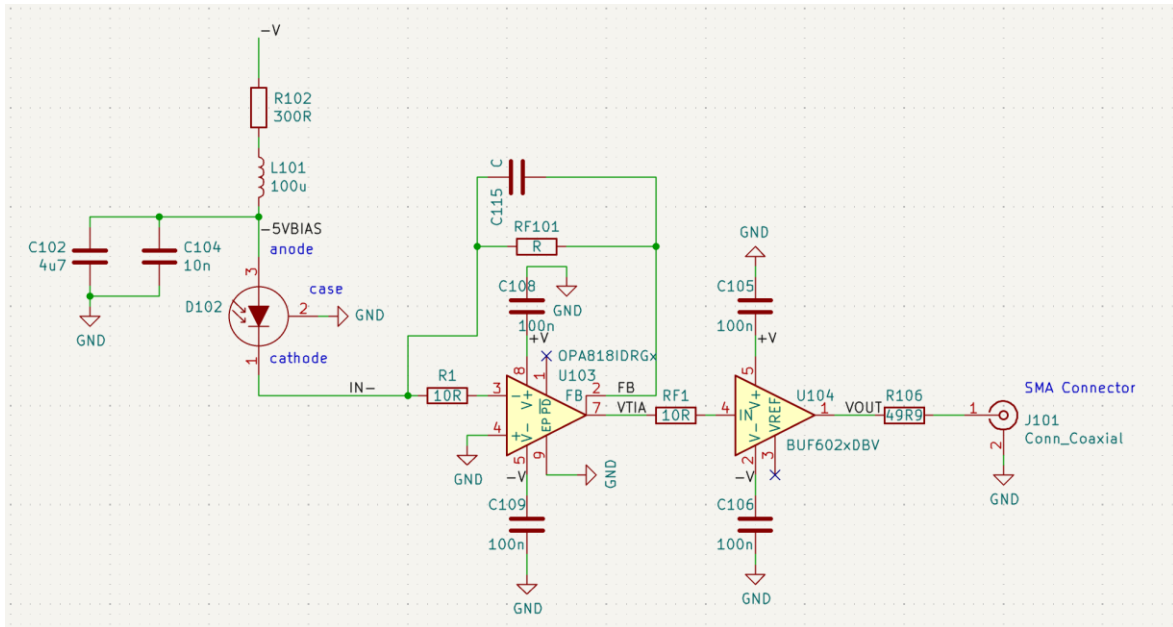
En la Ilustración 5 se observa el esquema del circuito de alimentación, cuyo objetivo es transformar la alimentación externa de  $\pm 12V$  en una alimentación de  $\pm 5V$  que es lo que se necesita en el circuito principal y que esta alimentación tenga el menor ruido posible. Este circuito tiene 5 elementos principales:

- **Reguladores de alimentación:** Estos reguladores utilizan una fuente de corriente precisa que alimenta un seguidor de emisor. Esta arquitectura garantiza mantener unos niveles de ruido en la alimentación extremadamente bajos.
- **Resistencias de Programación (R101 y R107):** Estas resistencias de programación o  $R_{set}$  se utilizan para fijar la tensión de salida de los reguladores de alimentación. Las fuentes de corriente de estos reguladores fijan  $100\mu A$  y se ha elegido como

alimentación del circuito principal  $\pm 5V$  porque el amplificador operacional y el buffer de salida tienen un máximo de alimentación de  $\pm 6V$  y se eligió  $\pm 5V$  para no someterlos a un estrés demasiado alto. Por tanto, para obtener esos  $5V$  con  $100\mu A$  de corriente se necesita una resistencia de  $50k\Omega$  que es el valor elegido para R101 y R107.

- **Entrada de alimentación externa:** Uno de los elementos es la entrada de alimentación externa que aporta una fuente LDS12B de Thorlabs dando  $\pm 12V$
- **Diodos:** El propósito de los 2 diodos en este circuito es proteger a los reguladores de fallos en la fuente ya que, si en algún caso esta fallara o tuviera una polarización errónea, serían los diodos los que se dañarían protegiendo los reguladores.
- **Condensadores de desacoplo:** En este circuito de alimentación se colocaron 6 condensadores de desacoplo, estos cumplen el propósito de dar estabilidad a la alimentación ya que corrigen pequeñas variaciones en la tensión de alimentación para mantener el ruido de alimentación lo más bajo posible. Se eligió  $4,7\mu F$  para tener un equilibrio entre poder guardar una gran carga para mantener el voltaje estable, pero siendo suficientemente pequeños para tenerlos en nuestra placa.

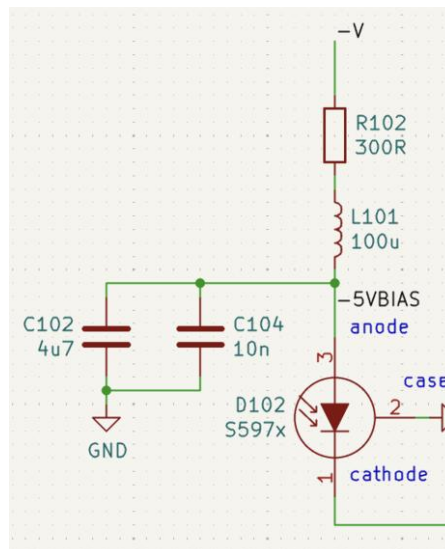
### 5.3.2 CIRCUITO PRINCIPAL



*Ilustración 6 - Esquema del circuito principal*

El circuito principal consta de 3 etapas principales:

#### 5.3.2.1 Etapa de detección

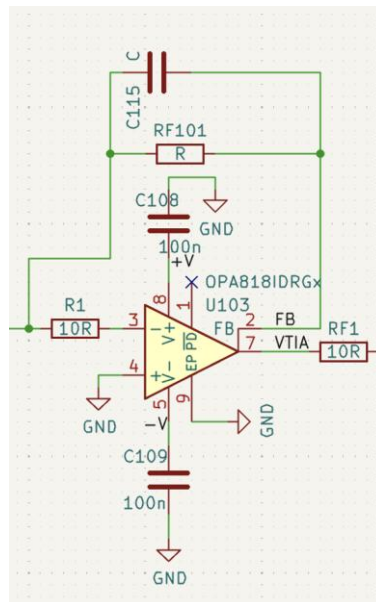


*Ilustración 7 - Etapa de detección*

Esta etapa se encarga de convertir la señal óptica en una señal de corriente. Esto se consigue utilizando el fotodiodo FDS015 que tiene una capacitancia muy pequeña 0,65pF a 5V. Sin embargo, se ha buscado reducir esa capacitancia montado el fotodiodo con una polarización inversa a -5V lo cual nos permite tener la menor capacitancia posible lo reduce la capacitancia de unión lo cual permite tener un menor tiempo de respuesta y un mayor ancho de banda.

Además, se ha montado con una pequeña red de filtrado con un inductor L101 y la resistencia R102, estos componentes se colocan entre el ánodo del diodo y la alimentación de -5V. El inductor como un “bloqueador” del ruido proveniente de la alimentación negativa. La resistencia R102 cumple con 2 funciones, la primera proteger el fotodiodo en caso de una potencia óptica incidente extremadamente alta o un cortocircuito ya que en esos casos esta resistencia actuaría como un limitador de la corriente máxima. La segunda función que cumple la cumple en conjunto con los condensadores C102 y C104 formando un filtro paso bajo para eliminar el ruido en altas frecuencias, los valores de estos condensadores son genéricos, se eligió los valores de 4,7 $\mu$ F y 10nF ya que existen empaquetados en tamaños suficientemente pequeños. La resistencia se eligió 300 $\Omega$  porque con esto se limita la corriente máxima a 15mA lo cual protege nuestro sensor en caso de cortocircuitos o potencias ópticas demasiado altas.

### 5.3.2.2 Etapa de amplificación transimpedancia



*Ilustración 8 - Etapa de amplificación transimpedancia*

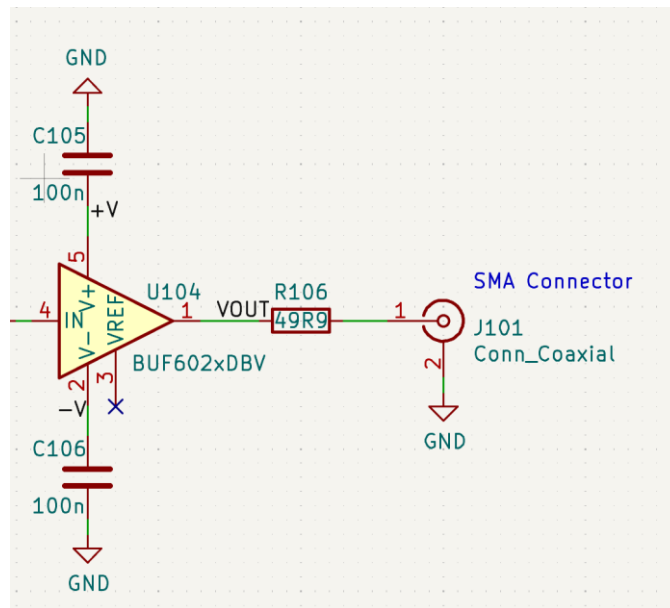
Esta etapa es el núcleo del tratamiento de señal del sensor convirtiendo la corriente generada por la etapa de detección en un voltaje amplificado con el OPA818 ya mencionado en la sección 5.2.1. También se compone por una resistencia RF101 de realimentación y un condensador de realimentación C115.

- **Resistencia de realimentación:** Se eligió  $1,2\text{k}\Omega$  para obtener el mayor ancho de banda teniendo una ganancia de transimpedancia suficientemente alta de  $1200\text{V/A}$  y que con  $0,5\text{A/W}$  de responsividad del fotodiodo nos daría una responsividad respecto de la potencia óptica incidente de  $0,5\text{A/W} \times 1,2\text{k}\Omega = 0,6\text{V/mW}$  con una longitud de onda de  $750\text{nm}$ .
- **Condensador de realimentación:** El valor de este condensador fue elegido durante la simulación, se eligió  $0,75\text{pF}$  porque en la simulación daba un buen equilibrio entre tener un gran ancho de banda, pero sin tener un pico muy alto justo antes de que empiece a caer la ganancia.

Esta etapa consta de condensadores de desacoplo entre la alimentación y tierra para evitar grandes oscilaciones en la alimentación.

Por último, también explicar el propósito de las resistencias R1 y RF1 de  $10\Omega$ , estas 2 resistencias buscan dar estabilidad al circuito aislando las capacitancias del amplificador de las del buffer y del fotodiodo.

### 5.3.2.3 Etapa de salida



*Ilustración 9 - Etapa de salida*

La etapa de salida se asegura de que la señal de salida pueda viajar correctamente a través de largos cables sin problemas.

Se utiliza el buffer de salida ya explicado en la sección 5.2.3, una resistencia de  $50\Omega$  para la adaptación de impedancia y que coincida la impedancia con los cables coaxiales y las entradas de los instrumentos de medida como osciloscopios o analizadores de espectros. Por último un conector SMA.

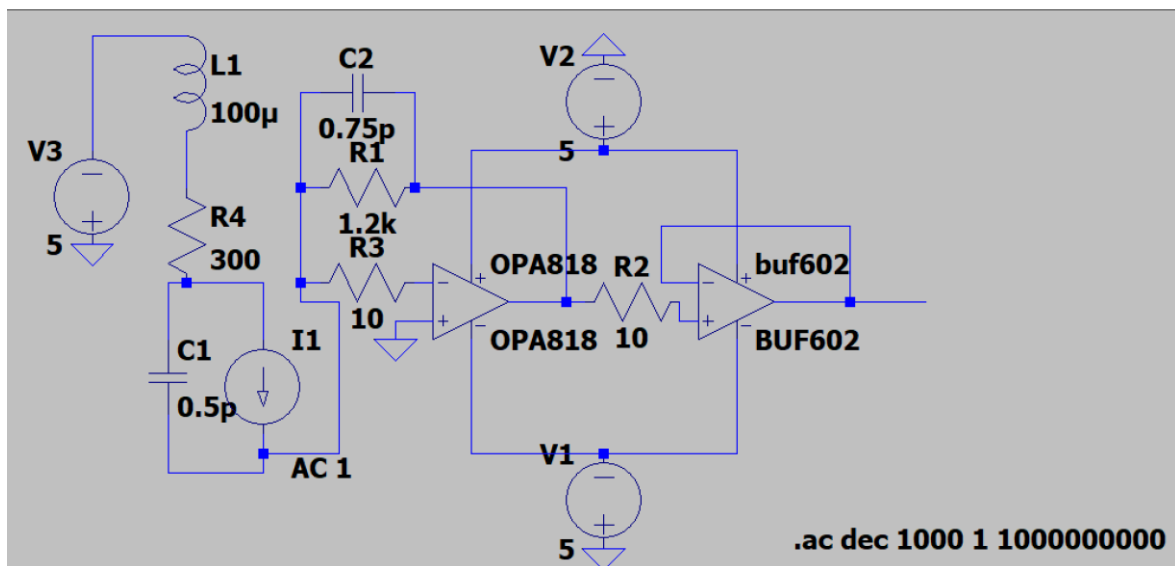
## 5.4 SIMULACIÓN EN LTSPICE

Para validar nuestro diseño antes de diseñar la placa PCB primero se validó la respuesta del circuito con una simulación en LTSpice un software avanzado de simulación de circuitos.

El objetivo principal de esta simulación era comprobar que la respuesta en frecuencia maximizaba el ancho de banda y no tenía picos en ella.

### 5.4.1 MODELADO DEL CIRCUITO EN LTSPICE

El primer paso para simular el circuito en LTSpice es modelar el circuito.



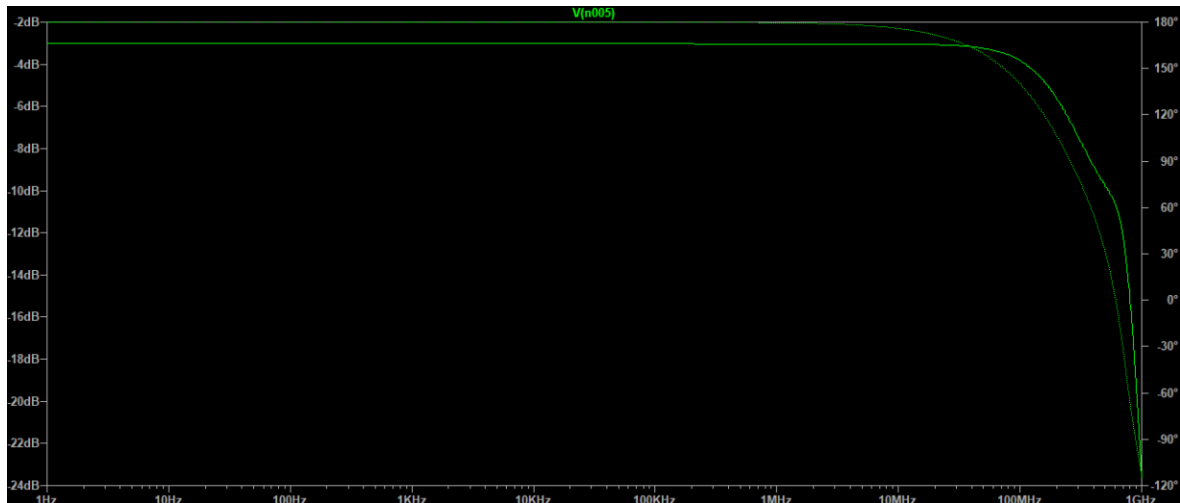
*Ilustración 10 - Esquema LTSpice*

- **Modelado del fotodiodo:** Para el modelado del fotodiodo se usa una fuente de corriente en paralelo con un condensador de 0,5pF.
- **Circuitos integrados:** Para la simulación de circuitos integrados se utiliza unos archivos para simulaciones que los propios fabricantes ofrecen, con ellos se puede simular el comportamiento del amplificador y del buffer con una gran fidelidad a su comportamiento real.
- **Otros componentes:** El resto de los componentes son componentes genéricos por tanto se obtienen de la librería propia de LTSpice.

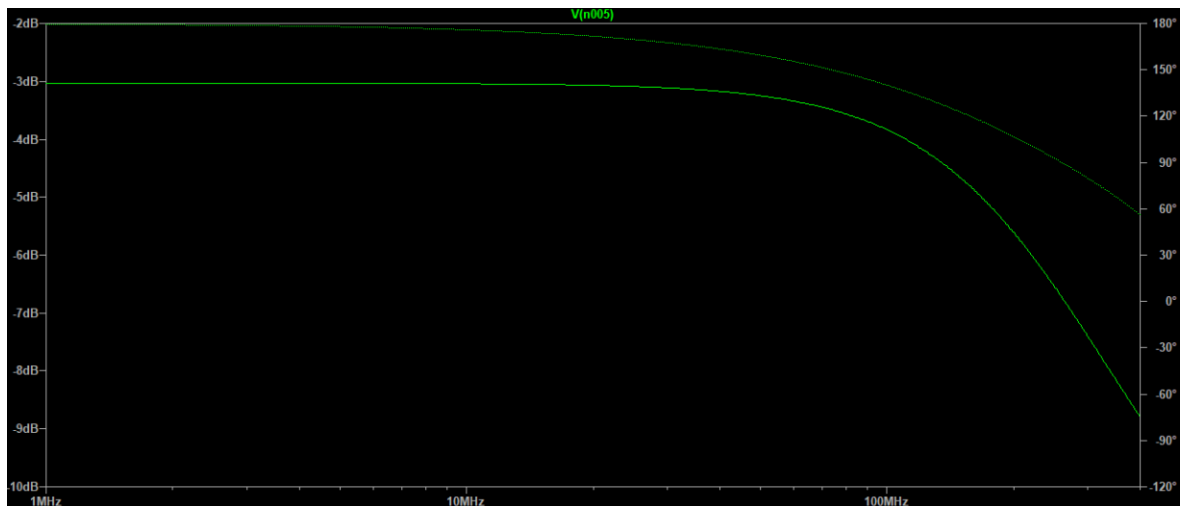
### 5.4.2 SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA

Para la simulación y obtención de la respuesta en frecuencia del circuito se utiliza la función Análisis AC (AC sweep) de LTSpice la que realiza un barrido logarítmico y genera un

diagrama de bode del sistema, donde se puede observar la magnitud y la fase. El resultado de este diagrama de bode se utilizó para ajustar el condensador de realimentación para así obtener una respuesta en frecuencia sin picos.



*Ilustración 11 - Respuesta en frecuencia simulación*



*Ilustración 12 - Zoom en la simulación de la respuesta en frecuencia*

En la Ilustración 11 se puede ver el gráfico completo de la respuesta en frecuencia. Al hacer zoom en la Ilustración 12 se puede observar que el ancho de banda a -3db se encuentra entre 200 y 300 MHz y es una respuesta bastante plana y sin picos lo cual cumple con creces el

requisito de ancho de banda inicial por tanto se puede proceder con el diseño de la placa PCB.

### 5.4.3 SIMULACIÓN DEL RUIDO

Tras la validación de la respuesta en frecuencia, se procede con una simulación del ruido en la salida con LTSpice. Este paso es necesario para asegurar que se cumple con el requisito de poder medir señales ópticas de muy baja potencia.

Para ello se utiliza la simulación .noise, la cual permite calcular la densidad espectral del ruido en función de una fuente de entrada. Este modelo de simulación considera las 2 fuentes principales de ruido:

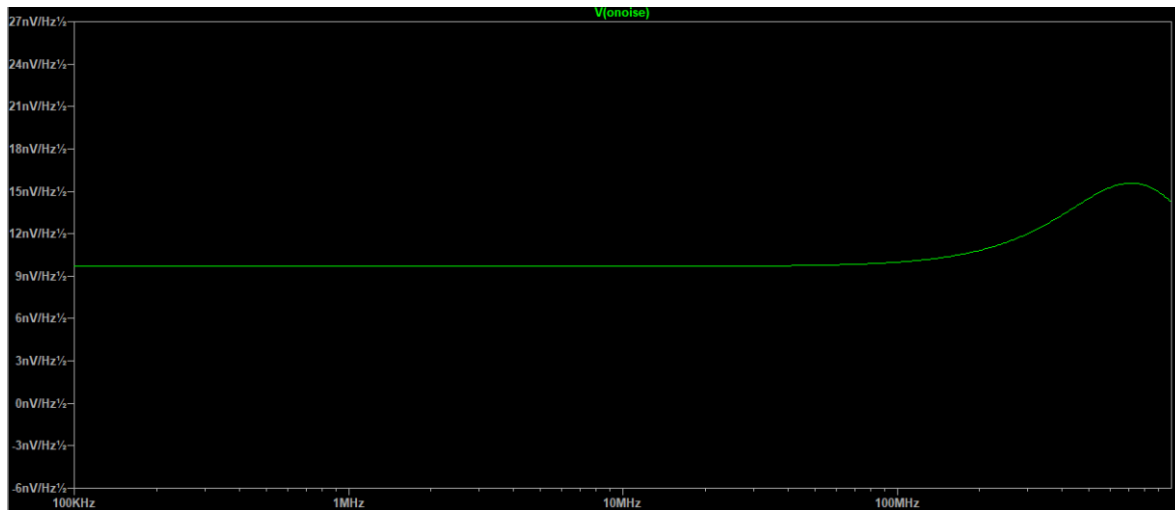
- **Ruido térmico:** Este ruido es generado por la resistencia de realimentación del amplificador transimpedancia.
- **Ruido del amplificador OPA818:** La simulación también tiene en cuenta el ruido introducido por el amplificador operacional que según el fabricante Texas Instruments es de  $2.2\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

Esta simulación proporciona la densidad del ruido de salida lo que permite calcular el NEP (noise equivalent power).

El NEP es una de las características más importantes en un fotodetector de este tipo. Es la potencia óptica incidente mínima que el detector necesita recibir para que la señal que produce sea igual que el ruido generado por el detector.

Esta medida quiere decir cuál es la mínima potencia óptica que se puede medir ya que si se recibiera una señal de menor potencia no se podría distinguir del ruido.

Los resultados de la simulación se representan en el dominio de la frecuencia.



*Ilustración 13 - Simulación del ruido*

En la gráfica observable en la Ilustración 13 se puede ver que en frecuencias bajas el ruido se mantiene estable en torno a  $10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  y al acercarse a frecuencias más altas y más cercanas a el límite de ancho de banda simulado el ruido sube alcanzando un pico de  $15\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  a 700MHz. Esta subida del ruido en frecuencias cercanas al ancho de banda se debe a la llamada “ganancia del ruido” la cual aumenta en altas frecuencias.

Estos datos de densidad de ruido en la salida son útiles pero el dato que más se necesita es el NEP antes mencionado. Este NEP dependerá de la responsividad del sistema la cual depende de la longitud de onda de la luz incidente. Pero con la responsividad máxima que sería con una luz de 750nm de longitud de onda se puede calcular la responsividad como un producto de la responsividad del fotodiodo con la resistencia de realimentación  $1,2\text{k}\Omega \times 0,5\text{A/W} = 0,6\text{V/mW}$ . Tras obtener la responsividad se obtiene el NEP con una división de la densidad espectral de ruido dividido de la responsividad  $\frac{10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}}{0,6\text{V/mW}} = 16\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  lo cual quiere decir que la mínima potencia detectable por el fotodetector con un aparato de medida con una frecuencia de adquisición de 1 segundo es de 16pW con una luz de 750nm de longitud de onda lo que cumple con los requisitos iniciales.

## **5.5 DISEÑO DE LA PLACA PCB EN KICAD**

El diseño físico de la placa PCB del fotodetector es una fase crítica de este proyecto ya que hubo que poner el circuito en una placa considerablemente pequeña y sin comprometer el funcionamiento del mismo.

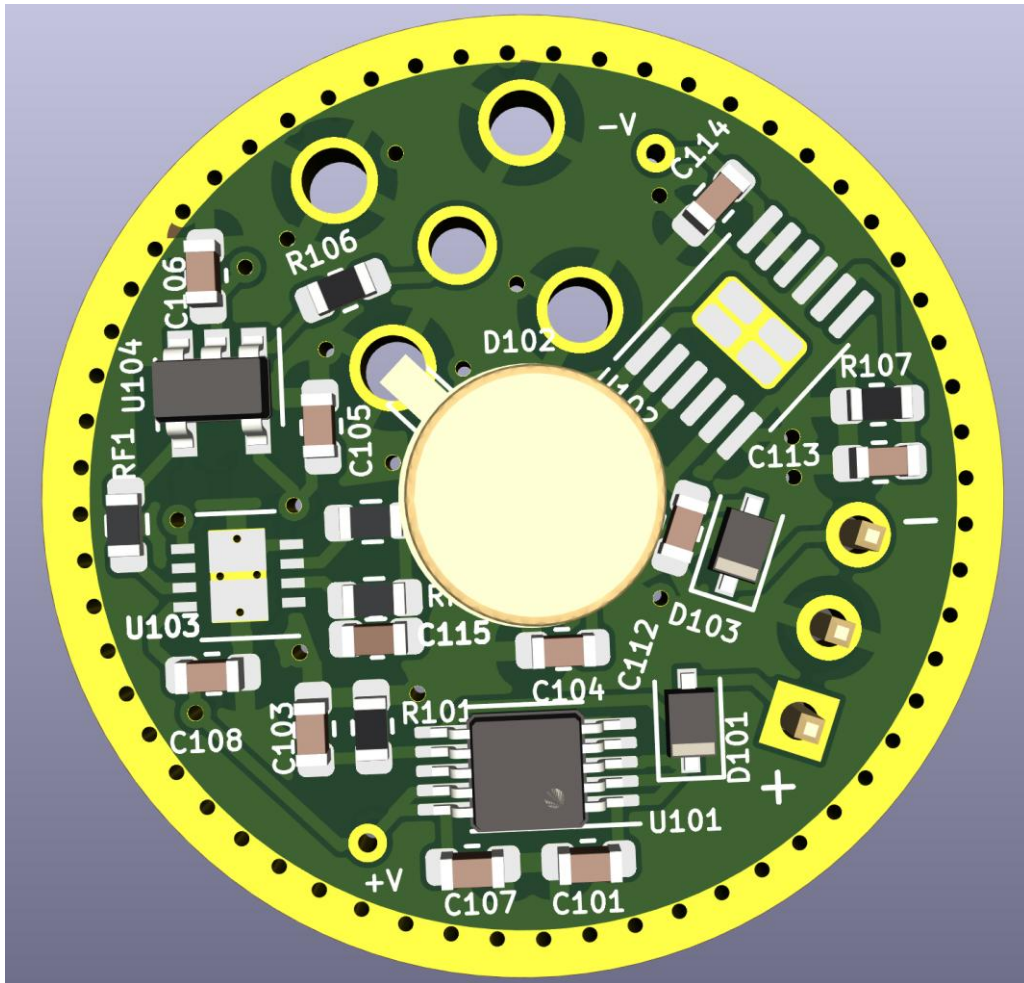
### **5.5.1 CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS Y DE LAS DIMENSIONES**

El primer paso para el diseño fue definir la geometría y el tamaño de la placa.

Para asegurar un fácil uso y buena compatibilidad dentro del laboratorio se debía construir una placa de forma circular y con 1 pulgada (2,54 centímetros) de diámetro. Estas dimensiones obligaran a tener todos los componentes muy compactos dentro de la placa.

### **5.5.2 EMPLAZAMIENTO DE COMPONENTES**

La segunda fase para el diseño de la placa consiste en posicionar los componentes de una manera estratégica ya que había que meter muchos componentes en muy poco espacio y además asegurarse que se mantenía la integridad de la señal, por tanto, se optó por un diseño el cual tuviera componentes en ambas caras de la placa. En la cara frontal se colocaron todos los circuitos integrados y toda la parte del circuito por la que pasa la señal para evitar que esta tuviera que recorrer pistas largas. El fotodiodo se colocó en el centro de la placa y se movieron a la cara trasera de la placa solo los componentes necesarios para que cupiera el resto en la cara frontal. Una vez colocados los componentes se colocaron las pistas que los conectan entre ellos.



*Ilustración 14 - Imagen del diseño de la PCB*

En la Ilustración 14 se puede observar la imagen 3D de la PCB que da Kicad una vez está diseñada.

### **5.5.3 VERIFICACIÓN DE ERRORES**

El último paso de este proceso es verificar que el circuito real de la placa coincide con el esquemático diseñado y que la placa no tiene errores como cortocircuitos, componentes que se superponen etc.

Para esto KiCad tiene una herramienta llamada DRC (design rules checker) con esta herramienta KiCad comprueba que todo en la placa este correcto y proporciona un informe con los errores cometidos en el diseño.

Tras comprobar con el DRC que la PCB no tiene errores estaba lista para pedirla y comenzar con el montaje.

## **5.6 IMPLEMENTACIÓN FÍSICA (MONTAJE DEL PROTOTIPO)**

Una vez validado el diseño del circuito a través de las simulaciones en LTSpice y finalizado el diseño de la placa PCB con la herramienta KiCad, se procedió al pedido de los componentes y a la fabricación del prototipo.

### **5.6.1 PEDIDO DE COMPONENTES**

Para los componentes electrónicos la mayoría de ellos se pidieron al vendedor DigiKey, una tienda online de componentes electrónicos muy conocida. El único componente que no se compró en DigiKey fue el fotodiodo ya que al ser del fabricante Thorlabs solo está disponible en su página web.

<i>Tipo de componente</i>	<i>Componente en PCB</i>	<i>Número de identificación del componente</i>	<i>Valor</i>	<i>Cantidad</i>
Fotodiodo	D102	<a href="#">FDS015</a>		1
Amplificador operacional	U103	<a href="#">OPA818IDRGR</a>		1
Buffer de salida	U104	<a href="#">BUF602IDBVT</a>		1
Conector SMA	J101	<a href="#">901-144</a>		1
Regulador de alimentación	U101	<a href="#">LT3042</a>		1

Regulador de alimentación	U102	<a href="#">LT3093</a>		1
Cable de alimentación	J102	<a href="#">Cable</a>		1
Condensador	C101, C102, C103, C107, C112, C113, C114	<a href="#">C0603C475K8PACTU</a>	4.7uF	7
Condensador	C104	<a href="#">C0603X103K4RECAUTO</a>	10nF	1
Condensador	C105, C106, C108, C109	<a href="#">CC0603KRX7R7BB104</a>	100nF	4
Condensador	C115	<a href="#">C0603C758C5GACTU</a>	0.75pF	1
Diodo	D101,D103	<a href="#">BAS316,115</a>		2
Bobina	L101	<a href="#">LQM21DH101M70L</a>	100uH	1
Resistencia	R1,RF1	<a href="#">RMCF0603FT10R0</a>	10	2
Resistencia	R101, R107	<a href="#">CRGCQ0603F56K</a>	56k	2
Resistencia	R102	<a href="#">RMCF0603JT300R</a>	300	1
Resistencia	R106	<a href="#">RNCP0603FTD49R9</a>	49.9	1

Resistencia	RF101	<a href="#">CR0603-JW-122ELF</a>	1.2k	1
-------------	-------	----------------------------------	------	---

*Tabla 3 - Componentes por sensor*

En la Tabla 3 se pueden ver todos los componentes, con su número de identificación el valor y la cantidad necesaria para construir un fotodetector, en la lista no aparece la placa PCB.

La placa PCB se pidió a un fabricante llamado OSHpark al cual para que fabriquen la PCB a medida hubo que enviar los archivos de diseño de KiCad.

## 5.6.2 PROCESO DE ENSAMBLAJE

El siguiente paso tras recibir el pedido con todas las piezas fue el ensamblaje. Primero se debía preparar la PCB para el ensamblaje, para esto se lijaron los bordes de la placa ya que venía con irregularidades de fábrica. Después se procedió con el dispensado de la pasta de soldadura en los terminales o pads de la PCB. Este paso tuvo especial complicación en los terminales del OPA818 y de los reguladores de alimentación ya que eran extremadamente pequeños. Para dispensar esta pasta térmica, se utilizó un microscopio, ya que el tamaño de los terminales era extremadamente pequeño y una máquina de aire comprimido que dispensaba la pasta para soldar empujando el embolo de una jeringuilla con la punta muy fina. Este material permitió un dispensado regular y preciso en todos los terminales de la placa.

Tras esto se procedió a posicionar todos los componentes en los terminales con la pasta para soldar ya administrada, este paso requirió de nuevo del microscopio y de unas pinzas extremadamente pequeñas para manejar correctamente estos componentes tan pequeños. También este paso requería de poner especial atención en que los componentes se colocaran en los terminales correctos y con la orientación correcta ya que por ejemplo colocar un diodo del circuito de alimentación en polarización inversa hubiera impedido que el circuito estuviera alimentado por tanto se tuvo especial cuidado en este paso.

Por último se introdujo la PCB con los componentes colocados sobre sus terminales con la pasta para soldar en el horno de reflujo y este completó la soldadura.

Este proceso se tuvo que hacer 2 veces, una por cada cara de la placa PCB ya que tiene componentes en ambos lados.

Por último, quedaban los componentes cuyos terminales atraviesan la placa que son el fotodiodo, el cable de alimentación y el puerto SMA de salida. Estos se soldaron con el método tradicional de soldaduras.

### **5.6.3 INSPECCIÓN TÉCNICA**

Para validar el correcto montaje del sensor se realizó una inspección técnica dividida en 2 partes.

Primero se hizo una inspección visual con el microscopio para comprobar que los componentes estuvieran bien alineados y para confirmar la ausencia de puentes de soldadura que pudieran causar cortocircuitos.

Segundo se procedió con una inspección eléctrica básica con un polímetro configurado en el modo de continuidad. Con esto se comprobó rigurosamente que no hubiera cortocircuitos indebidos prestando especial atención en los terminales +5V -5V y de tierra. Esta inspección garantizó que no existieran cortocircuitos no deseados que pudieran causar un mal funcionamiento del sensor o incluso que pudieran dañar algún componente.

Una vez finalizado este proceso se obtuvo la primera unidad funcional del fotodetector diseñado en este proyecto dejando listo este primer prototipo para las pruebas y la caracterización.

## **Capítulo 6. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Este capítulo explica el entorno de pruebas que se ha utilizado y los resultados técnicos obtenidos. Se comparará los resultados obtenidos con los esperados en las simulaciones.

### ***6.1 CONFIGURACIÓN GENERAL DEL ENTORNO DE PRUEBAS Y PRUEBAS BÁSICAS***

#### **6.1.1 CONFIGURACIÓN GENERAL DEL ENTORNO DE PRUEBAS**

Para la ejecución de pruebas y garantizar la repetibilidad y la estabilidad de las pruebas se ha utilizado una mesa óptica, para colocar todos los elementos y que queden fijos. El prototipo se alimenta con la fuente para la que fue diseñado LDS12V con  $\pm 12V$ .

La fuente de señal óptica utilizada para todas las pruebas es un láser en el espectro verde con una longitud de onda de 556 nm. Esta fuente se eligió por su suficiencia técnica y disponibilidad dentro del laboratorio.

#### **6.1.2 PRUEBA BÁSICA DE RESPUESTA DEL SENSOR**

La primera prueba realizada era muy sencilla y tan solo para comprobar que el sensor respondía a la luz, antes de montar set-ups de pruebas más complejas se debía comprobar que el sensor reaccionaba a la luz.

Para comprobar esto se alimentó el detector con la fuente LDS12V de Thorlabs y se conectó la salida del sensor a un polímetro en modo de medida de voltaje continuo. Primero se comprobó que el sensor diera en la salida 0V cuando estaba tapado y ninguna luz incidía en el fotodiodo.

Después para comprobar que el sensor respondió a la luz se le apuntó con una linterna de teléfono móvil al fotodiodo y se podía observar que el voltaje de salida indicado por el polímetro aumentaba al apuntar al fotodiodo con la linterna.

Tras esta sencilla prueba se pudo proceder a las siguientes pruebas para caracterizar diferentes características.

## **6.2 ANÁLISIS DE LA RESPONSIVIDAD**

### **6.2.1 MEDIDA DE LA RESPONSIVIDAD**

La responsividad es la relación entre la potencia incidente de entrada en el fotodiodo y la tensión eléctrica de salida. Para medir y cuantificar esta característica se montó un set-up que permitiera canalizar toda la luz del láser en el pequeño fotodiodo que incorpora el sensor.

El láser de 556 nm salía de una fibra óptica, a la salida de la fibra óptica se colocó una lente colimadora y tras esta un espejo para permitir el correcto alineamiento del haz de luz con el fotodetector. Se situó el fotodetector exactamente a la distancia focal de la lente en este caso 100 milímetros. Con esta configuración fue posible concentrar todo el haz de luz en la menor área posible y garantizar que toda la potencia óptica del láser era captada por el fotodiodo a la vez que un fácil alineamiento del sistema con el espejo.

Para la toma de datos se buscó incrementar suavemente la potencia óptica a través de tener colocados filtros ND e ir quitándolos y en cada punto de medida se tomaba el dato de tensión de salida con un osciloscopio y el dato de la potencia óptica incidente se obtenía con un medidor de potencia PM100D2 de Thorlabs.

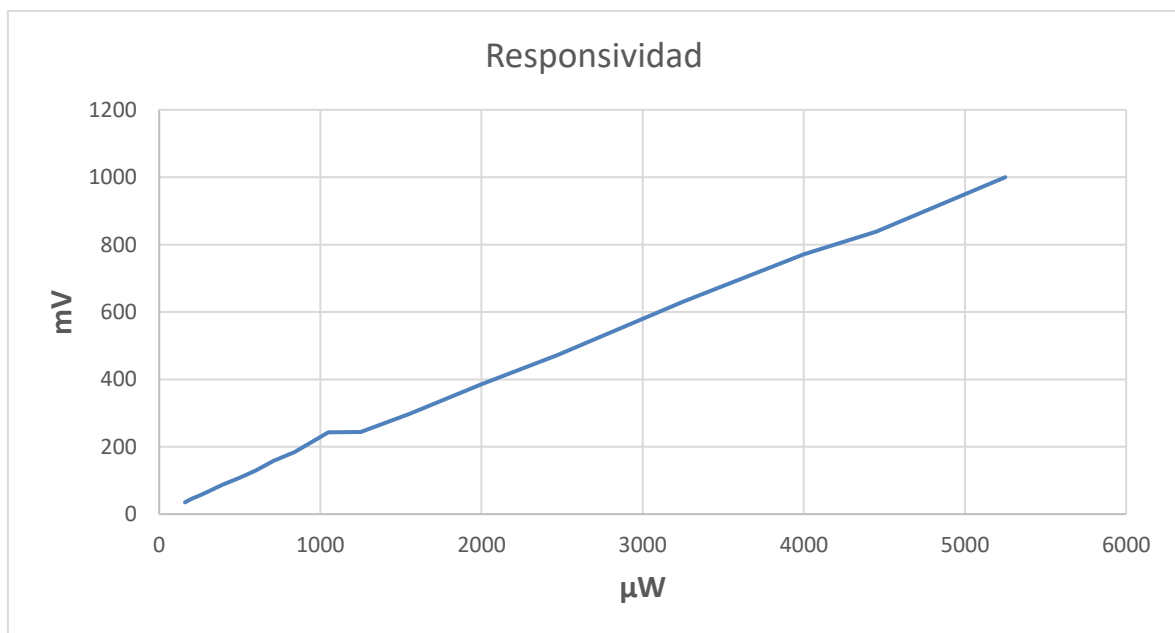
Antes de comenzar con la toma de datos se quiso comprobar que el haz de luz estaba totalmente concentrado en el fotodiodo. Para esto se realizó una prueba utilizando los controles del espejo para mover el haz de luz.

Al desplazar el haz de luz de manera horizontal o vertical sobre el área de detección del fotodiodo se comprobaba que había una meseta es decir que durante el movimiento del haz

de luz había un tiempo que mientras se seguía moviendo el haz el voltaje de salida era el mismo, lo cual confirmaba que el haz era más pequeño que el área activa del fotodiodo y que estaba totalmente alineado.

Que se debería esperar de esta prueba:

La responsividad teórica de este sistema ante un láser de 556 nm se calcula mediante el producto de la responsividad del fotodiodo y de la  $R_f$ . La responsividad del diodo se calcula de unos 0,3 A/W y al tener una  $R_f$  de 1,2k $\Omega$  nos da una responsividad teórica estimada de 0,36 V/mW. Por tanto, si se dibujara una gráfica que relacionara la potencia óptica en mW con los voltios de salida debería ser una línea recta que pase por el (0,0) con una pendiente de 0,36.



*Ilustración 15 - Gráfico de la responsividad*

### 6.2.2 ANÁLISIS DE LA MEDIDA DE LA RESPONSABILIDAD

Como se puede observar en la Ilustración 15 el resultado no es exactamente el esperado, se calcula una responsividad de 0,2 V/mW lo cual es inferior al valor esperado y la línea no es totalmente recta, cerca de 1mW se aplanan un poco y después sigue recta.

La diferencia entre el valor teórico calculado de 0,36 V/mW y el valor real obtenido de 0,2 V/mW se debe a la responsividad del diodo FDS015 ya que el valor que da el fabricante de 0,3 A/W puede variar en función de diversos factores como la temperatura y el ángulo de incidencia de la luz. Además, durante la fabricación de estos diodos se permiten pequeñas tolerancias lo cual puede variar el valor de la responsividad.

En conclusión, esta prueba de responsividad muestra que el sensor tiene una responsividad lineal y predecible. A pesar de la diferencia entre el valor teórico esperado y el valor real obtenido es una diferencia pequeña y se obtiene una responsividad real suficiente para los objetivos que tiene el fotodetector.

### **6.3 CARACTERIZACIÓN DEL ANCHO DE BANDA**

La respuesta en frecuencia del fotodetector es uno de los factores más importantes del sensor, principalmente para saber su ancho de banda. Para esto se ha buscado conseguir una frecuencia de corte y un diagrama de bode de la respuesta real del sensor.

#### **6.3.1 CONFIGURACIÓN DEL SET-UP DE DOBLE PASO POR AOM**

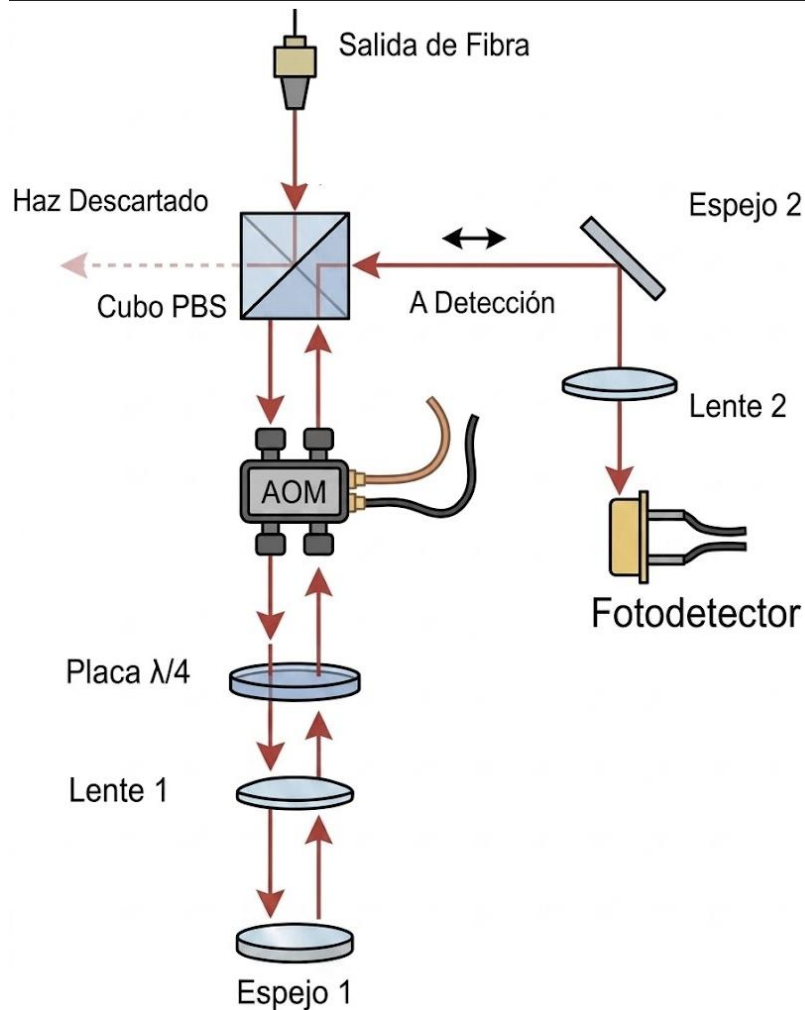
Para la caracterización de la respuesta en frecuencia se montó un montaje de doble paso utilizando un modulador acustoóptico (AOM). Este diseño permite superar las limitaciones intrínsecas de ancho de banda del AOM multiplicando ópticamente el desplazamiento de la frecuencia para poder saber cómo es la respuesta del detector en frecuencias más altas de las que permite el AOM.

El AOM utilizado tiene una frecuencia central de 80MHz. Este AOM al tener una frecuencia central de 80MHz puede trabajar entre 50MHz y 100MHz. Fuera de este rango la eficiencia de difracción cae drásticamente. Como en las simulaciones realizadas en el apartado 5.4.2 indicaban un ancho de banda de entre 200 y 300 MHz con esta frecuencia de entre 60 y 100 MHz no era suficiente por tanto se realizó un montaje de múltiple paso.

El montaje consiste en el láser saliendo de una fibra óptica, que llega a un cubo divisor polarizador para dejar pasar de frente solo el haz con una polarización vertical y desviar el haz con polarización horizontal hacia la izquierda, este haz desviado no se utilizara para nada. El haz que se deja pasar de frente pasa por el AOM es excitado por este generando varios ordenes difractados. Tras el AOM se coloca una placa de cuarto de onda, después una lente y por último un espejo. La lente debe estar colocada a distancia focal del AOM y del espejo para asegurar que todos los órdenes difractados vuelven a pasa por el AOM para asegurar el doble paso. La placa de cuarto onda asegura que todo el haz que en principio el cubo dejó pasar de frente en este caso se refleje para el lado izquierdo porque se ha cambiado la polarización del haz  $180^\circ$  y se reflejara hacia el lado derecho. En este lado se coloca una lente para colimar el haz de luz y un espejo para alinear perfectamente la luz que ha pasado 2 veces por el AOM con el fotodetector. La imagen real del montaje se puede observar en la Ilustración 16 y el diagrama en la Ilustración 17.



*Ilustración 16 - Imagen del montaje para respuesta en frecuencia*



*Ilustración 17 - Diagrama montaje doble paso por AOM*

### **6.3.1.1 Configuración para frecuencias medias 100-200 MHz**

Para este primer tramo de 100-200MHz el láser pasa por el AOM y se utilizó tan solo el orden +1 de difracción. Tras pasar por el AOM el haz de orden 0 (original) y el de orden +1 vuelven al AOM. Debido al efecto Doppler inducido por el frente de onda acústico, el haz obtiene un desplazamiento en frecuencia total de  $2 \cdot F_{RF}$  siendo  $F_{RF}$  la frecuencia introducida en el AOM.

Al combinar el haz de orden +1 con ese desplazamiento en frecuencia con el haz de orden 0 sin modificación de frecuencia en el área activa del fotodetector la intensidad óptica produce un batido eléctrico en el fotodiodo de frecuencia  $2 \cdot F_{RF}$  y al mover la frecuencia de entrada del AOM entre 50 y 100 MHz y con esto se obtuvieron datos de respuesta en frecuencia para frecuencias entre 100 y 200 MHz pero con este rango no era suficiente para observar una caída drástica y determinar el ancho de banda.

### ***6.3.1.2 Configuración para frecuencias altas 200-350 MHz***

Para llegar a frecuencias más altas se modificó el alineamiento para utilizar la interferencia no solo con el orden +1 sino también con el -1 teniendo 2 haces con desplazamiento de frecuencia de  $+2 \cdot F_{RF}$  y  $-2 \cdot F_{RF}$  respectivamente.

Al mezclar estos 2 haces con el haz de orden 0 sin modificar, se obtiene una frecuencia de batido de  $+2 \cdot F_{RF} - (-2 \cdot F_{RF}) = +4 \cdot F_{RF}$  lo cual permite obtener frecuencias en el fotodetector de 200-400 MHz.

## **6.3.2 MEDIDA, AJUSTE DE DATOS Y RESULTADO**

### ***6.3.2.1 Medida y obtención de datos***

Para la medida y la obtención de datos se utilizó una fuente de radiofrecuencia HP 8640B la cual es capaz de alcanzar 512 MHz, pero tan solo era necesario moverse en el régimen de 50 a 100 MHz. Para la medida se utilizó un analizador de espectro Rigol DS815. Para obtener los datos primero se utilizó el set-up de una sola interferencia con el orden +1 explicado anteriormente y se fue modificando la frecuencia de la fuente de radiofrecuencia entre 50 y 100 MHz y recogiendo el dato de en qué frecuencia se halla el pico de amplitud (2 veces la frecuencia del generador) y que valor tiene este pico, además se recogió el dato de la potencia óptica que tenía el orden +1 tras salir del AOM, esto se hizo aislando este orden con un iris y utilizando un medidor de potencia de Thorlabs para obtener la potencia óptica. La obtención del valor de la potencia óptica era necesaria porque más tarde se tendrá que hacer una normalización del valor de la amplitud con la eficiencia del AOM para que la eficiencia del AOM que varía según la frecuencia no afecte a la respuesta en frecuencia.

Tras esto se procedió a alinear el montaje para tener la doble interferencia con los haces de órdenes +1 y -1 y obtener un batido de 4 veces la frecuencia del generador de radiofrecuencia y se recogieron los mismos datos que con el alineamiento de una sola interferencia: frecuencia amplitud y potencia óptica del orden +1 para las frecuencias de 200 a 350 MHz.

### ***6.3.2.2 Normalización de los datos***

Una vez recopilados todos los datos desde 100MHz hasta 350Mhz, fue necesario aplicar un procesado de los datos para obtener la gráfica real de la respuesta en frecuencia del fotodetector. Este paso es crítico para desacoplar el comportamiento del fotodiodo del comportamiento óptico del AOM.

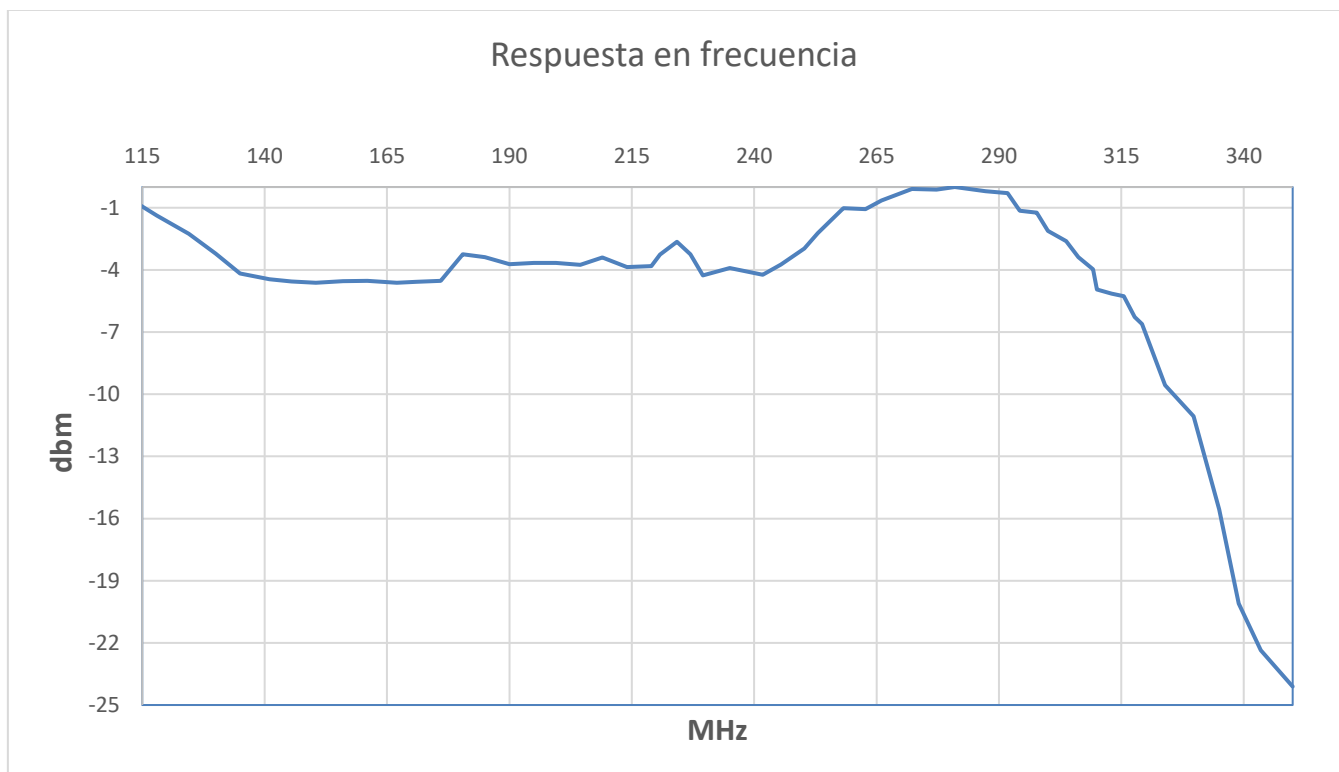
Como se anticipó durante la toma de medidas, el AOM utilizado está optimizado para una frecuencia central de 80 MHz. A medida que la frecuencia de radiofrecuencia del generador se aleja de este valor central hacia los 50 MHz o los 100 MHz, la eficiencia de difracción del AOM disminuye. Esta caída de eficiencia se convierte en una menor potencia óptica en los órdenes difractados +1 y -1.

La amplitud de la corriente del batido generada por el fotodiodo no solo depende de la respuesta del detector a esa frecuencia, sino que es directamente proporcional a la raíz cuadrada del producto de las potencias ópticas de los haces interferentes. Por tanto, la amplitud eléctrica medida decae de forma natural al disminuir la potencia óptica incidente, este efecto debe ser neutralizado para que los datos del ancho de banda del detector sean reales.

Para que la eficiencia del AOM no afectara a la respuesta en frecuencia se procedió a normalizar la amplitud de la señal de RF recogida en el analizador de espectros utilizando los datos de potencia óptica obtenidos con el medidor de potencia de Thorlabs. El procedimiento se realizó punto por punto para cada frecuencia evaluada siguiendo estos pasos:

1. **Linealización de la señal:** El primer paso fue que como el valor del pico de amplitud registrado en el analizador de espectros se encontraba en escala logarítmica en dBm, se transformó matemáticamente a una magnitud lineal Watios.
2. **Corrección por potencia óptica:** Después, se aplicó la relación de proporcionalidad. La amplitud linealizada de la señal eléctrica se dividió entre la raíz cuadrada de la potencia óptica medida para el orden +1 en esa misma frecuencia.
3. **Obtención de la curva final:** Al aplicar esta operación se eliminó el efecto que pudiera tener la variación de eficiencia del AOM a distintas frecuencias. Y se volvieron a pasar estos datos lineales a escala logarítmica (watios a dBm).

Todo esto se realizó en una hoja de Excel anotando cada dato en una columna y utilizando las siguientes columnas para las operaciones necesarias, y así replicarlo para todos los datos de distintas frecuencias de una vez y sin tener que repetirlo para todas.



*Ilustración 18 - Diagrama de bode respuesta en frecuencia*

### **6.3.3 ANÁLISIS DEL RESULTADO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA**

En la Ilustración 18 se puede ver el diagrama de bode del resultado de esta prueba. En el diagrama de bode los datos están ya normalizados con el método explicado en el apartado anterior.

El diagrama de bode muestra una curva sin un gran pico justo antes de la caída de la zona de corte, pero presentando un pico en 287 MHz y un ancho de banda de 306 MHz ya que en esa frecuencia se muestra una caída de 3dbm respecto al máximo.

Este ancho de banda cumple con creces el objetivo inicial de 100 MHz y es bastante similar a lo obtenido en la simulación de LTSpice en la sección 5.4.2, la mayor diferencia es la forma de la curva, pero no tiene un gran pico preocupante.

## **6.4 ANÁLISIS DEL RUIDO Y DE LA POTENCIA ÓPTICA INCIDENTE EQUIVALENTE AL RUIDO (NEP)**

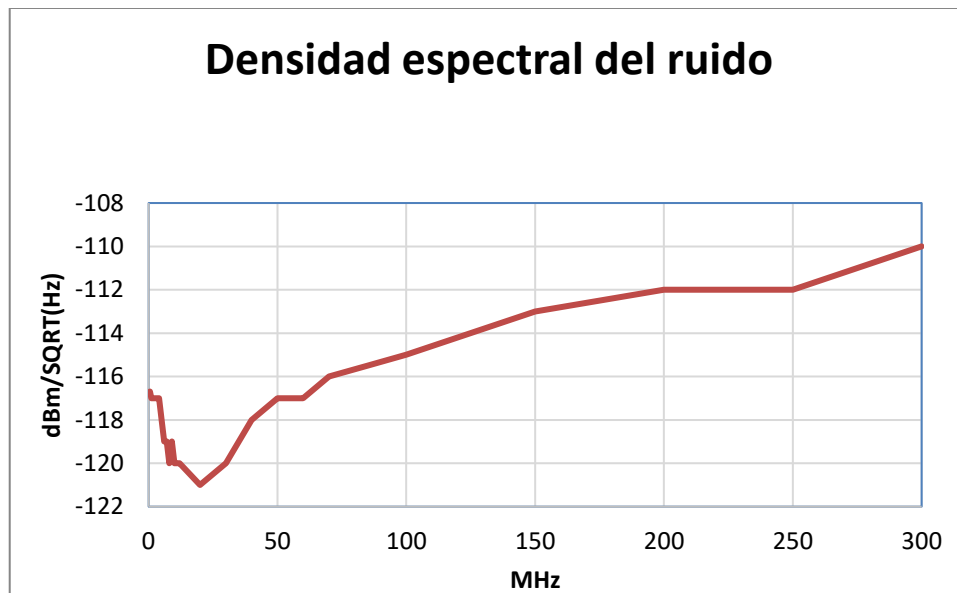
### **6.4.1 MEDIDA DEL SUELO DE RUIDO Y DEL NEP**

La caracterización del ruido y del NEP es una de las partes más importantes de este proyecto ya que los 2 requisitos iniciales principales y más importantes eran tener un gran ancho de banda y ser capaz de detectar señales ópticas muy pequeñas llegando incluso a poder medir señales ópticas con potencia de nanovatios.

Para conseguir saber exactamente cuál es el NEP y cuál es la potencia mínima que se puede medir con este sensor el primer paso era medir el ruido. Para esto se utilizó un analizador de espectros, en concreto el Rigol DSA815, pero el usar este instrumento tenía un problema y es que el suelo de ruido del analizador de espectros era superior al suelo de ruido del fotodetector por tanto no era una medida válida del suelo de ruido del fotodetector. Esto se comprobó viendo que la potencia del ruido era la misma sin tener nada conectado al analizador de espectros que teniendo el fotodetector conectado a él.

Para solventar esta problemática se utilizó un amplificador de muy bajo ruido Mini-Circuits ZFL-500LN+ para amplificar la señal de salida del fotodetector y que esta superase el suelo del ruido del analizador de espectros lo cual permitió obtener una medición precisa del suelo de ruido del fotodetector.

En cuanto a la metodología para la caracterización, el analizador de espectros se configuró para que mostrara la densidad espectral del ruido en unidades de  $\text{dBm}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Se recogieron lecturas a distintas frecuencias teniendo el sensor totalmente tapado para que nada de luz incidiera en él y así medir el suelo de ruido real.



*Ilustración 19 - Densidad espectral del ruido*

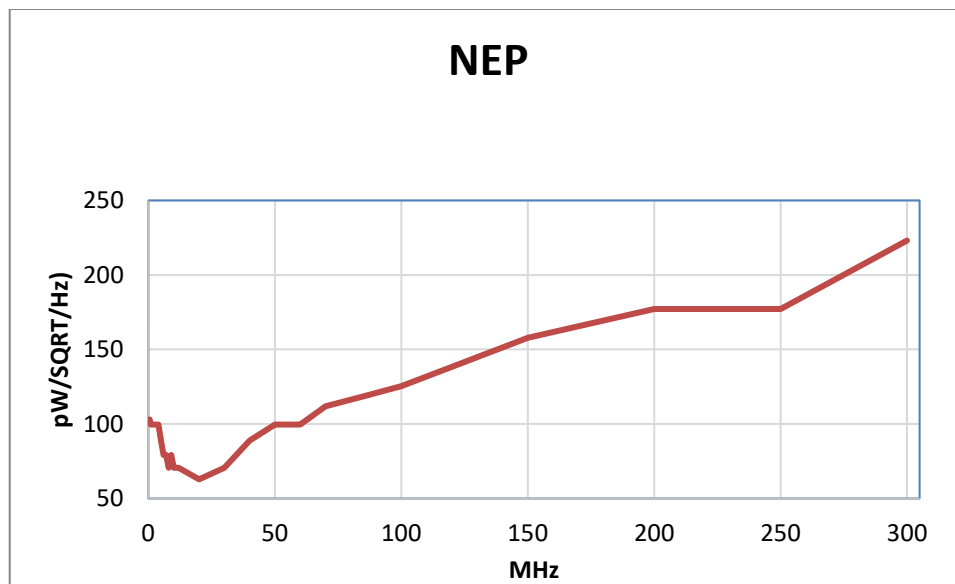
En la Ilustración 19 se puede observar el gráfico de la densidad espectral del ruido medida con el analizador de espectros entre 500 KHz y 300MHz el inicio del ancho de banda del amplificador utilizado y el final del ancho de banda del fotodetector.

El siguiente paso es transformar esta medición de ruido del analizador de espectros en la potencia equivalente al ruido (NEP). El proceso matemático para convertir esta lectura logarítmica instrumental al dominio óptico lineal requiere aislar la tensión de ruido y aplicar la sensibilidad del sistema. Dada la medida obtenida del analizador de espectros expresada

en  $\text{dBm}/\sqrt{\text{Hz}}$ , el primer paso era descontar la ganancia introducida por el amplificador utilizado que es de  $G_{\text{AMP}} = 24\text{dB}$  para hallar la potencia eléctrica del ruido real a la salida del fotodetector. Después, se aplicó la conversión de escala logarítmica a vatios lineales, incluyendo el factor de conversión de milivatios a vatios. A partir de esta potencia linealizada, y considerando la impedancia de entrada característica del analizador de espectros  $R_{\text{in}} = 50\Omega$ , se calculó la densidad espectral de tensión RMS mediante la ley de Ohm  $V = \sqrt{P \times R}$ . Finalmente, la conversión del dominio eléctrico al dominio óptico se realizó dividiendo esta tensión de ruido por la responsividad real medida del fotodetector  $R = 0,2\text{V/W}$ , obteniendo la siguiente expresión general:

$$\text{NEP} = \frac{\sqrt{10^{\frac{N_{\text{medido}} - G - 30}{10}} \cdot R_{\text{in}}}}{R}$$

Mediante esta fórmula se pudo pasar de  $\text{dBm}/\sqrt{\text{Hz}}$  medidos en el analizador de espectros con el amplificador a  $\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ .



*Ilustración 20 – NEP*

#### **6.4.2 ANÁLISIS DEL RESULTADO DEL SUELO DE RUIDO Y DEL NEP**

En la Ilustración 20 se puede observar la caracterización del NEP, en la que al analizar el resultado de la curva de Potencia Equivalente de Ruido (NEP) el cual muestra un comportamiento que concuerda con los modelos teóricos de los amplificadores de transimpedancia. En la región inicial de la banda pasante (desde 0,5 MHz hasta aproximadamente 40 MHz), el sistema muestra un suelo de ruido estable. En este tramo, el NEP registra su valor mínimo, de  $61,8 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  a 20 MHz y manteniéndose por debajo de los  $64 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  lo que indica una región de operación óptima con máxima sensibilidad.

A partir de los 50 MHz  $65,5 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  la curva refleja el inicio de un incremento monótono y progresivo en el valor del NEP. Este deterioro en la sensibilidad es la manifestación directa del fenómeno de ganancia de ruido (*noise gain*). Como se anticipó teóricamente y se pudo observar en la sección 5.4.3 que muestra la simulación del ruido, este aumenta a medida que se acerca a la frecuencia de corte del ancho de banda.

Este resultado es sumamente satisfactorio, ya que demuestra que, a pesar de la inevitable degradación por el ancho de banda extremo, el fotodetector conserva una resolución óptica excepcional, plenamente capaz de discriminar transitorios de fluorescencia muy débiles.

## Capítulo 7. PRODUCCIÓN EN SERIE Y BALANCE

### ECONÓMICO

Tras la validación exitosa del prototipo en el entorno experimental, la siguiente fase del proyecto consistió en la escalabilidad del diseño. En este capítulo se detalla el procedimiento de fabricación de 10 unidades adicionales para cubrir las necesidades del laboratorio y el balance económico final para comprobar el ahorro conseguido que justifica la viabilidad del proyecto.

#### ***7.1 PROCESO DE FABRICACIÓN EN SERIE***

En primer lugar, se procedió con el pedido de los componentes para la fabricación de 10 unidades, en este caso se pidió la cantidad exacta necesaria de componentes. Se pidió simultáneamente los componentes electrónicos y la placa PCB, igual que se detalló en el apartado 5.6.1.

El ensamblaje en este caso tuvo un pequeño cambio respecto al ensamblaje del prototipo detallado en la sección 5.6.2 ya que en este caso se pidió junto con las PCB una plantilla de acero inoxidable con los cortes para los terminales en los que se debía aplicar pasta para soldar. Esta plantilla de acero inoxidable permitió que la aplicación de la pasta para soldar fuera un proceso más sencillo y rápido. Tras esto se colocaron los componentes de manera manual igual que para el prototipo, después de esto se introducía la placa con los componentes posicionados en sus sitios en el horno de reflujo. Se repitió el proceso de administración de pasta para soldar y colocación de componentes para la otra cara de la placa y pero para esta cara la soldadura se efectuaba con una pistola de aire caliente. Por último se soldaron de forma tradicional los componentes cuyos terminales atraviesan la placa. Por último se comprobaba de manera visual con un microscopio la calidad de las soldaduras y

que no hubiera cortocircuitos no deseados. Este proceso se repitió para 11 fotodetectores, 10 del pedido para la fabricación en serie y 1 con los componentes sobrantes de los prototipos.

Finalmente se procedió con el control de calidad de todas las unidades. Cada uno de los fotodetectores fabricados se le realizó una comprobación con un polímetro de que no hubiera cortocircuitos indeseados. También se hizo una validación de funcionamiento básica, se conectaban uno por uno al polímetro en modo de medida de voltaje DC y al iluminar el área activa del fotodetector con un láser se comprobaba que el sensor respondía.

La ejecución de este control de calidad a todas las unidades aseguró que todos los dispositivos tenían un funcionamiento correcto.

El último paso antes de proceder a entregar los fotodetectores en el laboratorio y que estuvieran a disposición de los investigadores para la utilización fue un testeo de unidades aleatoria del ancho de banda. Se eligieron aleatoriamente 3 unidades de las 11 construidas y se colocaron en el montaje de prueba del ancho de banda de la sección 6.3.1. Esto se hizo con el objetivo de comprobar que el ancho de banda era similar al del prototipo. Para las 3 unidades se comprobó que la amplitud del tono de la señal de salida del fotodetector no empezaba a caer rápidamente hasta alcanzar los 300 MHz, no se tomaron datos exactos, solo se comprobó que la amplitud del tono se mantuviera estable hasta 300MHz y no empezara a caer antes.

Tras este proceso de validación los 12 fotodetectores (1 prototipo y 11 fabricados en serie) se dejaron en el laboratorio para que los investigadores de este pudieran utilizarlos.

## **7.2 BALANCE ECONÓMICO FINAL**

La fabricación en serie permite confirmar la viabilidad y el coste económico del proyecto y contrastar los datos finales con la estimación de la sección 4.5.

Para evaluar la viabilidad financiera, se ha realizado un desglose de los gastos reales incurridos durante el proyecto. Este balance se divide en gasto de materiales y hardware y el

coste asociado a la ingeniería y el ensamblaje. Por último se incluye un análisis del ahorro generado a la Universidad de Maryland.

### 7.2.1 COSTE DE PIEZAS Y MATERIALES

Esta partida contiene todos los costes relacionados con la adquisición de materiales.

<i>Categoría</i>	<i>Descripción</i>	<i>Coste unitario</i>
Circuitos integrados	Amplificador, Buffer, reguladores de alimentación	37,98\$
Fotodiodo	FDS015	63,03\$
PCB	Placa	1,6\$
Componentes pasivos	Resistencias, condensadores...	>1\$
Conectores	SMA, cable de alimentación	23,13
Total		≈126,74\$

*Tabla 4 - Coste de materiales*

En la Tabla 4 se puede observar el desglose del coste unitario de los componentes del fotodetector dividido en distintas categorías.

Para el prototipo se compraron componentes equivalentes a poder fabricar 4 unidades y para la fabricación en serie se compraron materiales exactos para construir 10 sensores, por tanto, el gasto total del proyecto en materiales y hardware ha sido de ≈1774,36\$ para obtener 12 unidades funcionales del fotodetector.

### **7.2.2 COSTE DE RECURSOS HUMANOS (INGENIERÍA Y ENSAMBLAJE)**

El coste de recursos humanos constituye el mayor de los costes del proyecto. Este coste incluye las horas dedicadas a la ingeniería es decir al diseño y a las pruebas del fotodetector y las horas dedicadas al ensamblaje de los fotodetectores. Para el coste se utiliza la tarifa estándar para estudiantes no graduados de la Universidad de Maryland de 15\$/h. Finalmente al proyecto se le ha dedicado un total de 265 horas, incurriendo un coste total de recursos humanos de 3975\$.

### **7.2.3 COMPARATIVA CON ESTIMACIÓN INICIAL Y AHORRO CONSEGUIDO**

El coste total real del proyecto, sumando coste de materiales y coste de recursos humanos es de 5749,36\$. Esta cifra es muy similar a la cifra estimada inicialmente en el apartado 4.5.3 de 5950\$ incluso es algo más baja de lo estimado inicialmente demostrando una buena planificación económica.

Para contextualizar el impacto de este proyecto y el ahorro conseguido se debe comparar el coste de este proyecto con el coste de adquirir 12 fotodetectores con características similares a proveedores comerciales. Un fotodetector comercial como los de la empresa Thorlabs puede costar hasta 1000\$ por tanto un coste total de 12000\$ para obtener 12 unidades.

Se concluye que el desarrollo de este proyecto ha conseguido un ahorro a la Universidad de Maryland de 6250,64\$, o un 50% frente a comprar 12 fotodetectores a vendedores comerciales. Pero aún más importante es el ahorro futuro que puede conseguir el laboratorio al haber hecho ya todo el gasto en costes de diseño y validación, cualquier unidad de fotodetector que quiera fabricar el laboratorio tendrá un coste tan solo de materiales y de ensamblaje de 156\$ (calculando que se necesitan 2 horas para el ensamblaje de un fotodetector). Esto representa un ahorro del 85% frente a la compra de equipos comerciales en los fotodetectores que se necesiten en el futuro.

## **7.3 DOCUMENTACIÓN, REPLICABILIDAD Y ADAPTABILIDAD**

### **7.3.1 DOCUMENTACIÓN Y REPLICABILIDAD**

Este proyecto también incluye la entrega de una documentación técnica al laboratorio, para asegurar que cualquier persona del laboratorio pueda operar o replicar los dispositivos diseñados.

Se ha elaborado una guía de uso y replicación detallada la cual se puede ver en el ANEXO II. En este documento se especifican las características técnicas y los límites del fotodetector.

La guía incluye un apartado dedicado a la construcción de nuevas unidades, donde se describe el proceso de montaje y soldadura. También se han adjuntado los archivos de diseño KiCad y los archivos de simulación de LTSpice. Esto permite que en cualquier momento si el laboratorio necesita más fotodetectores pueda fabricar con total facilidad.

### **7.3.2 ADAPTABILIDAD**

En la documentación entregada también se indica brevemente la modificabilidad del circuito es decir que elementos se pueden modificar para cambiar las características del fotodetector.

Si se necesita un fotodetector con mucha más ganancia para detectar señales más pequeñas o tener mayores voltajes de salida se puede modificar la resistencia de realimentación aumentando su valor lo cual aumentará la ganancia, pero disminuirá el ancho de banda. También se puede modificar el condensador de realimentación para cambiar la curva de la respuesta en frecuencia o para modificar el ancho de banda.

## Capítulo 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente Trabajo de Fin de Grado ha culminado con el desarrollo, caracterización y puesta en producción de un fotodetector de altas prestaciones diseñado para satisfacer las características concretas necesitadas por un laboratorio de física cuántica enfocado en el enfriamiento láser en la Universidad de Maryland. A partir de los resultados obtenidos se extraen las siguientes conclusiones y se proponen ideas para otras líneas de trabajos futuros.

### *8.1 CONCLUSIONES TÉCNICAS Y CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS*

El diseño del circuito ha logrado cumplir e incluso superar los requisitos técnicos iniciales marcados como objetivos:

- **Ancho de banda:** Se ha logrado un ancho de banda excepcional, el requisito inicial era de 100MHz y se ha logrado superar los 300MHz de ancho de banda.
- **Bajo ruido:** Se ha logrado un NEP mínimo de  $61,8 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  lo cual permitirá detectar señales ópticas con potencias extremadamente bajas, otro de los requisitos iniciales.
- **Forma y dimensiones:** Se ha logrado comprimir todo el diseño en una placa de 1 pulgada de diámetro lo que era otro de los requisitos iniciales.
- **Puertos de entrada de alimentación y de salida:** Se ha logrado tener la entrada de alimentación y la salida en los formatos deseados, siendo este otro de los requisitos iniciales.

En conclusión, todos los requisitos técnicos se han cumplido habiendo algunos que se han superado con creces.

## 8.2 *IMPACTO ECONÓMICO Y TRANSFERENCIA DE LA TECNOLOGÍA*

Más allá de los logros técnicos el proyecto ha logrado conseguir un gran ahorro al laboratorio y ha dotado al laboratorio de un diseño preparado por si se necesitaran más fotodetectores.

- **Ahorro masivo:** Se ha logrado un ahorro masivo de 6250,64\$. Este ahorro representa más de un 50% respecto del coste de comprar 12 fotodetectores.
- **Sostenibilidad y bajo coste marginal:** Tras amortizar el coste de desarrollo del diseño la fabricación y el ensamblaje de cada fotodetector tendrá un coste para el laboratorio de tan solo 156\$. Este coste hace que se obtenga un ahorro del 85% respecto a los modelos comerciales.
- **Autonomía:** Ahora el laboratorio cuenta con unos fotodetectores los cuales puede replicar, reparar e incluso modificar para cambiar las características de estos dependiendo de las necesidades del experimento.

## 8.3 *LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO*

Este proyecto puede sentar las bases para otros proyectos futuros relacionados y con distintas derivadas:

- **Fotodetector con salida logarítmica:** Una futura modificación de este fotodetector podría ser uno que tuviera una responsividad logarítmica logrando un gran rango dinámico y poder medir desde potencias ópticas muy pequeñas a potencias ópticas muy altas. Esto se puede lograr sustituyendo la resistencia de realimentación con un diodo el cual con muy poca corriente representaría una resistencia muy grande y con una corriente más alta una resistencia muy pequeña así pudiendo modificar la resistencia de realimentación de manera dinámica y teniendo una responsividad logarítmica en lugar de lineal.
- **Fotodetector con área activa grande:** Se podría modificar el fotodiodo para tener unos con un área activa más grande y tener un alineamiento más sencillo.

- **Integración de ganancia conmutable:** Una futura iteración de la PCB podría incluir un sistema de interruptores de radiofrecuencia (RF switches) o relés de estado sólido que permitan alternar entre diferentes valores de la resistencia de realimentación directamente desde la placa. Esto dotaría al dispositivo de un rango dinámico seleccionable, permitiendo al usuario priorizar entre máximo ancho de banda o máxima sensibilidad sin necesidad de desoldar componentes.

## Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

KICAD | 5.1 | Español | Documentation | KICAD. (s. f.). KiCad | 5.1 | Español | Documentation | KiCad. <https://docs.kicad.org/5.1/es/kicad/kicad.html>

*Acousto-optic diffraction.* (s. f.). Fosco Connect. <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/acousto-optic-diffraction>

Paschotta, R. (2005). Pockels Effect - an encyclopedia article. En *Pockels Effect*. <https://doi.org/10.61835/4j0>

Noy, G. (2023, 14 septiembre). *The Science Behind Cube beam splitters: Understanding light Manipulation Techniques*. 3DOptix. <https://www.3doptix.com/blog/the-science-behind-cube-beam-splitters-understanding-light-manipulation-techniques/>

Edmund optics (2026). *What are Beamsplitters?*. Edmundoptics. <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/what-are-beamsplitters/>

Edmund optics (2026). *Understanding Waveplates and Retarders*. Edmundoptics. <https://www.edmundoptics.co.uk/knowledge-center/application-notes/optics/understanding-waveplates/>

Aewallin. (s. f.). *One-Inch-Photodetector/README.md at master · aewallin/One-Inch-Photodetector*. GitHub. <https://github.com/aewallin/One-Inch-Photodetector/blob/master/README.md>

TU-Darmstadt-Apq. (s. f.). *GitHub - TU-Darmstadt-APQ/SFH203\_photodetector: Low-noise transimpedance amplifier optimized for the photodiode SFH203*. GitHub. [https://github.com/TU-Darmstadt-APQ/SFH203\\_photodetector](https://github.com/TU-Darmstadt-APQ/SFH203_photodetector)

Tu-Darmstadt-Apq. (s. f.-a). *GitHub* - *TU-Darmstadt-APQ/PDH\_phodiode: Fast photodiode for PDH-laser-locking.* GitHub. [https://github.com/TU-Darmstadt-APQ/PDH\\_phodiode](https://github.com/TU-Darmstadt-APQ/PDH_phodiode)

(S/f) Thorlabs.com

<https://media.thorlabs.com/globalassets/items/f/fd/fds/fds015/ttn125897-s01.pdf?v=0116113136>

# ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS

Aunque el desarrollo de elementos electrónicos para experimentos universitarios tiene un carácter técnico y especializado, este Trabajo de Fin de Grado muestra un enfoque alineado con los Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS). En este capítulo se muestra la alineación del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

**ODS 9, Industria, Innovación e Infraestructura:** La contribución principal del proyecto es en este objetivo, en concreto con su meta 9.5, la cual persigue fomentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales y académicos.

Al diseñar y fabricar un fotodetector de altas prestaciones con un coste de materiales y ensamblaje muy inferior al de las soluciones comerciales (reducción entorno al 85%), se democratiza el acceso a infraestructura de medición de alta precisión. Esto permite que laboratorios de investigación con presupuestos ajustados puedan llevar a cabo experimentos avanzados, impulsando la innovación científica sin que el coste de la instrumentación suponga un límite para el experimento.

El conocimiento generado (diseños, esquemas, resultados) queda a disposición del equipo de investigación, permitiendo que futuros estudiantes e investigadores repliquen o mejoren la tecnología sin depender de cadenas de suministro comerciales y costosas.

## ANEXO II

### *GUIA DE USO Y REPLICACIÓN EN INGLES*

El siguiente texto es el texto que compone la guía de uso y replicación aportada al laboratorio para asegurar que cualquier investigador pueda comprobar las características y replicar el fotodetector:

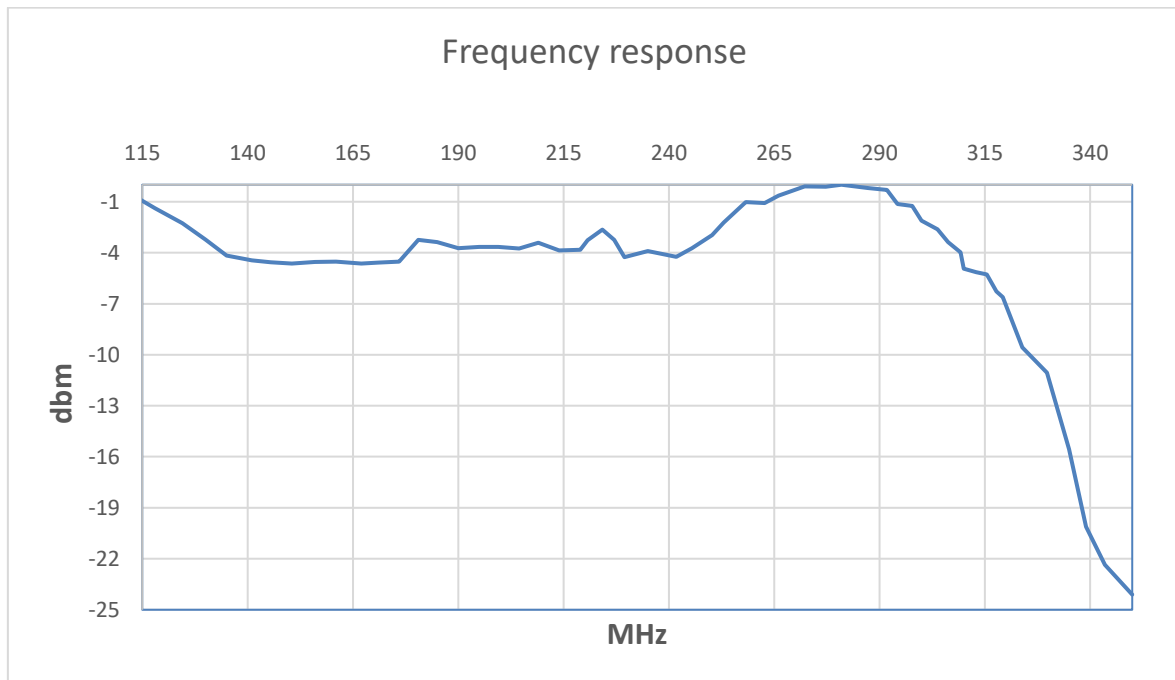
#### 1" PHOTODETECTOR

This photodetector features the **FDS015** photodiode from Thorlabs and the **OPA818** op amp with a **1.2k Rf**. It has a maximum input optical power of **5mW** (it can be damaged if it exceeds this limit) and a very small active area with a **150µm diameter**.

For the DC power supply, the **Thorlabs LDS12B** is required. All shown data has been measured using a **556nm** wavelength beam.

BW	Sensitivity	NEP	Active area	Max optical power input
~300MHz	0.2V/mW	60pW/SQRT(Hz)	150µm diameter	5mW

#### Frequency / Bandwidth



The bandwidth is approximately **300MHz**.

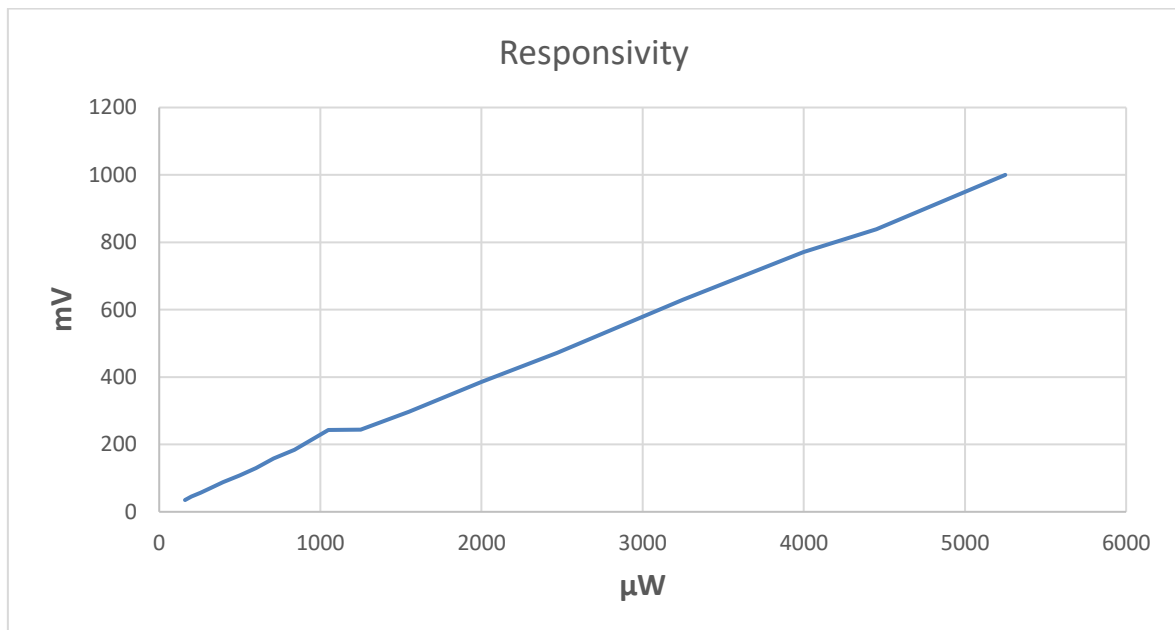
To characterize the photodetector's bandwidth, we built a double-pass interferometer using an Acousto-Optic Modulator (AOM). The laser beam was diffracted into the +1 and -1 orders, which were then retro-reflected through the AOM for a second pass. This configuration doubles the frequency shift for each beam, yielding  $+2RF$  and  $-2RF$  shifts respectively, where RF is the AOM driving frequency.

Spatially recombining these beams on the photodetector produces a heterodyne beat note at the difference frequency of  $4*RF$ . This 4-times multiplier allowed us to sweep the test frequency over a substantially wider range than the AOM's native bandwidth to evaluate the detector's high-frequency limit.

However, the AOM's diffraction efficiency naturally decreases as RF deviates from its center frequency, which would artificially look like a drop in the detector's performance. To isolate the detector's true response, we decoupled this optical loss by measuring the actual optical power of the diffracted beams at each frequency step. Since the heterodyne beat signal's amplitude is proportional to the optical power, we mathematically normalized the measured

electrical RF power against these optical readings. This calibration completely factors out the AOM's efficiency curve, ensuring that the resulting data reflects only the intrinsic electrical bandwidth of the photodetector.

### Sensitivity

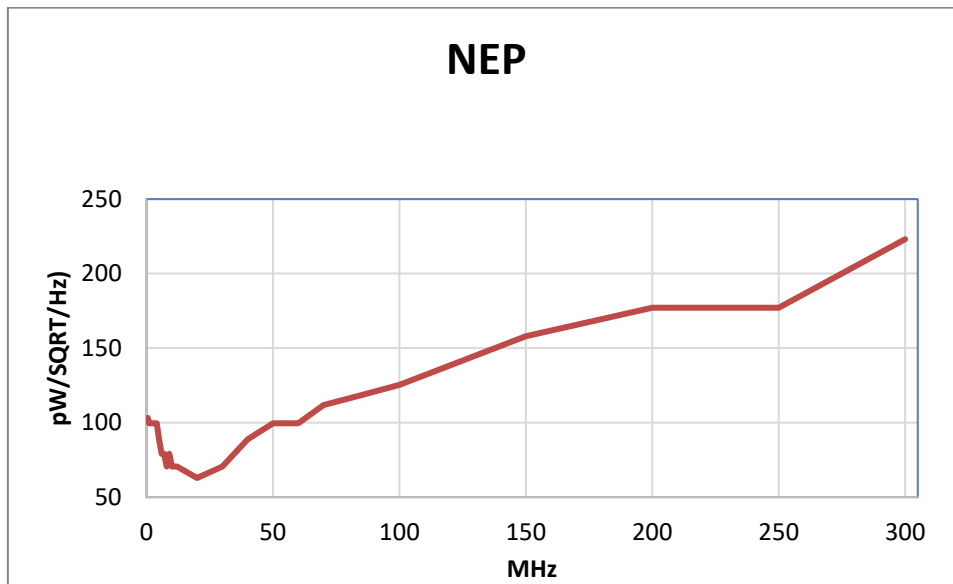


**Value: 0.2 V/mW**

To determine the photodetector's sensitivity, it was critical to ensure that the entirety of the laser beam's optical power was captured by the device's relatively small active area. To prevent any beam clipping which would artificially lower the measured responsivity, a focusing lens with a **100 mm focal length** was placed in the beam path.

By mounting the photodetector exactly at the focal plane, 100 mm behind the lens, we tightly concentrated the full spatial profile of the beam directly onto the photosensitive surface, guaranteeing a highly reliable and absolute sensitivity calibration.

### Noise



We have measured a minimum **NEP (Noise Equivalent Power)** of **60pW** of optical power that increases with frequency to **223pW at 300MHz**.

To determine the true NEP of the photodetector, the sensor was completely shielded from all ambient light to strictly isolate its intrinsic electrical dark noise. Because this baseline noise is extremely low, a **ZFL-500 RF amplifier** was placed between the detector and the spectrum analyzer to boost the signal well above the instrument's own noise floor.

The raw noise power spectral density was then recorded directly on the analyzer in **dBm/Hz**. Finally, to establish the NEP, this electrical measurement was mathematically corrected by subtracting the amplifier's gain, converted from a logarithmic electrical power to a linear voltage density, and divided by the detector's calibrated sensitivity. This conversion accurately translated the measured electrical noise into the equivalent optical noise floor, expressed in **W/SQRT(Hz)**.

## How to Build It

### Files:

- **1inch\_photodetector.zip**: This zip file contains all the KiCad files of the PCB, the BOM (Bill of Materials), and the LTSpice simulation. All files available in main lab computer in SchinelabPool/Projects/High-Bandwidth Photodetectors.

#### **Power Supply Circuit:**

- **R101** and **R107** can be modified to change the power supply, but **56k** was used to achieve **+5.56V**.

#### **Main Circuit:**

- **RF101** can be modified depending on the objective of gain and BW. Using **1.2k $\Omega$**  resulted in a **0.2V/mW** relation between output voltage and input optical power, with a BW of  **$\approx 300$  MHz**.
- Rf can be modified: if you use a larger resistor, you will increase sensitivity, but the BW will decrease; it needs to be simulated to see how it affects performance.

#### **Assembly:**

1. First, apply solder paste on all the front pads, place the components, and use a **reflow oven** to solder them.
2. For the back face, follow the same process but use a **hot air gun** instead of a reflow oven.
3. Finally, the **photodiode**, the **SMA output**, and the **DC input cable** must be soldered with a normal soldering iron as they are through-hole components.