

Proyecto Fin de Carrera

Grado en Ingeniería Electrónica Robótica y  
Mecatrónica

Diseño y caracterización de una fuente de  
estimulación luminosa de retinas

Autor: Juan Manuel Pino Blanco

Tutor: Carmen Aracil Fernández

Dpto. Ingeniería Electrónica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



**DINEL**  
DPTO. INGENIERÍA ELECTRÓNICA



Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Electrónica Robótica y Mecatrónica

# **Diseño y caracterización de una fuente de estimulación luminosa de retinas**

Autor:

Juan Manuel Pino Blanco

Tutor:

Carmen Aracil Fernández

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Electrónica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Carrera: Diseño y caracterización de una fuente de estimulación luminosa de retinas

Autor: Juan Manuel Pino Blanco

Tutor: Carmen Aracil Fernández

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

A mis padres, a mis abuelos y mis Shapaos, por ser los responsables de que nunca me rinda pesar de los altibajos de la vida. Gracias a vuestro ánimos y amor, soy Ingeniero. Os debo la última.

A Dekra T. & C. S.A.U., por confiar en mi como Ingeniero a pesar de no tener completa la titulación. Gracias por enseñarme la importancia de la certificación y el manejo de toda la instrumentación necesaria. En especial a Humberto Pérez Guerrero, mi compañero de las noches eternas, sin ti no estaría en esta posición.

A ARUS, aunque nuestros caminos se separan antes de los que me gustaría. Gracias por acogerme, en especial Manuel Perea Coca (Electronic Team Leader)

Al departamento de Ingeniería Electrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, particularmente a Carmen Aracial (mi tutora), por ofreceme este proyecto, enseñarme todo lo que necesitaba para llevar este proyecto a buen puerto. Ha sido un honor trabajar en este proyecto, gracias.

*Juan Manuel Pino Blanco*

*Sevilla, 2023*



En la actualidad, los avances en la bioingeniería han permitido una mejor comprensión de la causa y tratamientos de enfermedades. Con sistemas cada vez más precisos y potentes los procesos de estudio de enfermedades son más rápidos y seguros, dando como resultado mejores tratamiento y de más rápido desarrollo.

Sin embargo, el equipamiento especialidad sigue teniendo unos costes de adquisición muy elevado. En el caso de este trabajo se pretende diseñar y fabrica una alternativa más económica al *ColorDome*, usado actualmente para realizar electroretinogramas (ERG). Siendo ésta la motivación para realizar este trabajo.

La enfermedad en la que se quiere usar el resultado de este trabajo es la *retinosis pigmentaria*, la cual es una degeneración ocular provocada por la aparición de pigmentos opacos en la retina del enfermo. Se trata de una enfermedad ocular grave de carácter degenerativo y crónica, en la que se produce una pérdida progresiva de la capacidad visual. El estadio final de la enfermedad es una ceguera completa de la vista en el ojo afectado.

La única forma en la actualidad de detectar la *retinosis pigmentaria* es mediante electroretinogramas, pues la retina solo produce respuesta ante estímulos lumínicos, y dado que la enfermedad produce una opacidad en la retina. Pues la detección se realiza mediante la comparación entre la respuesta de una retina sana y una enferma.

El presente documento tiene como propósito explicar un sistema diseñado, fabricado y caracterizado que permita emitir estímulos lumínicos equivalente a los del *ColorDome*. Creando un sistema que permita realizar electroretinogramas, pero a una fracción de su coste y permitir realizar más ensayos sobre la enfermedad.



# Abstract

---

Currently, advances in bioengineering have allowed a better understanding of the cause and treatment of diseases. With increasingly precise and powerful systems, disease study processes are faster and safer, resulting in better treatment and faster development.

However, specialized equipment continues to have extremely high acquisition costs. In the case of this work, it is intended to design and manufacture a cheaper alternative to the ColorDome, currently used to perform electroretinograms (ERG). This being the motivation to conduct this work.

The disease in which they want to use the result of this work is *pigmentary retinosis*, which is an ocular degeneration caused by the appearance of opaque pigments in the patient's retina. It is a serious eye disease of a degenerative and chronic nature, in which there is a progressive loss of visual capacity. The final stage of the disease is complete visual blindness in the affected eye.

Currently, the only way to detect *pigmentary retinosis* is by electroretinograms, since the retina only produces a response to light stimuli, and since the disease produces an opacity in the retina. Well, the detection is done by comparing the response of a healthy retina and a diseased retina.

The present document has the purpose of presenting a system that allows the emission of light stimuli equivalent to those of the *ColorDome*. Creating a system that allows electroretinograms to be conducted but at a fraction of its cost and allows more tests on the disease.

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xix</b>
<b>Notación</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 objetivo</b>	<b>3</b>
2.1. Estado del arte.	3
2.2. Requisitos del Sistema	5
<b>3 Diseño del sistema</b>	<b>11</b>
3.1 Selección de componentes	12
3.1.1 Diodo LED	12
3.1.2 Regulador de tensión	14
3.1.3 Potenciómetro digital	16
3.1.4 Microcontrolador	17
3.2 Control de intensidad de iluminación	18
3.2.1 Regulación mediante variación de tensión	19
3.2.2 Regulación mediante variación mecánica de resistencia.	21
3.2.3 Regulación mediante bucle de control cerrado	21
3.3 Simulación	23
3.4 Software	25
3.4.1 Programación <i>LaunchPad</i>	26
3.4.2 Interfaz de usuario	28
<b>4 Fabricación</b>	<b>31</b>
4.1 Diseño en Altium	31
4.1.1 Esquemático	31
4.1.2 Rutado de la PCB	32
4.1.3 Renderizado en 3D	33
4.2 Construcción de la PCB	34
4.3 Resultado	35
<b>5 Resultados</b>	<b>37</b>
5.1. Resultados pruebas en el laboratorio CABIMER	37
5.2. Caracterización del prototipo	40
<b>6 Conclusiones y Propuestas de mejora</b>	<b>45</b>
<b>Referencias</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO I: Software MSP430G2553</b>	<b>49</b>

<b>ANEXO II: Software interfaz de usuario</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO III: BOM</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO IV: Manual de usuario</b>	<b>67</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3-1. Especificaciones técnicas del LED KW H4L531.TE	12
Tabla 3-2. Especificaciones técnicas de LM1085ISX-ADJ/NOPB	14
Tabla 3-3. Especificaciones MAX5437UED+T	17
Tabla 3-4. Resultado para la Ecuación 3-5.	23
Tabla 3-5. Asignación de Pines	27
Tabla 5-1. Características del Prototipo	43



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Retina sana y Retina con Retinosis Pigmentaria.	3
Figura 2-2. Rangos de Candelas, intervalos y repeticiones utilizadas en el estudio.	4
Figura 3-1. Esquema global del sistema	11
Figura 3-2. LED KW H4L531.TE.	13
Figura 3-3. Esquema eléctrico del LED KW H4L531.TE.	13
Figura 3-4. Flujo luminoso relativo.	14
Figura 3-5. LM1085.	15
Figura 3-6. Esquema de regulador con encendido a 5V.	15
Figura 3-7. Regulador ajustable básico.	16
Figura 3-8. Encapsulado TSSOP-14	17
Figura 3-9. MSP430G2553	18
Figura 3-10. MSP-EXP430G2 <i>LaunchPad</i> .	18
Figura 3-11. Ejemplo de control de intensidad lumínica de un LED.	19
Figura 3-12. Esquemático control en variación de tensión.	20
Figura 3-13. Potenciómetro radial y Motor paso a paso.	21
Figura 3-14. Configuración seguidora de tensión.	21
Figura 3-15. Fuente de corriente regulada plateada.	22
Figura 3-16. Esquema del sistema propuesto.	23
Figura 3-17. Respuesta del sistema. En azul la corriente que circula y en negro la tensión en cada nodo.	24
Figura 3-18. Respuesta del sistema en la resistencia R1. Corriente en función de la resistencia de R3.	24
Figura 3-19. Respuesta del sistema ante la variación de V3. Corriente en función de la Resistencia R3 y la tensión V3.	25
Figura 3-20. Representación del dialogo Maestro/Eslavo.	26
Figura 3-21. Esquema de los pines del MSP430G2553.	27
Figura 3-22. Diagrama de flujo de <i>void loop()</i> .	28
Figura 3-23. Interfaz de usuario.	29
Figura 3-24. Mensaje de parámetros incorrectos.	29
Figura 3-25. Ejemplo de transmisión de datos en el cuadro de dialogo.	30
Figura 4-1. Esquemático PCB	31
Figura 4-2. Top PCB	32
Figura 4-3. Bottom PCB	32
Figura 4-4. PCB en 3D	33
Figura 4-5. Simulación de la interconexión del <i>LaunchPad</i> y la PCB diseñada.	33
Figura 4-6. PCB fabricada por <i>JLCPCB</i> .	34

Figura 4-7. Vista superior del sistema.	35
Figura 4-8. Vista inferior del sistema.	35
Figura 4-9. Vista lateral izquierda del sistema completo.	36
Figura 4-10. Vista lateral derecha del sistema completo.	36
Figura 5-1. Montaje para realización del ensayo.	37
Figura 5-2. Resultados prueba sobre retina de ratón con pulso de 10 ms.	38
Figura 5-3. Resultados prueba sobre retina de ratón con pulso de 1 s.	39
Figura 5-4. Montaje para medición de corriente en el LED.	40
Figura 5-5. Resultados de las mediciones de corriente.	40
Figura 5-6. Valor mínimo medido capturado con el osciloscopio.	41
Figura 5-7. Valor máximo medido capturado con el osciloscopio.	41
Figura 5-8. Flujo relativo máximo del prototipo señalado en rojo.	42
Figura 5-9. Montaje con ratón artificial para caracterización.	42
Figura 5-10. Valor sobre fotodiodo a mínima potencia.	43

A	Amperios
V	Voltios
$\Omega$	Ohmios
<	Menor o igual
>	Mayor o igual
F	Faradio
Hz	Hercios
PCB	Printed Circuit Board
Lx	Luxes
Cd	Candelas
Lm	Lumen
S	Segundo
ms	Milisegundo
R	Resistencia
sin	Función seno
SMD	Surface-mounted device
THD	Through-hole device
LED	Light Emitting Diode
TTL	Transistor Transistor Logic
SPI	Serial Protocol Interface
UART	Univeral Asynchronous Reciever Transmitter
BOM	Bill Of Materials



# 1 INTRODUCCIÓN

---

El presente trabajo de fin de grado se compone de varias partes, de esta forma se separa las distintas etapas que engloban el proceso de diseño y construcción. El objeto de diseño este trabajo engloba términos propios de la medicina, así como de la ingeniería.

La aplicación de la ingeniería a las ciencias médicas ha permitido la mejora de calidad de vida de millones de personas, por esta la motivación de este trabajo de fin de grado adquiriera una mayor sustancia. Los requerimientos del diseño parten de una necesidad médica.

Es por ello por lo que el presente documento se dividirá de forma detallada, con el fin de no saturar al lector cuando se entrelacen términos médicos con ingenieriles. A demás se pretende explicar las distintas etapas del trabajo de forma clara y con coherencia.

La división del documento será:

- Objetivo
- Diseño del sistema.
- Fabricación del sistema.

En primer lugar, y con finalidad de entender el porqué de los requerimientos que aplican al sistema, se dará una explicación breve de la *Retinosis Pigmentaria* y cómo afecta a la retina. Detallando las necesidades de los investigadores médicos para continuar los progresos en la investigación del tratamiento de la enfermedad. Cubriendo lo que es llamado en el documento Análisis de requerimientos.

En segundo lugar, en el “Diseño del sistema”, se detalla el diseño de un sistema capaz de producir una potente fuente lumínica durante breves periodos de tiempo, variables según sea necesario y con la capacidad de regular la intensidad lumínica. Todo ello debe ser realizado de forma digital, es decir, debe permitir que a través de un microcontrolador se tenga el control total sobre el sistema. En esta parte del documento se justifican las decisiones que llevaron a la configuración final del sistema.

En tercer lugar, Fabricación del sistema, se detallan los procesos de fabricación, así como las técnicas empleadas para la fabricación de un prototipo funcional. También se detallarán los cambios cometidos en el diseño para poder llevar a cabo la producción. Pues el proceso de fabricación usado en la fabricación de la PCB, la litografía, requiere unos compromisos de diseño a la hora del diseño de las pistas, vías y espaciados dentro del circuito.



## 2 OBJETIVO

---

*De nada sirve decir “Lo estamos haciendo lo mejor posible”. Tienes que hacer lo que sea necesario para tener éxito.*

*Winston Churchill, 1874*

El objetivo principal del proyecto es facilitar el estudio de la *Retinosis Pigmentaria*, un conjunto de enfermedades genéticas crónicas con carácter degenerativo agrupadas bajo este nombre. Esta enfermedad produce una degradación de la capacidad de absorción lumínica en el ojo.

La degeneración de las células que forman la retina, conos y bastones, produce un oscurecimiento de la retina. Esto produce que una cantidad menor de luz alcance los nervios ópticos. Y al tratarse de una enfermedad degenerativa los pacientes que la sufren se ven abocados a la ceguera permanente.

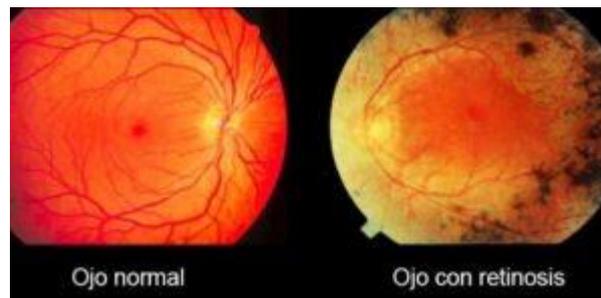


Figura 2-1. Retina sana y Retina con Retinosis Pigmentaria.

La técnica empleada para el estudio de la enfermedad es el *Electrorretinograma* (ERG). Esta técnica es un examen ocular en el cual se estudia la respuesta de la retina ante estímulos lumínicos, obteniendo la respuesta eléctrica mediante una serie de electrodos. Estos electrodos son posicionados sobre la córnea y la piel próxima al ojo.

Para la realización de ERG sobre explantes u organoides sería muy útil contar con un sistema portable y con dimensiones compatibles con el *MultiChannel*. Este sistema debería tener la capacidad de emitir estímulos lumínicos de intensidad variables con ancho de pulso variable. La motivación de presente documento será obtener un sistema que pueda sustituir al *ColorDome*, ayudando a los investigadores con sus estudios de la *Retinosis Pigmentaria*.

### 2.1. Estado del arte.

El sistema de referencia, sobre el cual se plantea el diseño del sistema, objeto de este trabajo, es el dispositivo *ColorDome*. El *ColorDome* se emplea actualmente para la realización de electroretinogramas. El dispositivo es utilizado para el estudio con animales vivos, principalmente ratones que fueron mutados para que posean la *Retinosis Pigmentaria*. El dispositivo que se pretende diseñar debe tener unas dimensiones más contenidas, adaptadas a la fisonomía de los ratones, incluyendo la compatibilidad con el sistema de medición *MultiChannel*. Pues el dispositivo se ideó pensando en humanos.

El *ColorDome* tiene la capacidad de variar la frecuencia de los pulsos luminosos que emite, así como la intensidad de cada uno de ellos. La unidad de intensidad lumínica empleada por el dispositivo es la candela (cd). Siendo esta la unidad básica del sistema internacional que mide la intensidad luminosa, en este documento se empleara también el lumen (lm), que se define como flujo luminoso.

Como apoyo al presente trabajo, se ha empleado el artículo “*Electroretinogram (ERG) to Evaluate the Retina Using Mouse Models*” (Electrorretinograma (ERG) para evaluar la retina usando modelos de ratón).

En el presente artículo se detalla el método para realizar un correcta ERG sobre ratones. Esto ha prestado valiosa información sobre lo que realiza hoy en día, y las mejoras que se pretenden. Ya que la conciencia actual sobre el trato animal no permite el sacrificio de ratón de manera tan ligera como antaño. Además, en el artículo se indica el uso del *ColorDome* como fuente lumínica para la realización del estudio. Sin embargo, debido a las limitaciones del sistema de trabajo actual, se usarán explantes extraídos por los investigadores de CABIMER.

Los explantes son sistemas orgánicos extraídos, en este caso la retina de un ratón, de tal forma que se puedan conservar vivos para poder experimentar sobre ellas. Lamentablemente, para extraer el explante el ratón ha de ser sacrificado de forma ética. Este proceso es llevado a cabo por los investigadores de CABIMER, de acuerdo con la DIRECTIVA 2010/63/EU, que regula la protección de animales utilizados para fines científicos dentro de la Unión Europea.

Adicionalmente, pueden usarse organoides en sustitución o como complemento para realizar las investigaciones necesarias. Los organoides son estructuras compuestas por tejidos vivos producidos artificialmente, a partir de células madre ya diferenciadas. Los organoides se emplean para recrear órganos humanos ya que recrear las mismas funciones biológicas que las del órgano que se quiere recrear. Además, son estructuras tridimensionales por lo que se pueden adaptar a sistemas complejo para la adquisición de datos.

Tanto los explantes como los organoides han de ser depositados sobre un dispositivo que permita obtener mediciones validas sobre ellos. Este dispositivo es conocido como MEA (Multi Electrode Array), consiste en un circuito impreso, donde se han rutado un array de electrodos de forma que este pueda ser empleado por el MultiChannel. Los explantes o organoides entra en contacto directo con los electrodos y de esta forma se puede estimular o recoger datos de ellos.

Protocols for serial intensity electroretinograms (ERGs)

Steps	Stimulus intensity (log cd·s/m <sup>2</sup> )	Interstimulus interval (s)	Number of repeats
Scotopic serial intensity <sup>a</sup>			
1	-6.0	2	20
2	-5.0	2	20
3	-4.0	5	15
4	-3.0	5	10
5	-2.0	5	10
6	-1	10	10
7	0	10	5
8	1.0	30	3
Photopic serial intensity <sup>b</sup>			
1	-1	1	10
2	0	1	10
3	0.3	2	10
4	0.6	2	10
5	1	5	10
6	1.48	5	5
7	2.0	10	5
8	2.3	10	3

<sup>a</sup>Overnight dark adaption

<sup>b</sup>Photopic background illuminance: 30 cd/m<sup>2</sup>; light adaptation duration: 10 minutes

Figura 2-2. Rangos de Candelas, intervalos y repeticiones utilizadas en el estudio.

Con el presente artículo se tienen datos acerca de los rangos de exposición, así como el método de trabajo empleado por el equipo de investigación. En el artículo se pueden observar dos casos, uno con oscuridad total “Scotopic serial intensit” y otro con iluminación ambiental “Photopic serial intensit”. Para el objeto del presente trabajo no se hará distinción de casos, ya que estos son condiciones ambientales. Lo que se puede observar es que las variaciones de intensidad lumínica son valores discretos, no de forma continua. También, se observa que los intervalos entre pulso son valores que se miden en segundo, además que el número de repeticiones cambia

en función del paso en el que estemos.

Los resultados en el estudio se obtuvieron mediante electrodos conectados a los globos oculares de los ratones. Se observa en los resultados que los ratones con retinas sanas tienen un comportamiento común. Sin embargo, cuando los resultados presentan anomalías se infiere que la enfermedad está presente.

## 2.2. Requisitos del Sistema

El prototipo debe cumplir con los requisitos que se exponen a continuación, dividido en tres bloques principales.

El bloque 1 de requisitos son aquellos asociados a la iluminación, son los siguiente:

- La forma del prototipo debe estar adaptada al espacio disponible en el MultiChannel. El espacio libre entre el microscopio integrado y el array de sensores.
- La cantidad de LEDs debe ser la mínima posible, buscando la máxima eficiencia.
- El cableado debe ser el mínimo posible.
- Los valores de intensidad lumínica deben ser los más aproximada posible al ColorDome. Deben ser valores altos.

El bloque 2 de requisitos son aquellos al control de la intensidad lumínica y la duración de los pulsos, siendo estos los siguientes:

- El control de la intensidad lumínica debe realizarse de forma digital.
- El ancho de pulso, así como el espaciado entre pulsos debe ser controlado de forma digital.
- La interfaz de control debe ser sencilla e intuitiva.

Y, por último, los requisitos del bloque 3, son los referentes a los requisitos del microcontrolador:

- El microcontrolador empleado debe ser de baja potencia, ya que las necesidades computacionales del sistema son mínimas.
- Deber tener un coste bajo.

Satisfaciendo lo anteriormente expuesto, se diseñará un sistema óptico-electrónica que garantice su empleabilidad. Teniendo en cuenta su cómoda, instalación y transporte.



# 3 DISEÑO DEL SISTEMA

*El futuro mostrará los resultados y juzgará a cada uno de acuerdo a sus logros...*  
- Nicola Tesla, 1856 -

Los objetivos de este capítulo son ofrecer una idea clara de cómo se ha llegado al sistema propuesto. En el diseño se optaron por ciertos componentes en lugar de otros atendiendo a su disponibilidad en el mercado. Para mejorar su comprensión se ha dividido en 4 partes. A saber: selección de componentes, control de intensidad de iluminación, simulación y software.

En la siguiente Figura, se presenta una imagen global del diseño que se quiere acometer:

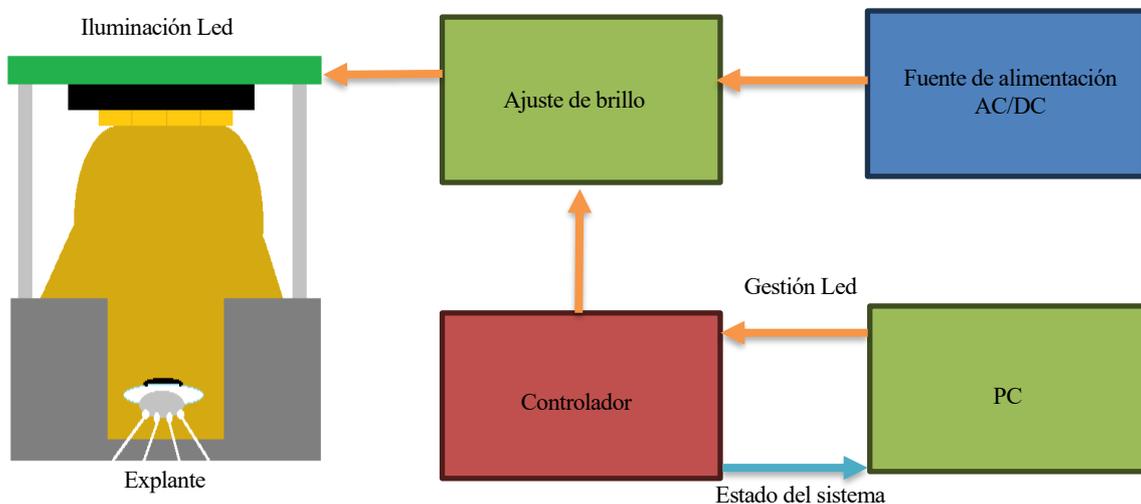


Figura 3-1. Esquema global del sistema

Como se aprecia en la Figura 3-1, es el esquema que compone el sistema y su disposición durante la realización de un estudio sobre un explante en el hueco disponible sobre el MultiChannel. El sistema se situará encima del explante depositado sobre una MEA, con el LED alineado con éste. Para el control del sistema se utilizará un PC, que mediante un cable USB se comunicará con el bloque Controlador. Este bloque está compuesto por un microcontrolador que tendrá programado las funciones necesarias para la gestión del LED, mientras en el PC estará instalado un software de control que transmitirá los valores indicados por el usuario al microcontrolador. Los valores de intensidad luminosa, ancho de pulso, intervalo entre pulsos y número de pulsos será indicado por el usuario a través del PC. Todo ello será explicado en detalle, en los siguientes puntos del presente documento.

### 3.1 Selección de componentes

Para la selección de los componentes se tuvo en cuenta la elegibilidad de componente, que estuviera disponible en los proveedores del departamento de electrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería. A demás, se tuvo en consideración que el número mínimo de partes por pedido fuera dentro de las necesidades de este proyecto, un demostrador tecnológico, entre 1 y 5 partes por pedido.

Estos componentes no son todos los integran el sistema, pero si los más significativos. Sin embargo, son la base entorno la cual se construye el proyecto. El resto de los componentes como resistencias, condensadores, transistores y amplificadores operacionales son componentes que no aportan significado al diseño sin los componentes a continuación mencionados.

#### 3.1.1 Diodo LED

Para la aplicación que se precisa para este proyecto, y a teniendo los requisitos de diseño, se ha seleccionado el LED ams OSRAM OSOLON Black Flat. En concreto, el KW H4L531.TE con emisión de color blanco. En la siguiente tabla se muestra un resumen de especificaciones técnicas:

Tabla 3-1. Especificaciones técnicas del LED KW H4L531.TE

Características	Valor
Colores del LED	Blanco
Temperatura del Color	6000K
Número de LEDs	4
Tensión Directa	10,90 – 14,90 V
Corriente Directa	50 – 1200 mA
Intensidad Luminosa	493,4 cd
Ángulo de Exposición	120°
Superficie Radiante	4 mm <sup>2</sup>

El color del LED es el blanco con una temperatura de color neutra pues es la requerida para realizar una EGR. Pues esto simula la exposición a la luz natural, estimulando todos los receptores de la retina. Ya que el color blanco es la suma de todos los colores del espectro visible. A demás, la intensidad luminosa es muy próxima a la del *ColorDome*.

Los valores de tensión y corriente directas son apropiados, pues se pretende usar una fuente de alimentación DC externa de 24 V y 2,5 A. Con el uso de un regulador lineal de tensión, se ajustará los valores de tensión y corriente para que estén situados dentro de los valores necesarios para el correcto funcionamiento del LED.

OSRAM, el fabricante de esta LED, es uno de los principales fabricantes de sistemas de iluminación ópticos. Lo que representa una baza a la hora de encontrar documentación y suministros de componentes disponibles.



Figura 3-2. LED KW H4L531.TE.

Este dispositivo LED, se encuentra conformado un array de 4 diodos LEDs conectados en serie. Esto ofrece la posibilidad de aplicar control sobre cada diodo individualmente. Sin embargo, para este proyecto se ha optado por no ejercer control individual sobre cada diodo. También, se ha de tener en cuenta que esta LED no soporta corriente inversa, lo que supone que en un error de montaje puede quedar inservible si se trata de usar con polaridad inversa. Esto no pasaría de ser un hecho anecdótico de no ser, porque se trata de un dispositivo destinado para el sector de la automoción, que la principal aplicación es la construcción de faros de automóvil.

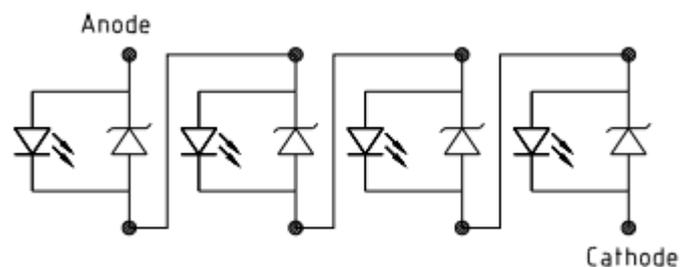


Figura 3-3. Esquema eléctrico del LED KW H4L531.TE.

Una cualidad significativa es la relación entre corriente e intensidad lumínica relativa, como se muestra en los documentos de especificaciones técnicas del LED. La relación que muestra es cuasi lineal, lo que permitirá establecer un sistema de control simple pero muy aproximado. Una de la advertencia que se ha de tener es que el fabricante desaconseja el uso del LED con corrientes inferiores a 50 mA. Además, que de 50 a 250 mA la respuesta lumínica del LED puede no ser lineal.

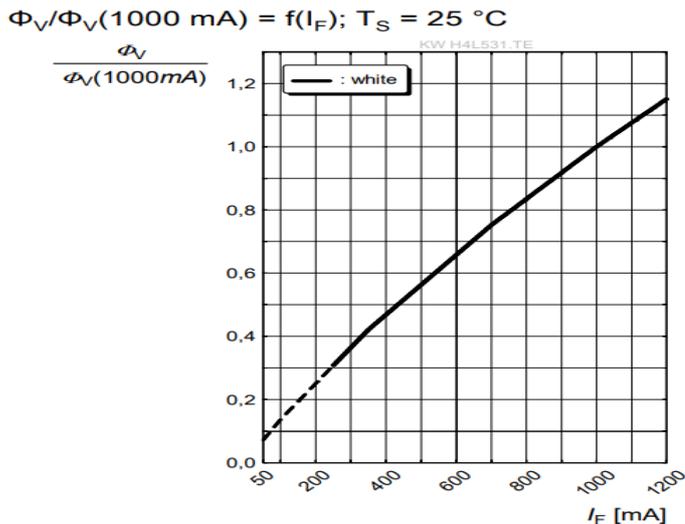


Figura 3-4. Flujo luminoso relativo.

### 3.1.2 Regulador de tensión

Con regulador de tensión se optó por el LM1085ISX-ADJ/NOPB del fabricante Texas Instruments. El cual es un regulador del voltaje lineal calificado como LDO (Low-Drop-Out), lo que implica una baja caída de tensión entre entrada y salida. Se opto por un regulador lineal, por el motivo que la fuente de alimentación portátil empleada para alimentar el sistema es de corriente continua que entrega 24 V y 2,5 A. Un resumen de las especificaciones técnicas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3-2. Especificaciones técnicas de LM1085ISX-ADJ/NOPB

Características	Valor
Tensión de Entrada	1,5 – 29 V
Tensión de Salida Ajustable	1,25 – 27,5 V
Corriente de Salida	3 A
Tensión de Caída Vdo	1,3 V
Encapsulado	TO-263
Número de Pines	3
Temperatura de Trabajo Mín.	-40°C
Temperatura de Trabajo Máx.	125°C

El fabricante Texas Instruments, tiene una trayectoria más que dilatada en la fabricación de semiconductores y circuitos integrados. En la actualidad se encuentra como unos de los mayores productores de semiconductores del mundo. Lo que implica que sus productos son ampliamente usados en todo tipo de aplicaciones, lo que conlleva a un amplio repositorio para consultar en diseños similares al que se quiere llevar a cabo en este proyecto.

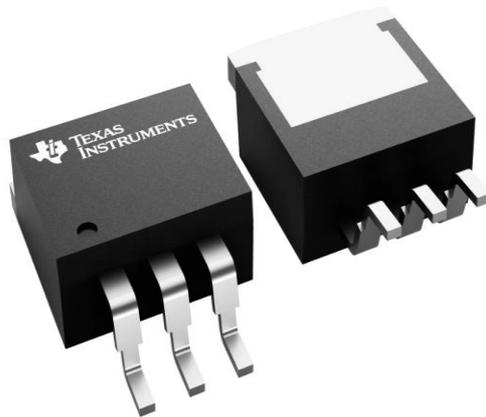


Figura 3-5. LM1085.

El principal motivo de la selección de este regulador de tensión, en su versión ajustable, es la configuración con control de encendido con lógica TTL. Con tan solo la inclusión de un transistor NPN, su puede activar la salida de tensión del regulador. Esto facilita enormemente el control de encendido, bloqueando o permitiendo el paso de corriente a través del pin ADJ del regulador. Si la lógica TTL está en nivel alto, el transistor NPN se activa y el regulador se desactiva, manteniendo una salida de aproximadamente 1,25 V. Si la lógica TTL se encuentra en nivel bajo, el transistor NPN no está polarizado y el regulador funciona con normalidad.

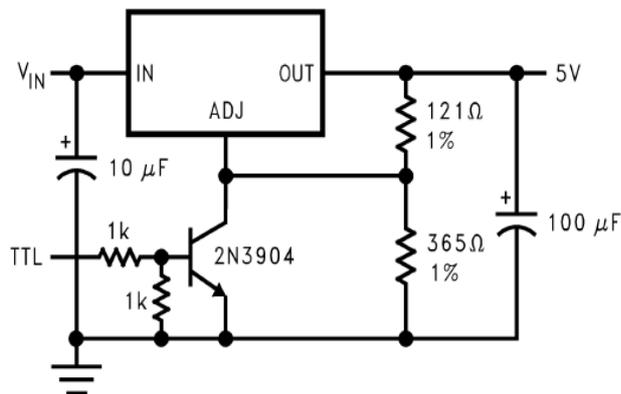


Figura 3-6. Esquema de regulador con encendido a 5V.

Además, el nivel de tensión de salida como único condicionante tiene que ser 1,3 V menor que el de entrada. Y como se aparece en la Tabla 3-1, la tensión directa del LED es de 10,9 a 14,9 V y la fuente de alimentación entrega 24V, la regulación de tensión se puede realizar sin ningún inconveniente. La tensión de salida en este caso será dictada para la relación entre  $R1$  y  $R2$ , como se observa en la siguiente ecuación y figura:

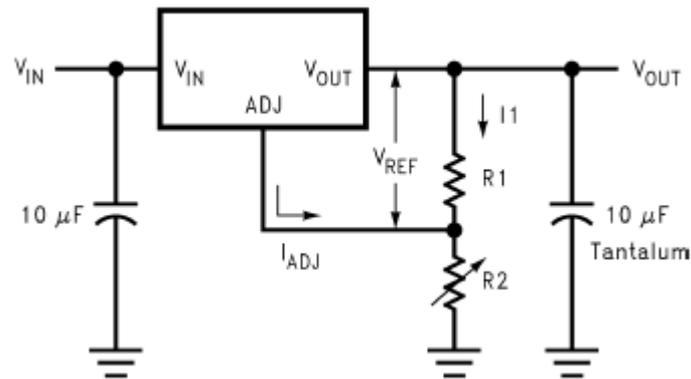


Figura 3-7. Regulador ajustable básico.

$$V_{out} = V_{ref} * \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) + I_{ADJ} * R2$$

Ecuación 3-1. Ecuación salida del voltaje del regulador.

La versión ajustable usa una tensión de referencia  $V_{ref}$  de 1,25 V para realizar el ajuste de tensión. Teniendo en cuenta que esta tensión se multiplica por coeficiente de  $R2$  entre  $R1$  más 1, a su vez sumando  $I_{ADJ}$  por  $R2$ . No permite regular la tensión de forma sencilla. Además, para valores pequeños de  $R1$ , de orden de  $100 \Omega$ ,  $I_{ADJ}$  es muy pequeño, sobre los 120  $\mu A$ . Permite despreciar el término  $(I_{ADJ} * R2)$ , simplificando aún más la ecuación de salida del voltaje, obtenido:

$$V_{out} = V_{ref} * \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$

Ecuación 3-2. Ecuación simplificada de salida del voltaje del regulador.

### 3.1.3 Potenciómetro digital

Como potenciómetro digital se seleccionó el MAX5437UED+T de fabricante Analog Devices. Se trata de un potenciómetro digital volátil, lo cual implica que no mantiene el valor seleccionado entre ciclos de apagado y encendido. Además, para su control cuenta con el uso del protocolo de comunicación SPI. En la siguiente tabla se muestra un resumen de sus especificaciones más significativas:

Tabla 3-3. Especificaciones MAX5437UED+T

Características	Valor
Tensión de Alimentación $V_{CC}$	2,7 – 5.25 V
Tensión de Alimentación $V_{DS}$	10 – 30 V
Resistencia	0 – 50 k $\Omega$
Tolerancia	20 %
Encapsulado	TSSOP-14
Número de Pines	14
Corriente máxima continua	$\pm 1$ mA
Interfaz	SPI

Analog Device, más en concreto la serie Maxim Integrated, son utilizados en una amplia variedad de equipos electrónicos basados en microprocesadores. Una muestra de las aplicaciones de los circuitos de Maxim incluye aplicaciones de electrónica de consumo, ordenadores personales y periféricos, aparatos electrónicos portátiles, comunicaciones inalámbricas y por fibra, equipos de pruebas, instrumentación, pantallas de vídeo y automoción.

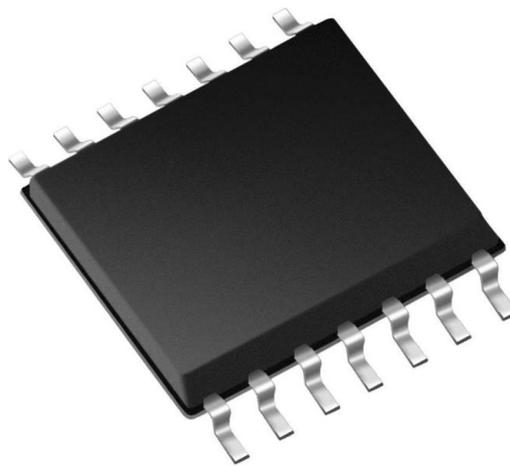


Figura 3-8. Encapsulado TSSOP-14

Debido a la escasez de como ponentes se optó por la versión de 50 k $\Omega$  ya que la versión de 100 k $\Omega$  no se encontraba disponible. A demás, cuenta con una tolerancia del 20% sin duda una desventaja que se ha de tener en cuenta. Pues la regulación del sistema vendrá limitada en función del valor de resistencia que se obtenga experimentalmente sobre el dispositivo. Otros dispositivos con mejores tolerancias no estaban disponibles o no poseían las características eléctricas adecuadas, para la realización de este proyecto.

### 3.1.4 Microcontrolador

Como microcontrolador se optó por el MSP430G2553, facilitado por el Departamento de Electrónica. La familia de microcontroladores MSP430 (MSP: Mixed-Signal Processor) de Texas Instruments son procesadores de señal combinada de 16 bits. Su arquitectura pertenece a la categoría RISC (Reduced Instruction Set Computer o Computador de Conjunto de Instrucciones Reducidas). Diseñados para tener un muy bajo consumo eléctrico. Son muy útiles gracias la amplia capacidad para soportar diferentes periféricos.

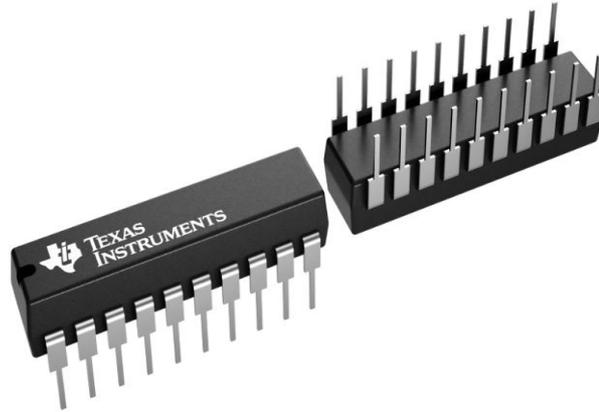


Figura 3-9. MSP430G2553

Para facilitar tanto la programación, como el diseño se empleó el *LaunchPad* MSP-EXP430G2. Gracias al puerto USB-B con el que cuenta y la interfaz UART ya integrada, fue una decisión más que óptima para este proyecto. A demás, sirvió como referencia a la hora de plantear las dimensiones del sistema.

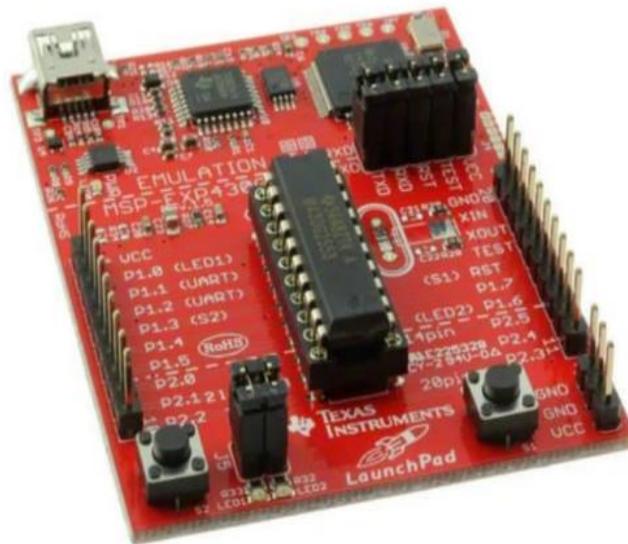


Figura 3-10. MSP-EXP430G2 *LaunchPad*.

### 3.2 Control de intensidad de iluminación

Las estrategias de control habitualmente usada para el control de la intensidad lumínica de un LED, PWM (Pulse Width Modulation), también conocida como modulación por ancho de pulso. El PWM permite el ajuste de la cantidad de energía que se entrega al LED, mediante la modificación del Duty cycle (ciclo de trabajo) de la señal, el porcentaje por ciclo que la señal se encuentra en nivel alto. Esta señal puede cuadrada o senoidal, en sistemas digitales suele ser cuadrada.

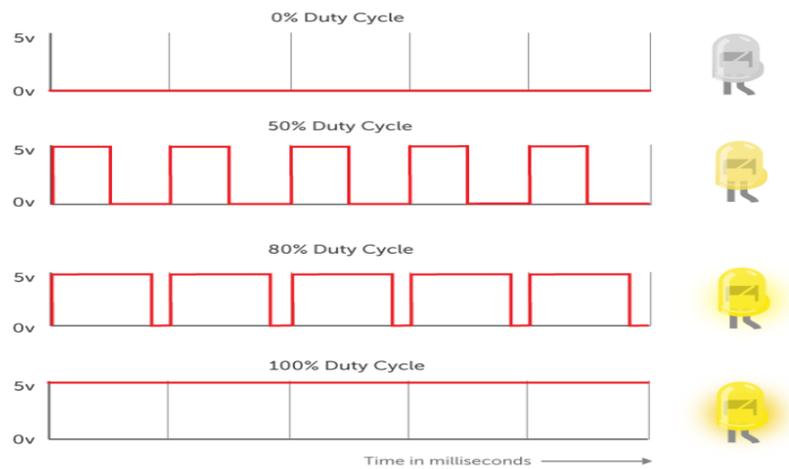


Figura 3-11. Ejemplo de control de intensidad lumínica de un LED.

En realidad, con este tipo de control hace uso del comportamiento capacitivo del diodo para regular la intensidad lumínica del LED. Cuanto más bajo sea el Duty cycle menos tiempo permanece encendido el LED no dejando que este llegue a encenderse por completo y produciendo la ilusión de que este tiene menos brillo. Para niveles de frecuencia bajos es posible ver los parpadeos en el LED. Dado que, para la aplicación de este proyecto, los pulsos son unitarios y de ancho variable esta estrategia no es válida. Por lo cual, como alternativa se usará la estrategia CCR (Continuous Current Reduction), reducción de continua de corriente. En la cual se reducirá de forma intencional la corriente suministrada al LED para variar su intensidad luminosa. Esta estrategia se basa en aplicar la Ley de Ohm, por lo cual se fijará una intensidad objetivo y se manipularán la tensión o la resistencia para obtener la corriente deseada.

A continuación, se explicarán las distintas estrategias consideradas, para el módulo de control de intensidad de la iluminación.

### 3.2.1 Regulación mediante variación de tensión

Como primera aproximación se planteó la utilización de la variación de tensión y usar una resistencia de valor fijo para modificar el valor de corriente. La idea es usar la capacidad de regular la tensión de salida del LM1085 utilizando el potenciómetro digital MAX5437UED. Fijando los valores objetivos entre los 10,9 y 14,9 V, siendo éstos los valores de tensión para que el LED opere. Construyendo un sistema con el siguiente esquemático:

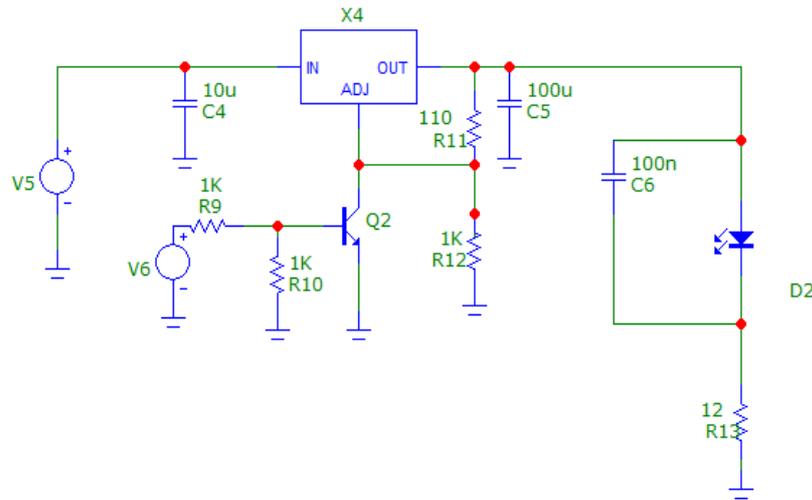
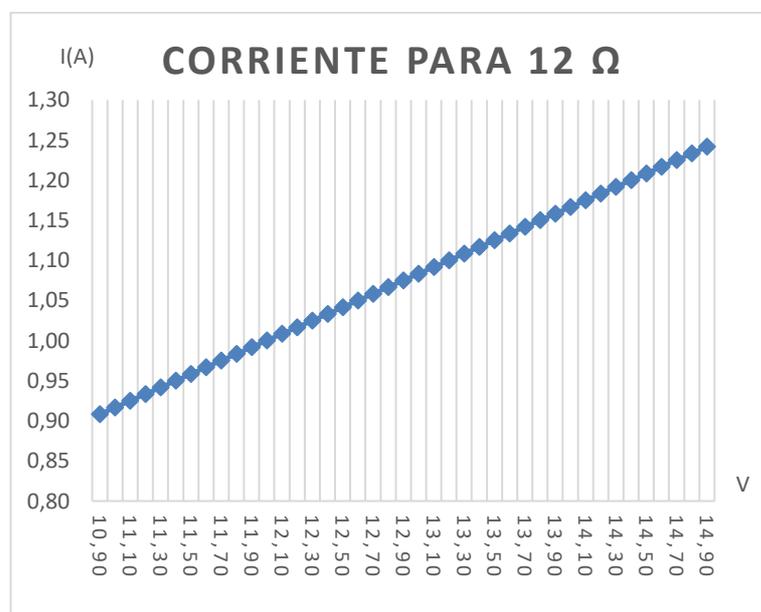


Figura 3-12. Esquemático control en variación de tensión.

Donde R12 sería el potenciómetro digital, X4 el regulador de tensión y D2 el LED. Sin embargo, aunque pareciera un sistema prometedor la variación en corriente que se consigue con este sistema es pequeña. Para obtener una corriente de 1,2 A a la tensión máxima de que soporta el LED sería necesaria una resistencia de 12  $\Omega$ , pero esto a su vez implica que la corriente mínima que podríamos suministrar al LED sería de 910 mA. Haciendo uso de la figura 3-3, se conseguiría una variación relativa de luminosidad inferior al 15%



Gráfica 3-1. Relación tensión corriente para una resistencia de 12  $\Omega$

Para solventar este inconveniente se debería integrar varias resistencias en el sistema de distintos valores para cubrir todo el rango de corriente de LED. Para ello sería necesario integrar un sistema para la selección de la resistencia correcta en función del nivel lumínico que se desee. Sin embargo, esto añadiría complejidad al sistema y un aumento de costes, así como la utilización de un volumen mayor para el desarrollo del proyecto. Por lo cual, esta estrategia quedo descartada.

### 3.2.2 Regulación mediante variación mecánica de resistencia.

Como segunda aproximación al problema se planteó el uso de un potenciómetro analógico, pues los potenciómetros digitales disponibles no soportan los niveles de corriente adecuados para este proyecto. Esto implicaría renunciar al control totalmente digital del sistema, uno de los requisitos impuestos para el sistema. Como solución se planteó usar un motor paso a paso para el control de potenciómetro analógico. Mediante la unión del rotor del motor al eje axial del potenciómetro, esto permitiría un control digital, se conseguiría la regulación de corriente.

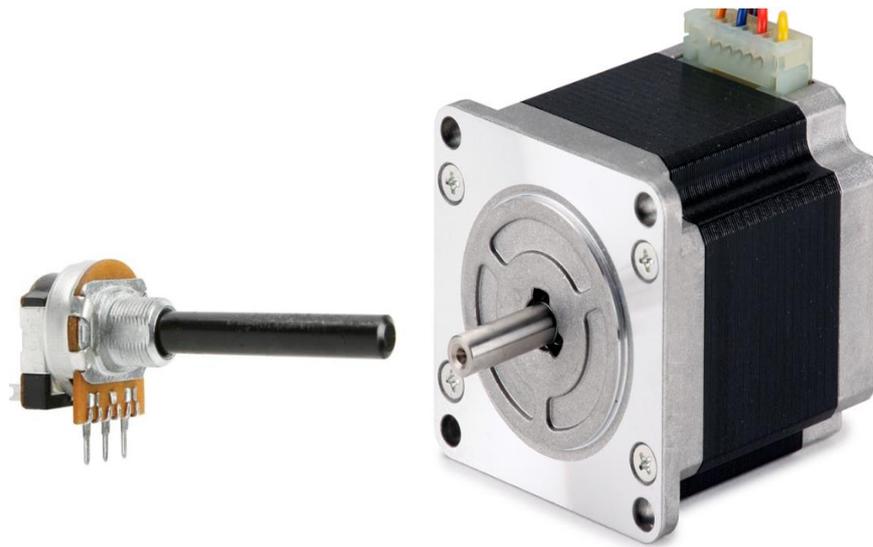


Figura 3-13. Potenciómetro radial y Motor paso a paso.

Sin embargo, este sistema de regulación quedó descartado debido a la complejidad que representaba. Se debía diseñar la unión mecánica, con un coste tanto en tiempo como monetaria no asumible, la integración de un controlador (Driver) para el motor, así como el diseño de un soporte para el motor. Solo el volumen que implica el motor ya representa un desafío significativo, haciendo el sistema incompatible con el MultiChannel por dimensiones. Pues el espacio disponible para el sistema es relativamente pequeño.

### 3.2.3 Regulación mediante bucle de control cerrado

Esta estrategia está basada en el uso de un amplificador operacional (A.O.) como fuente de corriente. Dado que la configuración más básica de amplificador operación es el seguidor de tensión, usado para la adaptación de impedancias entre distintos circuitos. Si a éste se le coloca una resistencia de salida toda la corriente se trasladará a través de esta. Y mediante el uso de un sistema de control de tensión a la entrada del amplificador se podría tener una fuente de corriente regulada.

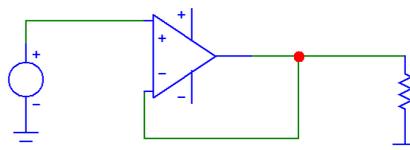


Figura 3-14. Configuración seguidora de tensión.

La tensión de entrada en la entrada positiva sería la misma que en la entrada negativa, lo que la tensión de salida sería la misma que la de entrada. Por lo cual permite fijar la corriente en la resistencia de salida, aplicando la ley de Ohm. Sin embargo, esta configuración presenta un problema la corriente máxima que se puede entregar es la máxima que ofrezca el amplificador operacional, en el caso de este trabajo el LM358P sería 20 mA. Lo que representa un serio inconveniente, ya que la corriente mínima para que el LED opere es de 50 mA.

La solución para el problema de la baja corriente es la inclusión de un transistor MOSFET, el cual será usado en la región óhmica. En la región óhmica o lineal, el transistor actúa como una resistencia variable, permitiendo modular el paso de corriente a través de éste. Pero esto implica que el transistor está consumiendo potencia, por lo cual el transistor se calentará en exceso si se usa de forma continuada. Sin embargo, dado el carácter del sistema, las emisiones de pulsos lumínicos son de corta duración. Por lo cual, no implicará un exceso de temperatura. En caso de realizar un uso prolongado, se debe integrar un disipador al transistor.

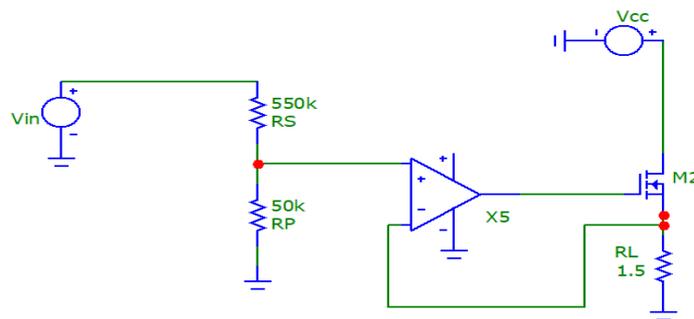


Figura 3-15. Fuente de corriente regulada plateada.

Como se puede apreciar en la figura 3-14. En esta solución se ha integrado el potenciómetro digital como RP, RS siendo una resistencia fija, RL la resistencia de carga 1,5 Ω, la tensión de  $V_{in}$  24 V y la tensión  $V_{cc}$  12,5 V. Las resistencias fijas se han seleccionado para que la máxima corriente que puede entregar el sistema es de 1,3 A. Esto se debe a la tolerancia del 20 % de potenciómetro digital. Se optó por que el sistema pudiera entregar más corriente en el caso de que el valor del potenciómetro fuera de 40 kΩ pudiera seguir entregando 1 A. Este compromiso resta precisión al sistema ya que, si el potenciómetro resulta ser de 60 kΩ, hay 20 kΩ que no se usarían. La tensión máxima de salida en el divisor de tensión es de 2 V, por lo que en el caso del IRFZ44 usado en este proyecto sería la tensión mínima de ruptura antes de abandonar la zona lineal.

$$V_{out} = V_- = V_+ = V_{in} * \left( \frac{RP}{RS + RP} \right)$$

Ecuación 3-3. Ecuación del divisor de tensión.

$$I_{RL} = \frac{V_{out}}{RL}$$

Ecuación 3-4. Ley de Ohm sobre la resistencia RL

$$I_{RL} = \frac{V_{in} * \left(\frac{RP}{RS + RP}\right)}{RL} = 16 * \left(\frac{RP}{550k + RP}\right)$$

Ecuación 3-5. Sustitución de la ecuación 3-3 sobre la 3-4.

Los cálculos como se muestran en las ecuaciones anteriores son muy sencillos ya que se trata de un seguidor de tensión. Por lo cual se optó por este sistema para la regulación de corriente, por tanto, la regulación de intensidad luminosa. En la siguiente tabla se han tabulado el valor de la corriente en función del valor de la resistencia del potenciómetro.

Tabla 3-4. Resultado para la Ecuación 3-5.

Resistencia en kΩ	Corriente en mA
0	0
10	258,7
20	561,4
30	827,6
40	1084,7
50	1333,3

### 3.3. Simulación

Una vez, seleccionado como se va a controlar la intensidad lumínica y el encendido a través de la configuración del regulador de tensión con encendido y pagado. Se procede a simular el sistema para ello se hará uso del software Micro-Cap 12, facilitado por el Departamento de Electrónica. Micro-Cap 12 permite la construcción de esquemáticos para la simulación dinámica de circuitos electrónico, tanto analógicos como digitales.

La simulación de circuitos electrónicos permite un ahorro sustancial de tiempo. Ya que, a partir de los cálculos preliminares se puede construir un circuito y comprobar si el circuito cumple con las especificaciones, y detectar los posibles fallos que tenga. Esto supone ahorrar dinero en circuitos de pruebas, pues un cálculo incorrecto puede suponer dañar o destruir valiosos componentes.

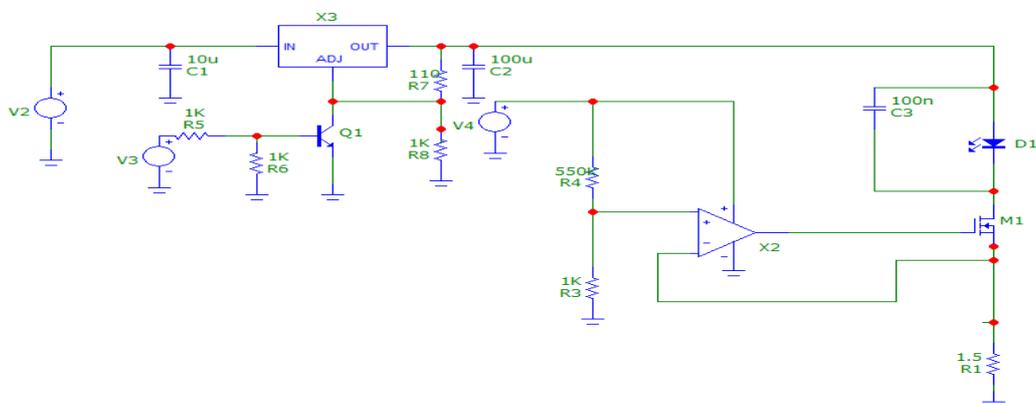


Figura 3-16. Esquema del sistema propuesto.

La simulación del sistema se centra en dos casos comprobar que la regulación de corriente cumple con lo planeado teóricamente, y que el sistema para el encendido/apagado del sistema cumple con lo descrito en la hoja de datos del LM1085. La simulación se lleva a cabo con los componentes que luego se instalarán en la PCB, exceptuando el potenciómetro digital del cual no se logró encontrar su modelo de simulación y se usó en su lugar una resistencia genérica que luego se parametrizaría. También, se comprobó que las tensiones y corrientes en los lazos del circuito fueran las correctas.

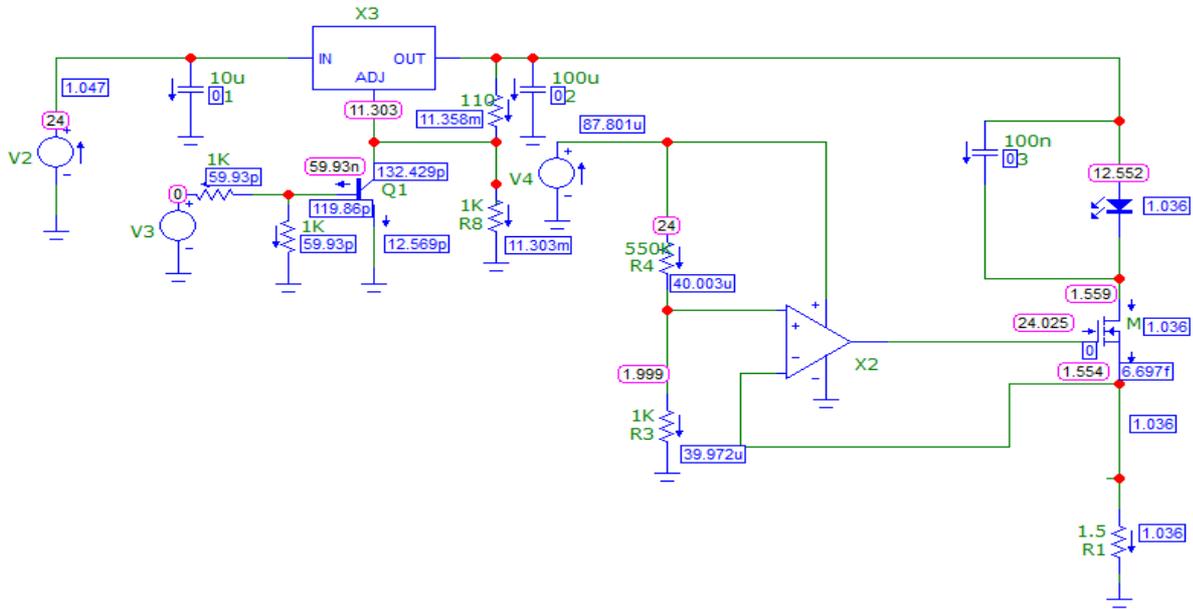


Figura 3-17. Respuesta del sistema. En azul la corriente que circula y en negro la tensión en cada nodo.

Como se observa en la figura 3-16, los valores tanto de corriente como de tensión son lógicos para el sistema planteado en el estudio estático cuando la resistencia del potenciómetro R3 tiene un valor de 40 kΩ. Se observa que la corriente que circula por R1 es de 1,036 A. Por lo tanto, el LED está con la máxima iluminación posible. Los resultados más detallados sobre la corriente en la resistencia R1 se muestra en la siguiente figura.

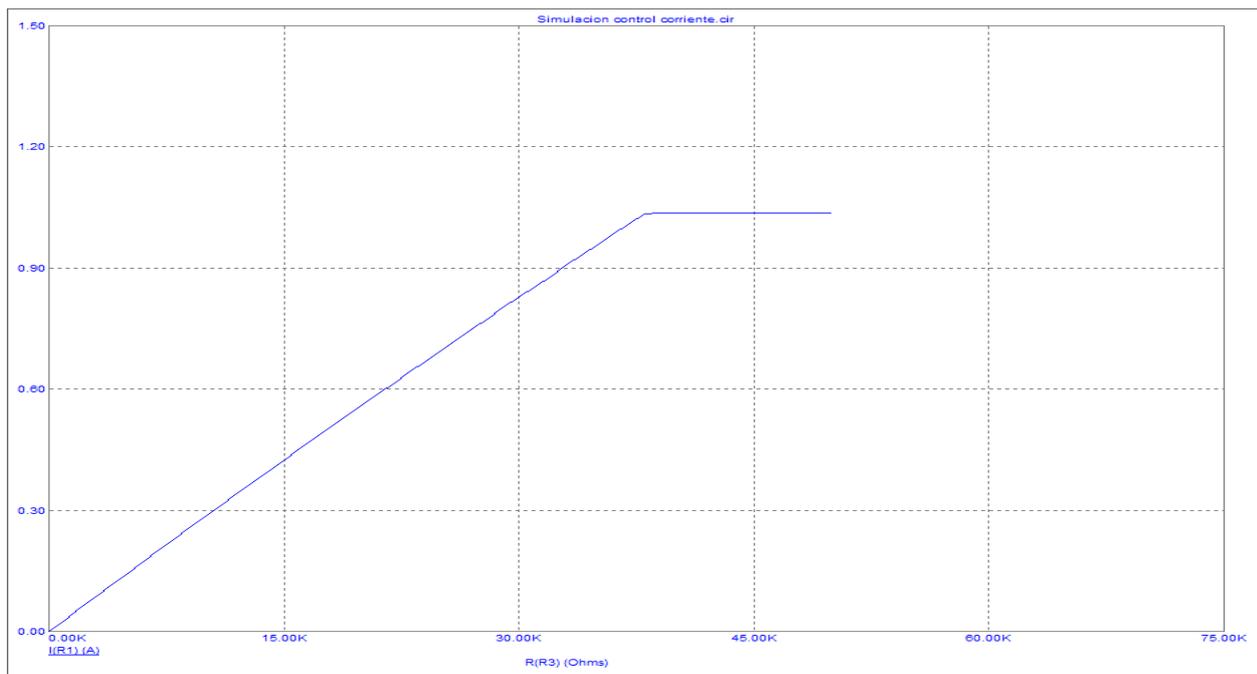


Figura 3-18. Respuesta del sistema en la resistencia R1. Corriente en función de la resistencia de R3.

En la figura 3-18, se muestra la respuesta lineal que tiene el sistema a la hora de modular la corriente que fluye por la R1, por tanto, por el LED, en función de la resistencia del potenciómetro R3. Se observa que a partir de 37,5 k $\Omega$  aproximadamente, el sistema se satura y ya no tiene un comportamiento lineal, no puede entregar más corriente. Esto se debe a que se alcanzó la tensión de ruptura del MOSFET por lo que se alcanza la máxima tensión que cae en la resistencia de carga. Este comportamiento fue previsto, y se buscó de manera intencionada como se describió en el punto 3.2.3.

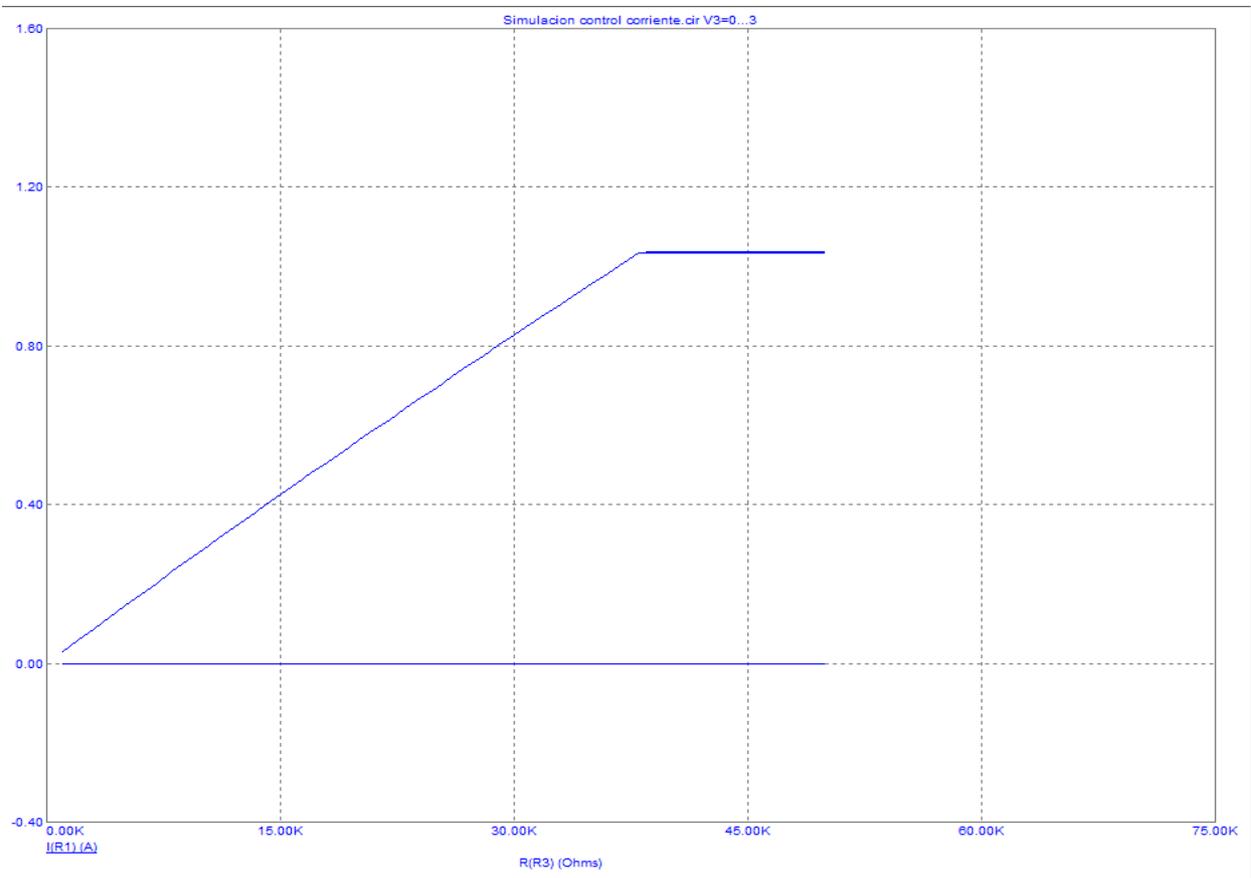


Figura 3-19. Respuesta del sistema ante la variación de V3. Corriente en función de la Resistencia R3 y la tensión V3.

En la figura 3-18, se obtuvo la respuesta del sistema ante la variación de la señal de encendido. Para ello se simula que la señal tomara los valores 0; 1; 2; 3 V. Para valores inferiores a 1,3 V el sistema está completamente encendido como se observa en la curva superior. Para valores superior a 1,3 V el sistema está completamente apagado como se observa en la curva inferior en la que se puede observar que el valor es continuamente 0 independientemente de la resistencia del potenciómetro.

Con esto resultado queda demostrado que el sistema funciona teóricamente, con lo que se puede pasar a la fabricación del sistema. Para completar el sistema se han de integrar dos amplificadores operacionales, uno como seguidor de tensión para adaptar la impedancia entre la placa del microcontrolador y el sistema. Y otro seguidor de tensión para el potenciómetro ya que se trata de un sistema digital en conveniente protegerlo ante la desadaptación de impedancia.

### 3.4. Software

El software será el encargado de realizar el control sobre los dos parámetros del sistema, el tiempo de encendido apagado del LED y la potencia lumínica de este. Para ello se programará el microcontrolador MSP430G2553, que será el responsable de realizar la acción. Y, por otra parte, se incluye la interfaz de usuario, donde se seleccionarán el valor de los parámetros, así como la cantidad de repeticiones del sistema.

Para llevar a cabo esta tarea se aplicó el modelo de comunicaciones Maestro/Esclavo. Donde el Maestro será el PC donde se instale el software que contiene la interfaz de usuario, y el Esclavo será el microcontrolador. La interfaz de comunicación será el puerto serie también conocida como UART. El Maestro iniciara la comunicación enviando un Bit y espera la respuesta del Esclavo. Una vez recibida la respuesta el Maestro envía los valores seleccionados por el usuario, que dando a la espera de la confirmación del fin del proceso. Una vez finalizado el proceso el Esclavo enviara el mensaje de confirmación de fin, que dando este a la espera para volver a iniciar el proceso de nuevo.

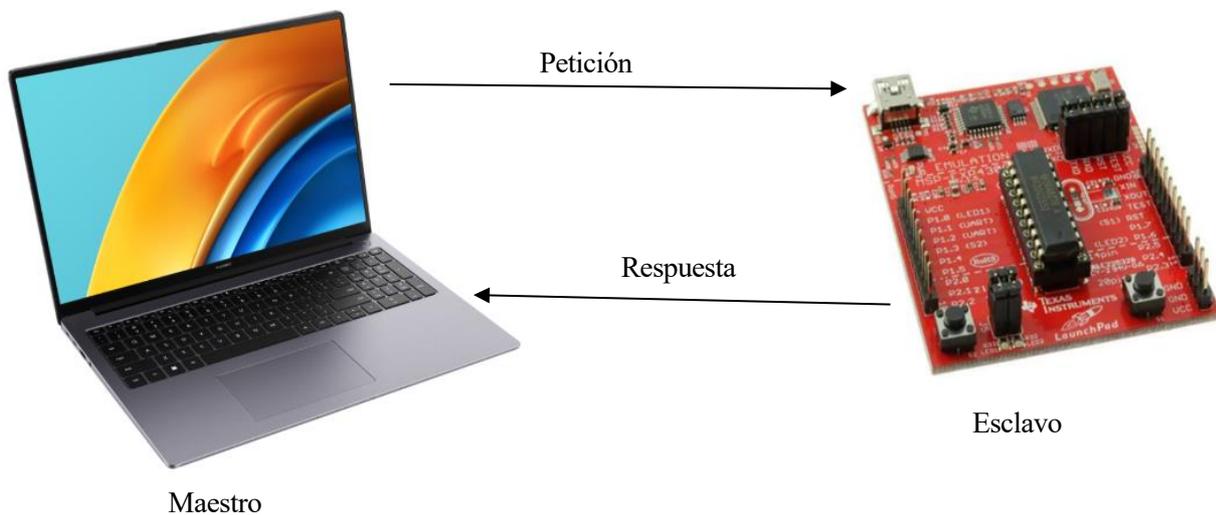


Figura 3-20. Representación del dialogo Maestro/Esclavo.

Adicionalmente, se programó una función al microcontrolador para que pudiera ser usado sin la necesidad de un PC, mediante uno valores previamente almacenados en memoria. Solo con alimentar el sistema en su conjunto y pulsando el botón S2, situado en la esquina inferior izquierda, el sistema realiza un ciclo completo. Esto es útil para comprobar si hubiera algún tipo de problema de conexión entre el PC y el microcontrolador.

### 3.4.1 Programación *LaunchPad*

Para la programación del MSP430G2553 se usó la plataforma *Energía*, esta plataforma es similar a la plataforma Arduino. Lo que implica una interfaz familiar y simple a la hora de la programación. Además, cuenta como una amplia biblioteca de proyectos de referencias para facilitar el aprendizaje.

El código del proyecto se adjunta como Anexos, para la consultar por el usuario o para futuras mejoras del software. Sin embargo, el usuario final no tendrá que modificar este código en ningún aspecto, pues el control de los parámetros se realizar a través de la interfaz de usuario. Solo sería necesario modificar el código si se quiere modificar los valores del modo local.

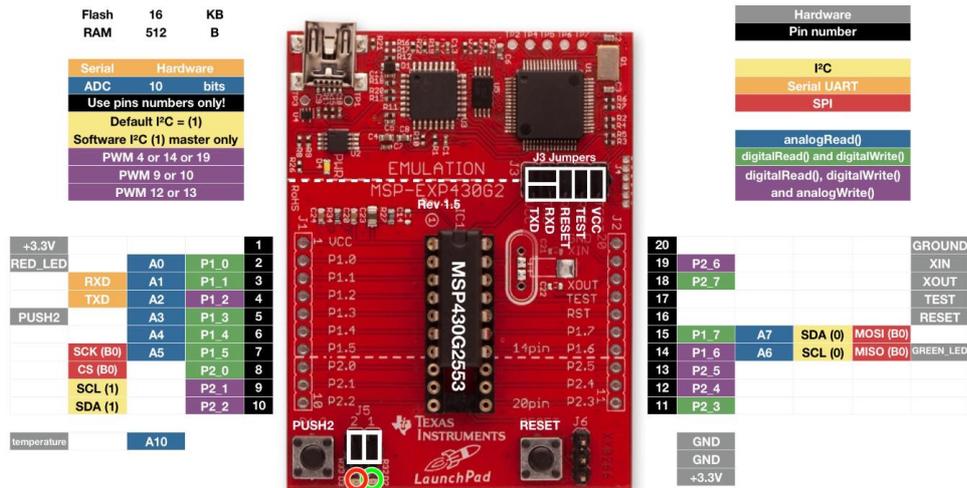


Figura 3-21. Esquema de los pines del MSP430G2553.

La asignación de pines se ha realizado teniendo en cuenta las necesidades del proyecto. Pues para la comunicación con el potenciómetro digital se realiza mediante el protocolo SPI, lo que implica el uso de tres pines, que se definen en rojo en la figura 3-20. También se necesita un puerto para el control del encendido, luego el sistema requerirá el uso de solamente 4 pines para comunicación. En la siguiente tabla se definen los pines usados en la programación.

Tabla 3-5. Asignación de Pines

Numero de Pin	Uso
1	activación LED
7	CLK SPI
8	CS SPI
15	MOSI SPI

Los pines usados se deben a la asignación restringida para la comunicación SPI que realiza *Energía*. El pin 1 se usó para activar el LED debido que también está asignado al led rojo del *LaunchPad*, lo que facilita la comprobación del correcto funcionamiento del sistema. Los pines 7 8 y 15 se usarán para la comunicación SPI con el potenciómetro digital.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo de la función *void loop ()* donde el microcontrolador llegaba a cabo todos los procesos para controlar el LED. La función *Lumifunction* es la responsable de leer los parámetros almacenado en memoria, enviar al potenciómetro el valor de resistencia que debe tener, ejecutar el número de ciclos a realizar con el tiempo entre ciclos y el ancho del pulso almacenados. La función *Decodi* es la responsable de leer la cadena de caracteres que se envía a través de la interfaz de usuario, y separar la cadena en las distintas variables, además de almacenarlas en memoria.

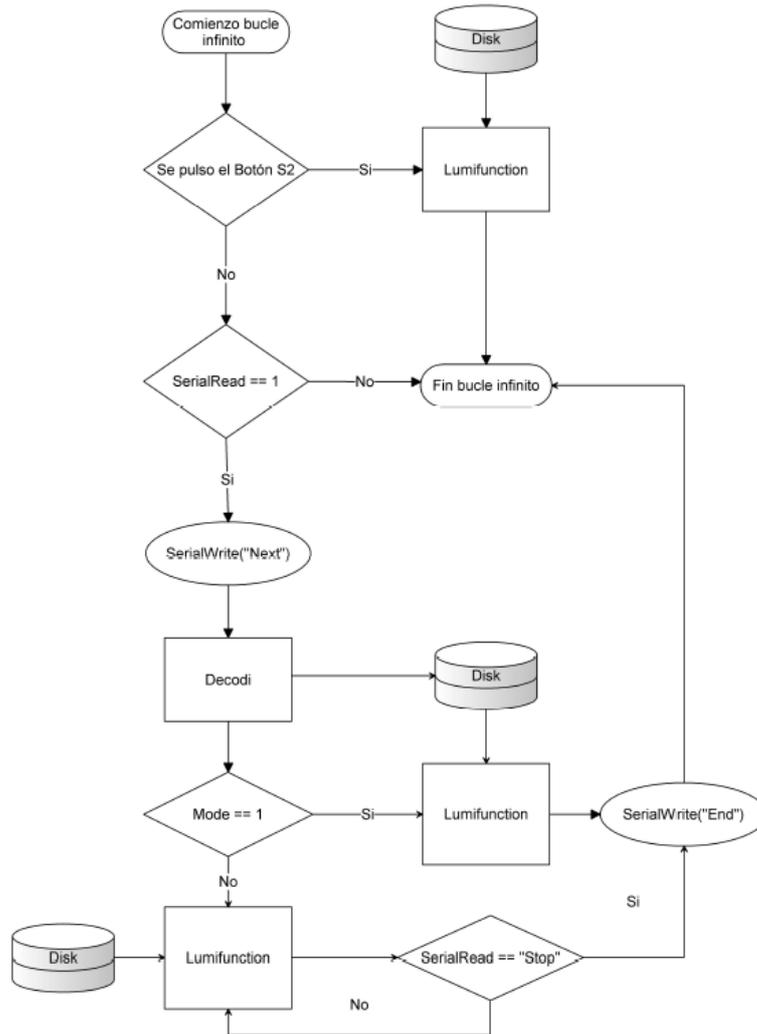


Figura 3-22. Diagrama de flujo de `void loop()`.

### 3.4.2 Interfaz de usuario

Para la programación de la interfaz de usuario se usó la plataforma *Visual Studio* de la empresa *Microsoft*. *Visual Studio* permite editar y compilar código en multiplex lenguaje. Para la creación de la interfaz de usuario se utilizó la API WPF (Windows Presentation Foundation) en lenguaje C# con las herramientas Framework .NET.

Esta API permite de forma sencilla crear un programa con interfaz de usuario, ya que se trata una interfaz declarativa en la que podemos usar los bloques ya creados para diseñar la interfaz, además de modificar estos mediante un editor incorporado o el uso del lenguaje XAML. Añadiendo, que gracias a esta API el programa es compatible con todas las versiones de *Windows* a partir de *Windows XP* hasta la versión más reciente *Windows 11*. Lo que facilita su uso y distribución, pues al ser un ejecutable no se necesita instalar ningún software adicional.

La siguiente Figura muestra la interfaz de usuario diseñada para ser intuitiva, clara y fácil de usar. Haciendo uso de la filosofía de diseño minimalista, se ha creado un interfaz que no posee grandes florituras. Todos las opciones y parámetro de entrada están claramente a la vista y son fácilmente interpretables.

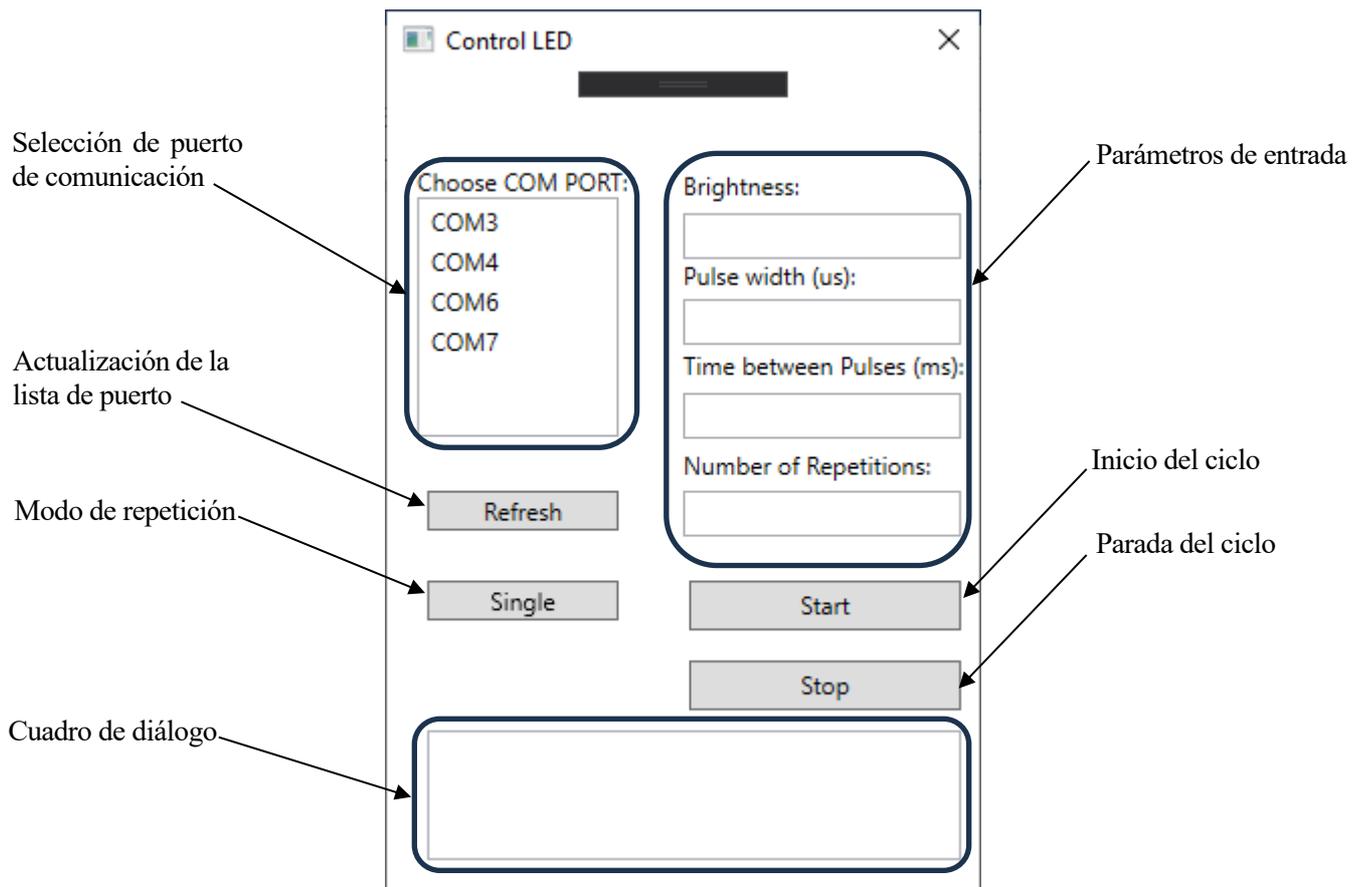


Figura 3-23. Interfaz de usuario.

La interfaz cuenta con mecanismos de seguridad para que solo se pueda escribir en los parámetros de entrada, definidos en la figura anterior, solamente números y con los valores en intervalos previstos. En caso de que uno o varios valores no sean correctos, se borran todos los valores introducidos y se mostrara el siguiente mensaje:

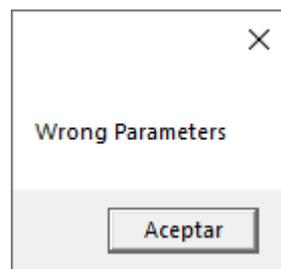


Figura 3-24. Mensaje de parámetros incorrectos.

En el cuadro de dialogo se nos muestra los mensajes enviados con la inclusión del prefijo *TX*, y los mensajes recibidos con el prefijo *RX*. Todos los mensajes cuentan con la introducción de la hora en tiempo real de la máquina que ejecuta la interfaz. El texto del cuadro de dialogo se puede copiar, pero no eliminara ni modificar.

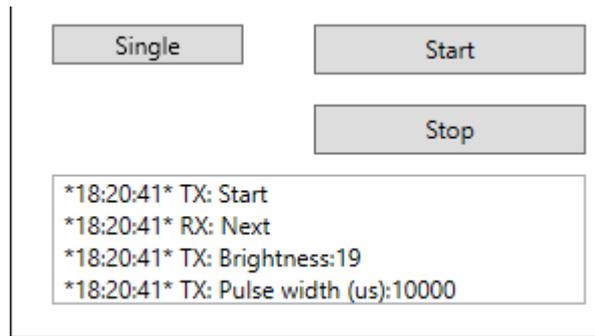


Figura 3-25. Ejemplo de transmisión de datos en el cuadro de dialogo.

Para iniciar la transmisión de datos haremos clic, en el botón *Refresh*, actualizando la lista de puertos disponibles y se seleccionan el puerto correspondiente. A continuación, se hará la selección del modo de repetición, *Single* para un solo ciclo y si se hace clic sobre el cambiara a *Continuos* para infinitos ciclos, en el segundo modo se deshabilita el parámetro *Number of Repetitions*. Seguidamente se pulsará el botón *Start* para comenzar la transmisión y el ciclo, quedando a la espera de del mensaje de repuesta *End* para confirmar el fin del proceso. El botón *Stop* parara los ciclos solo en modo continuo de infinitos ciclos, además mostrando un mensaje de fin de ciclos.

## 4 FABRICACIÓN

*El barco está más seguro anclado en el puerto, pero ese no es el cometido de los barcos.*

*Pablo Coelho, 1947*

En este capítulo vamos a describir las partes de las que consta la fabricación del prototipo, desde la traslación del esquemático realizado para la simulación hasta el proceso de fabricación soldadura y montaje. El proceso de fabricación es uno de los puntos fundamentales para realizar la demostración de los conceptos aprendidos y llevarlos a cabo, demostrando la capacidad de producir un sistema de uso real.

Para la traslación del diseño del esquemático *Micro-Cad 12* a un diseño PCB apto para la fabricación se empleó el software *Altium Designer*. *Altium* no solo permite realizar el trazado de vías, sino también un renderizado 3D de la PCB además permite combinar varios diseños para genera un render para anticipar el resultado de la fabricación.

### 4.1 Diseño en Altium

Para satisfacer las necesidades del diseño real se añadieron los componentes necesarios como el puerto de entrada de alimentación del sistema, un seguidor de tensión para conectar mediante alta impedancia la *Luanchpad* y esta PCB. Además, los condensadores de filtrado especificados en los datasheet de los distintos componentes y un condensador en paralelo al LED.

#### 4.1.1 Esquemático

El esquemático está incluido como anexo a este documento. En él se puede apreciar el diseño en su conjunto, así como todas las conexiones que se han de realizar. Adicionalmente, la BOM (Bill Of Materials), se adjunta como anexo.

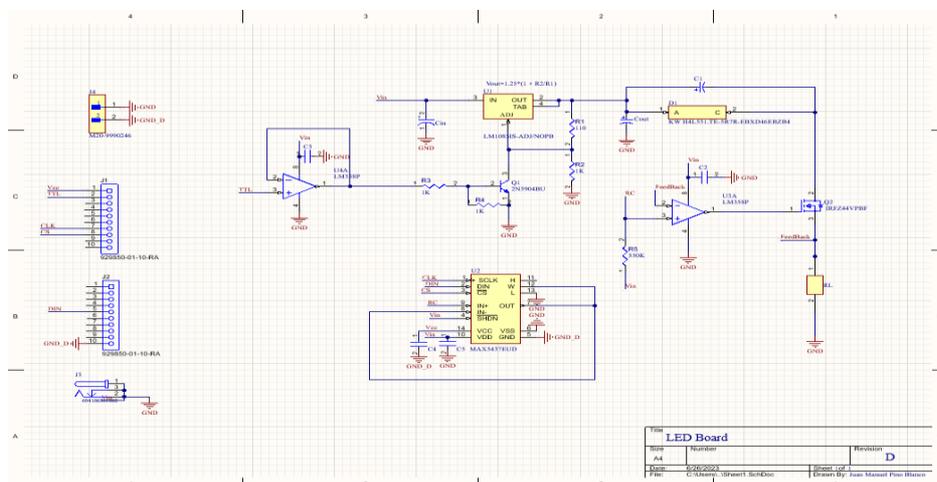


Figura 4-1. Esquemático PCB

### 4.1.2 Rutado de la PCB

Debido a la complejidad del diseño se optó por una solución en dos capas. La amplia mayoría de los componentes están situados en el plano Top (plano superior). Sin embargo, solo dos componentes están situados en el plano Bottom (plano inferior), el conector y el LED. El LED debe estar ubicada a que al tener que colocar el *Launchpad* sobre el plano Top, lo que supondría que la proyección lumínica quedaría opacada por el *Launchpad*. Además, esta ubicación facilita la alineación con el objetivo del estímulo.

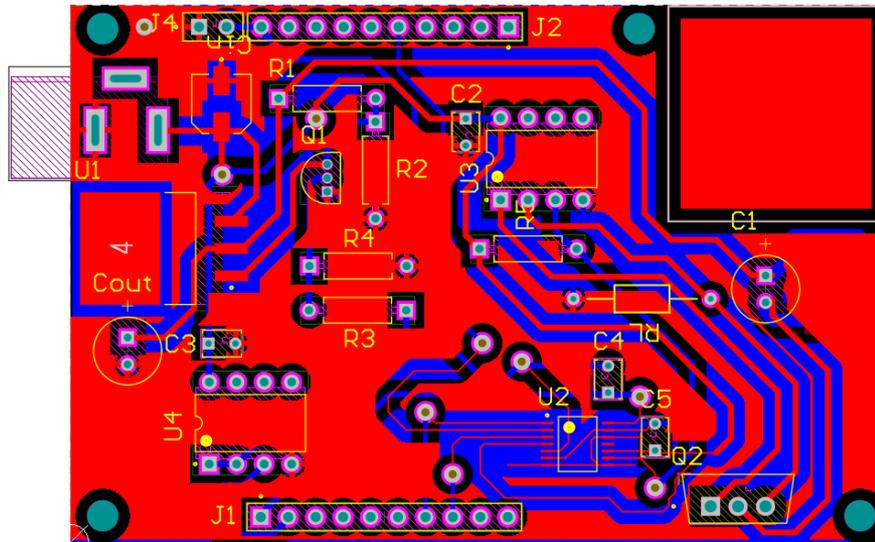


Figura 4-2. Top PCB

En la figura 4-2, en la esquina superior derecha se aprecia un cuadro de espacio libre, este fue añadido debido a la imposibilidad de soldar LED a la PCB. Por lo cual, el maestro de laboratorio proporcionó una solución en la que se compró una PCB en la que viene ya soldado el LED.

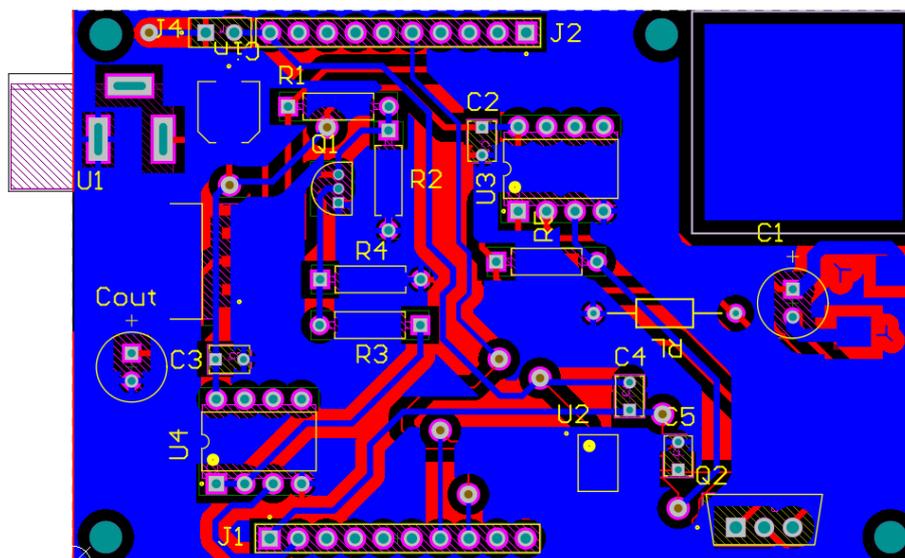


Figura 4-3. Bottom PCB

### 4.1.3 Renderizado en 3D

La renderización en 3D nos permite tener una vista previa clara de la PCB. En este caso se puede apreciar la disposición de los componentes en una relación de escala directa. Esto permite anticipar las posibles dificultades a la hora de realizar la soldadura de los componentes.

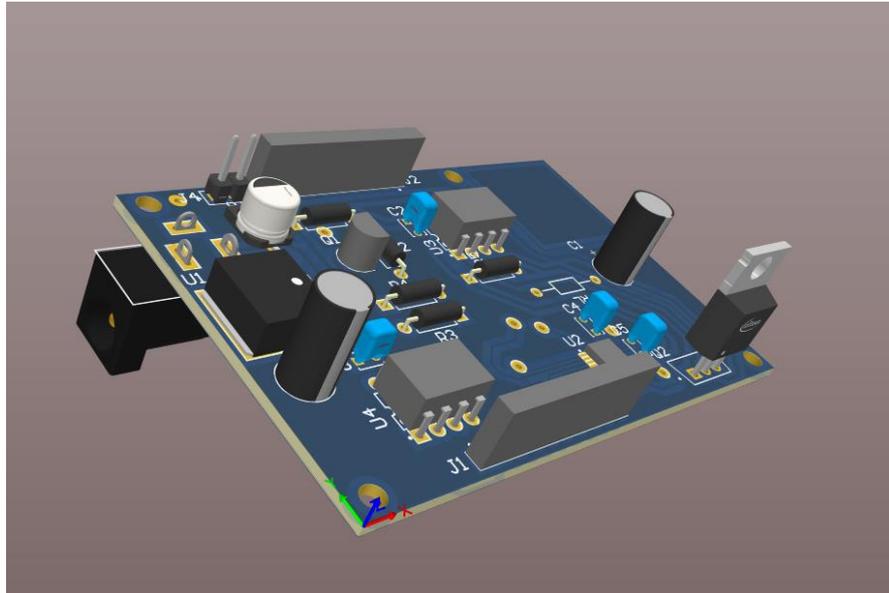


Figura 4-4. PCB en 3D

Además, se incluye como renderizó una placa muy similar al *LaunchPad* para hacer una anticipación de cómo se conectarían ambas placas y comprobar el espacio disponible entre ambas.

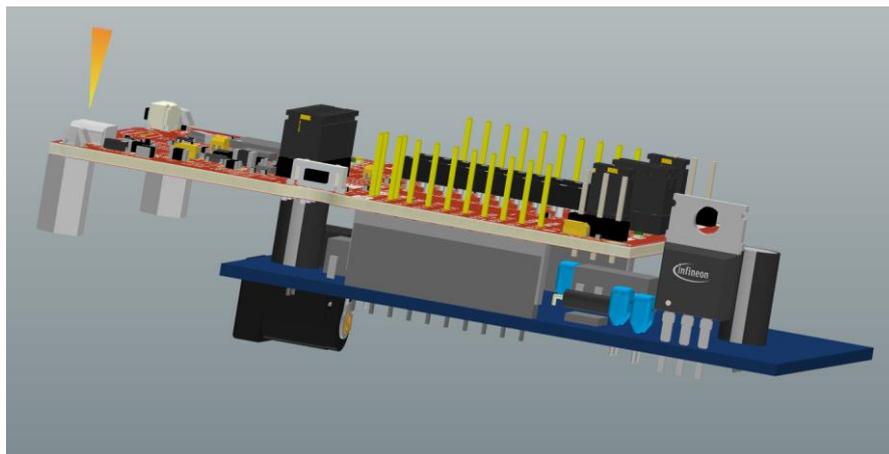


Figura 4-5. Simulación de la interconexión del *LaunchPad* y la PCB diseñada.

Como se aprecia en la figura 4-5, el condensador  $C_{out}$  choca con la parte inferior del *LaunchPad*. Por lo tanto, no se soldará en posición vertical, sino se colocará en posición horizontal doblando la patas del condensador, pues éstas son bastante largas.

## 4.2 Construcción de la PCB

Para la construcción de la PCB inicialmente se optó por usar los recursos del laboratorio del Departamento de Electrónica. Esto consistía en realizar la PCB mediante foto revelado ultravioleta, mediante el uso de una insoladora.

El procedimiento, para el revelado son los siguientes:

1. Se imprimió por separados el top y bottom en papel vegetal.
2. Se coloca una placa fotosensible debidamente alineada entre ambos impresos.
3. Se introduce en la insoladora, durante unos 2 minutos.
4. Se aplica liquido revelador, obteniendo las huellas y, utilizando ácido, se elimina el exceso cobre.
5. Una vez se tengan la placa impresa, se puede cortar, taladrar y dar forma a la placa.
6. Se elimina el exceso de fotorresina con la acetona.
7. Finalmente, se sueldan los componentes mediante estaño.

Debido a los fallos que se producían a la hora de producir el revelado se optó por encargar la fabricación de la PCB a la empresa *JLCPBC*, que es una especialista en el sector además de contar unos breves plazos de entrega. El resultado de la fabricación de la PCB fue el siguiente:

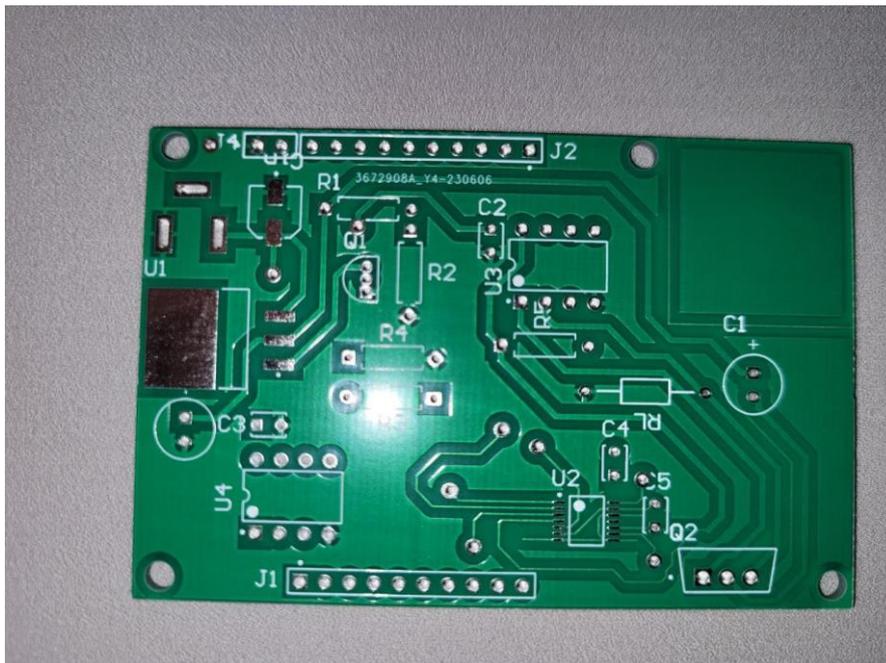


Figura 4-6. PCB fabricada por *JLCPBC*.

Los resultados de la fabricación son óptimos, todos taladros están en su posición correcta y con el diámetro apropiado. La prueba de continuidad, realizada con un multímetro, no mostro ninguna pista en mal estado. Por lo que se dio el visto bueno para soldar los componentes sobre ella.

### 4.3 Resultado

El resultado obtenido tras soldar los componentes y añadir un cable para la desconexión de LED sin tener que desconectar la alimentación del sistema fueron los siguiente:

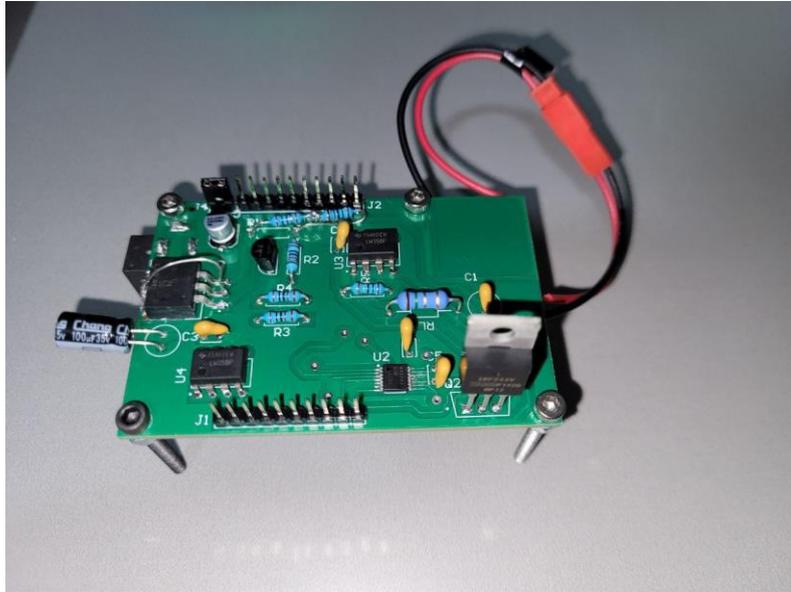


Figura 4-7. Vista superior del sistema.

Debido a una mala interpretación del datasheet del LM1085, no se unió la pata de OUT con la superficie TAB, lo que producía que el sistema no entregara los valores calculados de tensión. Este inconveniente se solucionó soldando una pieza de metal entre ellas, como se puede apreciar en la figura 4-7.

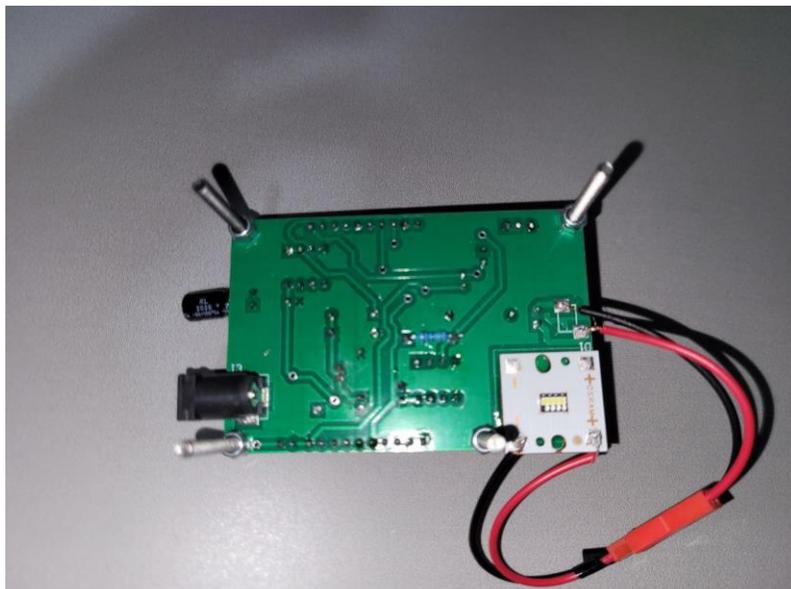


Figura 4-8. Vista inferior del sistema.

Como se aprecia en la figura 4-8 el LED está alojado dentro de una PCB independiente, y éste está conectada mediante cables a la PCB principal. La sujeción entre ellas se realizó mediante resina bicomponente con resistencia a altas temperatura.

La integración con el *LaunchPad* fue del todo exitosa, como muestra la siguiente figura, el alineamiento de los

pine del receptáculo con los pines de la PCB fueron perfecta. No se produce interferencia mecánica entre ninguno de los componentes.

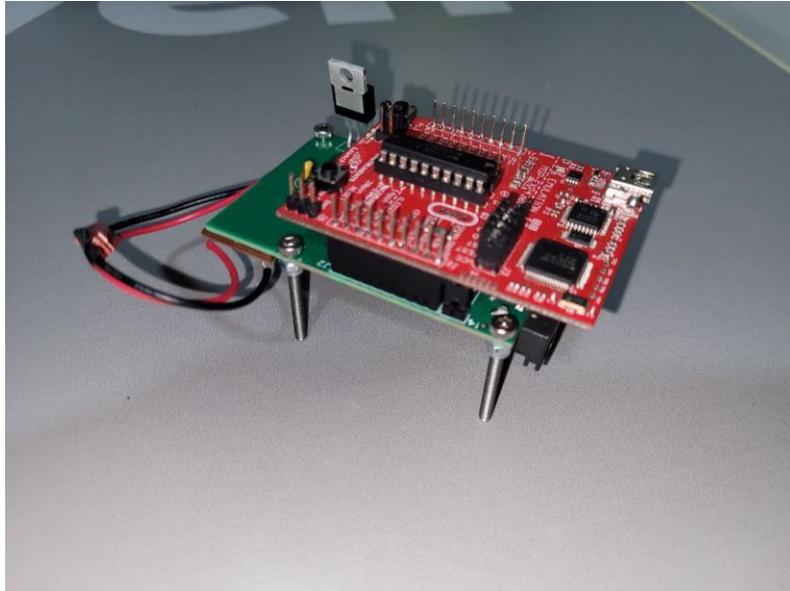


Figura 4-9. Vista lateral izquierda del sistema completo.

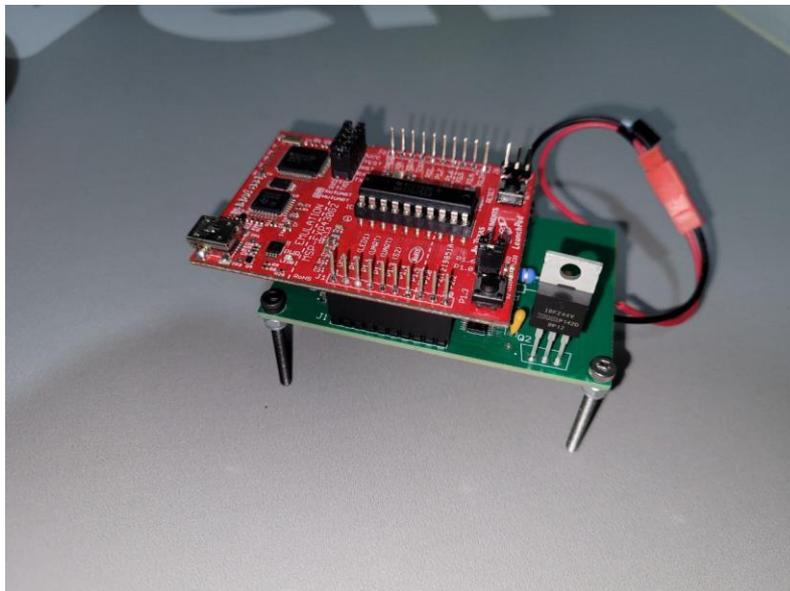


Figura 4-10. Vista lateral derecha del sistema completo.

Adicionalmente, se detectó que la comunicación mediante el protocolo SPI no se realizaba de forma correcta con el potenciómetro digital. Para solucionar este problema se optó por inutilizar el OPA (amplificador operacional) integrado en el potenciómetro y cortocircuitar las patas 8 y 9. Esto supuso que se obvia el OPA reduciendo las posibles interferencias que pudiera producir. El cortocircuitado de las patas 8 y 9 supuso volver a conectar la entrada de tensión del potenciómetro al OPA que regula la corriente que circula por el LED.

## 5 RESULTADOS

*Ningún plan, por bueno que sea, resiste su primer contacto con el enemigo, con la realidad.*

*Helmuth Carl Bernard von Moltke. 1800*

Las pruebas realizadas junto a los científicos de CABIMER (Centro Andaluz de Biología Molecular y Medicina Regenerativa) arrojaron resultados positivos respecto al funcionamiento del prototipo. Se pudo realizar una prueba funcional al prototipo y no se arrojó ningún fallo por parte del prototipo.

### 5.1. Resultados pruebas en el laboratorio CABIMER

El día 27 de julio de 2023, se realizaron las pruebas experimentales en los laboratorios del Departamento de Fisiología Médica y Biofísica pertenecientes a la Universidad de Sevilla. Las condiciones de la prueba se realizaron de acuerdo con el protocolo fijado por los científicos de CABIMER. Las condiciones lumínicas ambientales fijadas en baja luminosidad menor  $50 \text{ cd/cm}^2$  y dos tipos de estimulaciones lumínica. La primera con un pulso lumínico de 10 ms con un espaciado entre pulsos de 1 s con 7 intervalos de repetición. Y una segunda con un pulso lumínico de 1 s con un espaciado de 10 s con 7 intervalos de repetición.



Figura 5-1. Montaje para realización del ensayo.

Las pruebas se realizaron sobre dos organoides, con una maduración de 125 días y 157 días, y sobre dos explantes de retinas extraídas de ratones wild type (ratones sanos, que suelen usarse como control

Debido a fallos en la interpretación del datasheet del potenciómetro digital no se consiguió tener el control de la intensidad lumínica listo para los ensayos, por lo cual todas las pruebas se realizaron a máxima potencia lumínica. Lo que reflejó datos interesantes ya que los resultados para el pulso de 10 ms tanto en los organoides como las retinas de ratones no fueron representativos del experimento ya que se podía inferir que se debía a un acoplamiento entre el sensor de medida. Pues casi todos los canales de medida reflejaron el mismo resultado lo que indica que no se debe a una interacción biológica. Posteriormente se repitió el ensayo sin ningún artefacto biológico obtenido el mismo resultado prueba inequívoca de que la interacción la produce el prototipo por sí mismo.



Figura 5-2. Resultados prueba sobre retina de ratón con pulso de 10 ms.

Los resultados con el pulso de 1 s fueron mucho más interesantes desde el punto de vista biológico, pues tanto en los organoides como las retinas de ratón producían una respuesta de aproximadamente el mismo valor de tensión, pero con polaridad inversa. Esto muestra una respuesta al estímulo lumínico. Además la respuesta tiene un retraso de aproximadamente de 1 s, con respecto al estímulo lo que indica que es de origen biológico. Se observó como esta respuesta solo se reproducía en los canales 21, 26 y 71. Esto fortalece la hipótesis de que la respuesta es biológica ya que solo se produce en estos electrodos, y no en todos, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.

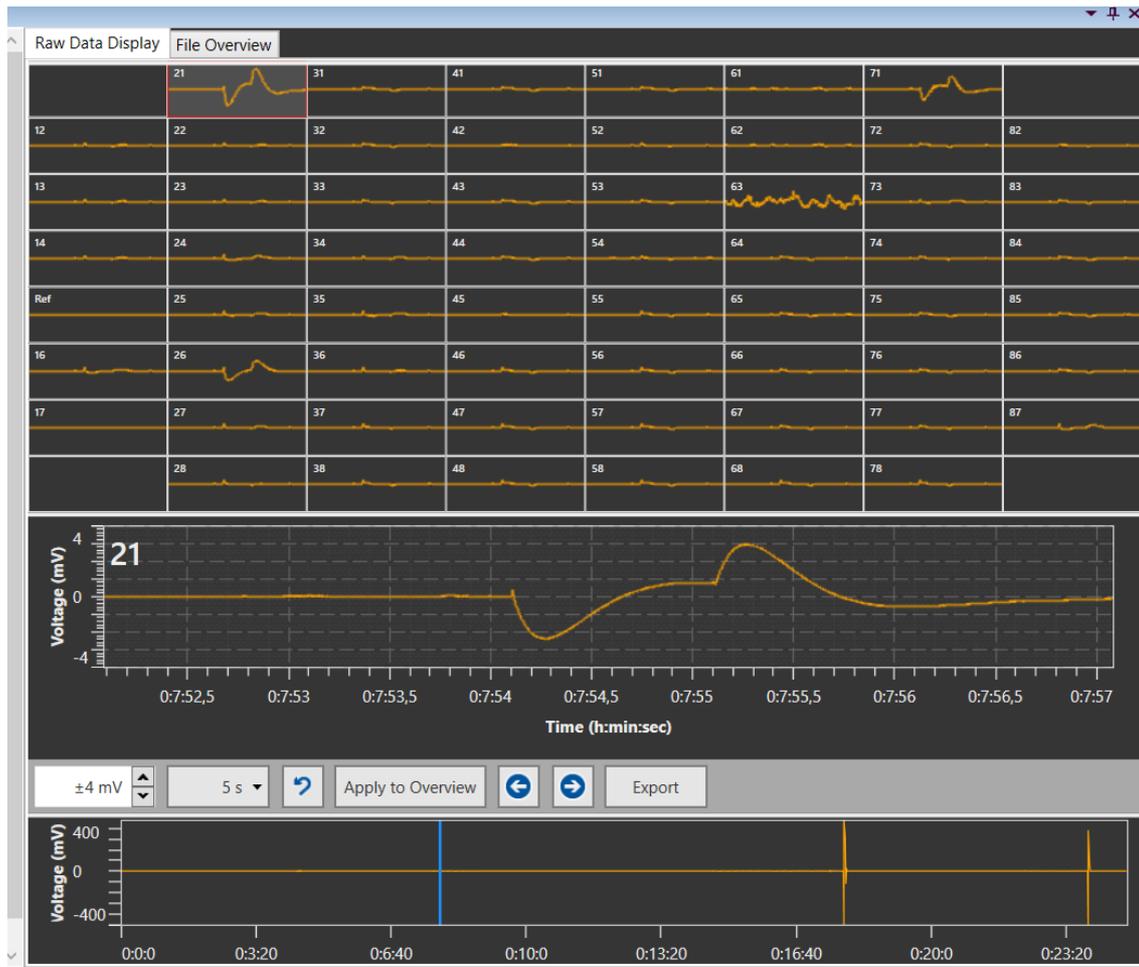


Figura 5-3. Resultados prueba sobre retina de ratón con pulso de 1 s.

Los científicos de CABIMER adicionalmente añadieron una solución con fármacos sobre los organoides para probar los efectos que estos producían los mismo. Se pudo a.

Las conclusiones de los ensayos fueron satisfactorias ya que se comprobó la robustez de prototipo ya que, en toda la jornada de pruebas realizada, con una duración de 6 horas, no se produjo ni un solo fallo. No hubo ninguna respuesta incorrecta por parte del software, ni la comunicación entre el portátil de mando y el prototipo no se cayó en ningún momento. A pesar, de la intensa jornada, en los ciclos de trabajo con pulsos de 10 ms no se produjeron aumentos de temperatura en la PCB o en el encapsulado del LED. En los ciclos de trabajo con pulsos de 1 s se produjo un ligero aumento de la temperatura en el encapsulado del LED. Sin embargo, el tiempo entre pulsos 10 s fue suficiente para la correcta disipación del calor generado. Adicionalmente, se realizó una prueba con ciclo de trabajo 2 s encendido y 10 s entre pulso, esto produjo un aumento significativo de la temperatura del encapsulado del LED, pero en el resto de componente de las PCB. Como recomendación para tiempos superior a 1 s de pulso de encendido se debe aumentar proporcionalmente el tiempo entre pulsos, o si es necesario bajar el tiempo entre pulsos sería necesario la inclusión de un disipador térmico para mejor la transferencia de calor y prolongar la vida útil del prototipo.

## 5.2. Caracterización del prototipo

Para la caracterización de la potencia lumínica del prototipo se aplicó la ley de Ohm sobre la resistencia de potencia RL. Para ello se preparó una prueba en la que se varió la resistencia del potenciómetro digital y comprobando la tensión que caía en la resistencia RL se obtuvo la corriente que está consumiendo el LED. La ejecución de las mediciones se realizó siguiendo las condiciones de un segundo de pulso con tres pulsos de activación y un descanso entre pulso de 10 segundos.

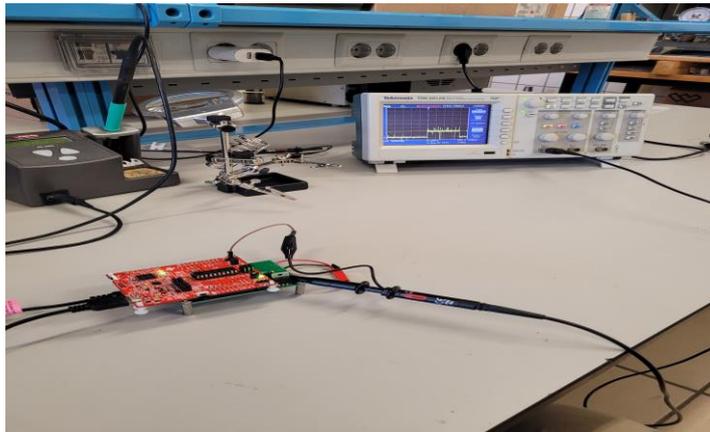


Figura 5-4. Montaje para medición de corriente en el LED.

El resultado de las mediciones fue decepcionante, pues con se refleja en la figura 5-5, en la que se obtiene los resultados la corriente máxima es 629 mA, muy lejos de los 1000 mA cálculos en la simulación del sistema.

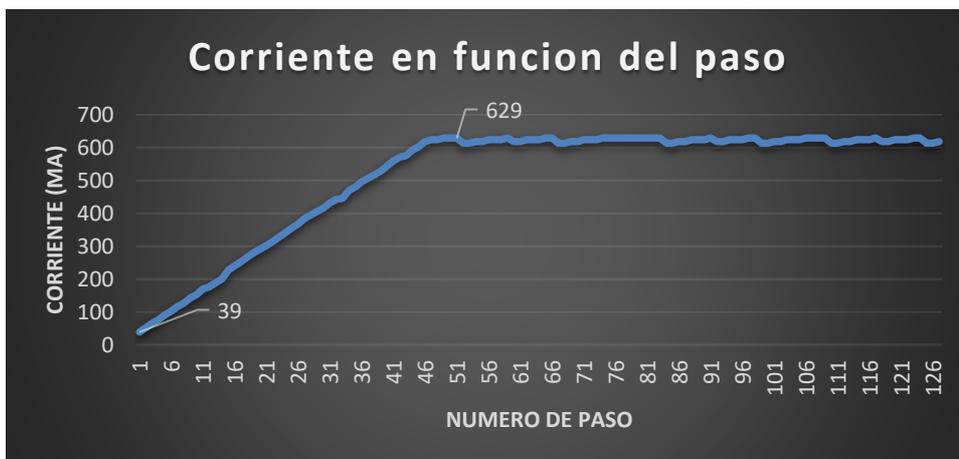


Figura 5-5. Resultados de las mediciones de corriente.

Como se aprecia en la figura anterior, el valor mínimo de corriente medida es 39 mA para el valor 1 enviado al potenciómetro digital, y el valor más alto se obtiene para el valor 47. Si se sigue subiendo el valor de paso se producen fluctuaciones en el valor medido de corriente, pero no aumento ya la corriente suministrada.

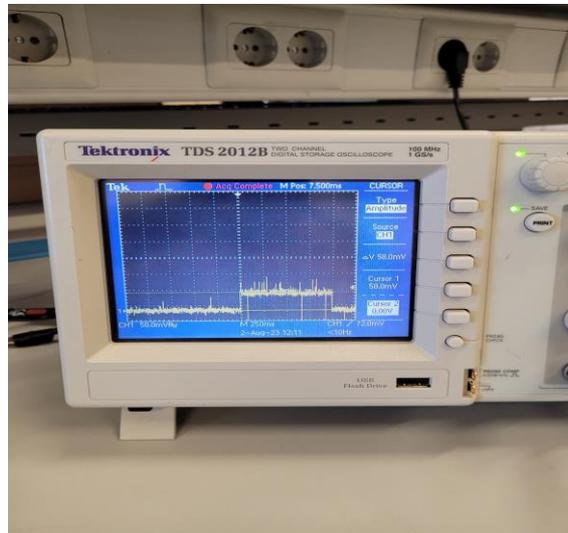


Figura 5-6. Valor mínimo medido capturado con el osciloscopio.

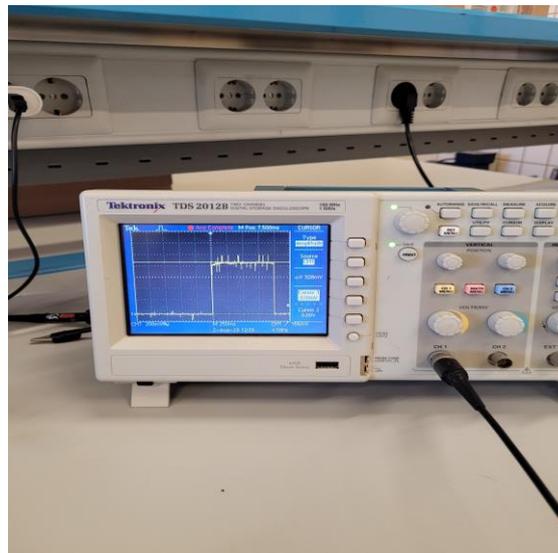


Figura 5-7. Valor máximo medido capturado con el osciloscopio.

Como se observa en las figuras 5-6 y 5-7 se observa que hay demasiado ruido en la medición. Esto habrá que tenerlo para próximas versiones ya que las interferencias EMI (Electromagnetic Interference) puede producir errores en la lectura de los valores y producir una respuesta incorrecta del sistema.

Si se sigue la información que suministra el datasheet del LED se estaría transmitiendo el 70% de flujo luminoso máximo, como se muestra en la figura 5-8 aplicando el valor máximo de corriente obtenido. Por lo tanto, el flujo luminoso máximo que estaría emitiendo será de 1113 lm. Esto no presenta mayor problema ya que en las pruebas con los científicos de CABIMER el problema es que el prototipo ha máxima potencia tiene demasiada intensidad lumínica.

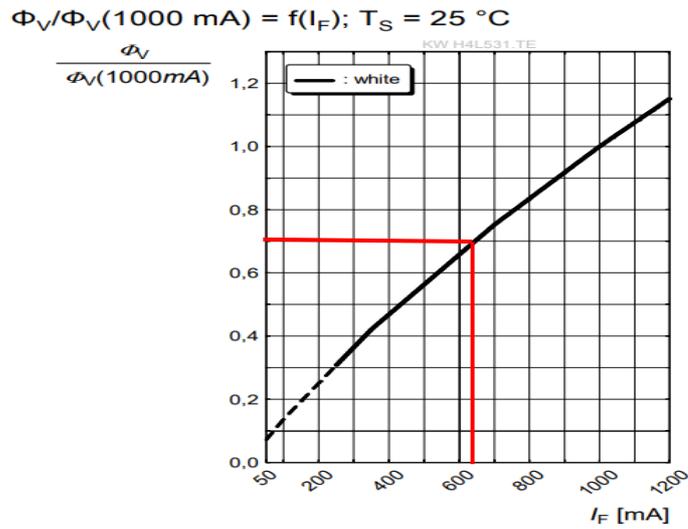


Figura 5-8. Flujo relativo máximo del prototipo señalado en rojo.

Adicionalmente, se intentó caracterizar el prototipo con el modelo de ratón artificial generado en el TFG de Ginés Díaz Chamorro *Caracterización de fuente de estimulación óptica para aplicaciones biomédica*. Lamentablemente, no se pudo caracterizar ya que el fotodiodo que simula el ojo izquierdo del ratón saturaba mínima potencia del prototipo a la distancia que estaría situado del ratón real. Y la fotorresistencia que simula el ojo derecho del ratón simplemente no funcionaba. En la siguiente figura se muestra la configuración de la prueba de caracterización.

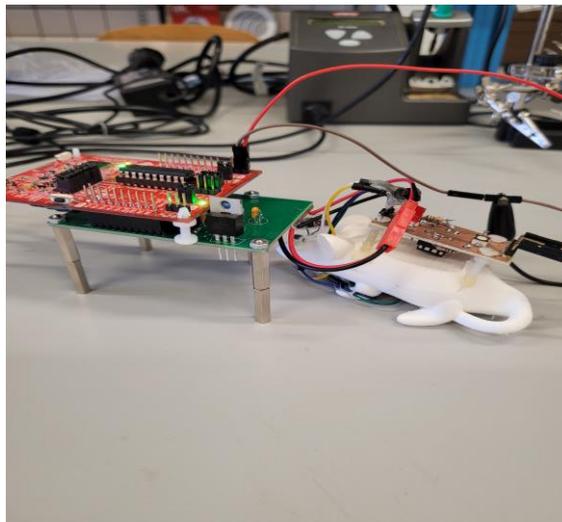


Figura 5-9. Montaje con ratón artificial para caracterización.

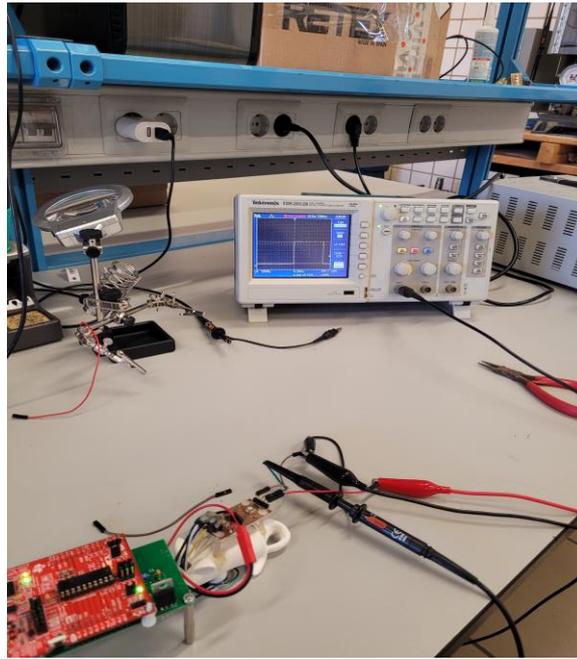


Figura 5-10. Valor sobre fotodiodo a mínima potencia.

Como se observa en la figura 5-10, el valor medido con el osciloscopio es de 3,3 V la tensión máxima de alimentación del ratón artificial los que indica que está en saturación. Por lo que, aunque permite validar el encendido del LED, no permite caracterizar la variación del brillo. Esto se debe a que la ganancia del amplificado que tiene integrado el ratón es demasiado alta.

Finalmente, las características del prototipo se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5-1. Características del Prototipo

Características	Valor
Tensión de Alimentación	24 V
Tiempo de encendido mínimo	5 ms
Flujo luminoso mínimo	159 lm
Flujo luminoso máximo	1113 lm
Corriente máxima continua	639 mA
Interfaz de comunicación	SPI



## 6 CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA

Una vez finalizadas todos los bloques que componen este trabajo, realizando todas las pruebas de comprobación de la fuente lumínica, se pueden extraer las siguientes conclusiones. Los resultados obtenidos en el punto 5, indican las líneas de mejora que se deben tener en cuenta en el futuro para mejorar los resultados.

En primer lugar, se debe destacar que la integración del sistema ha sido un éxito. El diseño es muy robusto permitiendo trabajar con el prototipo por ciclos muy prolongados de tiempo, incluso a máxima potencia con los ciclos de descanso adecuados. La fabricación del sistema se ajustó a las necesidades de los requisitos de instalación y transporte fijados al comienzo del presente documento.

La intensidad lumínica del sistema es perfectamente controlable desde la interfaz de usuario, así como el ancho de pulso, el espaciado y la cantidad de pulsos. Cumpliendo con los requisitos del sistema bloque 2, la interfaz de control es amigable para ser usada por una persona sin conocimientos de programación o ingeniería. Al tratarse de un archivo ejecutable no requiere, ningún software adicional solo una maquina con Windows instalada. Cabe destacar que solo se tiene 47 valores (de 0 a 46) de ajuste lumínico, para los requisitos obtenido en las pruebas de CABIMER serían más que suficiente, pero sería conveniente mejorar el sistema en este aspecto.

De las pruebas en CABIMER se puede extraer que se realizó la estimulación lumínica en los organoides y explantes es fundamental reducir el flujo luminoso. Cabe destacar que de las pruebas de caracterización se obtuvo que el LED está trabajando al 70% de su capacidad máxima. En el momento de realización de las pruebas no está disponible la regulación de intensidad, por lo que fue decepcionante no poder regular la intensidad lumínica. En la versión actual este problema está solucionado pero el uso de potenciómetro digital supuso más inconvenientes que aciertos.

Como propuesta de mejora cara al futura, se plantea la mejora en la capacidad de mejorar la precisión a la hora de regular la intensidad luminosa. Se plantea la sustitución del potenciómetro digital por un conversor digital analógico (DAC), pues la toleración del 20 % que tiene el potenciómetro digital no sería aceptable para la producción en masa. Adicionalmente el microcontrolador MSP430G2553, cuenta con varios conversores digitales analógicos con una resolución 8 bits (de 0 a 255), o uno externo con mayor resolución mediante comunicación SPI.

Adicionalmente, se plantea la integración del microcontrolador en la PCB del sistema luminoso para la obtención de un sistema en un solo nivel. Pues ahora mismo, el *LaunchPad* es solo útil para la comunicación y alimentación del microcontrolador el resto de las funciones del *LaunchPad* no son utilizadas. Pudiendo obtener un sistema un sistema todavía más compacto, además de la sustitución del LED actual por uno de menor potencia.



## REFERENCIAS

- [1] H. W. W. N. Liu PK, «Electroretinogram (ERG) to Evaluate the Retina Using Mouse Models.,» *Humana*, pp. 217-227, 09 Noviembre 2022.
- [2] R. V. García, «Diseño, fabricación y caracterización de sistema,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2021.
- [3] G. D. Chamorro, «Caracterización de fuente de estimulación óptica para,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2022.
- [4] I. Sinclair, *Practical Electronics Handbook*, Newnes, 2006.
- [5] energiaproject, «Eneriga.nu,» energiaproject, [En línea]. Available: <https://energia.nu/reference/>. [Último acceso: 25 Mayo 2023].
- [6] Microsoft, «Documentacion de .NET,» Microsoft, [En línea]. Available: <https://learn.microsoft.com/es-es/dotnet/>. [Último acceso: 25 Mayo 2023].
- [7] Texas Instrument, «TI.com,» [En línea]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf?ts=1693237748469&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Fes-mx%252FMSP430G2553](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf?ts=1693237748469&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Fes-mx%252FMSP430G2553). [Último acceso: 25 Mayo 2023].
- [8] Texas Instruments, «TI.com,» [En línea]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf?ts=1693227136400&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM358%253Futm\\_source%253Dgoogle%2526utm\\_medium%253Dcpc%2526utm\\_campaign%253Dasc-null-null-GPN\\_EN-cpc-evm-google-wwe\\_cons%2526utm\\_content%25](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf?ts=1693227136400&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM358%253Futm_source%253Dgoogle%2526utm_medium%253Dcpc%2526utm_campaign%253Dasc-null-null-GPN_EN-cpc-evm-google-wwe_cons%2526utm_content%25). [Último acceso: 2023 Mayo 25].
- [9] OSRAM, «AMS-OSRAM,» [En línea]. Available: <https://look.ams-osram.com/m/5845e985cd93aba1/original/KW-HKL531-TE.pdf>. [Último acceso: 25 Mayo 2023].
- [10] Infineon, «Infineon,» [En línea]. Available: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFZ44V-DataSheet-v01\\_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b51fa2214](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFZ44V-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b51fa2214). [Último acceso: 25 Mayo 2023].
- [11] Texas Instruments, «TI.com,» [En línea]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1085.pdf?ts=1693238053661&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM1085%253FkeyMatch%253DLM1085%2526tisearch%253Dssearch-everything%2526usecase%253DGPN-ALT](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1085.pdf?ts=1693238053661&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM1085%253FkeyMatch%253DLM1085%2526tisearch%253Dssearch-everything%2526usecase%253DGPN-ALT). [Último acceso: 25 Mayo 2023].
- [12] Analog Devices, «analog.com,» [En línea]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX5436-MAX5439.pdf>. [Último acceso: 25 Mayo 2023].



# ANEXO I: SOFTWARE MSP430G2553

```
#include <SPI.h>
// set pin 8 as the slave select for the digital pot:
const int slaveSelectPin = 8;
#define LED RED_LED//
int value = 0;
int time_pulse = 100;// 2us is de minimum time allow by Colordome
int bright = 55;// Luminous intensitivity, accepted value 0 to 127
int BetPulTime=200; // Time between pulses
int NmbPulse=10; // Number of repetitions
int Mode=1;
const byte Button = 5; //
void Lumifunction();
void Decodi();
String str[5];
void setup() {
  // set the speed to serial connection
  Serial.begin(9600);
  // initialize SPI:
  SPI.begin();
  //define de interruption use the board without a PC
  //attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(Button), blink, CHANGE);
  //set the power control as an output
  pinMode(LED, OUTPUT);
  // set the slaveSelectPin as an output:
  pinMode (slaveSelectPin, OUTPUT);

  delay(200);
  // This maintain the power sourcer down
  digitalWrite(LED,HIGH);
}
int digitalPotWrite(int value) {
  // take the SS pin low to select the chip:
  digitalWrite(slaveSelectPin,LOW);
  delay(100);
  // send in the address and value via SPI:
```

```

SPI.transfer(value);
// take the SS pin high to de-select the chip:
digitalWrite(slaveSelectPin,HIGH);
}
void blink(){
  noInterrupts();
  Lumifunction();
  interrupts();
}
void Lumifunction()
{
  Serial.println("Lumifunction");
  for (int i = 0; i < NmbPulse; i++)
  {
    digitalWrite(LED,LOW);
    delay(time_pulse);
    digitalWrite(LED,HIGH);
    delay(BetPultime);
  }
}
void Decodi(){
  Serial.println("Decodi");
  int i=0;
  while(i<5)
  {
    str[i]= Serial.readString();
    delay(250);
    if(str[i].length(>0)
    {
      i++;
      Serial.println("OK");
    }
  }
  bright=str[0].toInt();
  time_pulse=str[1].toInt();
  BetPultime=str[2].toInt();
  NmbPulse=str[3].toInt();
  Mode=str[4].toInt();

```

```
Serial.println(str[4]);

}

void loop() {
  value = Serial.read();
  delay(10);
  if(value=='1')
  {
    Serial.println("Next");
    Decodi();
    digitalPotWrite(bright);
    if(Mode==1)
    {
      Lumifunction();
    }
  }
  else if(Mode==0)
  {
    while(1)
    {
      Lumifunction();
      String M = Serial.readString();
      if (M == "Stop")
      {
        break;
      }
      delay(10);
    }
  }
  Serial.println("End");
}
}
```



## ANEXO II: SOFTWARE INTERFAZ DE USUARIO

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows;
using System.Windows.Controls;
using System.Windows.Data;
using System.Windows.Documents;
using System.Windows.Input;
using System.Windows.Media;
using System.Windows.Media.Imaging;
using System.Windows.Navigation;
using System.Windows.Shapes;
using System.IO.Ports;
using System.Threading;
using System;
using System.Diagnostics;
using System.Text.RegularExpressions;

namespace Control_LED_TFG
{
    /// <summary>
    /// Lógica de interacción para MainWindow.xaml
    /// </summary>
    public partial class MainWindow : Window
    {
        bool x = false;
        string[] Package;
        string Port = "";
        string Choose = "Single";
        string[] D;
        FlowDocument mcFlowDoc = new FlowDocument();
        Paragraph para = new Paragraph();
        SerialPort ComPort = new SerialPort();
```

```

public MainWindow()
{
    InitializeComponent();

    ComPort.BaudRate = 9600;
    ComPort.Handshake = Handshake.None;
    Choose = Cmode.Content.ToString();

    foreach (string s in SerialPort.GetPortNames())
    {
        ListBox.Items.Add(s);
    }
}

/// <summary>
/// When the star button is pressed collect the data of the box and call the funtion mode to start the process.
/// Also, disable itself and enables the stop button.
/// </summary>
/// <param name="sender"></param>
/// <param name="e"></param>
public void Button_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    Package = new string[5];
    D = new string[5];
    string M = Mode(Cmode.Content.ToString());
    Package[0] = bright.Text;
    Package[1] = time_pulse.Text;
    Package[2] = BetPultime.Text;
    Package[3] = NmbPulse.Text;
    Package[4]= M ;
    D[0] = "TX: " + LineA.Text + bright.Text;
    D[1] = "TX: " + LineB.Text + time_pulse.Text;
    D[2] = "TX: " + LineC.Text + BetPultime.Text;
    D[3] = "TX: " + LineD.Text + NmbPulse.Text;
}

```

```
D[4] = "TX: " + Cmode.Content.ToString();
activation.IsEnabled = false;
try
{
    x = AnalyzeParameter(bright.Text, time_pulse.Text, BetPultime.Text, NmbPulse.Text);
}
catch
{
    MessageBox.Show("Missing data");
    activation.IsEnabled = true;
    return;
}
if (x == true)
{
    bright.Clear();
    time_pulse.Clear();
    BetPultime.Clear();
    NmbPulse.Clear();
    activation.IsEnabled = true;
    MessageBox.Show("Wrong Parameters");
}
else
{
    if (ListBox.SelectedItems.Count > 0)
    {
        Port = ListBox.SelectedItem.ToString();
        if (ComPort.IsOpen == false)
        {
            ComPort.PortName = Port;
        }
    }
    activation.IsEnabled = true;
    Thread send = new Thread(Sender);
    send.Start();
}
}
```

```
/// <summary>
///
/// </summary>
/// <param name="text"></param>
/// <param name="text2"></param>
/// <param name="text3"></param>
/// <param name="text4"></param>
/// <returns></returns>
public bool AnalyzeParameter(string text, string text2, string text3, string text4)
{
    int num = Int32.Parse(text);
    int num2 = Int32.Parse(text2);
    int num3 = Int32.Parse(text3);
    int num4 = Int32.Parse(text4);
    if (num > 127 || num2 < 2 || num3 < 2 || num4 < 1)
    {
        return true;
    }
    else
    {
        return false;
    }
}

private string Mode(string Valor)
{
    if (Valor == "Single")
    {
        return "1";
    }
    else
    {
        return "0";
    }
}
}
```

```
/// <summary>
/// This function is responsible to send the data to the microcontroller.
/// First open the port selected, and send a byte to indicate to the microcontroller to be ready.
/// Second await for the microcontroller responds. And send the data chosen by the user.
/// And finally await for the microcontroller to confirm the end of the execution.
/// </summary>
public void Sender()
{
    string data;
    try
    {
        if (ComPort.IsOpen == false)
        {
            ComPort.Open();
        }
    }
    catch (Exception ex)
    {
        MessageBox.Show(ex.Message);
        return;
    }
    ComPort.Write("1");
    WriteData("TX: Start"+"\\n");
    do
    {
        data = ComPort.ReadLine();
        Thread.Sleep(10);
    } while (data.Length < 2);
    for(int i=0; i < 5; i++)
    {
        data = "";
        WriteData(Package[i]+"\\n");
        ComPort.Write(Package[i]);
        while (!data.Contains("OK"))
        {
            Thread.Sleep(millisecondsTimeout: 100);
            data = ComPort.ReadLine();
        }
    }
}
```

```

        WriteData("RX: " + data + "\n");
    }
    for (int i = 0; i < 5; i++)
    {
        WriteData(D[i] + "\n");
    }
    do
    {
        data = ComPort.ReadLine();
        Thread.Sleep(10);
        if (data.Length > 2)
        {
            WriteData("RX: " + data + "\n");
        }
    } while (!data.Contains("End"));
    ComPort.Close();
    return ;
}

/// <summary>
/// Update the port availables when the button is pressed.
/// </summary>
/// <param name="sender"></param>
/// <param name="e"></param>
private void Refresh_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    ListBox.Items.Clear();
    foreach (string s in SerialPort.GetPortNames())
    {
        ListBox.Items.Add(s);
    }
}

/// <summary>
/// By default, the option selected is "Continuous" and when is pressed change to "Single".
/// For the option "Single" the Number of impulses is Enabled.
/// For the option "Continuous" the Number of impulses is Disabled and fixed in the value of 100.
/// </summary>

```

```
/// <param name="sender"></param>
/// <param name="e"></param>
public void Cmode_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    if (Cmode.Content.ToString() == "Single")
    {
        Cmode.Content = "Continuos";
        NmbPulse.Text = "100";
        NmbPulse.IsEnabled = false;
    }
    else
    {
        Cmode.Content = "Single";
        NmbPulse.Clear();
        NmbPulse.IsEnabled = true;
    }
    Choose = Cmode.Content.ToString();
}

/// <summary>
/// When the Stop button is press, disables the stop and enables the start button.
/// Forced the connection to close and display the message "Aborted".
/// </summary>
/// <param name="sender"></param>
/// <param name="e"></param>
private async void Stop_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    activation.IsEnabled = true;
    Task CloseTask = new Task(ContClose);
    CloseTask.Start();
    await Task.CompletedTask;
    MessageBox.Show("Aborted");
}

/// <summary>
/// Function to force connection closure
/// </summary>
private void ContClose()
```

```

{
    try
    {
        ComPort.Write("Stop");
        Thread.Sleep(100);
        ComPort.Close();
    }
    catch(Exception ex)
    {
        MessageBox.Show(ex.Message);
    }
}

private void Lisetner_TextInput(object sender, TextCompositionEventArgs e)
{

}

/// <summary>
/// This 4 functions allows the input to be only numbers
/// </summary>
/// <param name="sender"></param>
/// <param name="e"></param>
private void Bright_PreviewTextInput(object sender, TextCompositionEventArgs e)
{
    e.Handled = !OnlyNumberText(e.Text);
}

private void Time_pulse_PreviewTextInput(object sender, TextCompositionEventArgs e)
{
    e.Handled = !OnlyNumberText(e.Text);
}

private void BetPultime_PreviewTextInput(object sender, TextCompositionEventArgs e)
{
    e.Handled = !OnlyNumberText(e.Text);
}

private void NmbPulse_PreviewTextInput(object sender, TextCompositionEventArgs e)

```

```
{
    e.Handled = !OnlyNumberText(e.Text);
}
/// <summary>
/// The type Regex is a secuence that allows compare type of strings, in this case numbers.
/// </summary>
private static readonly Regex _regex = new Regex("[^0-9]+");

/// <summary>
/// This function analyze if the input is a number.
/// </summary>
/// <param name="text"></param>
/// <returns></returns>
private static bool OnlyNumberText(string text)
{
    return !_regex.IsMatch(text);
}

private void WriteData(string text)
{
    // Assign the value of the plot to the RichTextBox.
    Application.Current.Dispatcher.Invoke(new Action(() => {
        para.Inlines.Add("*" + DateTime.Now.ToString("HH:mm:ss") + "*" + text);
        mcFlowDoc.Blocks.Add(para);
        Lisetner.Document = mcFlowDoc;
        Lisetner.ScrollToEnd();
    }));
}

private void Lisetner_PreviewTextInput(object sender, TextCompositionEventArgs e)
{
    e.Handled = true;
}

private void RX(object sender, SerialDataReceivedEventArgs e)
{
    string Datos = ComPort.ReadExisting();
    Thread.Sleep(TimeSpan.FromMilliseconds(1));
    WriteData(Datos);
}
```

```

    }

    private void Lisetner_TextChanged(object sender, TextChangedEventArgs e)
    {

    }
}

<Window x:Class="Control_LED_TFG.MainWindow"
    xmlns="http://schemas.microsoft.com/winfx/2006/xaml/presentation"
    xmlns:x="http://schemas.microsoft.com/winfx/2006/xaml"
    xmlns:d="http://schemas.microsoft.com/expression/blend/2008"
    xmlns:mc="http://schemas.openxmlformats.org/markup-compatibility/2006"
    xmlns:local="clr-namespace:Control_LED_TFG"
    mc:Ignorable="d"
    Title="Control LED" Height="450" Width="310" ResizeMode="NoResize">
    <Grid x:Name="__Sin_nombre_" Margin="0,0,0,0">
        <Button x:Name="activation" Content="Start" HorizontalAlignment="Left"
Height="25" Margin="150,255,0,0" VerticalAlignment="Top" Width="135"
Click="Button_Click"/>
        <TextBlock x:Name="ListBox1" HorizontalAlignment="Left" TextWrapping="Wrap"
VerticalAlignment="Top" Width="140" Margin="15,47,0,0" Height="155"><Run Text="Choose COM
PORT:"/><InlineUIContainer>
            <ListBox x:Name="ListBox" Height="120" Width="100"
RenderTransformOrigin="0.5,0.44"/>
            </InlineUIContainer></TextBlock>
        <TextBox x:Name="bright" HorizontalAlignment="Left" Height="23"
TextWrapping="Wrap" Text="" VerticalAlignment="Top" Width="138" Margin="147,71,0,0"
ToolTip="Only 0 to 127" PreviewTextInput="Bright_PreviewTextInput" MaxLength="3"/>
        <TextBox x:Name="time_pulse" HorizontalAlignment="Left" Height="23"
TextWrapping="Wrap" Text="" VerticalAlignment="Top" Width="138" Margin="147,114,0,0"
ToolTip="Minimun value 2us" PreviewTextInput="Time_pulse_PreviewTextInput"
MaxLength="7"/>
        <TextBox x:Name="BetPultime" HorizontalAlignment="Left" Height="23"
TextWrapping="Wrap" Text="" VerticalAlignment="Top" Width="138" Margin="147,161,0,0"
ToolTip="Minimun value 2ms" PreviewTextInput="BetPultime_PreviewTextInput"
MaxLength="7"/>
        <TextBox x:Name="NmbPulse" HorizontalAlignment="Left" Height="23"
TextWrapping="Wrap" Text="" VerticalAlignment="Top" Width="138" Margin="147,210,0,0"
ToolTip="1 to 9999" PreviewTextInput="NmbPulse_PreviewTextInput" MaxLength="4"/>
        <TextBlock x:Name="LineA" HorizontalAlignment="Left" TextWrapping="Wrap"
Text="Brightness:" VerticalAlignment="Top" Margin="147,49,0,0"/>
        <TextBlock x:Name="LineB" HorizontalAlignment="Left" TextWrapping="Wrap"
Text="Pulse width (ms):" VerticalAlignment="Top" Margin="147,94,0,0"
RenderTransformOrigin="0.149,0.627"/>
        <TextBlock x:Name="LineC" HorizontalAlignment="Left" TextWrapping="Wrap"
Text="Time between Pulses (ms):" VerticalAlignment="Top" Margin="147,139,0,0"/>
        <TextBlock x:Name="LineD" HorizontalAlignment="Left" TextWrapping="Wrap"
Text="Number of Repetitions:" VerticalAlignment="Top" Margin="147,189,0,0"/>
        <Button x:Name="Refresh" Content="Refresh" HorizontalAlignment="Left"
Margin="20,210,0,0" VerticalAlignment="Top" Width="95" Click="Refresh_Click"/>
        <Button x:Name="Cmode" Content="Single" HorizontalAlignment="Left"
Margin="20,255,0,0" VerticalAlignment="Top" Width="95" Click="Cmode_Click">
            <Button.CacheMode>
                <BitmapCache/>
            </Button.CacheMode>

```

```
        </Button>
        <Button x:Name="Stop" Content="Stop" HorizontalAlignment="Left"
Margin="150,295,0,0" VerticalAlignment="Top" Width="135" Click="Stop_Click" Height="25"/>
        <RichTextBox x:Name="Lisetner" HorizontalAlignment="Left" Height="65"
Margin="20,330,0,0" VerticalAlignment="Top" Width="265" AllowDrop="False"
IsTabStop="False" PreviewTextInput="Lisetner_PreviewTextInput"
TextChanged="Lisetner_TextChanged">
            <FlowDocument>
                <Paragraph>
                    <Run Text=""/>
                </Paragraph>
            </FlowDocument>
        </RichTextBox>

    </Grid>
</Window>
```



## ANEXO III: BOM

Comment	Description	Designator	Value	Quantity
ECA-1VM101	Aluminum Electrolytic Capacitor (Radial Lead Type), 100 uF, 35 V, -40 to 85 degC, 2-Pin THD, RoHS, Bulk	C1, Cout	100 uF	2
RCER71H104 K0DBH03A	Cap Ceramic 100nF 50V X7R ±10% Radial 2.5mm +125°C Ammo Pack	C2, C3, C4, C5	100 nF	4
EEE-FK1V100R	Cap Aluminum 10uF 35V 20% (5 X 5.8mm) SMD 160mA 2000 hr 105°C T/R	Cin	10 uF	1
KW H4L531.TE- 5R7R- EBXD46EBZB 4	LED Uni-Color White 1590lm x=0.32/y=0.33 Chip LED 8-Pin SMD T/R	D1	NA	1
929850-01- 10-RA	Female Header, Pitch 2.54 mm, 1 x 10 Position, Height 8.26 mm, Tail Length 3.18 mm, -40 to 105 degC, RoHS, Bulk	J1, J2	NA	2
6941063010 02	DC Power Jack Connector WR-DC, Male, Right Angled, THT, 5 A, 24 V	J3	NA	1
M20- 9990246	CONN HEADER VERT 2POS 2.54MM	J4	NA	1
2N3904BU	NPN General-Purpose Amplifier, 40 V VCEO, 0.2 A, -55 to 150 degC, 2-Pin TO-92, RoHS, Bulk	Q1	NA	1
IRFZ44VPBF	MOSFET N-CH 60V 55A TO220AB	Q2	NA	1
MFR- 25FBF52- 499K	Axial Resistor, 499 KOhm, +/- 1%, 0.25 W, -55 to 155 degC, 2-Pin THD, RoHS, Bulk	R5	499 kOhm	1
MFR- 25FBF52-1K	Axial Resistor, 1 KOhm, +/- 1%, 0.25 W, -55 to 155 degC, 2-Pin THD, RoHS, Bulk	R2, R3, R4	1 kOhm	3
MFR- 25FBF52-110	Axial Resistor, 110 Ohm, +/- 1%, 0.25 W, -55 to 155 degC, 2-Pin THD, RoHS, Bulk	R1	110 Ohm	1
RL15-1	Axial Resistor, 1.5Ohm, +/- 1%, 1 W, -55 to 155 degC, 2-Pin THD, RoHS, Bulk	RL	1.5 Ohm	1
LM1085IS- ADJ/NOPB	3A Low Dropout Positive Regulators, 3-pin TO-263, Pb-Free	U1	NA	1
MAX5437EU D	High Voltage +/-15V, Low-Drift Digital Potentiometers w/Uncommitted Op-Amp with 3-Wire Serial SPI Control Interface, Volatile, Linear Taper, 128 Steps, -40 to 85 degC, 14-pin TSSOP (U14-1)	U2	NA	1
LM358P	Dual Operational Amplifier, 3 to 32 V, 0 to 70 degC, 8-Pin PDIP (P), RoHS, Tape and Reel	U3, U4	NA	2



# ANEXO IV: MANUAL DE USUARIO

Para el correcto funcionamiento del sistema han de seguirse los siguientes pasos. No seguir los pasos conforme al presente documento puede producir daños irreparables en el sistema, y daños graves a las personas. El sistema puede producir daño eléctrico, y a la visión debido a la potencia lumínica del sistema.

## 1. Ensamblaje del sistema

El sistema se compone de dos partes claramente diferenciadas. Por una parte, se tiene el *LaunchPad*, y por otra la PCB de ajuste de iluminación, en la cual se encuentra el LED. La conexión entre las partes es tanto eléctrica, como mecánica. La unión se realiza mediante la inserción de los pines machos de la PCB, en los zócalos de los pines hembras del *LaunchPad*, ambos cuentan con el mismo número de pines por conector. Como se muestran en las siguientes figuras:

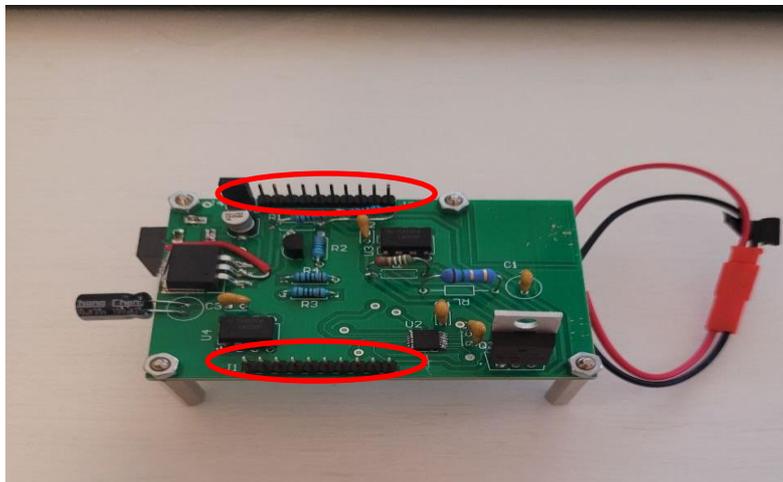


Figura 1. Vista superior de la PCB de ajuste de iluminación.



Figura 2. Vista inferior del *LaunchPad*.

Los pines macho de la PCB de ajuste de iluminación, se deben alinear con los pines hembra del *LaunchPad*, situados en la cara inferior de ésta. Es necesario hacer algo de presión para que la conexión eléctrica sea adecuada entre las partes del sistema. Los cables rojos y negro han de mantenerse conectados en todo momento. Estos cables son útiles en caso de que el LED se dañe y pueda ser sustituido. El resultado de la unión queda de la siguiente forma:

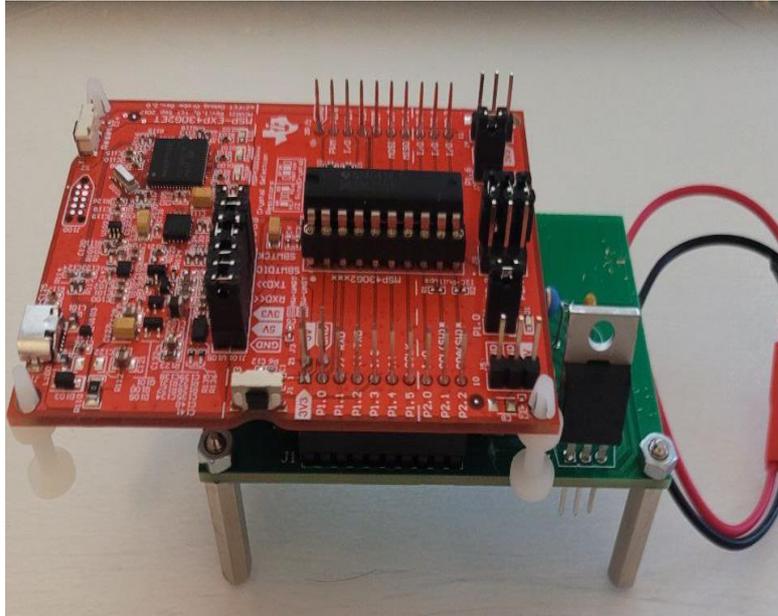


Figura 3. Resultado de las partes.

## 2. Conexión del sistema

En primer lugar, se ha de conectar el cable USB de comunicación, con el extremo micro USB tipo B en el zócalo del *LaunchPad*, y el otro extremo del cable USB tipo A al PC.



Figura 4. Cable USB micro tipo B a tipo A.

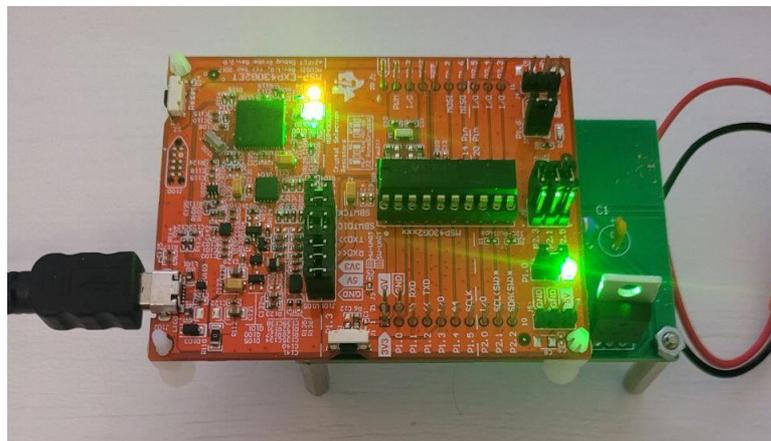


Figura 5. Sistema conectado al PC.

Como confirmación de la correcta conexión, nos debemos fijar en el estado de los LEDs, en concreto el LED verde de la esquina inferior derecha. Si este LED no se enciende, supone un fallo en el software, ya que este LED indica el estado de encendido del sistema. Si este LED está apagado, y se conecta el sistema a la fuente de

alimentación, el sistema se encenderá a máxima potencia, con el riesgo de producir deslumbramiento, y sobrecalentamiento, sino se desconecta de inmediato.

En segundo lugar, se debe conectar la fuente de alimentación, con valores nominales de 24 Vdc y 2,5 A, al conector Jack de 2,4mm de diámetro, situado en el plano inferior de la PCB. El modelo de la fuente de alimentación se muestra en la siguiente imagen:



Figura 6. Fuente de alimentación modelo GS60A24 de MEAN WELL.

El resultado de la conexión del Jack queda reflejado en las siguientes figuras:



Figura 7. Vista del plano inferior del sistema con las conexiones realizadas.

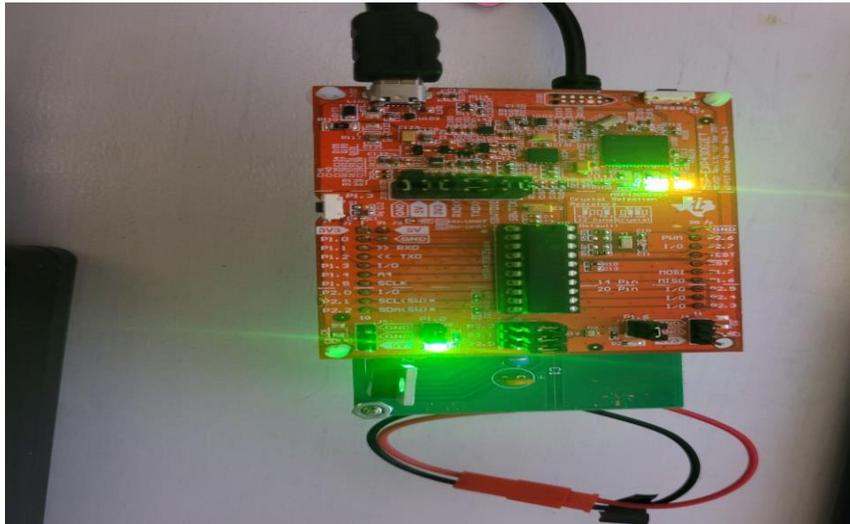


Figura 8. Vista del plano superior del sistema con las conexiones realizadas.

### 3. Interfaz de usuario

Para iniciar el control del sistema se ha de ejecutar el archivo *Control\_LED\_TFG.exe*. Una vez ejecutado el programa, nos aparece la siguiente interfaz, como se indica en la siguiente figura:

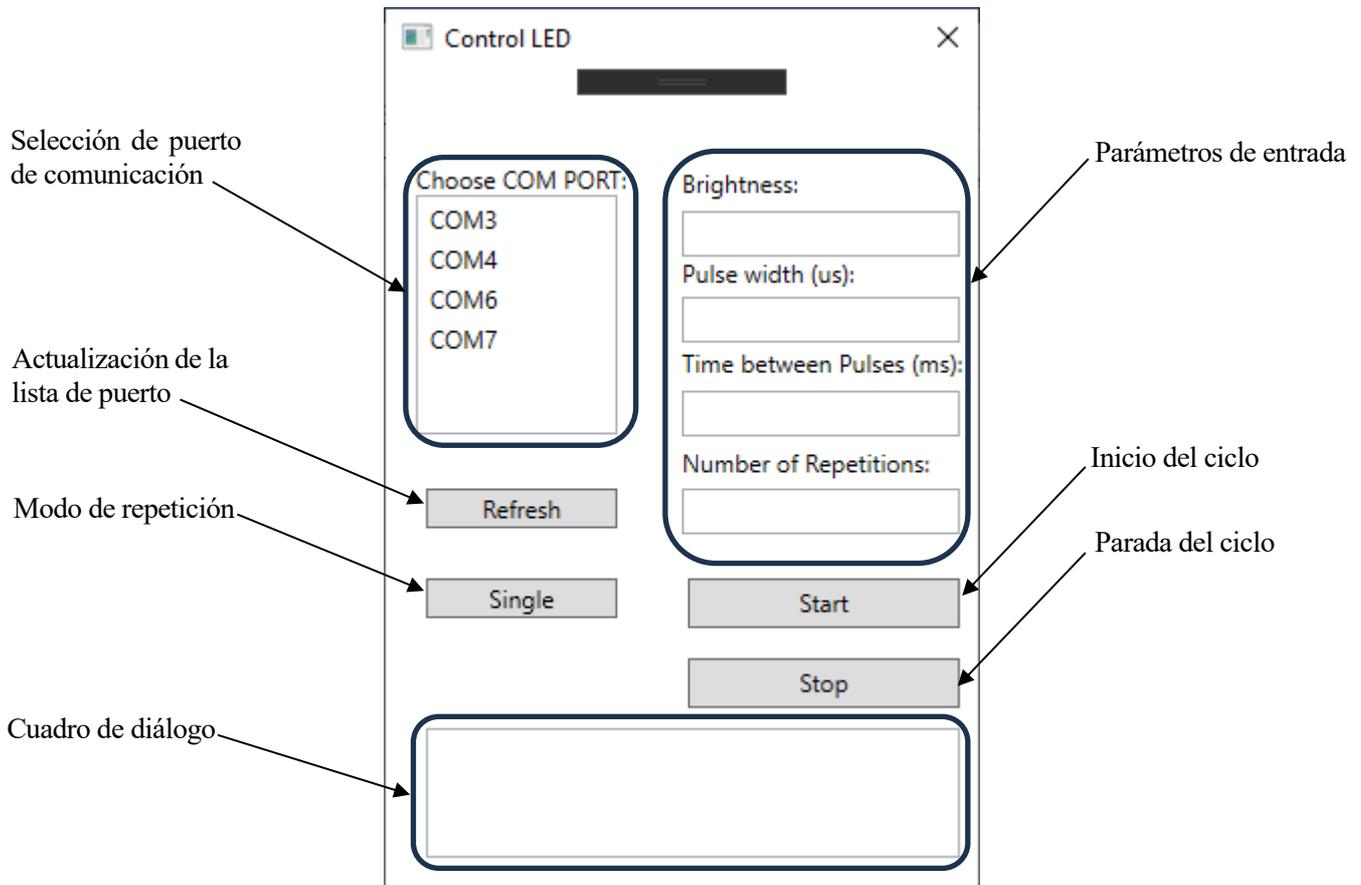


Figura 9. Interfaz de usuario.

Como primer paso, se debe seleccionar el puerto comunicación (COM), para ello debemos abrir el administrador de dispositivos de Windows, y en el desplegable “Puertos (COM Y PL)” nos deberá a parecer un con el siguiente título “MSP Application UART 1...”. Este nos indicara el COM asignado por el PC. Una vez, descubierto el COM pertinente bastará con hacer clic sobre el botón *Refresh*, para actualizar la lista de puertos disponibles, y hacer un clic sobre el COM correspondiente dejando éste seleccionado, como se indica en la siguiente figura:

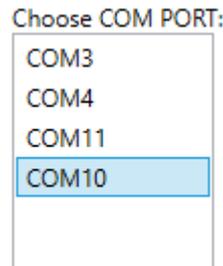
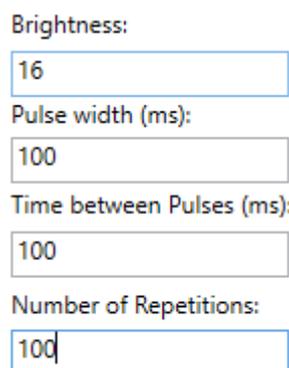


Figura 10. Ejemplo de selección de puerto COM.

A continuación, se procederá a indicar los parámetros de entrada indicados de la siguiente forma:

- **Brightness.** Variable del control de intensidad de brillo luminoso del sistema. Se indica con valores numéricos de 0 a 126, siendo 0 el mínimo brillo posible, y 126 el máximo.
- **Pulse Width.** Variable de control del ancho de pulso de estímulo luminoso. Se indica con valores numéricos de 2 a 10000, siendo dicho valor en milisegundos.
- **Time between Pulse.** Variable de control del tiempo entre pulsos de estímulo luminoso. Se indica con valores numéricos de 2 a 10000, siendo dicho valor en milisegundos.
- **Number of Repetitions.** Variable de control del número de ciclos de estímulo luminoso que se ejecutan. Se indica con valores numéricos de 1 a 9999.



Brightness:  
16

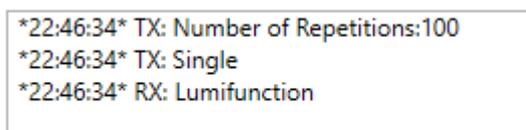
Pulse width (ms):  
100

Time between Pulses (ms):  
100

Number of Repetitions:  
100

Figura 11. Ejemplo de parámetros de entrada al sistema.

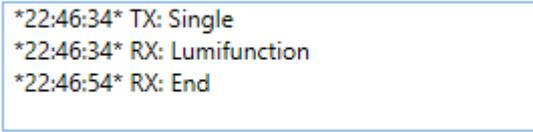
Finalmente, se puede pulsar el botón *Start*, iniciando la transmisión de datos quedando reflejado el intercambio de información entre el *LaunchPad* y el PC, en el cuadro de diálogo. En él se nos muestran los mensajes enviados con la inclusión del prefijo *TX*, y los mensajes recibidos con el prefijo *RX*. Todos los mensajes cuentan con la introducción de la hora en tiempo real del PC que ejecuta la interfaz. El texto del cuadro de diálogo se puede copiar, pero no eliminara ni modificar.



```
*22:46:34* TX: Number of Repetitions:100
*22:46:34* TX: Single
*22:46:34* RX: Lumifunction
```

Figura 12. Ejemplo de mensajes en el cuadro de dialogo.

Se continuará la transmisión de datos y la ejecución de los ciclos, quedando a la espera del mensaje de respuesta *End*, para confirmar el fin del proceso. Como se ejemplifica en la siguiente figura:



```
*22:46:34* TX: Single
*22:46:34* RX: Lumifunction
*22:46:54* RX: End
```

Figura 13. Ejemplo de mensaje *End* en el cuadro de dialogo.

Adicionalmente, si se pulsa *Single* cambiará a *Continuos*, para realizar infinitos ciclos. En el segundo modo se deshabilita el parámetro *Number of Repetitions*. Se ejecutarán los ciclos hasta que se pulse el botón *Stop*, finalizado el proceso y quedando a la espera del mensaje de respuesta *End*. Una vez recibido este mensaje podemos volver a reiniciar el sistema con los mismos parámetros de entrada u otros.