



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Diseño de un luxómetro para la medida de fuentes de luz
para endoscopia.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR/A: Párraga Ortega, Jorge

Tutor/a: Berjano Zanón, Enrique

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de
Ingeniería del Diseño

Trabajo Final de Grado en Ingeniería Electrónica
Industrial y Automática

Diseño de un luxómetro para la medida de fuentes de luz para endoscopia

ALUMNO: Jorge Párraga Ortega

TUTOR: Dr. Enrique Berjano Zanón

CURSO: 2021-2022

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres y a mi hermano por todo el apoyo y cariño que me han dado a lo largo de la carrera y la realización de este Trabajo de Fin de grado.

Además, quiero agradecer a todos los compañeros de clase que han estado conmigo estos últimos años y que han hecho de esta etapa de mi vida una gran experiencia. En especial quiero nombrar a Álvaro Castellanos, Alejandro Olcina y Miguel Olivares, que me han acompañado en los trabajos y jornadas de estudio a lo largo de la carrera.

También agradezco a mis amigos que se han interesado por el proyecto y me han mostrado su apoyo, especialmente a Jose Antonio Pérez, Tomás Colomer y Jose Diepa, con los que tantas veces he hablado sobre el proyecto y me han animado a la realización de este.

Por último, dar las gracias a todos los profesores del grado que tanto me han enseñado y, por supuesto, a mi tutor Enrique Berjano Zanón. Desde el primer momento me ha asesorado y ha estado pendiente para que este proyecto pudiera salir adelante.

Índice de documentos

DOCUMENTO 1. Memoria.....	4
DOCUMENTO 2. Planos.....	48
DOCUMENTO 3. Pliego de Condiciones.....	50
DOCUMENTO 4. Presupuesto.....	56



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de
Ingeniería del Diseño

Trabajo Final de Grado en Ingeniería Electrónica
Industrial y Automática

Diseño de un luxómetro para la medida de fuentes de luz para endoscopia

DOCUMENTO 1. MEMORIA

ALUMNO: Jorge Párraga Ortega

TUTOR: Dr. Enrique Berjano Zanón

CURSO: 2021-2022

Resumen

El objetivo de este Trabajo de final de Grado (TFG) es el diseño y verificación de un luxómetro digital basado en un fotodiodo, para la medida y validación de fuentes de luz específicas para la iluminación de procesos endoscópicos.

Se realizará un estudio de las diferentes fuentes de luz para la endoscopia, así como del entorno de diferentes procesos endoscópicos, con el objetivo de acotar un rango óptimo para minimizar el error a la hora de validar las fuentes de luz.

A continuación, se procederá a realizar el diseño analógico para convertir la señal de salida del fotodiodo en una señal analógica que pueda ser digitalizada mediante un convertidor analógico digital. Una vez diseñado el circuito electrónico se validará

Por último, se diseñará el programa y conexionado de la parte digital del prototipo, y una vez terminado, se procederá a la validación de este.

Abstract

The objective of this Bachelor's Degree Final Project is the design and verification of a digital luxmeter based on photodiode, for measuring and validate specific light sources used on the illumination of endoscopic process.

A study of the different light sources for endoscopy will be done, as well as the environment of different endoscopic processes, with the aim of delimiting the best range for minimizing errors when validating light sources.

Next, the analogic design will be carried out for converting the output signal of the photodiode into a signal that can be digitized by an Analog-to-digital converter, once it is finished it will be validated.

Finally, the program and connections of the digital part of the prototype will be designed, and once finished, it will be validated.

DOCUMENTO 1. Memoria

Resumen	5
Abstract.....	5
Lista de Figuras	7
Lista de Tablas.....	7
1. Introducción	9
2. Objetivo	10
3. Antecedentes	10
3.1 Funcionamiento de un fotodiodo	10
3.2 Fotodiodo como transductor.....	11
4. Estado del arte	12
5. Especificaciones	15
6. Diseño solución adoptada	15
6.1 Diagrama de bloques	16
6.2 Selección del sensor.....	17
6.3 Análisis de la señal	18
6.4 Descripción detallada por bloques del prototipo.....	19
6.4.1 Descripción detallada por bloques del prototipo.....	19
6.4.2 Eliminación de offset	21
6.4.3 Filtro paso bajo.....	22
6.4.4 Convertidor Analógico Digital.....	23
6.4.5 Microcontrolador	24
6.4.6 Interfaz con el usuario.....	25
7. Verificación mediante simulación	26
7.1 Alimentación	26
7.2 Etapa de amplificación de transimpedancia.....	26
7.3 Etapa restadora de offset y amplificación.	28
7.4 Etapa filtro paso bajo	31
7.5 Etapa Digital	32
8. Conclusión	37
9. Referencias.....	38
Anexo 1: Código del microcontrolador	40

Lista de figuras

Figura 1 Esquema fotodiodo sometido a una fuente de luz[2]	11
Figura 2:Curva característica de un fotodiodo I-V[4]	12
Figura 3 Gráfico del standard D65[5]	12
Figura 4 Diagrama de bloques del diseño propuesto.....	16
Figura 5 Gráfica de corriente de luz inversa del fotodiodo VISHAY BPW34	17
Figura 6 Esquema de amplificador de transimpedancia.....	20
Figura 7 Esquema circuito restador de offset	21
Figura 8 Esquema filtro paso bajo (anti-aliasing) activo.....	23
Figura 9 Microcontrolador Arduino Nano[12].....	25
Figura 10 Pantalla LCD 20x4.....	25
Figura 11 Etapa 1 (Figura 6) modificada para su simulación mediante software	27
Figura 12 Gráfica DC Sweep Voltaje salida etapa 1 sobre Intensidad fotodiodo	28
Figura 13 Etapa 2, figura 7 modificada para simulación.....	29
Figura 14 Grafico del análisis transitorio de la etapa 2, se observa la entrada (Vo_1) en rojo y la salida (Vo_2) en verde.	30
Figura 15 Etapa 3, figura 8 modificada para su simulación.	31
Figura 16 Gráfica barrido AC de la señal de salida de la etapa 3.....	32
Figura 17 Convertidor Analógico-Digital ADS1110.	33
Figura 18 Esquema conexionado Arduino Nano con pantalla LCD 20x4 y 2 botones de interacción con el usuario,	34
Figura 19 Diagrama de bloques del programa cargado al microcontrolador.	35
Figura 20 Pantalla de carga	36
Figura 21 Pantalla LCD en funcionamiento normal.....	36
Figura 22 Pantalla LCD con la Pantalla Congelada	36
Figura 23 Pantalla LCD en Stand By	37

Lista de Tablas

Tabla 1. Fuentes de luz para endoscopia con sus especificaciones	14
Tabla 2. Longitud de onda de los fotodiodos basados en su material [8] ...	15
Tabla 3. Valores de la simulación DC Sweep de la etapa 1	28

Tabla 4. Valores del análisis transitorio de la etapa 2	30
Tabla 5. Conexión de entradas/salidas microcontrolador	34

1. Introducción

La endoscopia es una técnica empleada en medicina para visualizar las estructuras interiores del cuerpo humano mediante una sonda flexible dotada de una pequeña cámara y una luz en su extremo. Algunos tipos de endoscopia, como puede ser la laparoscopia, permiten intervenir quirúrgicamente al paciente, realizando una incisión hasta 20 veces más pequeña que la que se necesitaría en una intervención de cirugía abierta. Las posibilidades que ofrece este tipo de técnicas son tan amplias que en la actualidad se pueden llevar a cabo incluso cirugías en remoto [1].

Los luxómetros son equipos electrónicos utilizados en numerosos campos tecnológicos, cómo puede ser en arquitectura, para realizar comprobaciones de iluminación dentro de una vivienda u oficina. También se emplean en procesos de validación o calibración de cualquier aparato emisor de luz, desde una bombilla halógena de uso doméstico o un foco que ilumine el escenario de un teatro, hasta aparatos más específicos como son las fuentes de luz para la endoscopia, que es la tecnología que se analizará en este TFG.

Las fuentes de luz en la endoscopia juegan un papel muy importante, pues la correcta iluminación de la zona que se quiere observar o intervenir será uno de los principales factores de éxito a la hora de llevar a cabo este tipo de intervenciones. Así, para que la imagen recibida sea nítida es preciso que esa zona se encuentre iluminada de acuerdo con unos determinados parámetros.

2. Objetivo

El objetivo de este TFG es el diseño de un sistema de medida de intensidad lumínica, que comprende el espectro necesario para la medida y verificación de las fuentes de luz utilizadas en procesos endoscópicos. Este instrumento de medida estará compuesto por un fotodiodo, que actuará como transductor del sistema, un circuito analógico para el tratamiento de la señal proveniente del sensor, permitiendo su posterior digitalización mediante un convertidor ADC, y un microcontrolador para el tratamiento de la señal digital e interfaz con el usuario, con objeto de poder realizar medidas con este sistema de forma externa.

3. Antecedentes

El luxómetro es el instrumento mediante el cual se mide la iluminancia de un espacio o punto. Este se basa en la utilización de un sensor óptico o fotodetector, el cual actúa como transductor de la iluminancia, proporcionando una señal eléctrica. Existen distintos tipos de fotodetectores, aunque los más utilizados hoy en día son los fotodiodos, los fototransistores y las fotorresistencias o LDRs. Los más empleados para la medición de la iluminancia de un área son los fotodiodos, debido a su linealidad y su bajo tiempo de respuesta.

3.1 Funcionamiento de un fotodiodo

El fotodiodo forma parte de los fotodetectores que son transductores capaces de transformar radiación luminosa en corriente eléctrica. En concreto, el fotodiodo se basa en una unión de silicio PN, semiconductor P (dopado con aceptadores) y semiconductor N (dopado con dopadores). Si la unión PN es irradiada con radiación, ya sea esta visible o no, y si dicha radiación supera la brecha de bandas, aparecerán pares electrón-hueco adicionales que se desplazarán bajo el efecto del campo eléctrico en la zona de unión, como se muestra en la Figura 1.

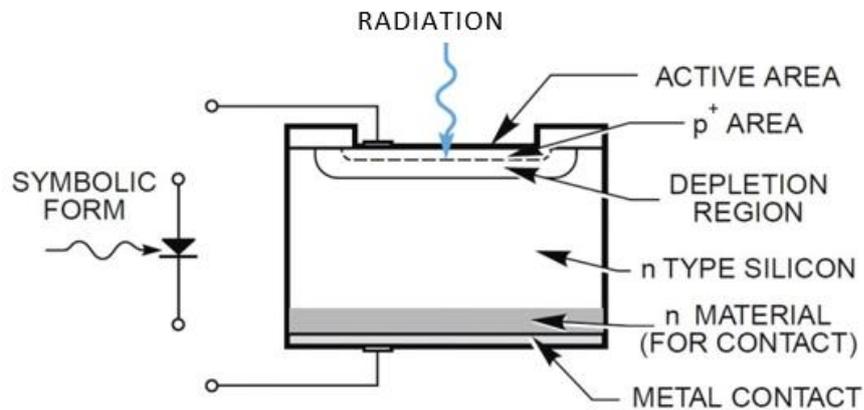


Figura 1. Esquema fotodiodo sometido a una fuente de luz[2]

La llegada de electrones a la zona N y de huecos a la zona P genera una diferencia de potencial que será transformada en una corriente medible mediante la conexión del fotodiodo a una resistencia de carga.

3.2 Fotodiodo como transductor

Basándonos en el principio de funcionamiento de un fotodiodo, cuando los utilizamos como sensores no se utilizan como generadores, sino que se aprovecha la posibilidad que tienen de poder aplicarles una tensión de polarización inversa. Esto permite aumentar la velocidad como sensor, pues al aplicar esta tensión inversa las cargas generadas en la zona desierta son recogidas rápidamente y, por tanto, la respuesta se realiza en un menor tiempo [3].

Si comparamos los fotodiodos con los fototransistores o fotorresistencias, veremos cómo los primeros ofrecen mayor linealidad y menor tiempo de respuesta (más velocidad), que es lo que se busca a la hora de seleccionar cualquier transductor.

De acuerdo con lo comentado, es más idóneo trabajar en polarización inversa como se observa en la Figura 2. Esta muestra la curva característica de los fotodiodos, siendo la linealidad en el tercer cuadrante idónea para trabajar sobre ella, ya que nos permite tener una señal analógica de salida lineal.

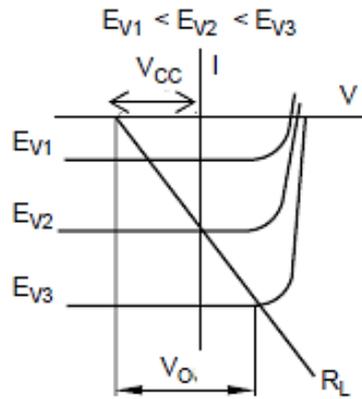


Figura 2. Curva característica de un fotodiodo I-V[4]

4. Estado del arte

Para poder realizar un circuito de medida de luz será necesaria la realización de un estudio de las fuentes de luz usadas en procesos endoscópicos, con el objetivo de acotar un rango de potencia e intensidad luminosa.

Respecto a las características de la luz empleada en la endoscopia, se comprueba que la totalidad de fuentes de luz emiten luz fría, y esta comprende desde 5500 a 7000 grados Kelvin. Esto se debe a que la luz fría, por lo general, permite una iluminación más detallada de la imagen captada digitalmente. Esto se puede observar en la Figura 3, donde vemos unos rangos en función de la iluminancia y la temperatura del color, y la zona blanca indica que la claridad de la imagen será la oportuna.

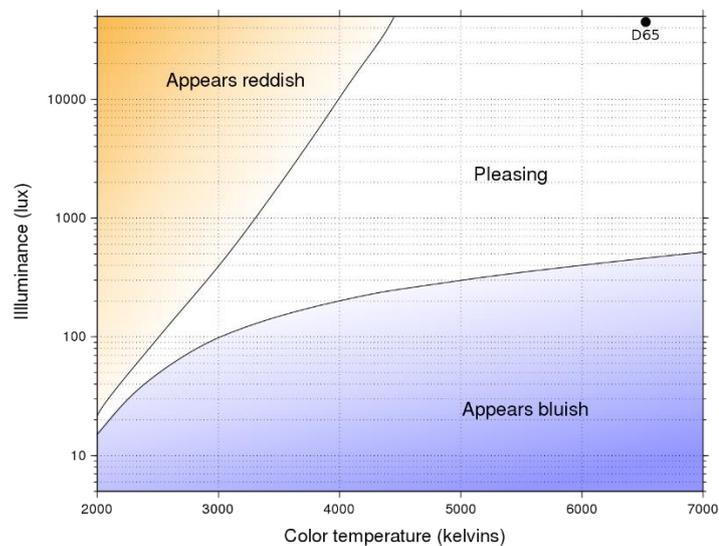


Figura 3. Gráfico del standard D65[5]

Existe una gran gama de fuentes de luz que varían en la cantidad de lúmenes que emiten, sin embargo, esto se debe a que en función del proceso endoscópico a realizar se necesitan distintas características en las fuentes de luz. Por ejemplo, no será necesario el mismo flujo luminoso para la iluminación de un espacio como el de la cavidad abdominal que para la iluminación de un espacio como el de la articulación del hombro. Por lo tanto, lo que no variará en su utilización será la intensidad luminosa que llega a la superficie que queremos ver con claridad, y esto se determinará con nuestra unidad a medir, los luxes.

No hay información clara sobre el tamaño exacto de la cavidad peritoneal, que probablemente es una de las zonas con más volumen en la que realizar una endoscopia, por tanto, para calcularlo se han considerado las siguientes características [6]: eje longitudinal de 0.25 m, eje transverso de 0.12 m y eje anteroposterior de 0.08 m. este cálculo determina un volumen de unos 2.4 L. Sin embargo, este no es el volumen máximo que puede alcanzar, ya que se expande y puede llegar a tener un volumen de hasta 4 L en dilatación. Además, sus medidas se verían incrementadas proporcionalmente, obteniendo un área máxima donde incidirá la luz generada por la fuente de luz del endoscopio de 0.042 m^2 . Para un área más pequeña se ha escogido un proceso artroscópico, como puede ser la intervención artroscópica de una mano, obteniendo un volumen de 0.011 L y un área de 0.0025 m^2 . Se muestran en la Tabla 1 las diferentes fuentes de luz utilizadas para cavidades de distintos tamaños.

Tabla 1. Fuentes de luz para endoscopia con sus especificaciones

Modelo endoscopio	Modelo endoscopio	Flujo luminoso (lm)	Temperatura del color (K)	Iluminancia Área más grande (klx)	Iluminancia Área más pequeña (klx)
EUROCLINIC – ED300		180	5500	4.27	72
PHOTONIC – F5100		1000	6500	23.71	40
IMC – Lumina L90		10000	6500	237.14	400
WISAP - L300		30000	6000-6500	711.41	12000
BIOTEX – FNT 200		800	6000	18.97	320

Como se muestra en la Tabla 1, las fuentes de luz para endoscopia se encuentran comprendidas en un rango de temperatura del color entre 5500-6500 K. Aunque se ven grandes variaciones en la iluminancia, pues dependerá de multitud de variables como el tamaño corporal, posibles inflamaciones intradérmicas u objetos externos al cuerpo humano, nuestra intención será la de analizar los modelos para el supuesto para el que se ha diseñado, así como ponerlo a prueba en dichas condiciones de espacio iluminado para comprobar que llegan al rango idóneo de visualización digital que se encuentra entre los 25 klx y los 75 klx, como se mostraba en la Figura 3.

5. Especificaciones

La idea principal del luxómetro es su utilización para fuentes de luz de sistemas endoscópicos y para ello tendremos que centrarnos en un rango determinado de medida. Este no tendrá por qué empezar en 0 luxes, ya que el objetivo del diseño será la validación de fuentes de luz para endoscopia, por lo que se preferirá un rango más pequeño, pero de mayor precisión a la hora de la digitalización.

Como se aprecia en las curvas de Kruithof [7], ya que de media hemos visto que nuestra temperatura del color ronda los 6000K, tiene sentido que se busque en endoscopia una iluminancia aproximada de entre 25 klx y 75 klx. La longitud de onda a medir será toda aquella que se encuentre dentro del espectro de visión del ser humano o que englobe la mayor parte posible, este rango se sitúa entre los 380 nm y 680 nm, aproximadamente. Para este rango de medida se elegirá un fotodiodo basado en silicio, ya que es el material que nos permite abarcar este rango de medida como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Longitud de onda de los fotodiodos basados en su material [8]

Material	Longitud de onda (nm)
Silicio	190-1100
Sulfuro de plomo	1000-3900
Germanio	800-1900
Indio galio Arsénico	800-2600

6. Diseño solución adoptada

Con las características descritas podemos realizar la elección del sensor con el que traduciremos la iluminancia recibida a señales eléctricas, para posteriormente interpretar mediante el diseño de un circuito electrónico que adecúe la señal para su digitalización y representación a través de un microcontrolador.

6.1 Diagrama de bloques

La Figura 4 muestra el diagrama de bloques del sistema desde la alimentación y el sensor hasta la interfaz con el usuario.

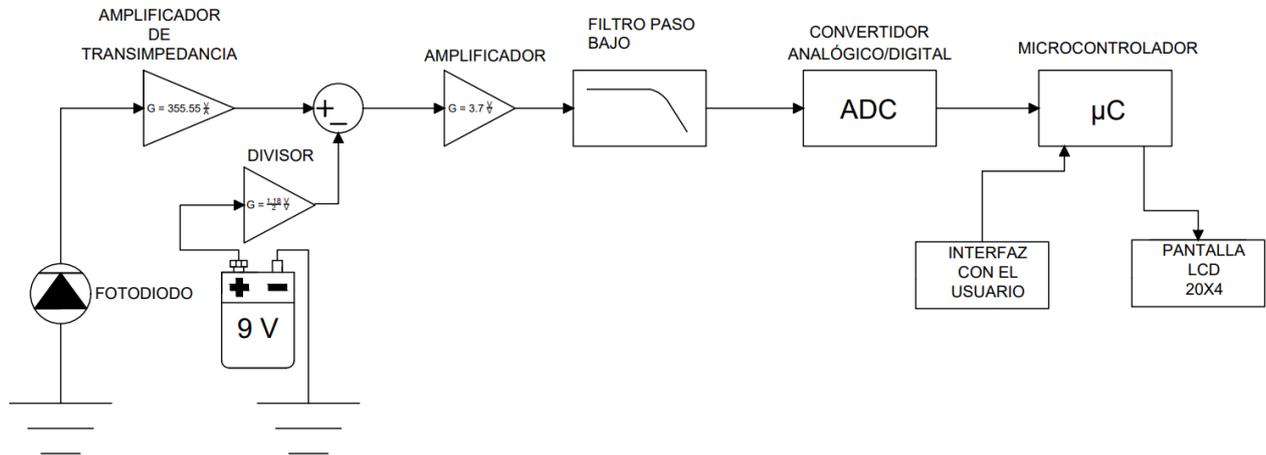


Figura 4. Diagrama de bloques del diseño propuesto.

En el diagrama de bloques de la figura 4 se pueden observar las distintas etapas:

- *Fotodiodo.* Se trata del sensor encargado de traducir la iluminancia a corriente eléctrica.
- *Alimentación.* Pila de 9 V que se emplea para alimentar el circuito.
- *Amplificador de Transimpedancia.* Se trata de un amplificador de ganancia 355.55 V/A.
- *Divisor.* Etapa que disminuye la señal de la pila en un factor de $\frac{1.18}{2}$ V/V
- *Restador.* En esta etapa se resta la señal amplificada del sensor menos la señal disminuida de la pila.
- *Amplificador.* La señal proveniente de la resta se amplifica con un factor de 3.7 V/V para tener la señal en un rango entre 0 V y 5 V.
- *Convertidor Analógico digital (ADC).* Etapa en la que se traduce la señal analógica a bits con ayuda de un circuito integrado.
- *Microcontrolador.* Circuito integrado donde se programará la interfaz con el usuario y se tratarán los datos provenientes del ADC.

- *Interfaz con el usuario.* interruptor con los que el usuario interactuará para cambiar la visualización de los datos.
- *Pantalla LCD 20x4.* Pantalla en la que se reflejarán los datos tratados por el microcontrolador.

6.2 Selección del sensor

Siguiendo las características deseadas del fotodiodo, se realiza una búsqueda y se elige el sensor Vishay BPW34 (Vishay Intertechnology, Malvern, PA, USA) [9]. Este sensor, basado en silicio, posee un rango de recepción de longitud de onda comprendido entre 430 nm y 1100 nm. Este rango será suficiente para el luxómetro que se va a diseñar, ya que abarca el espectro perceptible por el ser humano, teniendo en cuenta la temperatura del color que utilizan las fuentes de luz destinadas para la endoscopia.

Como se puede observar en la Figura 5, el sensor abarca un rango de respuesta ante la iluminancia válido para el intervalo que se había planteado para el luxómetro. Como hemos comentado con anterioridad, la intensidad luminosa en espacios endoscópicos suele ser de alrededor de 50 klx, y en la gráfica observamos cómo el máximo al que podemos llegar sería de aproximadamente 80.000 luxes.

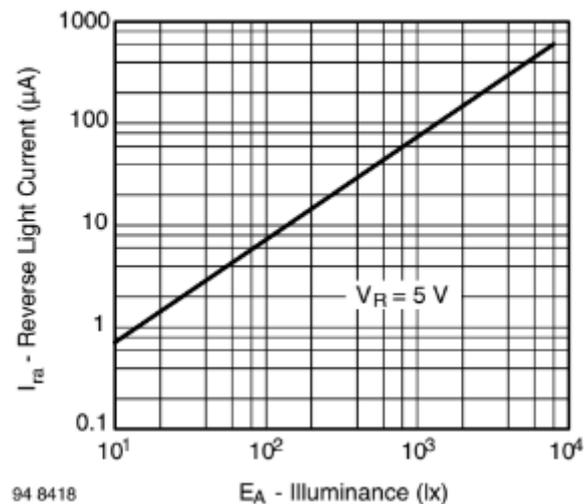


Figura 5. Gráfica de corriente de luz inversa del fotodiodo VISHAY BPW34.

6.3 Análisis de la señal

Para analizar la señal que circulará a través del circuito a proponer, lo primero será acotar el rango de salida útil que tendrá nuestro fotodiodo, ya que hemos comentado que nos centraremos en un rango entre 25 klx y 75 klx.

Para la condición de temperatura ambiente a 25 °C, inversamente alimentado con una $V_r = 5 V$ y con una iluminancia de 1 klx, se obtienen 75 μA [9], con lo que para el rango seleccionado de 25 klx a 75 klx se obtendrá una sensibilidad de 75 nA/lx. Por tanto, la salida a tener en cuenta del fotodiodo se encontrará entre -1.875 mA a -5.625 mA.

La función del prototipo será la de calibración o validación de fuentes de luz destinadas para la endoscopia, las cuales, en un entorno de prueba controlado, emitirán sobre la superficie un valor estable de luxes, lo que quiere decir que el circuito a diseñar deberá ser capaz de admitir señales DC. Sin embargo, con el objetivo de un mayor filtrado de la señal y para evitar posteriormente el anti-aliasing en la digitalización de la señal, será necesario saber cuál será la frecuencia máxima de entrada que podremos llegar a aceptar.

Para obtener esta frecuencia máxima, en primer lugar, se calcula el cambio máximo que se puede realizar en el sistema, obteniendo que son 50 klx, yendo de un extremo a otro. Además, asumiremos que esta variación en un proceso controlado de validación nunca será instantáneo, sino que será de forma gradual, y por ello asumiremos que la variación en el tiempo será de 1 s. Una vez se dispone de estos dos datos, y basándonos en la frecuencia máxima de un operacional en función del Slew-Rate, obtenemos la siguiente ecuación [10]:

$$f_{max-sr} = \frac{SR}{2 \cdot \pi \cdot A} \quad (1)$$

Tratando el Slew-Rate (SR) como la máxima variación de iluminancia, obtenemos:

$$\frac{\partial lx}{\partial t} = 50 \text{ klx/s} \quad (2)$$

Siendo la amplitud máxima de la variación de la onda senoidal $\frac{50 \text{ klx}}{2} = 25 \text{ klx}$, nos quedaría la siguiente ecuación de frecuencia máxima:

$$f_{max} = \frac{\frac{\partial |x|}{\partial t} |_{max} (lx/s)}{2 \cdot \pi \cdot A(lx)} = \frac{50 \cdot 10^3 \cdot lx/s}{2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot lx} = 0.318 \text{ Hz} \quad (3)$$

Por tanto, la frecuencia máxima estimada de la señal será de 0.318 Hz. Si se considera esta frecuencia como valor de corte, implicaría condensadores y resistencias de un valor muy elevado a la hora de implementar el filtro paso-bajo, por lo que se ha decidido utilizar una frecuencia máxima de 1 Hz.

6.4 Descripción detallada por bloques del prototipo

A continuación, teniendo descrita y acotada la señal de salida del transductor iluminancia a corriente pasaremos al diseño del circuito analógico para la conversión de esta señal en una señal que pueda ser digitalizada para su tratamiento con el microcontrolador.

6.4.1 Descripción detallada por bloques del prototipo

Teniendo en cuenta que a la salida de nuestro fotodiodo se obtiene una señal de corriente de rango -1.875 mA a -5.625 mA y para realizar la conversión de analógico a digital, necesitaremos una señal en voltaje. La opción del amplificador de transimpedancia será la idónea para esta función, ya que permite la conversión I/V y, a su vez, una amplificación gracias a su resistencia de realimentación. De esta forma se obtiene la siguiente función de ganancia:

$$V_{out} = -I_{IN} \cdot R_f \quad (4)$$

El esquema eléctrico de esta etapa se representa en la Figura 6.

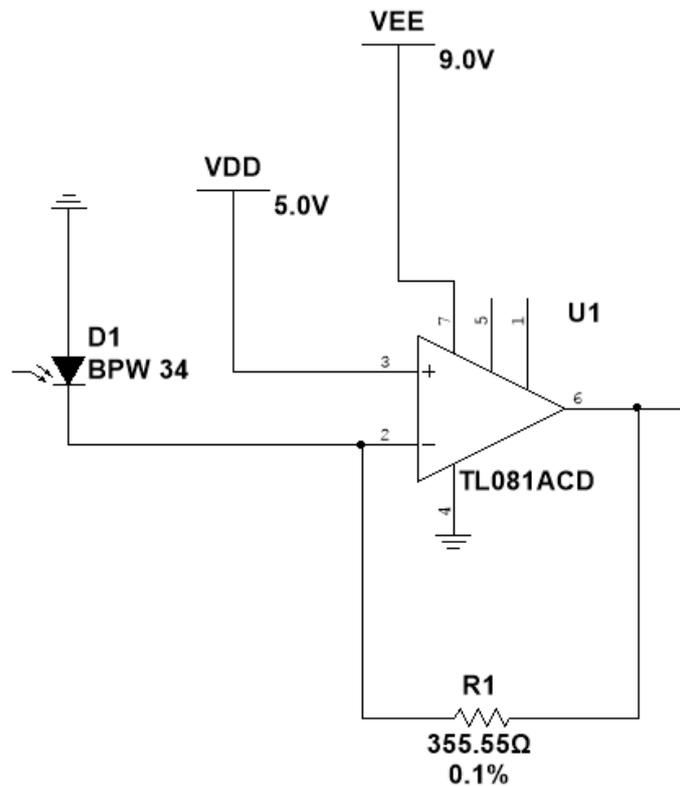


Figura 6. Esquema de amplificador de transimpedancia.

Con una ganancia elevada, cualquier corriente de polarización a la entrada del terminal inversor del amplificador operacional resultará en una compensación de salida. Con el objetivo de aminorar este problema, esta etapa de amplificación se diseñará con un amplificador operacional de entrada de los transistores de efecto de campo (FET). Por tanto, para el diseño se utilizará el AO TL081ACD que tiene un voltaje de compensación de entrada muy bajo.

Despejando la resistencia de la Ecuación 4 y teniendo como valor de voltaje de salida máximo 9 V, pero teniendo en cuenta que la salida tendrá 5 V de voltaje mínimo y un rango de 3.75 mA, se obtiene la ganancia deseada de 355.555 V/A. Para que el voltaje variable comprenda entre 5 V y 7 V se utilizará una resistencia de 355.55 Ω y una tolerancia de 0.1%, Estos componentes determinarán que el rango de luxes comprendido en voltaje sea de la siguiente manera:

$$V_{range_out} = (-(-3.75 \text{ mA}) \cdot 355.55 \pm 0.1\% \Omega) = 1.3333\text{V} \pm 1.33 \text{ mV}$$

$$V_{out_min} = 5 + (-(-1.875 \text{ mA}) \cdot 355.55 \pm 0.1\% \Omega) = 5.6666 \text{ V} \pm 0.66 \text{ mV}$$

$$V_{out_max} = 5 + (-(-5.625 \text{ mA}) \cdot 355.55 \pm 0.1\% \Omega) = 6.9999\text{V} \pm 2 \text{ mV}$$

La señal de salida en tensión de esta etapa comprenderá desde 5.667 V a 6.999 V, si solo se tiene en cuenta el rango a digitalizar posteriormente.

6.4.2 Eliminación de offset

El offset, que será eliminado en esta etapa, estará compuesto por - 5 V utilizados en la etapa anterior para la alimentación del sensor junto a la señal proveniente del sensor cuando la iluminancia recibida se comprende entre 0 klx y 25 klx. Este cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$V_{out_max_0-25} = (-(-1.875 \text{ mA}) \cdot 355.55 \pm 0.1\% \Omega) = 0.6666 \text{ V} \pm 0.66 \text{ mV}$$

$$V_{offset_total} = V_{out_max_0-25} + 5V = 5.6666 \text{ V}$$

Se utilizará el esquema para esta etapa del circuito representado en la Figura 7.

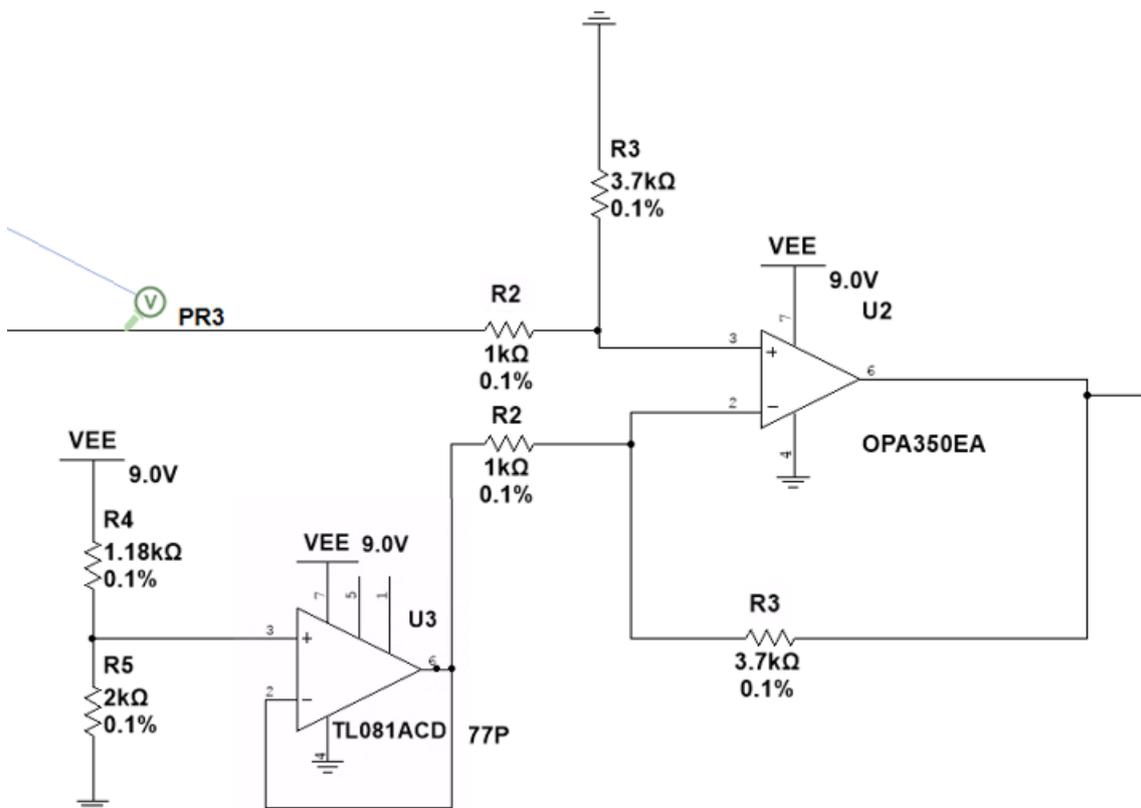


Figura 7. Esquema circuito restador de offset

En este circuito utilizamos dos señales de entrada, VEE que representa la tensión proporcionada por la pila alcalina de 9 V y V_{PR3} que equivaldría a la señal de salida de la etapa anterior.

Con la señal de offset a restar ya calculada de 5.666 V, se deberá dividir la tensión VEE para obtener un voltaje similar, utilizando un divisor de tensión mediante las resistencias R4 y R5.

$$V_{Offset} = V_{ee} \cdot \frac{R5}{R5+R4} = 9 V \cdot \frac{2 k\Omega}{2 k\Omega+1.18 k\Omega} = 5.660377 V \quad (5)$$

Una vez obtenida la señal a restar, y con el esquema definido, queda comprobar matemáticamente que en efecto se eliminará el valor de offset de la señal de entrada.

$$V_{out} = (V_{PR1} - V_{Offset}) \cdot \frac{R3}{R2} \quad (6)$$

$$V_{out_min} = (V_{PR1_min} - V_{Offset}) \cdot \frac{R3}{R2} = (5.6666 V - 5.6603 V) \cdot \frac{3.7 k\Omega}{1 k\Omega} = 0.0232 V$$

$$V_{out_max} = (V_{PR1_max} - V_{Offset}) \cdot \frac{R3}{R2} = (6.9999 V - 5.6603 V) \cdot \frac{3.7 k\Omega}{1 k\Omega} = 4.956 V$$

Esto proporciona una señal en tensión a la salida de esta etapa entre 0.0232 V a 4.956 V, teniendo solo en cuenta el rango que queremos medir desde 25 klx a 75 klx.

6.4.3 Filtro paso bajo

El filtro paso bajo no solo se usará con el objetivo de filtrado de señales de alta frecuencia, sino que también se utilizará como filtro antialiasing para la señal de entrada al convertidor ADS1114 [11], cuya ratio de muestreo es de 860 muestras por segundo (mps), o lo que es lo mismo, una frecuencia de muestreo de 860 Hz.

Aplicando el teorema de Nyquist [12], que define que para una buena digitalización de la señal la velocidad de muestreo ha de ser mayor al doble del componente de interés de frecuencia más alta de la señal a digitalizar, y teniendo en cuenta que se ha calculado

una frecuencia máxima de 1 Hz y que esta podría ser mayor debido a la falta de experimentación, la frecuencia de corte del filtro paso bajo será menor que la división de la frecuencia de muestreo entre 2. Al no poder realizar un ensayo experimental para calcular el verdadero ancho de banda de la señal, este ancho de banda se agranda para no perder información con el filtro paso bajo.

$$f_c \leq \frac{f_m}{2} = 430 \text{ Hz} \quad (7)$$

Ya que este filtro se pondrá después de las etapas de amplificado y resta, tendremos el poder de manejo del valor tanto de la resistencia cómo del condensador que filtrará estas frecuencias mayores de 4 Hz.

$$f_{c-final} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 70 \text{ k}\Omega \cdot 0.56 \mu\text{F}} = 4.06 \text{ Hz} \quad (8)$$

El filtro paso bajo será de primer orden, pues la atenuación que nos ofrece de 20 dB/dec en la banda de rechazo será suficiente para la eliminación de señales de ruido externas, así como para evitar el aliasing, y seguirá el esquema que vemos en la Figura 8.

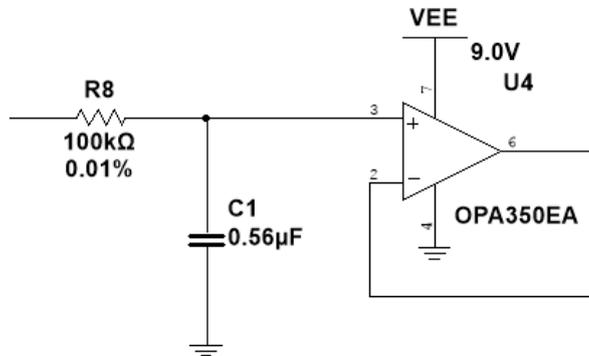


Figura 8. Esquema filtro paso bajo (anti-aliasing) activo.

6.4.4 Convertidor Analógico Digital

Esta etapa final corresponde a la entrada de la señal resultante de las etapas anteriores a un circuito integrado convertidor analógico digital, como es el ADS1114, el cual convertirá el rango de entrada de 0 V a 5 V a bits digitales, con una resolución de 15 bits.

Se obtienen un total de 2^{15} valores y dejará una resolución entre bits de:

$$Resolución_{mV/bits} = \frac{5 V}{2^{15} bits} = 0.152588 mV/bit$$

$$Resolución_{lux/bits} = \frac{50\,000 lux}{2^{15} bits} = 1.52588 lux/bit$$

Esta resolución correspondería a una digitalización de todos los valores de 0 a 5 V, pero como se ha comentado, nuestro rango de interés se encuentra entre 0.0232 V y 4.956 V, por tanto las relaciones de conversión de la señal de entrada al sistema desde el fotodiodo y de salida del sistema en voltaje y en bits son:

$$Relación_{mV/lux} = \frac{V_{max}-V_{min}}{lx_{max}-lx_{min}} = \frac{4,956 V - 0,0232 V}{75 klx - 25 klx} = 0.098665 mV/lux \quad (9)$$

$$Relación_{lux/bits} = \frac{Resolución_{mV/bits}}{Relación_{mV/lux}} = \frac{0.098665 mV/lux}{0.152588 mV/bit} = 1.5465 lux/bit \quad (10)$$

Esto implica que cada bit equivaldrá a 1.54 luxes, por tanto, será el error que se tenga a la hora de representar la señal digitalizada. Este error es asumible, teniendo en cuenta que el rango es del orden de klx y supone solo el 0.00309% del fondo de escala.

6.4.5 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado programable las veces que se deseen y con memoria para ejecutar el programa grabado en la misma. El programa permite gestionar distintas entradas y salidas. Para este TFG se ha utilizado un microcontrolador comercial basado en el software libre Arduino, debido a la variabilidad que permite dicho software, sin embargo, en un futuro se plantea la realización de un prototipo con un microcontrolador específico para este ámbito.

Se ha seleccionado dentro de la gama de la empresa Arduino (Somerville, Massachusetts, USA) la tarjeta Arduino Nano, debido a su reducido tamaño (45x18 mm) que permite la creación de un prototipo más acorde al tamaño real de un producto final.

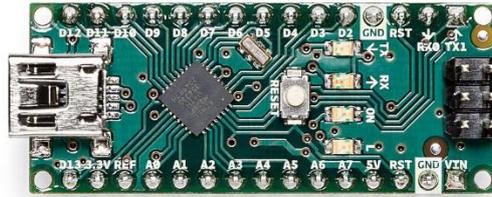


Figura 9. Microcontrolador Arduino Nano[13].

El Arduino nano está compuesto por un microcontrolador ATmega328P, 14 pines digitales (6 PWM) entrada/salida y 8 pines analógicos, también posee una señal de salida estable a 5V y una masa de referencia. Posee un reloj interno de 20MHz. La memoria se divide en 32 kB de memoria Flash, 2 kB de memoria RAM y 1 kB de memoria EEPROM. El microcontrolador para su correcto funcionamiento se deberá alimentar entre 7.5 V y 12 V.

6.4.6 Interfaz con el usuario

La interfaz con el usuario estará compuesta por una representación gráfica de los valores medidos a través de una pantalla LCD 20x4, conectada en paralelo con el microcontrolador del diseño, y por 2 accionadores a disposición del usuario, que permitirán congelar los datos en pantalla, poner en *Stand By* el microcontrolador sin perder las medidas y, por último, eliminar los datos obtenidos hasta el momento y apagar el microcontrolador.

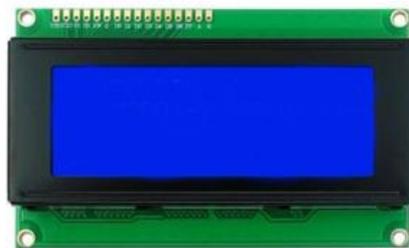


Figura 10. Pantalla LCD 20x4.

7. Verificación mediante simulación

La verificación del prototipo se ha llevado a cabo mediante dos programas de simulación de la plataforma de la UPV poli[LABS]. Para la parte analógica del prototipo se ha utilizado el software NI MULTISIM 14.1 de Electronics Workbench (Toronto, Canadá).

A lo largo de este apartado se comprobará el funcionamiento de cada etapa individualmente.

7.1 Alimentación

A lo largo de las etapas se observan dos alimentaciones, VDD y VEE, y estas alimentaciones provienen de dos fuentes diferentes.

Con el objetivo de calcular el consumo total del circuito, se simula el circuito analógico obteniendo un consumo de 22.5 mA. Además del circuito analógico, el microcontrolador elegido y la pantalla LCD tienen un consumo aproximado de 40 mA.

La alimentación VEE consiste en una pila de 9 V y 692 mAh alcalina de dióxido de manganeso[14] de la empresa Duracell Industrial Operations (Connecticut, Estados Unidos), con la que alimentaremos el microcontrolador Arduino, que posteriormente nos permitirá obtener VDD con un valor de 5 V gracias a su pin de salida “5 V”.

No se busca una pila de gran capacidad, ya que el prototipo no estará en constante funcionamiento, y con las 17 horas aproximadamente que permite esta pila de uso bajo este consumo, será un sistema de alimentación idóneo.

7.2 Etapa de amplificación de transimpedancia.

Esta etapa, a partir de ahora denominada como etapa 1, es la conformada por la señal de corriente generada por el fotodiodo como señal de entrada y a su salida obtendremos la

señal amplificada 355.55 A/V, es decir, obtendremos como señal de salida un voltaje amplificado de la corriente de entrada.

Para la realización de la simulación no será posible utilizar el modelo BPW34 como generador de corriente, debido a limitaciones del software con el que se realiza la simulación. En lugar de dicho fotodiodo utilizaremos una fuente de corriente continua a la que se le darán los valores correspondientes a la iluminancia recibida del fotodiodo, y en luxes serán 25 klx a 75 klx, que en el fotodiodo se reflejará como una corriente entre 1.875 mA y 5.625 mA.

La simulación correspondiente para esta etapa consistirá en un barrido en corriente continua de todos los valores posibles para la I_1 de la Figura 11. Además, como escalón en la simulación se escogerá 75 nA, ya que es la cantidad de intensidad que aumenta el fotodiodo BPW34 por cada lux que incide sobre el mismo.

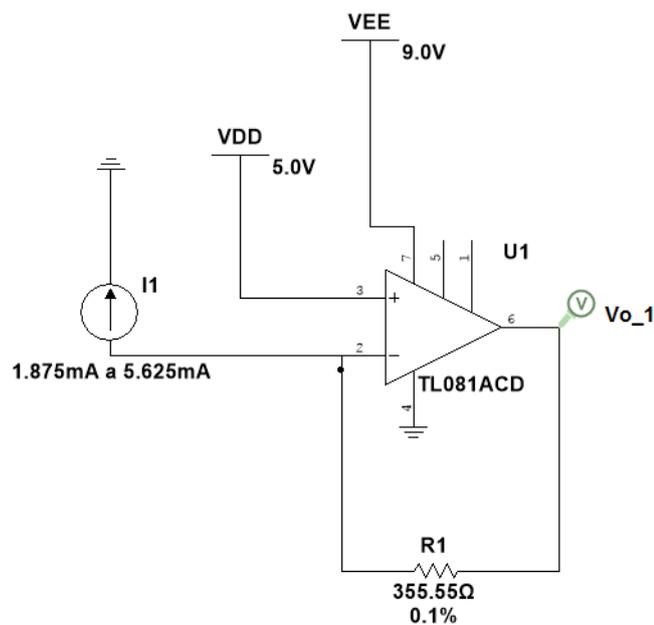


Figura 11. Etapa 1 (Figura 6) modificada para su simulación mediante software.

En la Figura 12 se observa que se cumple el rango esperado de salida y, por lo tanto, la relación entre voltaje e intensidad. Debido a la imposibilidad de representar una tabla con 50 000 valores, se realiza otra simulación con un aumento de 0.375 mA por secuencia para obtener distintos valores, incluyendo el inicial y el final de forma numérica.

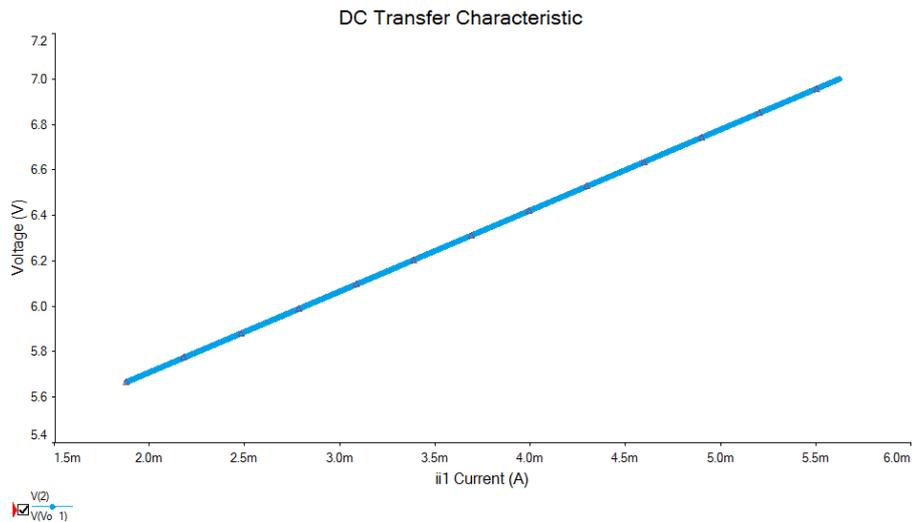


Figura 12. Gráfica DC Sweep Voltaje salida etapa 1 sobre Intensidad fotodiodo

Los valores se representan en la Tabla 3 y corresponde a lo ya calculado en el punto 6.4.1.

Tabla 3. Valores de la simulación DC Sweep de la etapa 1

Intensidad fotodiodo mA	Voltaje salida etapa 1 (V)
1.875	5.6666
2.250	5.8000
2.625	5.9333
3.000	6.0666
3.375	6.2000
3.750	6.3333
4.125	6.4666
4.500	6.6000
4.875	6.7333
5.250	6.8666
5.625	6.9999

7.3 Etapa restadora de offset y amplificación.

Para la siguiente verificación utilizaremos exactamente la misma disposición que en la Figura 7, salvo que la señal de entrada en Vpr3, que representaba la señal de salida de la

etapa 1, se representará como una señal senoidal que oscile entre 5.6666 V y 6.9999 V, lo que corresponde a Vo_1 en la Figura 13. Vo_1 abarca la señal que queremos digitalizar y su frecuencia tendrá el valor máximo calculado anteriormente, que corresponde a 1 Hz.

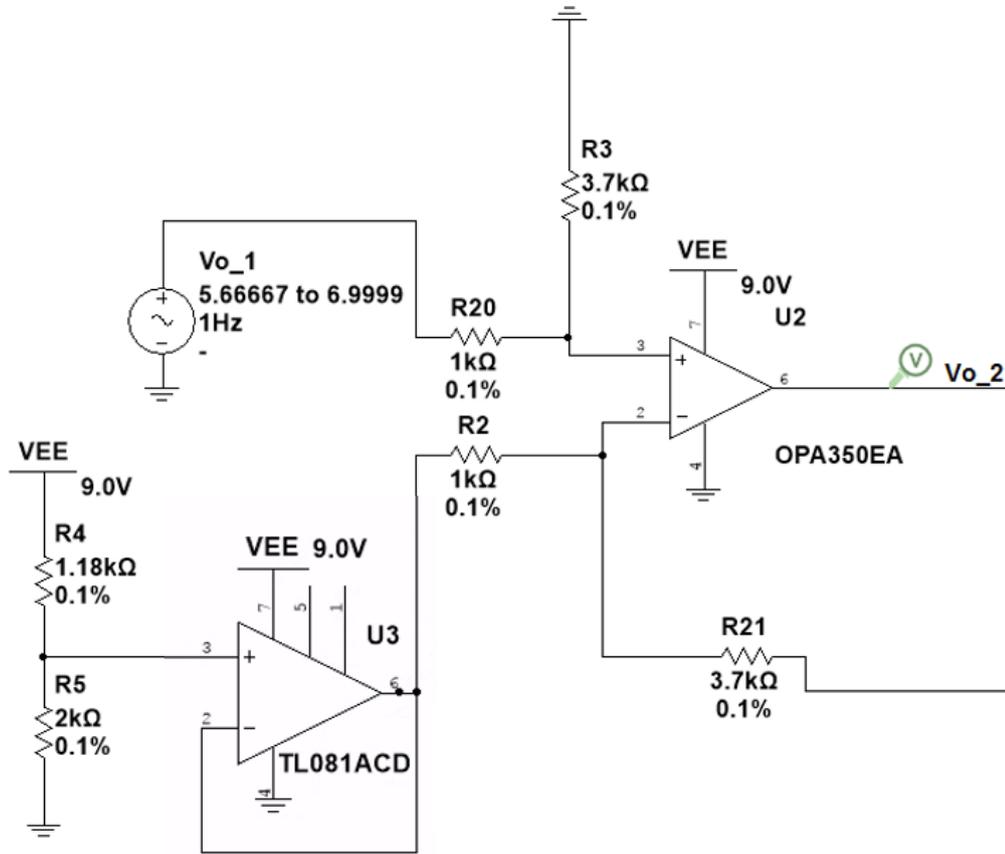


Figura 13. Etapa 2, figura 7 modificada para simulación.

Para analizar la etapa 2 se realizará un análisis transitorio con el objetivo de ver las variaciones simultáneamente de la señal de entrada y de salida de la etapa restadora de offset y amplificación.

En la Figura 14 se observa que el offset presente en la entrada de la etapa 2, no se mantiene a la salida de esta etapa, debido al circuito restador de la etapa y, además, se ve cómo ha obtenido una ganancia hasta situarse en el rango aproximado de 0 y 5 V.

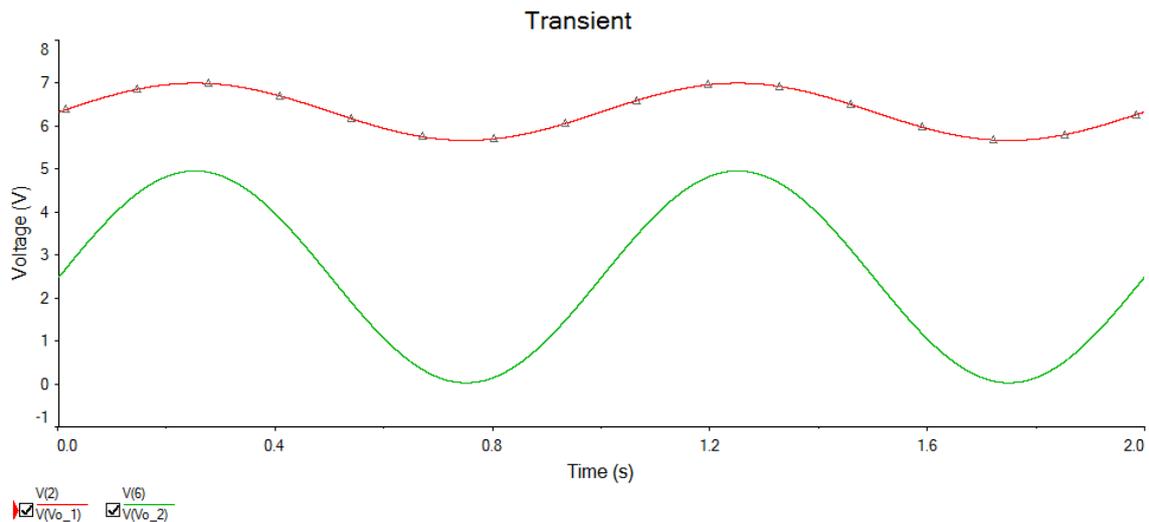


Figura 14. Gráfico del análisis transitorio de la etapa 2, se observa la entrada (V_{o_1}) en rojo y la salida (V_{o_2}) en verde.

Para obtener los datos en extremo de la salida, además de algunos datos intermedios orientativos de la relación por transformación, se extraen los datos de la simulación en una hoja de Excel para su interpretación y se representan en la Tabla 4..

Tabla 4. Valores del análisis transitorio de la etapa 2

Tiempo (s)	Voltaje salida etapa 1 (V)	Voltaje salida etapa 2 (V)
0	6.333	2.489
0.10	6.725	3.939
0.25	6.999	4.956
0.30	6.967	4.835
0.40	6.725	3.939
0.50	6.333	2.489
0.60	5.941	1.040
0.75	5.666	0.0244
0.80	5.699	0.143
0.90	5.941	1.039
1.00	6.333	2.489

Se observa en la Tabla 4 como los valores corresponden aproximadamente con lo esperado, según los cálculos del punto 6.4.2. Se ven ciertas disparidades en los valores

extremos del orden de 1 mV, debido a un pequeño error de aproximación del programa de simulación, así como a la imperfección del operacional al estar alimentado en negativo a 0 V, pues dificulta que se llegue a obtener voltajes tan bajos como los esperado a la salida.

7.4 Etapa filtro paso bajo

Para esta etapa final de filtrado o etapa 3, se realizará la verificación mediante un diagrama de bode de la señal a la entrada y a la salida, para comprobar realmente que la señal a frecuencias de 1 Hz o inferiores no se ve disminuida, pero si lo hace a frecuencias superiores, y con una disminución considerable para evitar problema de aliasing cuando se digitalice posteriormente la señal. La entrada a esta señal se simulará como una senoidal de 1 Hz y con un rango entre 0.0232 V y 4.956 V, representado en la Figura 15 como Vo_2.

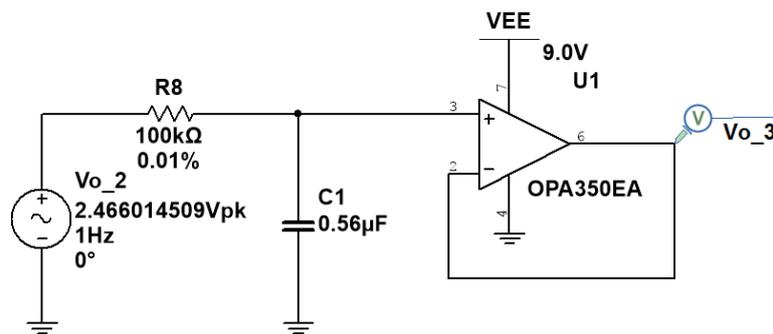


Figura 15. Etapa 3, figura 8 modificada para su simulación.

Se va a realizar un diagrama de Bode que lleva a cabo un barrido en frecuencia de la ganancia entre entrada y salida. Este diagrama se representa en la Figura 16

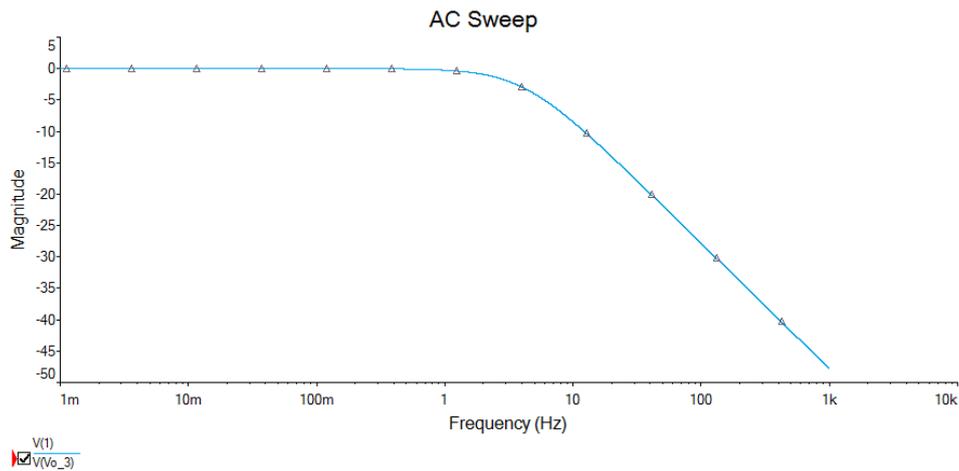


Figura 16 .Gráfica barrido AC de la señal de salida de la etapa 3.

Se observa en la Figura 16 que el valor máximo calculado de la señal, 1 Hz, tiene una ganancia muy próxima a los 0 dB. También se analiza que la reducción al rango de frecuencia al que trabajará el luxómetro no se ve afectado por el filtro paso bajo, por lo que se considera correcta la frecuencia de corte. La función principal del filtro es eliminar frecuencias superiores a la frecuencia máxima de la señal, debido a que pueden suponer fallos en el muestreo. La reducción a la frecuencia de muestreo es igual a 0.005 V/V, por tanto, confirmamos que el filtro paso bajo activo evitará problemas en el muestreo de la señal.

7.5 Etapa Digital

Para la etapa digital, etapa 4, se ha utilizado el software de simulación Proteus desarrollado por Labcenter Electronics Ltd (Grassington, Reino Unido). Se ha seleccionado este software a través de poli[LABS], ya que, dentro de los programas a disposición del alumnado, es el programa óptimo por la simulación del microcontrolador elegido y su representación en una pantalla LCD.

La etapa digital comienza a la entrada del convertidor analógico digital. Según el punto 6.4.4, se utilizaría el ADS1114, pero en el software de simulación no existe tal dispositivo, por tanto, se empleará el ADS1110 en la verificación de esta etapa. La única diferencia sustancial entre el uso del ADS1110 y el ADS1114 es el rango de valores a la entrada del ADC, ya que el rango de entrada del primero está comprendido entre 0 V y 2.048 V, y el del ADS1114 entre 0 V y 5 V, así, en la simulación el rango de entrada a la

etapa, comprendido entre 25 klx y 75 klx, se representará con una señal de tensión variable entre 0 V y 2.048 V, indicada en la Figura 17 como VIN+.

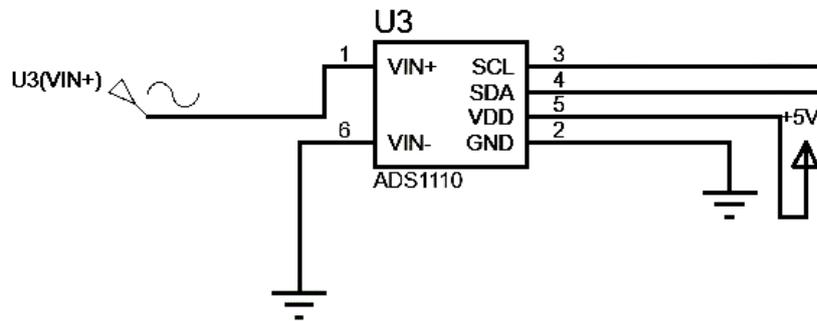


Figura 17. Convertidor Analógico-Digital ADS1110.

En la Figura 17 se observa el conexionado del convertidor analógico digital para la simulación de la etapa 4. En el terminal VIN+ tendremos la señal de salida de la etapa 3. El terminal VIN- y GND se conectan a masa. El terminal VDD se conectaría al terminal de tensión del microcontrolador Arduino Nano de +5V, sin embargo, esto no será posible debido a que la tarjeta simulada de Arduino carece de este terminal, por ello se colocarán fuentes de tensión externas para la simulación. El terminal SCL se conectará a la entrada analógica 5 del microcontrolador, mientras que el terminal SDA lo hará a la entrada analógica 4 del microcontrolador. La conexión con el microcontrolador será a través del protocolo I2c.

En la Figura 18 se observa el conexionado del microcontrolador con la pantalla LCD y los interruptores con los que el usuario interactuará.

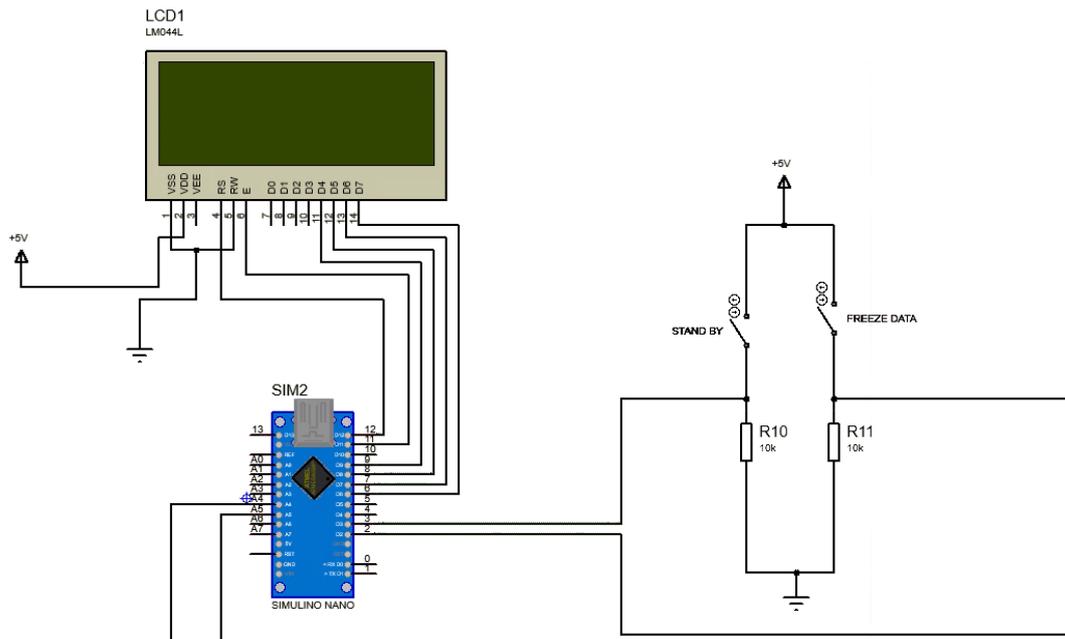


Figura 18. Esquema conexionado Arduino Nano con pantalla LCD 20x4 y 2 botones de interacción con el usuario.

Los pines de entrada/salida digital del microcontrolador y sus conexiones se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Conexionado entradas/salidas microcontrolador

Pin nº	Entrada/Salida	Descripción
2	Entrada	Botón “Freeze Data”
3	Entrada	Botón “Stand By”
6	Salida	LCD-D7
7	Salida	LCD-D6
8	Salida	LCD-D5
9	Salida	LCD-D4
11	Salida	LCD-E
12	Salida	LCD-R/W

Una vez completado el conexionado, tanto al ADC como a los dispositivos de interfaz con el usuario, se explica el funcionamiento del código cargado al microcontrolador.

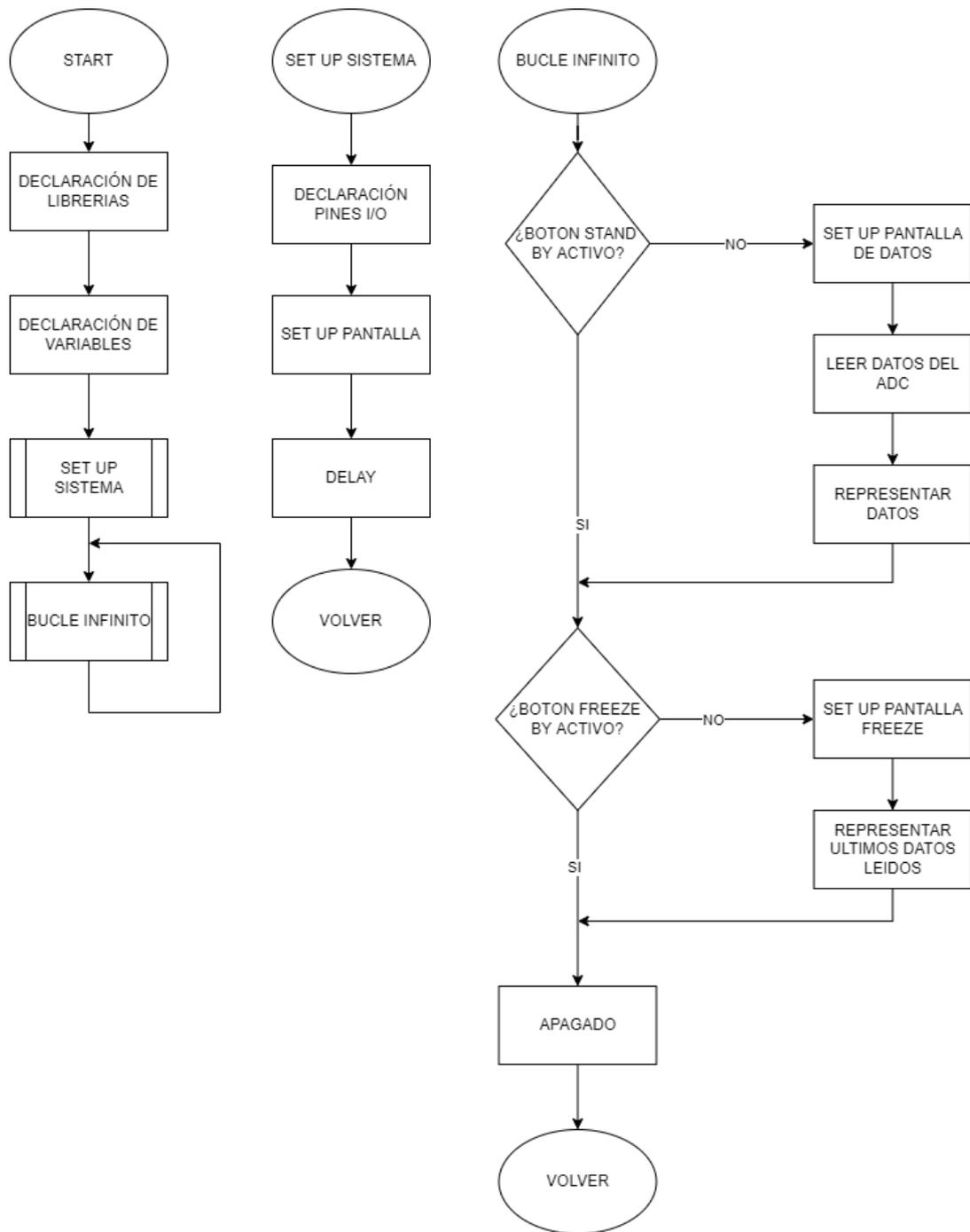


Figura 19. Diagrama de bloques del programa cargado al microcontrolador.

Se puede observar que hay tres flujogramas principales dentro del diagrama de bloques completo. En primer lugar, se realizará la declaración de librerías necesarias para la comunicación I2c con el ADS1110 y para la comunicación en paralelo con la pantalla LCD 20x4.

Posteriormente, se declararán todas las variables a utilizar a lo largo del programa con sus respectivos valores, según sean necesarios. Tras la declaración de las variables se

realizará la puesta a punto del sistema, el cual incluye la declaración de los pines de entrada y salida, la configuración de la pantalla LCD y una pantalla de carga (Figura 20) que dará paso al bucle infinito o principal, en el que transcurrirá todo el programa.



Figura 20. Pantalla de carga

El bucle principal consta de 4 estados:

-Funcionamiento normal (Figura 21): durante este estado se verá en la pantalla la medida actual, la media, la máxima y la mínima alcanzadas.

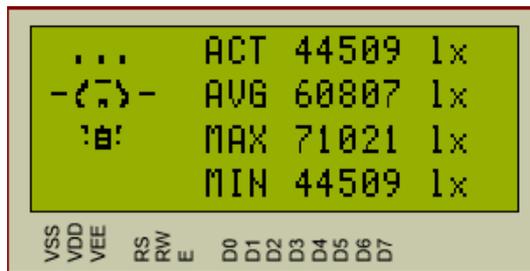


Figura 21. Pantalla LCD en funcionamiento normal.

-Pantalla congelada (Figura 22): durante este estado se verá en la pantalla la última medida, la media, la máxima y la mínima tomadas.

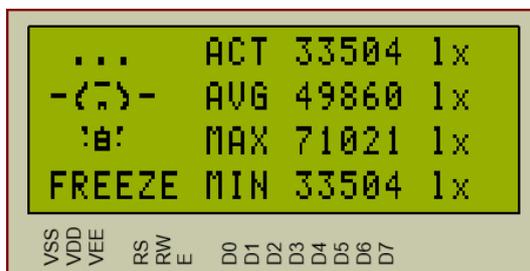


Figura 22. Pantalla LCD con la Pantalla Congelada.

-Stand By (Figura 23): durante este estado no se verán resultados, pero se mantendrán guardados en la memoria los resultados obtenidos antes de entrar a este estado.



Figura 23. Pantalla LCD en Stand By.

-Apagado: durante este estado la pantalla se mostrará sin caracteres y los datos obtenidos hasta el momento se eliminarán.

8. Conclusión

La realización de este proyecto ha permitido diseñar y validar mediante software un luxómetro digital, basado en fotodiodo, con un rango de medida específico para el proceso de validación de fuentes de luz utilizadas en procesos endoscópicos.

La elaboración de un prototipo físico es algo a valorar a corto plazo, así como la realización de una PCB específica para el diseño con el objetivo de compactar el prototipo y asemejarlo lo máximo posible a un producto terminado y a disposición en el mercado.

9. Referencias

[1] «Practicada la primera operación teleasistida con 5G», *www.nationalgeographic.com.es*, 28 de febrero de 2019. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/practicada-primer-operacion-teleasistida-5g_13948 (accedido 19 de julio de 2022).

[2] «Photodiode Sensor Physics». <https://www.newport.com/n/photodiode-physics> (accedido 26 de julio de 2022).

[3] «tema sensores OPTICOS escrito SeIV.pdf». Accedido: 16 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: https://poliformat.upv.es/access/content/group/GRA_12160_2021/Anexos/%C3%93pticos/tema%20sensores%20OPTICOS%20escrito%20SeIV.pdf

[4] «fotodiodos.pdf». Accedido: 20 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://silver.udg.edu/sip/ARXIUS/fotodiodos.pdf>

[5] «Iluminante estándar D65 | Glosario gráfico». http://www.glosariografico.com/iluminante_estandar_d65 (accedido 25 de agosto de 2022).

[6] «Anatomía y fisiología del estómago | Gastroenterología | AccessMedicina | McGraw Hill Medical». <https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1475§ionid=101521534> (accedido 16 de julio de 2022).

[7] «La calidad de la luz del LED (1ª parte)», *Interempresas*. [https://www.interempresas.net/Iluminacion/Articulos/225100-La-calidad-de-la-luz-del-LED-\(1-parte\).html](https://www.interempresas.net/Iluminacion/Articulos/225100-La-calidad-de-la-luz-del-LED-(1-parte).html) (accedido 26 de julio de 2022).

[8] Luis, «Fotodiodo: Definición, características y tipos», *Ingeniería Electrónica*, 17 de enero de 2017. <https://ingenieriaelectronica.org/fotodiodo-definicion-caracteristicas-y-tipos/> (accedido 19 de julio de 2022).

[9] «bpw34.pdf». Accedido: 25 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>

[10] «Universitat Politècnica de València - 2014 - Universitat Politècnica de València.pdf». Accedido: 25 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/159584/Alcal%C3%A1%20-%20Dise%C3%B1o%20y%20desarrollo%20de%20un%20prototipo%20de%20lux%C3%B3metro%20basado%20en%20fotodiodo..pdf?sequence=1>

[11] «ADS1114 data sheet, product information and support | TI.com».

https://www.ti.com/product/ADS1114?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=asc-dc-null-prodfolderdynamic-cpc-pf-google-ww&utm_content=prodfolddynamic&ds_k=DYNAMIC+SEARCH+ADS&DCM=yes&gclid=CjwKCAjwo_KXBhAaEiwA2RZ8hB8J-1QbIffrfq6OULo6e8-8do3UZvVVfClnXrxNLZUcuzRDe4bxmhoC7ygQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds (accedido 17 de agosto de 2022).

[12] «Adquirir una Señal Analógica: Ancho de Banda, Teorema de Muestreo de Nyquist y Aliasing». <https://www.ni.com/es-es/innovations/white-papers/06/acquiring-an-analog-signal--bandwidth--nyquist-sampling-theorem-.html> (accedido 27 de julio de 2022).

[13] «Arduino Nano», *Arduino Official Store*. <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano> (accedido 22 de agosto de 2022).

[14] «PC1604.pdf». Accedido: 2 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Duracell/PC1604.pdf>

Anexo 1: Código del microcontrolador

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include "Wire.h"
#define ads1110 0x48

LiquidCrystal lcd(12, 11, 9, 8, 7, 6);
const int rs=12, en=11, d4=9, d5=8, d6=7, d7=6;
float lux=0;
int data=0;
int aux=0;
float avg=0;
float avg_guardado;
float Vmax= 2.048;//máximo a la entrada ya que se utiliza para la simulación
el ads1110, en caso de poder utilizar el ADS1114 este valor sería 5V
float Max=0;
float Min=75000;
float voltage;

byte bombilla_1[8]={0x1, 0x3, 0x6, 0xC, 0x8, 0xC, 0x6, 0x0};
byte bombilla_2[8]={0x1F, 0x0, 0x0, 0x0, 0x0, 0xE, 0xA, 0x0};
byte bombilla_3[8]={0x10, 0x18, 0xC, 0x6, 0x2, 0x6, 0xC, 0x0};
byte bombilla_4[8]={0x3, 0x1, 0x0, 0x0, 0x1, 0x0, 0x0, 0x0};
byte bombilla_5[8]={0x4, 0x1F, 0x11, 0x1F, 0x11, 0x1F, 0x0, 0x0};
byte bombilla_6[8]={0x18, 0x10, 0x0, 0x0, 0x10, 0x0, 0x0, 0x0};

void setup(){
  pinMode(3, INPUT); // Boton Stand By
  pinMode(2, INPUT); // Boton Freezing

  Wire.begin();
```

```

Serial.begin(9600);

lcd.begin(20,4); //Inicialización de la pantalla LCD
inicio_pantalla();
delay(1500);
lcd.clear();
}

void loop()
{
  if(digitalRead(3)==LOW && digitalRead(2)==LOW)
  {
    pantalla_sin_datos();
    Readluxes();
    lcd.setCursor(11,0);
    lcd.print(lux,0);
    lcd.setCursor(11,1);
    lcd.print(avg,0);
    lcd.setCursor(11,2);
    lcd.print(Max,0);
    lcd.setCursor(11,3);
    lcd.print(Min,0);
  }
  if(digitalRead(3)==HIGH && digitalRead(2)==LOW)
  {
    pantalla_standBy();
  }
  if(digitalRead(3)==LOW && digitalRead(2)==HIGH)
  {
    pantalla_freeze();
  }
}

```

```

    lcd.setCursor(11,0);
    lcd.print(lux,0);
    lcd.setCursor(11,1);
    lcd.print(avg,0);
    lcd.setCursor(11,2);
    lcd.print(Max,0);
    lcd.setCursor(11,3);
    lcd.print(Min,0);
}
if(digitalRead(3)==HIGH && digitalRead(2)==HIGH)
{
    lcd.clear();
    lux=0;
    avg=0;
    Max=75000;
    Min=25000;
}
}

```

```

float lx_max_min(float lux)
{
    if (lux>Max){
        Max=lux;
    }
    else if (lux<Min) {
        Min=lux;
    }
    return Max, Min;
}

```

```

float vm_lux(float lux)
{
    aux++;
    avg_guardado=avg_guardado+lux;
    avg=avg_guardado/aux;
    return avg;
}

float Readluxes(){ //Lectura a través del protocolo I2C del ADC
    byte Hbyte;
    byte Lbyte;
    byte Positive_Negative;
    Wire.requestFrom(ads1110, 3);
    Hbyte=Wire.read();
    Lbyte=Wire.read();
    Positive_Negative=Wire.read();//No se usará, pero sirve para cortar la señal según nos la envía el ADS1110
    data = Hbyte * 256;
    data = data + Lbyte;
    voltage = (data * Vmax)/32768.0;
    lux = (voltage*(50001/Vmax))+25000; //Obtención del valor el lux en el rango 25 klx a 75 klx
    lx_max_min(lux);
    vm_lux(lux);
    return (int)lux;
}

void inicio_pantalla()
{
    lcd.clear();
    icono_Bombilla();
    lcd.setCursor(7,0);
}

```

```
    lcd.print("|LUX METER|");
    lcd.setCursor(11,1);
    lcd.print("BY");
    lcd.setCursor(6,2);
    lcd.print("JORGE PARRAGA");
    lcd.setCursor(9,3);
    lcd.print("2022 (C)");
}
```

```
void icono_Bombilla()
{
    lcd.createChar(0, bombilla_1);
    lcd.createChar(1, bombilla_2);
    lcd.createChar(2, bombilla_3);
    lcd.createChar(3, bombilla_4);
    lcd.createChar(4, bombilla_5);
    lcd.createChar(5, bombilla_6);
    lcd.setCursor(1,0);
    lcd.print(".");
    lcd.print(".");
    lcd.print(".");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("-");
    lcd.write(byte(0));
    lcd.write(byte(1));
    lcd.write(byte(2));
    lcd.print("-");
    lcd.setCursor(1,2);
    lcd.write(byte(3));
    lcd.write(byte(4));
```

```
    lcd.write(byte(5));  
}
```

```
void pantalla_standBy()
```

```
{  
  lcd.createChar(0, bombilla_1);  
  lcd.createChar(1, bombilla_2);  
  lcd.createChar(2, bombilla_3);  
  lcd.createChar(3, bombilla_4);  
  lcd.createChar(4, bombilla_5);  
  lcd.createChar(5, bombilla_6);  
  lcd.setCursor(0,0);  
  lcd.print("          ");  
  lcd.setCursor(0,1);  
  lcd.print(" ");  
  lcd.setCursor(4,1);  
  lcd.print("          ");  
  lcd.setCursor(4,2);  
  lcd.print("          ");  
  lcd.setCursor(0,3);  
  lcd.print("          ");  
  lcd.setCursor(1,1);  
  lcd.write(byte(0));  
  lcd.write(byte(1));  
  lcd.write(byte(2));  
  lcd.setCursor(1,2);  
  lcd.write(byte(3));  
  lcd.write(byte(4));  
  lcd.write(byte(5));  
  lcd.setCursor(8,1);
```

```

    lcd.print("STAND BY");
delay(500);
lcd.setCursor(4,1);
    lcd.print("      ");
delay(500);

}

void pantalla_sin_datos()
{
    icono_Bombilla();
    lcd.setCursor(7,0);
    lcd.print("ACT");
    lcd.setCursor(17,0);
    lcd.print("lx");
    lcd.setCursor(7,1);
    lcd.print("AVG");
    lcd.setCursor(17,1);
    lcd.print("lx");
    lcd.setCursor(7,2);
    lcd.print("MAX");
    lcd.setCursor(17,2);
    lcd.print("lx");
    lcd.setCursor(7,3);
    lcd.print("MIN");
    lcd.setCursor(17,3);
    lcd.print("lx");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("  ");
}

```

```
void pantalla_freeze()
{
    icono_Bombilla();
    lcd.setCursor(7,0);
    lcd.print("ACT");
    lcd.setCursor(17,0);
    lcd.print("lx");
    lcd.setCursor(7,1);
    lcd.print("AVG");
    lcd.setCursor(17,1);
    lcd.print("lx");
    lcd.setCursor(7,2);
    lcd.print("MAX");
    lcd.setCursor(17,2);
    lcd.print("lx");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("FREEZE");
    lcd.setCursor(7,3);
    lcd.print("MIN");
    lcd.setCursor(17,3);
    lcd.print("lx");
}
```



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de
Ingeniería del Diseño

Trabajo Final de Grado en Ingeniería Electrónica
Industrial y Automática

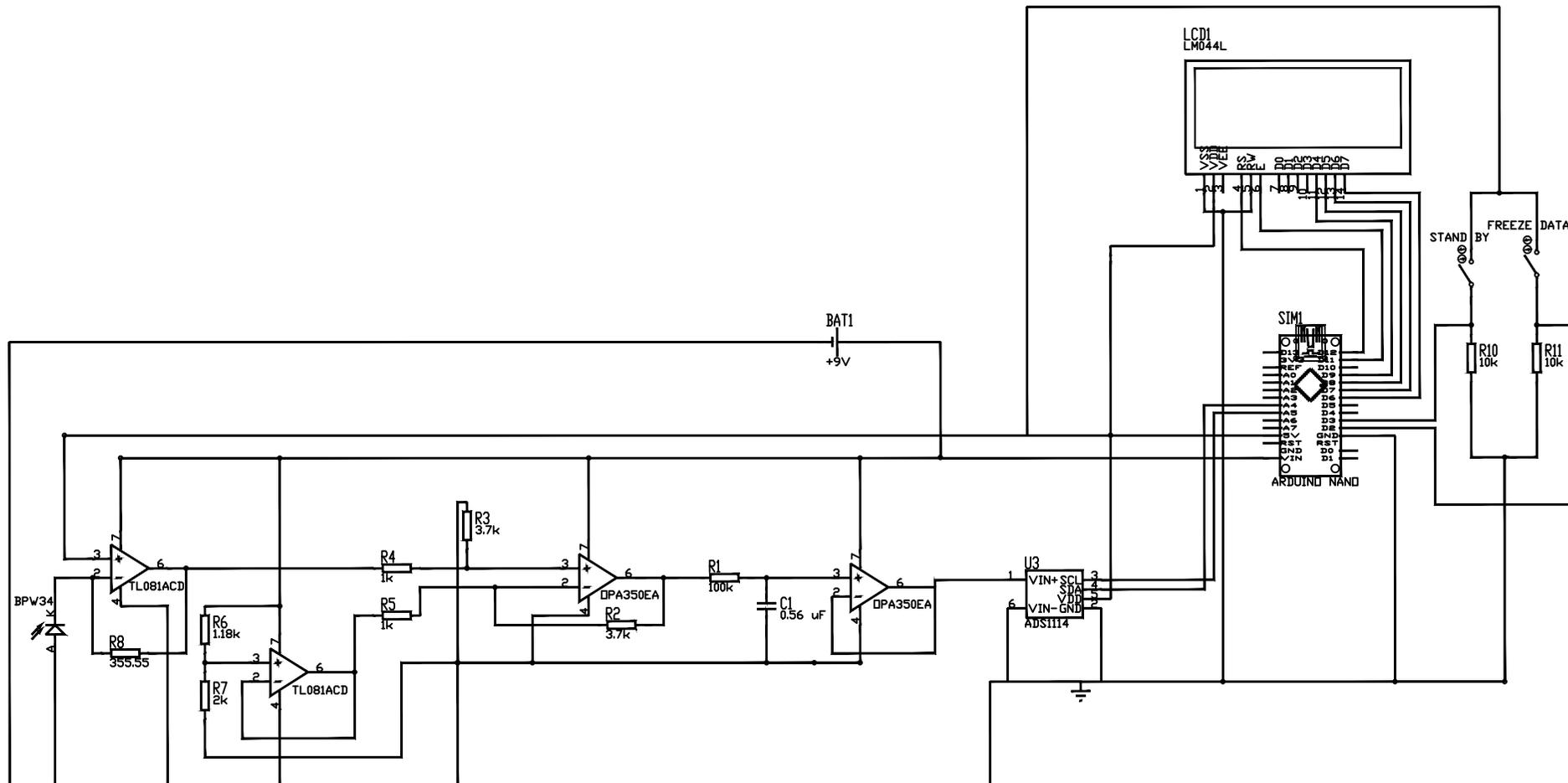
Diseño de un luxómetro para la medida de fuentes de luz para endoscopia

DOCUMENTO 2. PLANOS

ALUMNO: Jorge Párraga Ortega

TUTOR: Dr. Enrique Berjano Zanón

CURSO: 2021-2022



TÍTULO PROYECTO:
 Diseño de un luxómetro para la medida
 fuentes de luz para endoscopia.

Nº PLANO:
 1

NOMBRE AUTOR:
 JORGE PÁRRAGA ORTEGA

TÍTULO PLANO:
 Esquema electrónico acondicionamiento
 señal analógica, digitalización y
 representación de resultados



UPV-ETSID
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
 DE INGENIERÍA DEL DISEÑO



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de
Ingeniería del Diseño

Trabajo Final de Grado en Ingeniería Electrónica
Industrial y Automática

Diseño de un luxómetro para la medida de fuentes de luz para endoscopia

DOCUMENTO 3. PLIEGO DE CONDICIONES

ALUMNO: Jorge Párraga Ortega

TUTOR: Dr. Enrique Berjano Zanón

CURSO: 2021-2022

DOCUMENTO 3. Pliego de condiciones

1.	Objeto	52
2.	Condiciones y normas de carácter general	52
3.1	Condiciones técnicas de los materiales	52
3.2	Condiciones técnicas de ejecución	54
3.3	Condiciones Facultativas	54

1. Objeto

La presente especificación técnica se refiere a la producción de un luxómetro digital basado en fotodiodo, fijando las mínimas condiciones que ha de cumplir para su correcto funcionamiento. Este documento aplica a la totalidad de sistemas electrónicos y eléctricos que conforman el producto final. Se podrán adoptar diferentes soluciones justificando previamente su necesidad de cambio y bajo ningún concepto disminuyendo las especificaciones del producto.

2. Condiciones y normas de carácter general

Durante la ejecución del proyecto se deberá observar la siguiente normativa:

- UNE 21302-300:2004 Vocabulario electrotécnico. Medidas e instrumentos de medida eléctricos y electrónicos.
- UNE-EN IEC 62368-1:2020 Equipos de audio y vídeo, de tecnología de la información y la comunicación. Parte1: Requisitos de seguridad.
- UNE-EN 61439-1:2012. Conjuntos de aparamenta de baja tensión.
- Real Decreto 187/2016, de 6 de mayo, por el que se regulan las exigencias de seguridad del material eléctrico destinado a ser utilizado en determinados límites de tensión.
- Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, Reglamento electrotécnico para baja tensión.

3. Condiciones Particulares

3.1 Condiciones técnicas de los materiales

- Fotodiodo:
El fotodiodo utilizado como sensor del prototipo viene especificado en el documento 1 “Memoria”, siendo este el BPW34 del fabricante VISHAY. Para comprobar su correcto funcionamiento se ha de realizar una comprobación mediante aparatos correctamente calibrados de su salida a diferentes entradas.

- Resistencias:
Los valores de las resistencias han sido determinados a lo largo del documento 1 “Memoria”. En esta se ha especificado tanto el valor nominal como la tolerancia, que bajo ningún concepto deberá superar el 0.1%. Antes de la instalación de estas, se deberá comprobar sus valores a través de un multímetro o aparato similar.

- Condensador:
El valor nominal del condensador viene determinado en el documento 1 “Memoria”. Este condensador ha de ser de cerámica multicapa y con una tolerancia máxima del 5%. Se recomienda el uso del condensador KEMET con referencia C0805C564J5RACTU o similar. Antes de la instalación, se deberá comprobar sus valores a través de un multímetro o aparato similar.

- Amplificadores operacionales:
El modelo del amplificador según su etapa viene detallado en el documento 1 “Memoria”. Comprobar que la salida de los amplificadores operacionales con los extremos de las entradas es equivalente a la verificación por simulación del documento 1.

- Convertidor Analógico digital
Se utilizará el ADS1114 del fabricante TEXAS INSTRUMENTS o similar para el montaje. Para la comprobación del correcto funcionamiento, se deberá alimentar a 5 V y comprobar la salida es igual a 32768 ante una entrada de 5 V.

- Microcontrolador:
Se empleará el microcontrolador ARDUINO NANO para el montaje del prototipo, se podrá variar entre distintos modelos de la marca ARDUINO ya que el programa está realizado con compatibilidad a los modelos de dicha marca. Para la comprobación del correcto funcionamiento se probará el programa “Blink” que proporciona IDE ARDUINO analizando los resultados.

- **Pantalla LCD:**
La pantalla LCD a utilizar será la pantalla LM044L o cualquiera cuyo tamaño de representación sea de 20x4 caracteres. Para la comprobación de su correcto funcionamiento se realizará el montaje del prototipo y se comprobará que en la pantalla se muestran los mismos resultados que en la simulación.
- **Botones:**
Como se puede ver en el documento 1 “Memoria” se utilizarán botones del tipo SPST, sin importar marca y modelo, teniendo siempre en cuenta el valor de corriente y tensión a soportar, 5 V en interruptor abierto y 0.5 mA en interruptor cerrado.
- **Pila:**
Como se describe en el documento 1 “Memoria”, se utilizará una Pila de 9 V y 692 mAh alcalina de dióxido de manganeso.

3.2 Condiciones técnicas de ejecución

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de los componentes del prototipo se procederá al montaje de este en una placa de pruebas. Ya comprobado que los resultados obtenidos son similares a los resultados de la verificación por simulación del documento 1 “Memoria”, se procederá a la elaboración de una PCB para el prototipo y a su instalación en la misma. Una vez instalada se comprobará el funcionamiento del prototipo.

3.3 Condiciones Facultativas

Las condiciones facultativas descritas a continuación están dirigidas a la parte contratista y a la dirección facultativa.

Condiciones a la parte de la dirección facultativa:

- Supervisión de los aspectos del proyecto que puedan afectar a la fiabilidad y seguridad durante la ejecución.

- Asunción de ser la máxima autoridad técnica en materia de interpretación de las indicaciones del proyecto.
- Cumplimentación de los certificados de dirección exigidos por la normativa vigente o por el pliego de condiciones técnicas.

Condiciones a la parte contratista:

- Conocimiento de la normativa aplicable.
- Obligación de un documento donde se reflejen las modificaciones del proyecto.
- Obligación del seguimiento completo de las indicaciones del proyecto.
- Obligación de utilización los materiales descritos en las condiciones técnicas de materiales.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de
Ingeniería del Diseño

Trabajo Final de Grado en Ingeniería Electrónica
Industrial y Automática

Diseño de un luxómetro para la medida de fuentes de luz para endoscopia

DOCUMENTO 4. PRESUPUESTO

ALUMNO: Jorge Párraga Ortega

TUTOR: Dr. Enrique Berjano Zanón

CURSO: 2021-2022

DOCUMENTO 4. Presupuesto

Lista de Tablas.....	57
1. Introducción.....	58
2. Coste del personal	58
3. Coste de los componentes	58
4. Coste amortizado del hardware	59
5. Coste amortizado del software utilizado	60
6. Presupuesto total	60

Lista de Tablas

Tabla 1 Coste del personal asociado al TFG	58
Tabla 2 Coste de los componentes para el prototipo.....	59
Tabla 3 Coste amortizado del hardware	60
Tabla 4 Coste amortizado del software utilizado	60
Tabla 5 Presupuesto total de ejecución material.	61
Tabla 6 Presupuesto total del proyecto.....	61

1. Introducción

En el presente presupuesto se indican los costes derivados del análisis y diseño de un luxómetro para la validación de fuentes de luz para la endoscopia. Los costes se encuentran divididos en cinco apartados: coste de la mano de obra, coste de los materiales del prototipo, coste del hardware, coste del software amortizado y coste de los gastos generales.

Al precio final se añade un 6 % de beneficio industrial y, por último, los impuestos correspondientes al IVA, el 21%.

2. Coste del personal

En este punto se desglosan los costes derivados de la actividad profesional del personal implicado en el proyecto, como se observa en la Tabla 1:

- Ingeniero técnico: Encargado del estudio y desarrollo del prototipo.

Tabla 1 Coste del personal asociado al TFG

Concepto	Cantidad (h)	Coste unitario (€/h)	Coste total (€)
Ingeniero técnico	300	25.00	7500.00
SUBTOTAL			7500.00

3. Coste de los componentes

En esta sección se desglosan los costes relacionados a los componentes ha utilizar para realizar un prototipo del diseño final propuesto como se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2 Coste de los componentes para el prototipo

Concepto	Coste unitario (€/ud)	Cantidad (ud)	Coste total (€)
Fotodiodo de silicio Vishay BPW34	0.64	1.00	0.64
Amplificador operacional TL081ACD	0.73	1.00	0.73
Amplificador operacional OPA350EA	3.86	3.00	11.58
Convertidor analógico-digital ADS1114	4.98	1.00	4.98
Microcontrolador Arduino Nano	8.00	1.00	8.00
Pantalla LCD LM044L	13.00	1.00	13.00
Interruptor pulsador	0.57	2.00	1.14
Batería 9 V 692 mAh	4.45	1.00	4.45
Resistencia 355.55 Ω 0.1 %	0.30	1.00	0.30
Resistencia 1.18 kΩ 0.1 %	0.72	1.00	0.72
Resistencia 2 kΩ 0.1 %	0.45	1.00	0.45
Resistencia 1 kΩ 0.1 %	0.47	2.00	0.94
Resistencia 3.7 kΩ 0.1 %	0.87	2.00	1.74
Resistencia 10 kΩ 0.1 %	0.88	2.00	1.76
Resistencia 100 kΩ 0.1 %	0.47	1.00	0.47
Condensador 0.56 μF 5 %	0.88	1.00	0.88
SUBTOTAL			51.78

4. Coste amortizado del hardware

En esta sección se desglosan los costes derivados del alquiler de equipo del laboratorio para hacer las pruebas pertinentes para el prototipo, así como el hardware utilizado para la realización del estudio y simulaciones en el proyecto, podemos ver desglosado dichos costes en la tabla 3.

Para calcular el tiempo de amortización empleado en el proyecto se seguirá la ecuación 1.

$$n^{\circ} \text{ meses} = \frac{300 (h)}{6 \left(\frac{h}{\text{día}}\right) \cdot 22 \left(\frac{\text{día}}{\text{mes}}\right)} = 2.28 \text{ meses} \quad (1)$$

Tabla 3 Coste amortizado del hardware

Concepto	Coste total (€)	Periodo de amortización (meses)	Periodo de uso (meses)	Coste Imputable (€)
Ordenador portatil	1249.99	48.00	2.28	59.37
Monitor de ordenador	129.99	48.00	2.28	6.17
Osciloscopio Digital Hanmatek DOS1102	249.99	12.00	2.28	47.50
Fuente de alimentación de banco RS PRO	169.07	12.00	2.28	32.12
Generador de Señal, JDS6600	181.00	12.00	2.28	34.39
SUBTOTAL				179.56

5. Coste amortizado del software utilizado

Durante el proyecto se utilizaron diversos softwares de pago, se desglosa el precio imputable de los mismos en la tabla 4.

Para calcular el tiempo de amortización empleado en el proyecto se seguirá la ecuación 1.

Tabla 4 Coste amortizado del software utilizado

Concepto	Coste de licencia (€)	Duración de licencia (meses)	Periodo de uso (meses)	Coste imputable (€)
Windows 10 pro	214.05	indefinida (48 de uso)	2.28	10.17
Microsoft Office 365	123.14	indefinida (48 de uso)	2.28	5.85
NI Multisim 14.1	1025.00	12.00	2.28	38.95
Proteus Enterprise	5620.00	12.00	2.28	1067.80
AutoCAD LT	533.00	12.00	2.28	101.27
SUBTOTAL				1122.77

6. Presupuesto total

A continuación, se presenta el resumen del presupuesto de ejecución material, en el que se incluye el coste del personal, de los componentes, del coste del hardware y del coste del software, como vemos reflejado en la tabla 5.

Tabla 5 Presupuesto total de ejecución material.

Concepto	Coste total sin IVA (€)	Porcentaje del coste
Subtotal Personal	7500.00	84.71%
Subtotal Componentes	51.78	0.58%
Subtotal Hardware	179.56	2.03%
Subtotal Software	1122.77	12.68%
TOTAL	8854.11	100%

El coste total del presupuesto de ejecución material asciende a **ocho mil ochocientos cincuenta y cuatro euros con once céntimos (8854.11 €)**.

El presupuesto de ejecución por contrata añade los conceptos de gastos generales y beneficio industrial. equivalen a un 14 % y un 6 % respectivamente. En la tabla 6 vemos representada la suma de estos valores y de los impuestos correspondiente hasta alcanzar el presupuesto total.

Tabla 6 Presupuesto total del proyecto

Concepto	Coste total (€)
Presupuesto de ejecución material	8854.11
14% Gastos generales	1239.57
6% Beneficio industrial	531.25
Suma antes del IVA	10624.93
IVA	2231.23
PRESUPUESTO TOTAL	12856.16

El total del presupuesto del proyecto asciende a **DOCE MIL OCHOCIENTOS CINCUENTA Y SEIS EUROS CON DIECISÉIS CÉNTIMOS (12856.16 €)**.