



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE LUXÓMETRO BASADO EN FOTODIODO

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

REALIZADO POR

ÁLVARO ALCALÁ GASTALDO

TUTORIZADO POR

ENRIQUE BERJANO ZANÓN

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

Documento 1: Memoria

1. Objetivo.....	5
2. Antecedentes	5
2.1 Funcionamiento de un fotodiodo.....	5
2.2 Modos de funcionamiento del fotodiodo.....	6
2.3 Estado del arte	7
3. Diseño del prototipo	9
3.1 Análisis de la señal	9
3.2. Diagrama de bloques.....	10
3.3. Diseño detallado de cada etapa.....	11
3.3.1 Amplificador de Transimpedancia	11
3.3.2 Filtro Activo Paso Bajo	13
3.3.3 Microcontrolador.....	15
3.3.4 Convertidor Analógico Digital.....	16
3.3.5 Interfaz con el usuario	17
4. Estimación teórica del offset.....	18
5. Verificación mediante simulación.....	22
5.1. Alimentación	23
5.2. Etapa de acondicionamiento de la señal.....	23
5.3. Etapa digital	26
5.4 Interfaz de la pantalla	31
6. Conclusiones.....	33
Referencias.....	33

Documento 2: Planos

Documento 3: Pliego de condiciones

1. Definición y alcance del pliego.....	38
2. Condiciones y normas de carácter general	38
3. Condiciones particulares	38
3.1. Especificaciones técnicas	38
3.1.1. Condiciones de los materiales	38
3.1.2. Condiciones de ejecución.....	40
3.2. Condiciones facultativas	40

Documento 4: Presupuesto

Anexo I: Código del Microcontrolador



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE LUXÓMETRO
BASADO EN FOTODIODO**

DOCUMENTO 1. MEMORIA

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

REALIZADO POR

ÁLVARO ALCALÁ GASTALDO

TUTORIZADO POR

ENRIQUE BERJANO ZANÓN

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

Documento 1: Memoria

1. Objetivo.....	5
2. Antecedentes	5
2.1 Funcionamiento de un fotodiodo.....	5
2.2 Modos de funcionamiento del fotodiodo.....	6
2.3 Estado del arte	7
3. Diseño del prototipo	9
3.1 Análisis de la señal	9
3.2. Diagrama de bloques	10
3.3 Diseño detallado de cada etapa	11
3.3.1 Amplificador de Transimpedancia	11
3.3.2 Filtro Activo Paso Bajo	13
3.3.3 Microcontrolador.....	15
3.3.4 Convertidor Analógico Digital.....	16
3.3.5 Interfaz con el usuario	17
4. Estimación teórica del offset	18
5. Verificación mediante simulación.....	22
5.1. Alimentación	23
5.2. Etapa de acondicionamiento de la señal.....	23
5.3. Etapa digital	26
5.4 Interfaz de la pantalla	31
6. Conclusiones	33
Referencias	33

Resumen

Se pretende diseñar un prototipo de luxómetro electrónico basado en un fotodiodo. Para ello se hará un estudio de los fotodiodos que existen actualmente en el mercado. Se estudiará el principio de funcionamiento de los distintos tipos de fotodiodos, así como sus características principales y se analizará el espectro de luxómetros de mano que ofertan los principales fabricantes para determinar rangos de medida, fuentes de alimentación, funciones adicionales, etc. A partir de ahí se procederá con el diseño de los circuitos electrónicos internos del luxómetro: amplificador de transimpedancia, filtro paso bajo, convertidor analógico digital, microcontrolador e interfaz con el usuario. El diseño será verificado por simulación y debido a la situación actual causada por el COVID-19, el montaje de del prototipo se ha pospuesto para futuros proyectos.

1. Objetivo

El objetivo del proyecto es diseñar un luxómetro electrónico de mano de precisión y económico. Para ello se ha de simplificar tanto su diseño como sus funcionalidades, incluyendo únicamente lo necesario para realizar las medidas sin comprometer o dificultar la interacción con el instrumento por parte del usuario.

2. Antecedentes

El luxómetro es el instrumento mediante el cual se mide la iluminancia de un espacio o foco y requiere de un sensor óptico (fotodetector) para convertir la luz en una señal eléctrica y así poder medir la intensidad de esta. Existen distintos tipos de fotodetectores en el mercado como el fototransistor o el LDR, pero el que utilizan los luxómetros es el fotodiodo debido a su linealidad y su bajo tiempo de respuesta.

2.1 Funcionamiento de un fotodiodo

El fotodiodo es un tipo de diodo que genera una corriente inversa cuando un haz de luz con suficiente energía incide sobre él. La corriente eléctrica generada aumenta cuando la cantidad de luz que lo incide es más intensa.

Mientras que el fotodiodo es sensible a magnitudes radiométricas, el luxómetro devuelve magnitudes fotométricas. Las magnitudes radiométricas son objetivas mientras que las fotométricas son subjetivas puesto que están pensadas desde el punto de vista del ojo humano.

El fotodiodo capta la irradiación que es una magnitud radiométrica, es decir, la cantidad de flujo radiante por unidad superficial (W/m^2), siendo el flujo radiante la energía por segundo, medida en vatios (W). Por el contrario, el lumen o *lm* es una magnitud fotométrica. Es la unidad del Sistema Internacional de Medidas para medir el flujo luminoso, una medida de la potencia luminosa emitida por una fuente de luz.

Para poder relacionar las magnitudes radiométricas con las fotométricas se ha de tener en cuenta la longitud de onda de la luz que recibe el fotodiodo. De este modo se relaciona la iluminancia o *lx* que se define como la cantidad de luz por unidad superficial (lm/m^2), con la irradiación o cantidad de flujo por unidad superficial (W/m^2).

La relación entre la iluminancia y la irradiación es conocida como el factor de visibilidad (*K_m*). Esta constante establece la cantidad de lúmenes que contiene cada vatio de energía lumínica. El máximo valor de lúmenes que puede contener un vatio se obtiene cuando la longitud de onda de la luz que emite un foco coincide con la longitud de onda que excita al ojo humano con mayor facilidad, que es la de 555 nm, que corresponde al color verde. A medida que nos alejamos de este valor, ya sea por encima o por debajo, la cantidad de lúmenes por vatio disminuye.

La respuesta relativa $V(\lambda)$ es un factor numérico que se asigna a cada longitud de onda y que sirve para calcular el número de lúmenes que hay en un vatio de una longitud de onda determinada.

Otro aspecto importante del funcionamiento de los fotodiodos es la longitud de onda de corte, es decir, el rango en el cual el fotodiodo es capaz de detectar variaciones de luz. En los fotodiodos basados en silicio, la longitud de onda de corte inferior está en torno a los 320 nm, mientras que,

en los fotodiodos basados en silicio, pero mejorados para captar luz UV, la longitud de onda de corte inferior es de 190 nm. El ojo humano, por ejemplo, solo es sensible a un rango de longitudes de onda denominado “Luz visible” que está comprendido entre 400 y 700 nm.

Los fotodiodos no son tan sensibles como los fototransistores, sin embargo, su linealidad y su tiempo de respuesta rápido los hace idóneos para aplicaciones como medidores de luz. En la Figura 1 se puede observar la curva característica de los fotodiodos, donde su zona más lineal se encuentra en el tercer cuadrante, por lo que, cuando se trabaja con un fotodiodo, interesa trabajar con polarización inversa o sin polarización. Estas dos configuraciones se conocen como fotoconductiva y fotovoltaica.

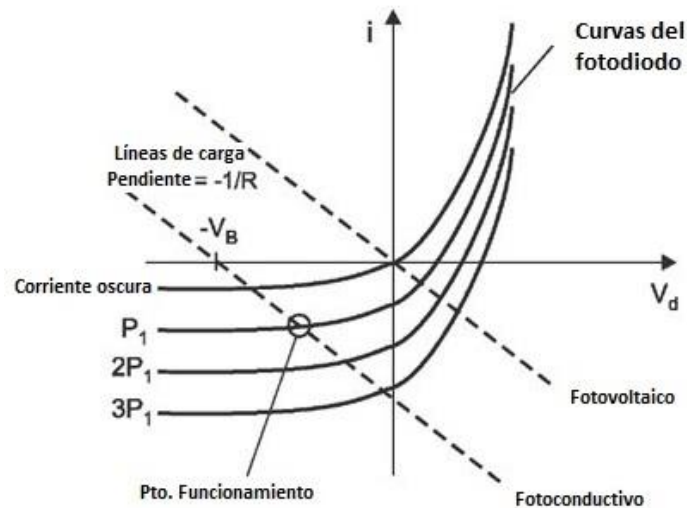


Figura 1: La corriente inversa que atraviesa el fotodiodo varía linealmente con la iluminancia cuando se está por encima de la región de corriente oscura.

2.2 Modos de funcionamiento del fotodiodo

El fotodiodo se puede implementar de dos maneras. Si se polariza inversamente tendrá una respuesta más rápida y un rendimiento mejor. Si no se polariza reduciremos considerablemente el ruido Shot al igual que la corriente de oscuridad y será más preciso.

Puesto que el objetivo es diseñar un luxómetro, es decir, un instrumento de medida, el fotodiodo no se va a polarizar, pues la precisión es más importante que la velocidad de respuesta. Aun así, se intentará evitar que el dispositivo tenga una respuesta lenta dentro de lo posible.

La mayoría de los fotodiodos vienen equipados con un lente que concentra la cantidad de luz que lo incide, de manera que la reacción a la luz sea más evidente.

Los fotodiodos están compuestos de distintos materiales. En la tabla 1 se pueden observar los más comunes:

Tabla 1: Comparación de los principales materiales de los fotodiodos. Cada material tiene sus ventajas y desventajas.

MATERIAL	RANGO LONGITUD DE ONDA	CARACTERÍSTICAS
Silicio (Si)	400-1000 nm	Corriente oscura baja, respuesta rápida.
Germanio (Ge)	900-1600 nm	Corriente oscura alta, respuesta lenta.
Indio:Galio:Arsenio:Fósforo (InGaAsP)	1000-1350 nm	Corriente oscura baja, respuesta rápida, caro.

2.3 Estado del arte





Los luxómetros comerciales disponibles ofrecen rangos muy variados como, por ejemplo, entre 0 y 20000 lx, que es el que ofrece el 941 Light Meter de FLUKE (Everett, Washington, USA). También hay rangos mayores como el ofrecido por el FT3424 de HIOKI (Ueda, Nagano, Japón), entre 0 y 200000 lx.

Por otro lado, con la aparición de los Smartphone se ha abierto un abanico de posibilidades en cuanto a la medida de magnitudes físicas. Las nuevas generaciones incorporan una gran variedad de sensores, como aceleración y sonido.

Uno de los sensores que prácticamente todos los Smartphone del mercado incorporan es el sensor de luminosidad. Normalmente se utilizan para mejorar la experiencia del usuario, regulando el brillo de la pantalla en función de la luminosidad del ambiente. Gracias a que estos dispositivos incorporan estos sensores, existen aplicaciones móviles que permiten medir los niveles de luminosidad del ambiente, actuando como si de un luxómetro portátil se tratase. Lo cierto es que, actualmente los luxómetros comerciales son más precisos. El rango de medida de estas aplicaciones está vinculado al rango de medida del sensor que incorpora el dispositivo. Se pueden encontrar aplicaciones que aseguran un rango de medida de 1 a 30000 lx, por ejemplo, la aplicación “Lux Meter” desarrollada por KHTSXR (Corea del Sur), aunque el rango donde las mediciones son precisas es bastante más pequeño (de 1 a 4.000 lx).

En el contexto de este TFG se han estudiado las características de los luxómetros de los principales fabricantes. La información se ha recopilado en la Tabla 2.

Tabla 2: Ejemplos comerciales de luxómetros de mano de los principales fabricantes y algunas de sus especificaciones más destacables.

EQUIPO	ESPECIFICACIONES	IMAGEN
FT3424 HIOKI (Ueda, Nagano, Japón)	<ul style="list-style-type: none"> ·Tipo de sensor: Fotodiodo de silicio ·Rango de medida: [0 – 200.000] lx ·Especificaciones de output: <ul style="list-style-type: none"> -Salida: D/A Output -Nivel de output: 2 V/rango fondo escala 	
HI97500 HANNA (Woonsocket, Rhode Island, EE.UU.)	<ul style="list-style-type: none"> ·Rango: [0.001 – 1.999] - [0.001 – 19.99] - [0.1 – 199.9] klx ·Resolución: [0.001] - [0.01] - [0.1] klx ·Precisión: ± 6% de la lectura, ± 2 dígitos ·Fuente de alimentación: x1 pila alcalina de 9 V ·Dimensiones: 164 x 76 x 45 mm 	
LM-100 AMPROBE (Everett, Washington, EE.UU.)	<ul style="list-style-type: none"> · Tipo de sensor: Fotodiodo de silicio y filtro · Rango [0 – 20] [0 - 200] [0 - 2000] [0 - 20000] [0 - 200000] lx · Precisión: ± 3% · Ángulo de desviación del coseno: <ul style="list-style-type: none"> - 30°: ±2%, 60°: ±6%, 80°: ±25% 	
941 Lightmeter FLUKE (Everett, Washington, EE.UU.)	<ul style="list-style-type: none"> · Medida en lx o cd/m², con botón para pasar las opciones de display · Rango de medida hasta 20.000 lx o cd/m² · Retención de data para poder leer la medición en el display · Capacidad para mostrar los valores máximos y mínimos medidos · Incluye tapa protectora 	

Según las características mostradas en la Tabla 2, muchos luxómetros utilizan como fuente de alimentación una única pila de 9 V. Sin embargo, no es la única opción. Como se puede ver en la tabla, también los hay que utilizan pilas alcalinas AA (1.5 V cada pila).

En general, lo que diferencia a un luxómetro de alta gama de uno de baja gama suele ser la variedad de funcionalidades que incorpora el dispositivo. Hay una serie de funcionalidades básicas comunes a la mayoría (incluidas aplicaciones móviles) como es la función de mostrar los valores máximos, mínimos y medios de las medidas tomadas durante un tiempo determinado. La mayoría también incluye la opción de convertir los resultados de *lx* (luxes) a *fc* (footcandle) o *cd/m²* (candela por metro cuadrado). Los modelos de alta gama suelen incorporar pantallas táctiles para mejorar la experiencia del usuario y conectividad inalámbrica con ordenadores y/o Smartphone para almacenar y analizar los datos almacenados del luxómetro.

3. Diseño del prototipo

Puesto que el objetivo es diseñar un luxómetro de mano que mida el espectro de luz visible en un punto, el **rango de longitudes de onda** que interesa medir es el que está comprendido entre los 400 y los 700 nm. Por ello, se elegirá un fotodiodo de silicio, ya que su rango de medida se adapta al rango que se desea medir.

Para elegir el **rango de luxes** que tendrá el luxómetro que se va a diseñar se ha consultado la norma UNE 12464-1 y 12464-2 (Iluminación, Iluminación de lugares de trabajo) que establece el valor recomendado de iluminación de los lugares de trabajo en interiores y exteriores. Si observamos los valores de iluminación para los distintos tipos de tareas desarrolladas en estos espacios, el valor máximo que se encuentra es de 5000 lx en espacios como quirófanos o mesas de autopsia. Por tanto, se ha decidido que el rango de medida del prototipo será de 0 a 20000 lx.

Se ha optado por utilizar una **alimentación no simétrica de 9 V** que vendrá proporcionada por una batería recargable de Cloruro de Tionilo-Litio.

La **señal de salida** del prototipo será una pantalla LCD donde se muestra el valor en luxes de la medida.

Se pretende diseñar un prototipo económico por lo que las **funcionalidades** que incluirá el diseño serán las básicas 1) mostrar el valor máximo, mínimo y medio, 2) mostrar el valor de la medida en tiempo real, 3) opción de congelar el valor medido durante el tiempo que se desee, 4) guardar un valor medida y 5) convertir el valor de lux a *footcandle* y viceversa.

3.1 Análisis de la señal

Para el diseño del prototipo se ha optado por utilizar el fotodiodo BPW21R (Vishay, Malvern, PA, USA). Se trata de un fotodiodo de silicio de tipo PN diseñado para aplicaciones de alta precisión. Se caracteriza por tener una respuesta muy lineal y una sensibilidad espectral similar a la del ojo humano (400 a 700 nm).

Para una condición de temperatura ambiente de 25 °C y 1 klx el fotodiodo BPW21R proporciona una corriente de salida inversa cuyo valor típico es de 9 µA. El semiconductor tiene un ancho de banda espectral de 420 a 675 nm y una sensibilidad de 9 nA/lx para un rango de 10⁻² a 10⁵ lx [1].

La función del prototipo es medir la iluminancia de un espacio donde no se prevén cambios drásticos en el ambiente, por ejemplo, una oficina. Por esto, se espera que durante la medición se

obtenga un valor estable de luxes. Esto quiere decir que el prototipo tiene que ser capaz de captar señales DC. Por otra parte, hay que determinar un valor de frecuencia máxima de la señal proporcionada por el fotodiodo (f_{max}) para, posteriormente, filtrar aquellas frecuencias más elevadas que no nos interesan y que se pueden interpretar como perturbaciones. Para ello se ha hecho una estimación de la velocidad de variación de la señal mediante un estudio práctico en una oficina orientada hacia el Este a primera hora de la mañana, haciendo uso del luxómetro y el cronómetro del móvil. Los datos obtenidos han sido: 13 lx con las luces apagadas, 700 lx con las luces encendidas, y un tiempo de encendido de aproximadamente 0.1 segundos.

Una vez determinados estos valores, se calcula la variación de la iluminancia (∂lx) respecto a la variación del tiempo (∂t) como:

$$\frac{\partial lx}{\partial t} = \frac{700-13}{0.1} = 6870 \text{ lx/s} \quad (1)$$

La frecuencia máxima de la señal se obtiene del mismo modo que se obtiene la máxima frecuencia de procesamiento de un amplificador operacional debido a su *slew rate* (máxima variación temporal de la tensión de salida):

$$f_{max-SR} = \frac{SR(V/\mu s)}{2\pi \cdot A} \quad (2)$$

donde A es el valor de pico de la senoidal de máxima frecuencia que se puede reproducir a la salida del amplificador.

Se obtiene así el valor de la frecuencia máxima de la señal proporcionada por el fotodiodo, donde el *slew rate* (SR) es la variación de la iluminancia respecto a la variación temporal ($\frac{\partial lx}{\partial t}$) y A es la amplitud de la máxima variación de la iluminancia, en este caso 560 lx.

$$f_{max} = \frac{\frac{\partial lx}{\partial t}|_{max} (lx/s)}{2\pi \cdot A(lx)} = \frac{6870 \text{ lx/s}}{2\pi \cdot \frac{700(lx)}{2}} = 3.12 \text{ Hz} \quad (3)$$

De este modo, la **frecuencia máxima de la señal** será **3.12 Hz**. Esta frecuencia máxima no es más que una estimación supuestas unas condiciones concretas, el resultado podría variar dependiendo de las condiciones del estudio práctico.

3.2. Diagrama de bloques

La Figura 2 muestra el diagrama de bloques del prototipo. Tal y como se ha determinado anteriormente, el fotodiodo elegido para el prototipo es el BPW21R.

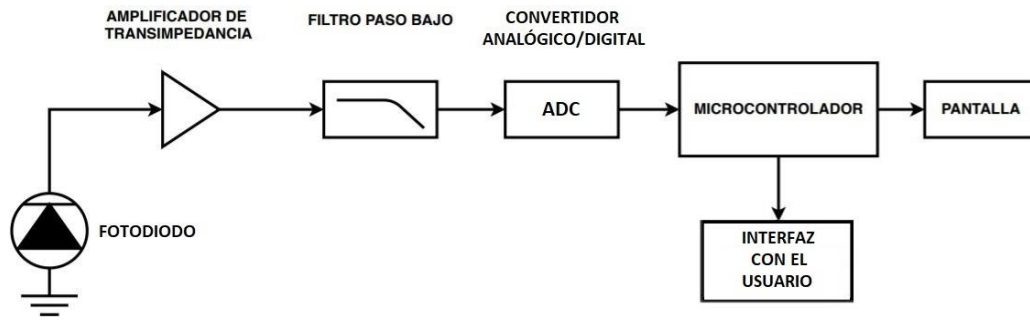


Figura 2: El diagrama de bloques del prototipo está compuesto por el fotodiodo en configuración fotovoltaica (no polarizado), un amplificador de transimpedancia, un filtro paso bajo para eliminar las frecuencias no deseadas, un convertidor ADC, un microcontrolador, una botonera para seleccionar las distintas funciones y una pantalla LCD para mostrar información al usuario.

3.3 Diseño detallado de cada etapa

3.3.1 Amplificador de Transimpedancia

El motivo por el que se ha incluido un amplificador de transimpedancia en el prototipo es porque el fotodiodo genera una corriente proporcional a la luz y lo que interesa es procesar la tensión, además, no es deseable que la señal que se va a medir afecte a la sensibilidad del sensor. Si se midiese la variación de la corriente del fotodiodo como caída de tensión en una resistencia, la tensión del fotodiodo variaría también. De este modo, al utilizar un amplificador de transimpedancia, el AO varía el voltaje de salida manteniendo constante el voltaje del fotodiodo.

Es conveniente que el AO elegido tenga una impedancia de entrada elevada y corrientes de polarización pequeñas. Esto se debe a que la señal de entrada es una corriente considerablemente débil, por lo tanto, si las corrientes de polarización del AO son grandes, se perderá parte de la señal proporcionada por el fotodiodo. Para ello se ha optado por un AO que tiene una etapa de entrada FET. Se busca que el AO sea rail-to-rail, de manera que la salida pueda alcanzar valores próximos a los de la alimentación del amplificador. El AO TLV271 (Texas Instruments, Dallas, TX, USA) se adapta a las necesidades del diseño.

La Figura 3 muestra el esquema de un amplificador de transimpedancia, también conocido como convertidor I-V. En este caso el fotodiodo está implementado en configuración fotovoltaica, es decir, no está polarizado.

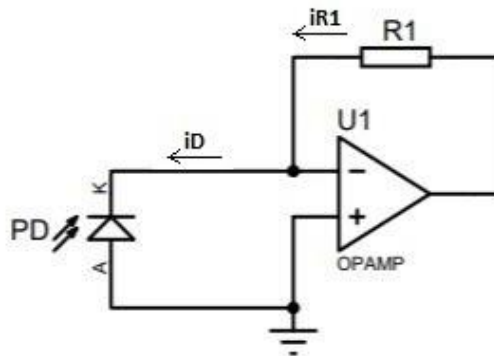


Figura 3: Amplificador de transimpedancia cuya ganancia depende del valor de la resistencia de la realimentación negativa R1. Convierte la corriente del fotodiodo en tensión a la salida del AO. Esta configuración no incluye polarización inversa del fotodiodo.

La ganancia del amplificador de transimpedancia viene determinada por el valor de la resistencia R1, que se puede calcular de la siguiente manera:

$$i_D + i_{R1} = 0 \quad (4)$$

donde i_D es la corriente generada por el fotodiodo e i_{R1} es la corriente que atraviesa la resistencia R1.

La corriente i_{R1} se puede expresar como la tensión en bornes de la resistencia (tensión de salida del AO (V_o) y tensión en el pin negativo del AO (V_i)) dividido por el valor de la resistencia R1.

$$i_D = \frac{V_i - V_o}{R1} \quad (5)$$

De esta forma se puede despejar de la ecuación (1) el valor de la resistencia R1 para un valor determinado de corriente i_D , siendo $V_i = 0$.

$$i_D + \frac{V_i - V_o}{R1} = 0 \quad (6)$$

$$R1 = \frac{V_i - V_o}{-i_D} \quad (7)$$

De las hojas de características proporcionadas por el fabricante del fotodiodo BPW21R (Figura 4) se observa que el valor de i_D correspondiente a 20000 lx, aproximadamente 125 μ A.

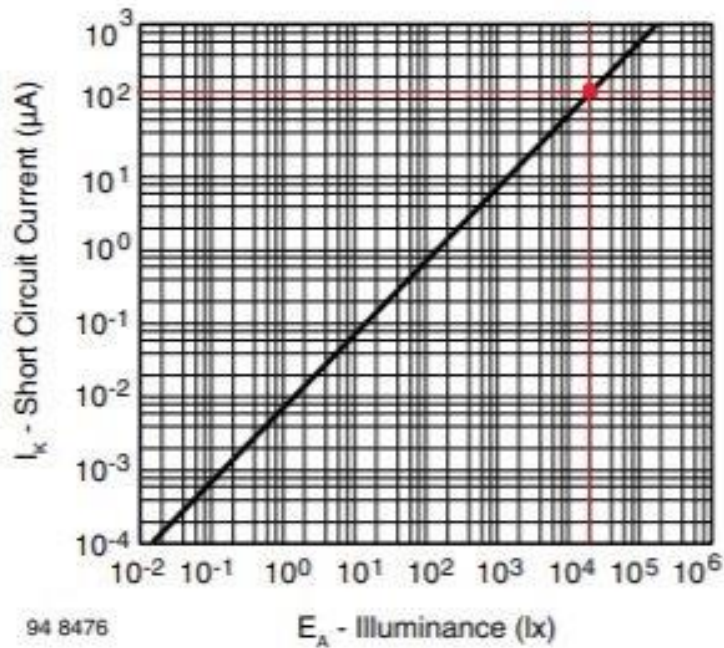


Figura 4: Curva de la corriente del fotodiodo, cuando este no está polarizado, frente a la iluminancia captada por el mismo.

Puesto que este valor de la corriente corresponde al máximo valor que se desea medir, determinamos que el valor de la tensión a la salida del AO (V_o) será el máximo. Según las hojas de características el AO se puede alimentar con una tensión máxima de 5.5 V. La alimentación del AO será proporcionada por el microcontrolador y será de 5 V no simétrica. Lo cierto es que el AO no es capaz de proporcionar una tensión de salida igual a la tensión de la alimentación. Se obtiene de las hojas de características proporcionadas por el fabricante del AO TLV271 el valor máximo de V_o que es capaz de proporcionar, es decir, ± 200 mV [2].

Por lo tanto, para el máximo valor de corriente determinado anteriormente ($125 \mu\text{A}$) se obtendrá el máximo valor de output posible ($5 \text{ V} - 100 \text{ mV}$). Resolviendo la ecuación (7) se obtiene el valor de R1.

$$R1 = \frac{V_i - V_o}{-i_D} = \frac{0 \text{ V} - 4.9 \text{ V}}{-125 \mu\text{A}} = 39200 \Omega \quad (8)$$

La **resistencia R1** tendrá el valor normalizado más próximo al obtenido en los cálculos, **39 k Ω** . Finalmente, la ganancia del AO será de -39000 V/A .

Con este valor de R1 se recalcula el voltaje a la salida del AO para una entrada de $-125 \mu\text{A}$.

$$-39000 \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot -125 \mu\text{A} = 4.875 \text{ V} \quad (9)$$

3.3.2 Filtro Activo Paso Bajo

En la Figura 5 se muestra el esquema del filtro paso bajo activo de primer orden incluido en el propio convertidor I-V de la Figura 3. Como se puede observar, se han juntado en una misma etapa las funciones del convertidor I-V y del filtro. Tener dos etapas distintas supondría tener dos AOs, lo que equivale a un consumo energético mayor y, ya que la alimentación del prototipo

viene proporcionada por una pila, cuanto menos consuma el prototipo, mayor será la duración de la batería. En el caso del prototipo la señal de entrada no es una tensión sino una corriente, la que proporciona el fotodiodo.

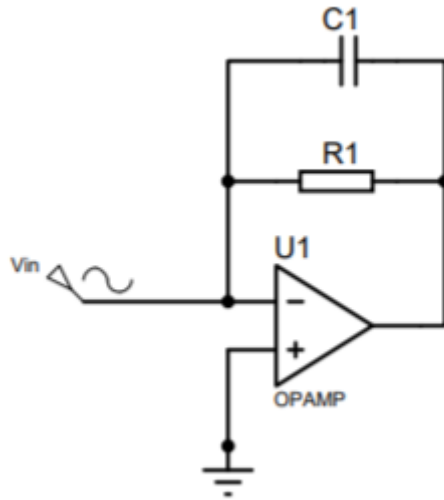


Figura 5: Filtro paso bajo activo. Mediante el diseño de la resistencia y el condensador se determina la frecuencia de corte superior.

Con la frecuencia de corte superior (f_{cs}) establecida en la sección 5 se procede al diseño del filtro activo paso bajo mediante la ecuación de diseño, cuyos parámetros son $R1$ y $C1$, siendo el último el condensador encargado de atenuar la señal a la frecuencia deseada.

$$f_{cs} = \frac{1}{2\pi R1 C1} \quad (10)$$

$$C1 = \frac{1}{2\pi R1 f_{cs}} = \frac{1}{2\pi \cdot 39000 \cdot 3.12} = 1.30 \mu F \quad (11)$$

Este valor de $C1$ no es un valor normalizado, por lo que se ha elegido un valor normalizado de $1.2 \mu F$, lo que significa que la f_{cs} no será el valor calculado previamente (3.12 Hz) sino 3.4 Hz, esto no supone un problema puesto que, para este valor normalizado del condensador $C1$, la frecuencia de corte superior es muy similar a la calculada anteriormente.

El pin positivo del AO está conectado a masa para obtener 0 V de forma que el AO no tenga un offset añadido a la salida.

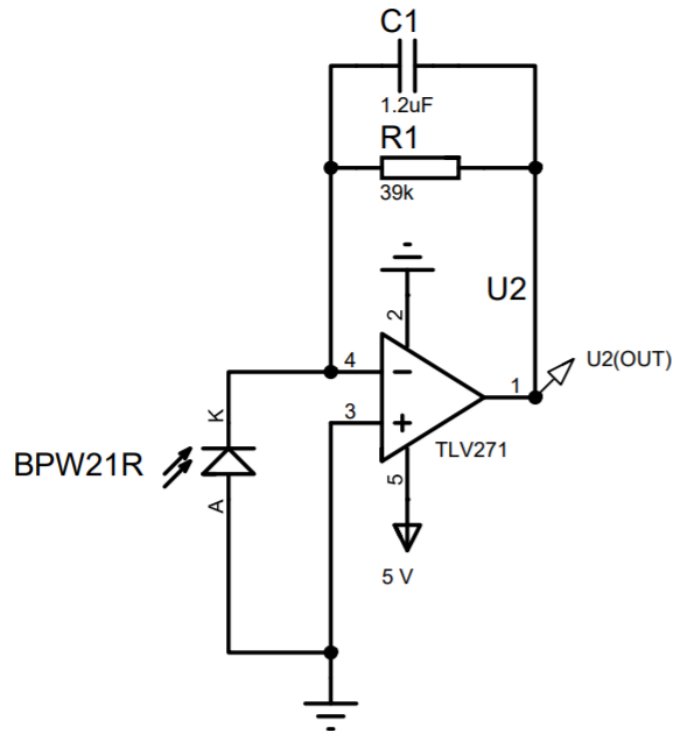


Figura 6: Esquema electrónico de la etapa del amplificador de transimpedancia y el filtro paso bajo. La alimentación de la etapa proviene del microcontrolador, el cual tiene un pin que proporciona 5 V.

3.3.3 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado que se encarga de gestionar una serie de entradas y salidas. Generalmente está compuesto por un procesador y una memoria cuya función es guardar el programa y sus variables. La función del microcontrolador en el prototipo es recoger la información proporcionada por las entradas analógicas (señal de entrada del sistema) y digitales (botonera) y mostrar la información deseada en la pantalla LCD. Con el fin de simplificar el diseño y puesto que se trata de un prototipo y no la versión final del producto, se ha decidido hacer uso de un microcontrolador comercial en vez de hacer un diseño propio, pero en el futuro se valorará la posibilidad de diseñar y producir un microcontrolador específico para la aplicación.

El tamaño del microcontrolador es un factor a tener en cuenta ya a que el prototipo es un instrumento de medida de mano, de este modo, es conveniente que el tamaño del microcontrolador elegido sea reducido. Se ha decidido que para esta aplicación se va a utilizar el microcontrolador Arduino Nano Every de la marca Arduino (Somerville, Massachusetts, USA) por su reducido tamaño (45x18 mm) y su peso (5 g) además de por su versatilidad.



Figura 7: Microcontrolador Arduino Nano Every.

El Arduino Nano Every consta de 22 pines digitales de entrada/salida y 8 pines de entrada analógicos (ADC 10 bit). Su reloj interno alcanza los 20 MHz, y en el apartado de la memoria cuenta con una memoria Flash de 48 KB, una memoria SRAM de 6 KB y una memoria EEPROM de 256 bytes.

3.3.4 Convertidor Analógico Digital

La necesidad de incluir una etapa de convertidor analógico digital surge debido a que los ADCs del microcontrolador son de 10 bits lo que equivale a un total de 1024 valores (2^{10} valores) y una resolución de 4.883 mV. De este modo, si el prototipo tiene un rango de 20001 valores (0 a 20000 lx) se traduce en que cada valor proporcionado por el ADC de 10 bits equivale a 19.55 lx como se observa en la expresión (19),

$$valor_{lx} = valor_{adc} \cdot \frac{20000}{1023} = 1 \cdot \frac{20000}{1023} = 19.55 \text{ lx} \quad (20)$$

por lo que se pierde información. Para obtener una mayor resolución es necesario implementar una etapa de conversión analógica digital con un mayor número de bits.

El ADC elegido para el prototipo es el ADS1115 del fabricante Texas Instruments (Dallas, Texas, USA). Este convertidor tiene una resolución de 16 bits, pero 1 bit se utiliza para establecer el signo, positivo o negativo, de este modo, existen 32768 valores posibles (2^{15} valores) y tiene una resolución máxima de 7.8 μ V. Se comunica con el microcontrolador mediante I2C e incorpora un amplificador de ganancia programable.

El amplificador de ganancia programable establece la escala completa, es decir, indica el valor de referencia del ADC. El valor de referencia por defecto del ADS1115 es ± 6.144 V, es decir, el valor máximo del convertidor (32767) corresponde a ± 6.144 V. Para obtener el factor de escala se divide el valor máximo de voltaje por el valor máximo de la palabra [3].

$$factor \ de \ escala = \frac{6.144 \ V}{32767} = 187.5 \ \mu V \quad (21)$$

En el apartado 7.1 se determinó que -125 μ A equivalen a 20000 lx y que la ganancia del amplificador de transimpedancia es de -39000 V/A, por lo que se puede obtener el voltaje a la salida del AO para 20000 lx.

$$-125 \mu A \cdot -39000 \frac{V}{A} = 4.875 V \quad (22)$$

Ahora se determina a cuantos luxes equivalen 6.144 V mediante una regla de tres.

$$6.144 V \cdot \frac{20000}{4.875} = 25206 lx \quad (23)$$

Por último, sabiendo a cuantos luxes equivalen 6.144 V se puede establecer la expresión de conversión de voltios a luxes:

$$valor_{volts} = valor_{adc} \cdot \frac{6.144 V}{32767} \quad (24)$$

$$valor_{lux} = valor_{volts} \cdot \frac{25206 lx}{6.144} \quad (25)$$

3.3.5 Interfaz con el usuario

Tal y como se ha establecido en el apartado 3, el prototipo incluye una serie de funcionalidades que requieren del accionamiento por parte del usuario, por este motivo el prototipo incluye un total de 5 botones cuyas funciones son 1) encender/apagar el dispositivo, 2) congelar/descongelar el valor medido, 3) guardar el valor medido y 4) convertir el valor medido de lx a fc y viceversa.

La interfaz con el usuario se divide en dos partes: la pantalla LCD5110 y el conjunto de botones mediante los cuales el usuario interactúa con el dispositivo.

El LCD5110 (Figura 14) es el display utilizado en los antiguos teléfonos móviles Nokia 5110 y 3310. Se trata de un display LCD de 84x48 pixeles monocromático. Se ha elegido este display debido a que, pese a su reducido tamaño, es muy legible e incorpora luz LED de fondo. Además, su precio es reducido, es sencillo de usar y requiere de tan solo 8 pines de E/S cuyo consumo es bajo.



Figura 8: Pantalla Nokia LCD 5110 con 8 pines de entradas y salidas y 84x48 pixeles.

Por otro lado, el conjunto de botones utilizados en el prototipo será: un botón para encender y apagar el prototipo y tres botones cada uno dedicado a una de las distintas funcionalidades.

4. Estimación teórica del offset

Puesto que se trata de un caso práctico con componentes reales, hay que tener en cuenta una serie de cosas que no se tendrían en cuenta si se tratase de un estudio teórico con componentes ideales.

Una de las cuestiones a considerar es el efecto de **las corrientes de polarización del AO en el error de offset** de la primera etapa. Para ello se modela eléctricamente el comportamiento de la polarización de la etapa de entrada, donde I_P es la corriente de entrada en el terminal positivo del AO e I_N es la corriente de entrada en el terminal negativo. La Figura 7 representa la etapa de entrada del amplificador operacional modelada como un arreglo de fuentes de corrientes ideales.

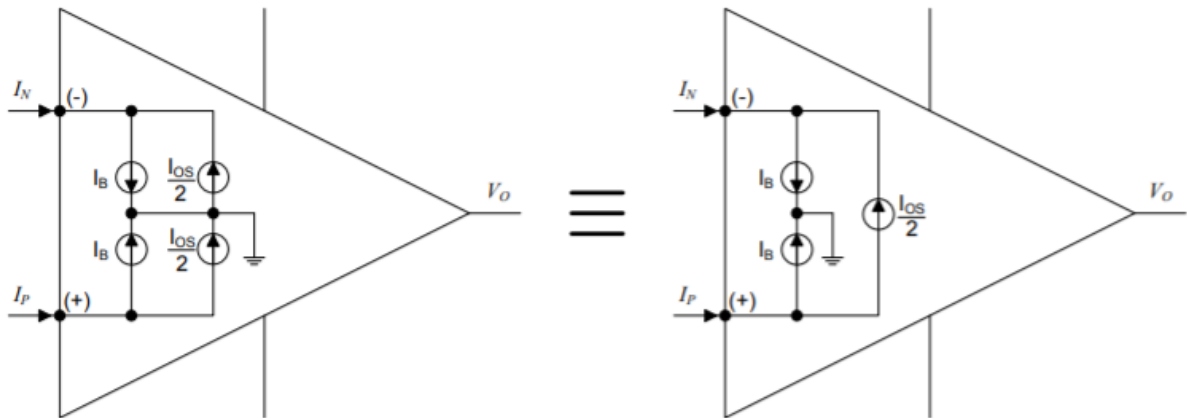


Figura 9: Modelado interno del amplificador operacional real.

A partir de estas corrientes se obtienen las corrientes de polarización (I_B) y la corriente de offset (I_{OS}) [4].

$$I_B = \frac{I_P + I_N}{2} \quad (12)$$

$$I_{OS} = I_P - I_N \quad (13)$$

$$I_P = 2I_B - I_N = 2I_B - (I_P - I_{OS}) = 2I_B - I_P + I_{OS}$$

$$2I_P = 2I_B - I_P + I_{OS}$$

$$I_P = I_B + \frac{I_{OS}}{2} \quad (14)$$

$$I_N = I_B - \frac{I_{OS}}{2} \quad (15)$$

Para el estudio de la influencia de las corrientes de entrada de la etapa se usa el modelo de la Figura 8.

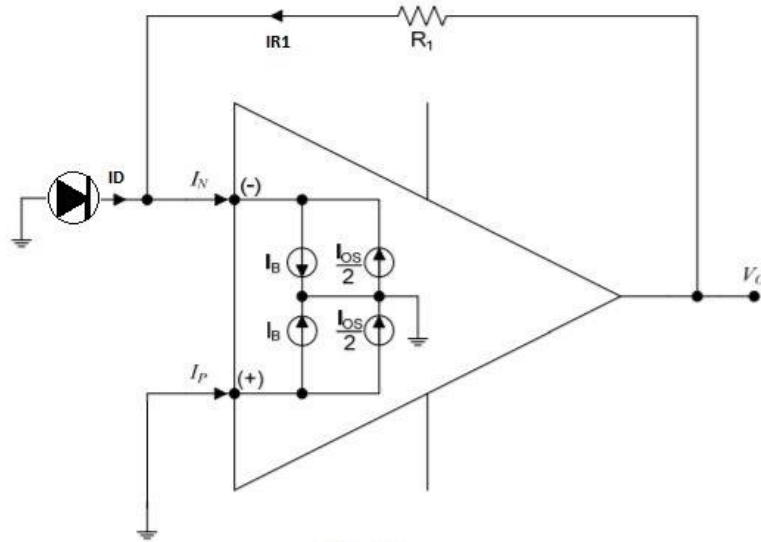


Figura 10: Amplificador operacional en configuración inversora considerando que posee corrientes de entrada no nulas.

Se ha de considerar que la señal de entrada a la etapa es nula para poder estudiar la influencia de las corrientes de entrada en la salida.

La tensión en el terminal positivo (V_+) es nula por lo que la corriente I_p también lo será. Como se ha determinado que la señal de entrada es nula, la corriente I_D también es nula. Por último, la corriente I_{R1} se puede calcular como la tensión en bornes de la resistencia ($V_o - V_-$) dividido por la resistencia $R1$.

$$I_{R1} = \frac{V_o - V_-}{R1}$$

Si se considera que $V_+ = V_- = 0$:

$$I_{R1} = \frac{V_o}{R1}$$

$$I_N = I_D + I_{R1} = I_{R1}$$

Sustituyendo por la ecuación (13):

$$I_{R1} = I_B - \frac{I_{OS}}{2} \quad (16)$$

Finalmente, la tensión de salida provocada por las corrientes de entrada se puede determinar con la siguiente expresión:

$$V_o = R1 \cdot \left(I_B - \frac{I_{OS}}{2} \right) \quad (17)$$

Los valores de la corriente de offset (I_{OS}) y la corriente de polarización (I_B) vienen proporcionados por el fabricante en las hojas de características y tienen un valor de 1 pA y 1 pA respectivamente.

Con estos datos podemos cuantificar el efecto de estas corrientes en el error de offset mediante la ecuación (15).

$$V_o = 39 \text{ k}\Omega \cdot \left(1 \text{ pA} - \frac{1 \text{ pA}}{2} \right) \quad (18)$$

Por tanto, las corrientes de polarización y la corriente de offset del AO se traducen en una tensión a la salida del mismo $V_o = \pm 21.5 \text{ nV}$ para valores típicos y a 25 °C. Como se puede observar,

este valor de tensión es prácticamente despreciable y se debe a que las corrientes de polarización y offset tienen un valor muy pequeño. Es por esto que se eligió este amplificador operacional.

Por otro lado, se ha de tener en cuenta también el **efecto de la tensión de offset del AO sobre el offset de la etapa.**

Si se cortocircuitan las entradas de un AO ideal, la tensión de salida será nula. Sin embargo, en un AO real esto no ocurre, si se cortocircuitan las entradas, se obtendrá una tensión a la salida del AO. Esta señal a la salida se debe a la tensión de offset (V_{io}) del propio AO. La Figura 9 muestra el modelado eléctrico de este offset.

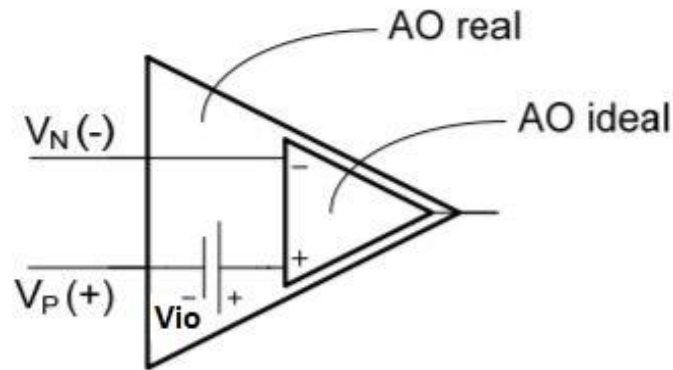


Figura 11: Modelo eléctrico del offset como una fuente de tensión ideal en serie con el terminal positivo.

A continuación, se analiza cómo afecta el error por offset al circuito inversor si se considera la presencia de la tensión de offset en el modelado del AO tal y como se representa en la Figura 10.

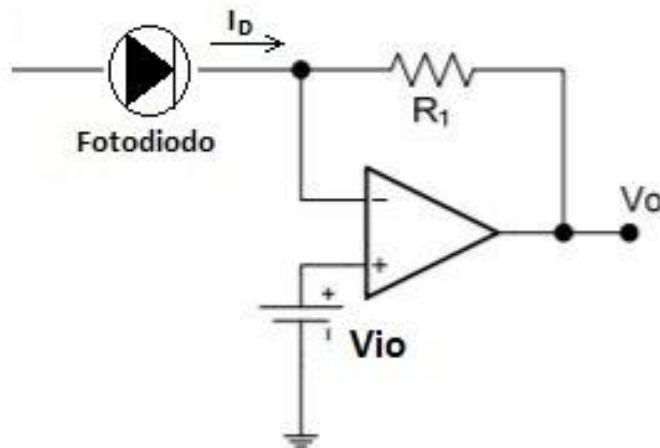


Figura 10: Amplificador operacional en configuración de inversor considerando la presencia del offset como una tensión aplicada al pin positivo del AO.

El offset es una señal DC que se suma a la señal de la tensión de salida del AO (V_o) que es función de la señal de entrada (I_D) y la ganancia ($-\frac{R_1}{R_2}$). Para calcular la tensión de salida debida al offset se ha de anular la señal de entrada del pin negativo del AO. Puesto que la señal de entrada del pin negativo viene dada por el fotodiodo hay que determinar el equivalente de Norton de este y así anular la fuente de intensidad sin despreciar la resistencia interna del fotodiodo. La Figura 11

representa el circuito equivalente del fotodiodo que está compuesto por una fuente de intensidad (I_{ph}), un diodo, un condensador en paralelo con la fuente de intensidad (C_D), una resistencia en serie (R_S) y una resistencia en paralelo (R_D) [5].

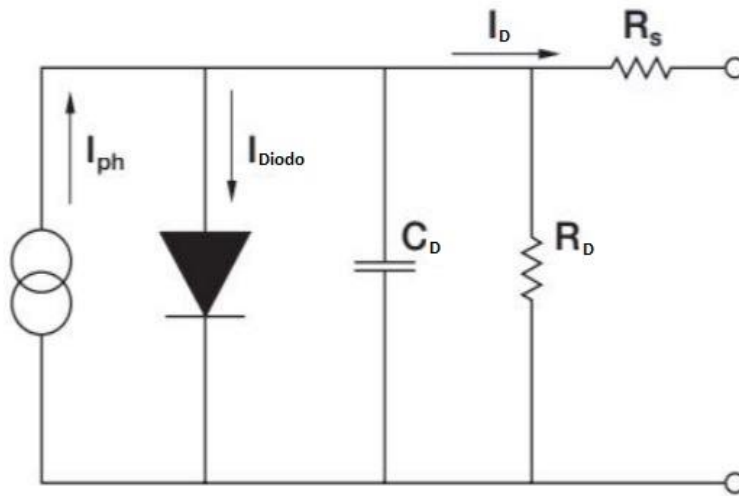


Figura 12: Circuito equivalente de un fotodiodo.

La resistencia R_D es la pendiente de la curva I-V del fotodiodo cuando este no está polarizado. Idealmente, esta resistencia tendría un valor infinito, en la realidad su valor es del orden de 10 a 1000 M Ω . La resistencia oscura se utiliza para determinar la señal de corriente de ruido cuando el fotodiodo no se encuentra polarizado y se obtiene experimentalmente aplicando ± 10 mV al fotodiodo, midiendo la corriente y calculando dicha resistencia. Este dato viene proporcionado por el fabricante en las hojas de características y tiene un valor de 38 G Ω .

Los límites de la región de agotamiento actúan como las placas de un capacitor paralelo (C_D). El fabricante proporciona dos valores de C_D , una cuando el fotodiodo no se polariza (1.2 nF) y otro cuando el fotodiodo está polarizado a la inversa con una tensión en bornes de 5 V (400 pF).

La resistencia en serie (R_S) viene determinada por la resistencia de los contactos del fotodiodo. El valor de esta resistencia suele estar entre los 10 Ω y los 1000 Ω . Ya que este dato no viene proporcionado por el fabricante y, puesto que es un valor considerablemente pequeño en comparación con R_D , no se tendrá en cuenta en los cálculos.

La resistencia equivalente de Norton será la resistencia oscura (R_D), pues en continua el condensador se comporta como un circuito abierto y, como se ha determinado anteriormente, la resistencia en serie R_S se desprecia. Una vez establecida la resistencia equivalente de Norton del fotodiodo, se sustituye en la Figura 12, quedando de la siguiente manera (Figura 12).

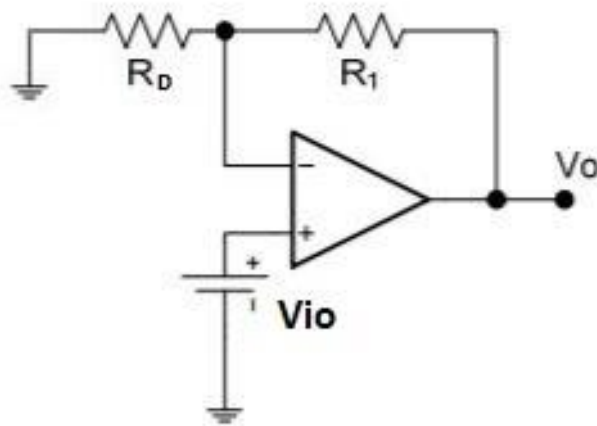


Figura 13: Amplificador operacional en configuración no inversor, cuya tensión de entrada es la tensión de offset V_{io} y cuya ganancia es $1 + \frac{R_1}{R_D}$.

Esta tensión de offset es un dato que viene dado por el fabricante del amplificador operacional TLV271 cuyo valor es de 0.5 mV para una temperatura ambiente de 25°C.

Finalmente, se calcula la tensión de salida debida al offset (V_o) como la señal de entrada (V_{io}) multiplicado por la ganancia del AO ($1 + \frac{R_1}{R_D}$).

$$V_o = V_{io} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_D}\right) = 0.5 \text{ mV} \cdot \left(1 + \frac{39 \text{ k}\Omega}{38 \text{ G}\Omega}\right) = 0.5 \text{ mV} \quad (19)$$

Se puede observar que la **tensión a la salida** del AO (V_o) debida a la tensión de offset (V_{io}) es de **0.5 mV**. Puesto que la entrada es una fuente de corriente, tiene una resistencia de Norton prácticamente infinita. Esto se traduce en que la ganancia de ruido (Noise Gain) de esta etapa es 1 y, por tanto, la V_{io} del AO aparecerá directamente en la salida.

Se puede asumir que la elección de los componentes de la etapa (fotodiodo y amplificador operacional) ha sido correcta puesto que las señales de error debido a las corrientes de polarización y de offset y la tensión de offset son prácticamente despreciables.

Al sumar el error de offset total debido a las corrientes de polarización y el offset del AO se obtiene un **error total de offset** de aproximadamente $\pm 500 \mu\text{V}$. Teniendo en cuenta que 4.875 V equivalen a 20000 lx, **el error total de offset equivaldrá a 2 lx**.

5. Verificación mediante simulación

A causa de la situación actual en España y a nivel mundial debido al COVID-19, la verificación del circuito se ha realizado exclusivamente mediante simulación a través de la plataforma poli[Labs]. El software usado para la simulación del prototipo ha sido Proteus Design Suite de Labcenter Electronics (Grassington, Inglaterra). Se ha utilizado este software de simulación y no otro debido a que se ha utilizado previamente durante la carrera.

En este apartado se va a realizar la simulación del prototipo por etapas. El motivo de que la simulación se realice por etapas y no como conjunto se explicará en el apartado de conclusiones.

5.1. Alimentación

La fuente de alimentación del circuito encargada de alimentar al microcontrolador se ha simulado como una batería de 9 V

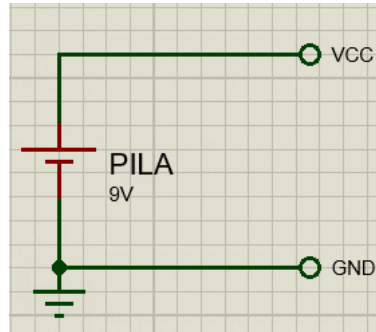


Figura 14: Alimentación del prototipo proporcionada por una única pila de 9 V. El terminal +VCC irá conectado al microcontrolador y el terminal GND será la referencia del sistema.

5.2. Etapa de acondicionamiento de la señal

La etapa de acondicionamiento de la señal está compuesta por el amplificador de transimpedancia y el filtro paso bajo.

La primera simulación que se ha realizado es la comprobación de que la salida del AO para una entrada conocida es la esperada. La entrada de la etapa es la señal proporcionada por el fotodiodo, en este caso corresponde a $-125 \mu\text{A}$ (el signo negativo de la señal de entrada viene debido a la configuración del fotodiodo como se explicó en el apartado de diseño). La alimentación no simétrica del AO viene dada por el microcontrolador, el cual tiene un pin que proporciona +5 V.

Como se puede observar en la figura 14, el valor de salida del AO es el esperado para dicha entrada. Al igual que en los cálculos teóricos, el valor de salida para una entrada de $-125 \mu\text{A}$ es de 4.875 V. Esto significa que el modelo de simulación se comporta igual que el modelo teórico.

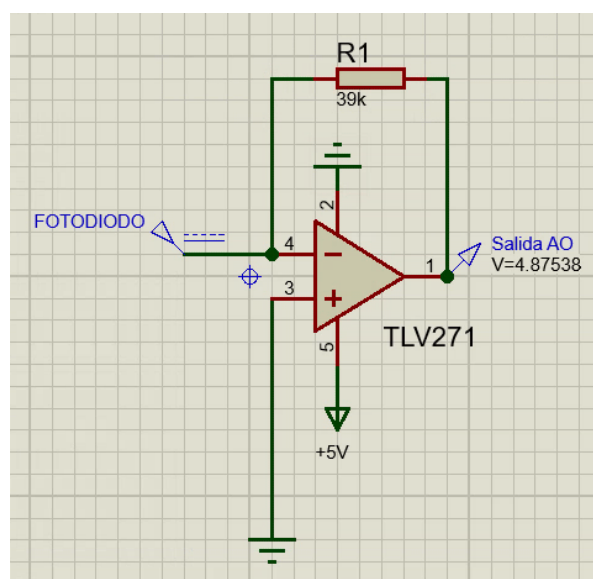


Figura 15: Simulación del amplificador de transimpedancia en el cual se obtiene una salida de 4.875 V para una entrada de $-125 \mu\text{A}$.

A continuación, se ha simulado el filtro. Se trata de un filtro paso bajo activo de primer orden y, por tanto, se espera obtener una atenuación de la ganancia a medida que la frecuencia aumenta. Al ser de primer orden, esta curva de ganancia deberá tener una pendiente negativa de -20 dB por década.

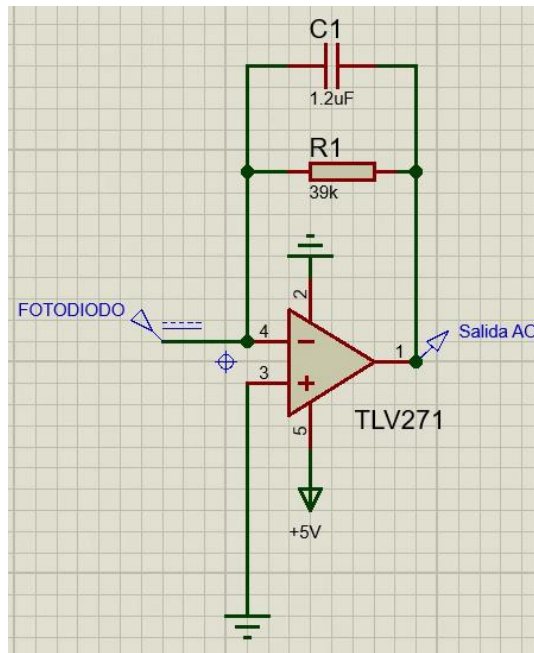


Figura 16: Simulación del filtro paso bajo. La señal proporcionada por el fotodiodo se ha sustituido por un generador de señal continua.

Para comprobar que la respuesta del filtro es la deseada se ha hecho una simulación de la respuesta de la ganancia en función de la frecuencia mediante un diagrama de Bode. En la figura 17 se puede observar dicha respuesta.

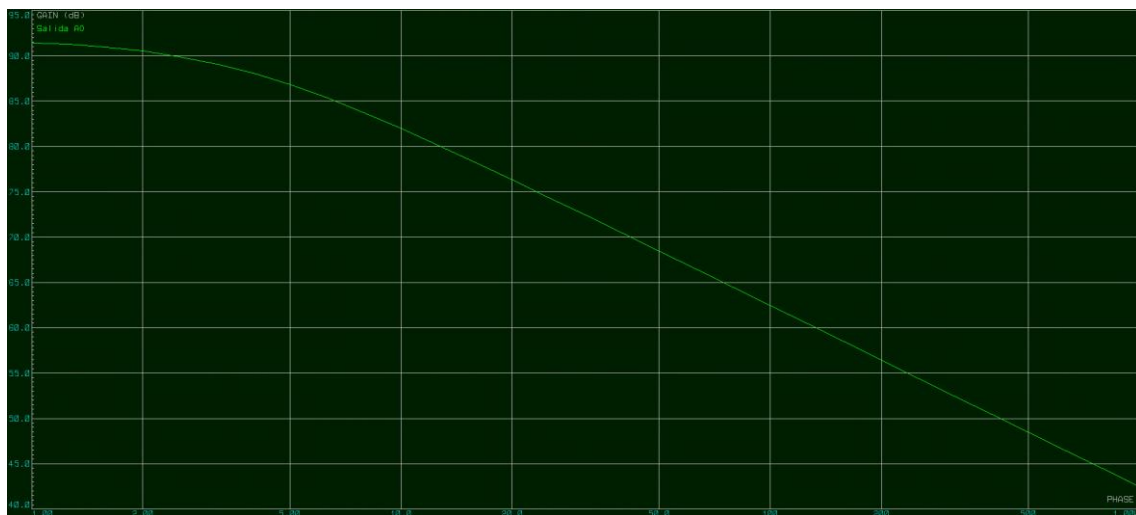


Figura 17: Diagrama de Bode de la ganancia del filtro paso bajo del prototipo.

La ganancia del filtro tiene unidades de V/A. Debido a esto, en ocasiones los simuladores no son capaces de proporcionar una respuesta en frecuencia correcta. Para comprobar la veracidad de la figura 17 se ha hecho la simulación del mismo con una entrada de corriente constante y se ha variado la frecuencia. De este modo, se puede obtener una gráfica punto a punto de la respuesta

del filtro paso bajo. Para ello, se ha recopilado el voltaje de salida para una entrada de $-100 \mu\text{A}$ a distintas frecuencias y, posteriormente, se ha hecho la conversión a decibelios. Mediante la herramienta Excel se han graficado los puntos de la tabla 3 obteniendo la gráfica que se observa en la figura 18.

Tabla 3: Resultados obtenidos de la simulación del filtro paso bajo. De izquierda a derecha: valor de la frecuencia, voltaje obtenido a la salida del filtro, ganancia estática y ganancia en decibelios.

Hz	V	K	dB
1	3,7400	37400	91,5
2	3,3400	33400	90,5
3	2,9000	29000	89,2
4	2,5100	25100	88,0
5	2,1700	21700	86,7
6	1,9000	19000	85,6
7	1,6800	16800	84,5
8	1,5100	15100	83,6
9	1,3600	13600	82,7
10	1,2400	12400	81,9
20	0,6440	6440	76,2
30	0,4340	4340	72,7
40	0,3280	3280	70,3
50	0,2620	2620	68,4
60	0,2190	2190	66,8
70	0,1880	1880	65,5
80	0,1630	1630	64,2
90	0,1470	1470	63,3
100	0,1320	1320	62,4
200	0,0662	662	56,4
300	0,0445	445	53,0
400	0,0339	339	50,6
500	0,0277	277	48,8
600	0,0236	236	47,5
700	0,0207	207	46,3
800	0,0184	184	45,3
900	0,0164	164	44,3
1000	0,0154	154	43,8

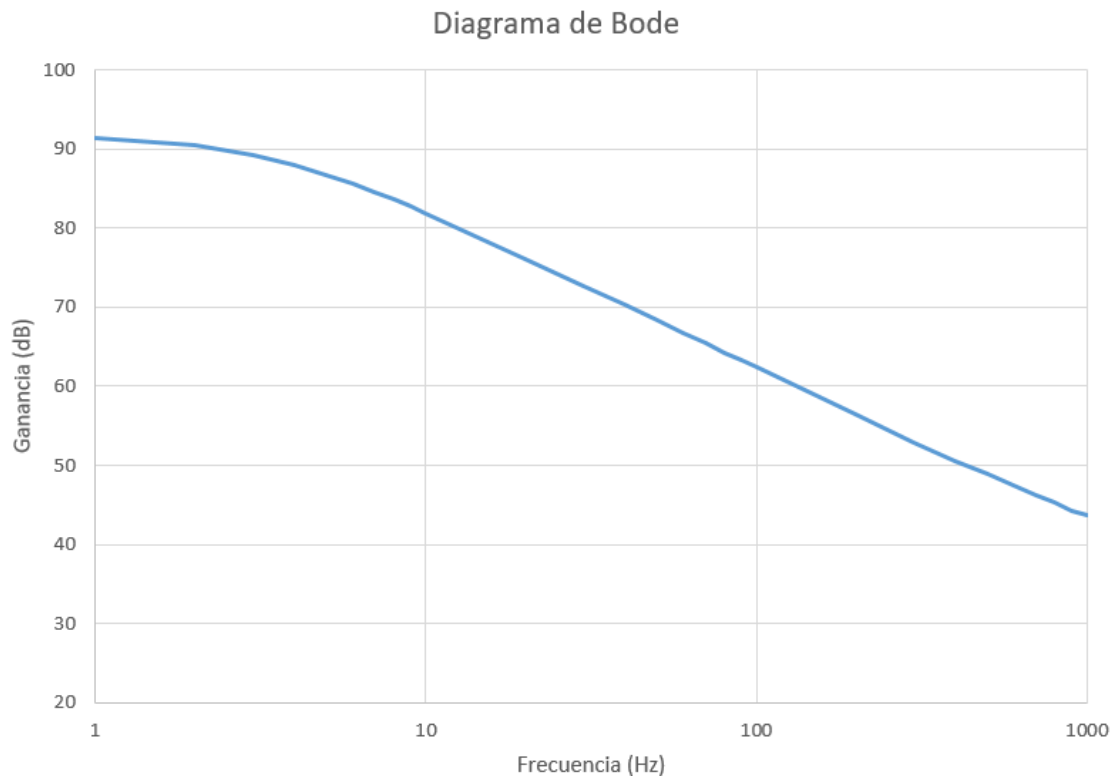


Figura 18: Curva característica para un rango de 1 a 1000 Hz del filtro paso bajo implementado en el prototipo para una entrada de $-100 \mu\text{A}$ cuya pendiente es de $-20 \text{ dB por década}$.

Comparando las figuras 17 y 18 se determina que la simulación del diagrama de Bode es correcta. El filtro se diseñó para tener una frecuencia de corte de 3.12 Hz y, como se puede observar en la figura 15, esto se cumple, pues la frecuencia de corte se obtiene en aquel punto en el que la ganancia se reduce en 3 dB respecto al nivel de referencia.

5.3. Etapa digital

La etapa digital empieza por el convertidor analógico digital. En el apartado de diseño se eligió el convertidor ADS1115 de 16 bits para el prototipo, pero el software de simulación Proteus Design Suite no incluye este componente, por lo que para la simulación se ha utilizado el ADS1110 del mismo fabricante. Este convertidor también es de 16bits, tiene la misma resolución y utiliza comunicación en serie I2C. La única diferencia que tiene respecto al ADS1115 es que no cuenta con amplificador de ganancia programable, sino que tiene una referencia interna de 2.048 V . Esto significa que la máxima entrada del ADC será de 2.048 V , es decir, los 20000 lux se obtendrán para un valor de entrada de 2.048 V , mientras que con el ADS1115 este valor se obtiene para un valor de entrada de 4.875 V .

Puesto que el comportamiento y la programación del ADS1110 son idénticos al del ADS1115, no existe inconveniente en utilizar uno en vez del otro en el apartado de simulación más allá de que la señal de entrada varía de los 0 a los 2.048 V en vez de 0 a 4.875 V .

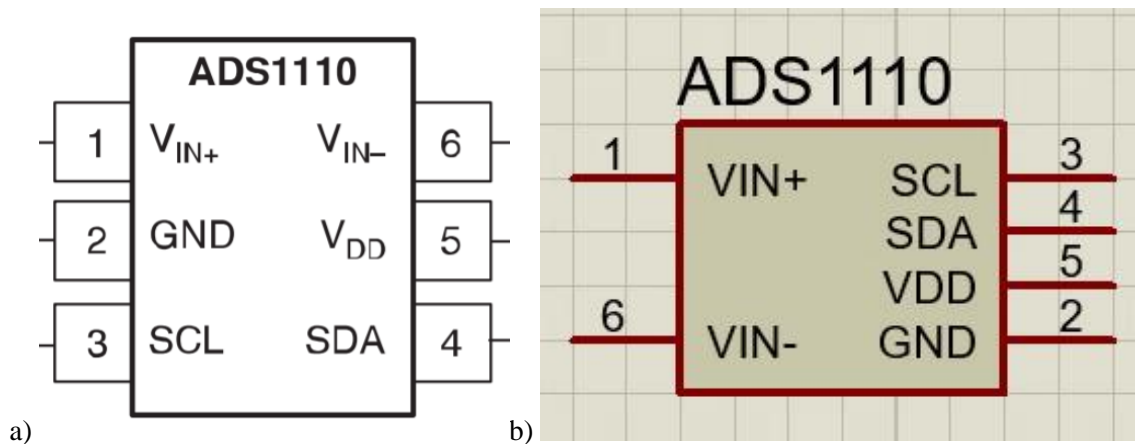


Figura 19: a) Diagrama de conexiones del convertidor analógico digital ADS1110. En los pines 1 y 6 se conecta el voltaje de entrada al ADC, el pin 5 está dedicado a la alimentación del convertidos y el 2 a la tierra o masa. Los pines 3 y 4 son los encargados de la comunicación en serie I2C. b) Diagrama de conexiones en el programa de simulación Proteus.

El microcontrolador es la siguiente parte de la etapa digital y se encarga de comunicarse con el ADC, mostrar el valor en pantalla e interactuar con las entradas y salidas accionadas por el usuario. Para la programación del microcontrolador se ha utilizado el IDE (desarrollo de entorno integrado) de Arduino.

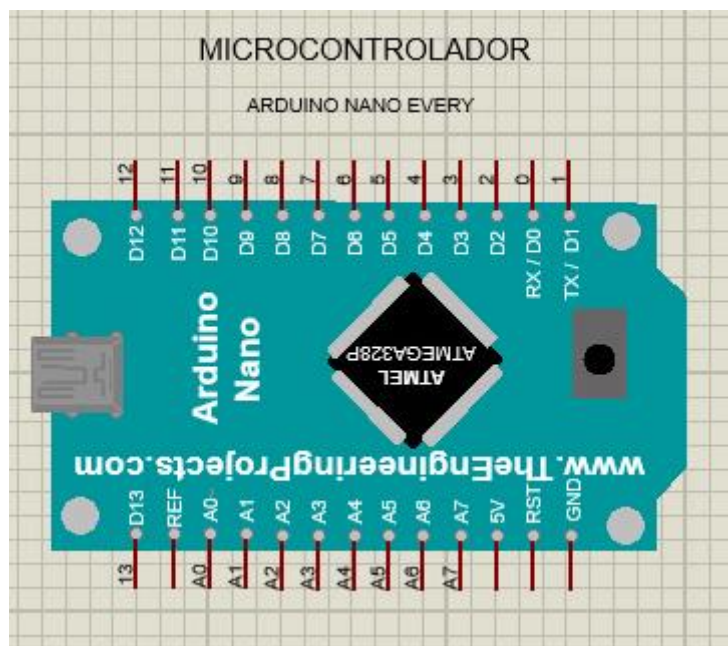


Figura 20: Diagrama del microcontrolador Arduino Nano Every en el programa de simulación Proteus. La alimentación del dispositivo se produce a través del pin Vin que no aparece en la simulación de Proteus.

En la figura 21 se observa el diagrama completo de la etapa digital. El ADC se alimenta mediante el pin de 5 V del microcontrolador y está conectado a la masa interna del mismo. En la simulación se ha tenido que sustituir la alimentación del ADC por una pila de 5 V porque al alimentarlo mediante el pin de 5 V del microcontrolador, el simulador deja de funcionar correctamente. La comunicación I2C se realiza mediante los pines A4 y A5 de la placa Arduino.

La pantalla LCD se conecta a los pines D8, D9, D10, D11 y D12 del microcontrolador. Todos estos son pines de entrada digitales. Por último, los botones están conectados a los pines digitales D0, D1 y D2 y se han implementado en configuración Pull-Down para los cuales se han utilizado tres resistencias de 10 kΩ y los 5 V y GND del microcontrolador.

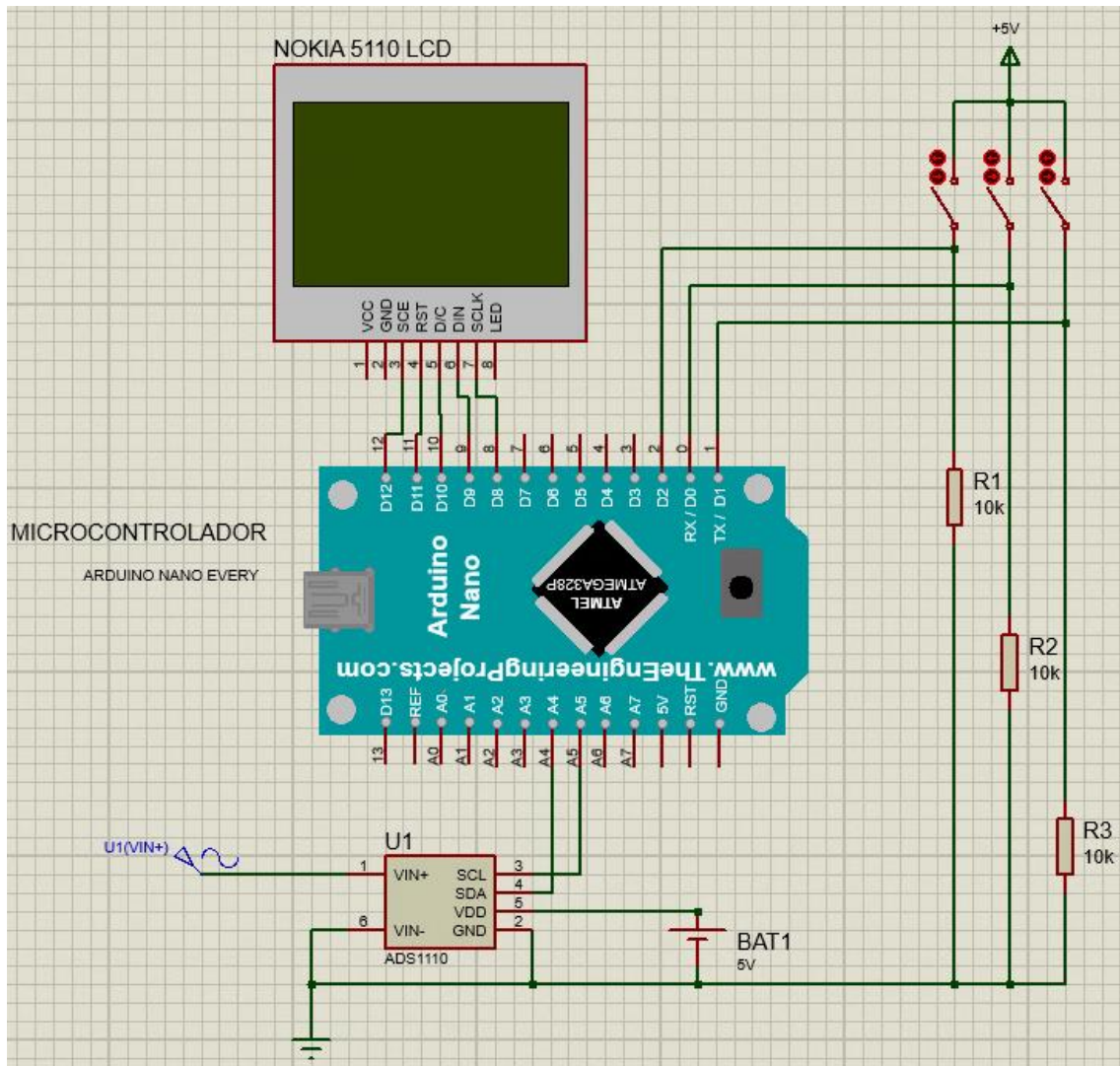


Figura 21: Simulación de la etapa digital completa con el convertidor digital analógico, el microcontrolador, los botones y la pantalla LCD. En la imagen se observa que la alimentación del ADC proviene de una pila de 5 V conectada entre el terminal VDD y GND, en la realidad el ADC está alimentado por el pin 5 V del microcontrolador. Los 5 V de las resistencias Pull-Down también se han sustituido por una fuente de tensión DC de +5 V.

Como se ha mencionado anteriormente, la programación del microcontrolador se ha desarrollado en el IDE propio de Arduino. A continuación, se muestran los flujogramas del programa del prototipo.

La figura 22 muestra el flujograma del código principal, donde se ven las funciones principales y la estructura general del programa. Primero, se declaran las librerías que se utilizarán a lo largo del código y se declaran todas las variables. Posteriormente se ejecuta la función “setup ()” y, finalmente se inicia el bucle infinito, del cual no se saldrá hasta que no se apague el dispositivo.

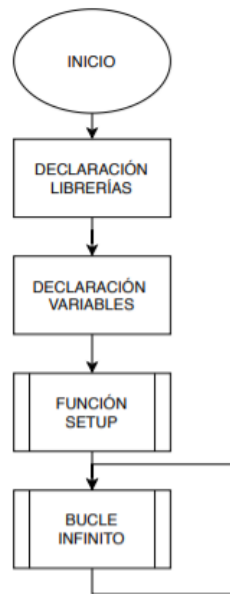


Figura 22: Flujograma del código principal.

La función “setup ()” se desarrolla en la figura 23. Esta función se encarga de hacer la configuración general para el código. El primer paso es configurar los pines para que se comporten como entradas o salidas, a continuación, se inicializa la pantalla LCD y se declara la interrupción que vendrá determinada por el pin de entrada digital 2. Finalmente se dibuja y se imprime en pantalla el logotipo del prototipo y, pasado un segundo, se finaliza la función.



Figura 23: Flujograma de la función “setup ()”.

El bucle infinito del código es la función “loop ()”. Es en esta parte del código donde se desarrollará el grueso del programa. Esta función tiene la característica de repetirse infinitamente hasta que se salga del programa, y en el caso de este prototipo, el programa termina únicamente al apagar el prototipo. El bucle empieza comprobando si el pin 0 está conectado a masa. Este pin se encarga de la funcionalidad congelar /descongelar medida a tiempo real. Al estar la entrada a nivel bajo, el microcontrolador lee el ADC e imprime el valor a tiempo real, el máximo, el mínimo y el medio en lx. Si mientras el dispositivo está leyendo el ADC se acciona el switch del pin 1, dándole un valor de entrada digital alto, el código convertirá las medidas de lx a fc y las imprimirá en pantalla. Una vez leído el ADC, con o sin conversión, se imprime en pantalla las cadenas de caracteres: “AVG: “, “MAX: “, “MIN: “ y “SAVE: “. Posteriormente se averigua si el valor guardado por el usuario está en unidades de lux o footcandles y se imprime en pantalla el símbolo de una de las dos. Finalmente, se actualiza el LCD y se espera 0.1 segundos para terminar el bucle.

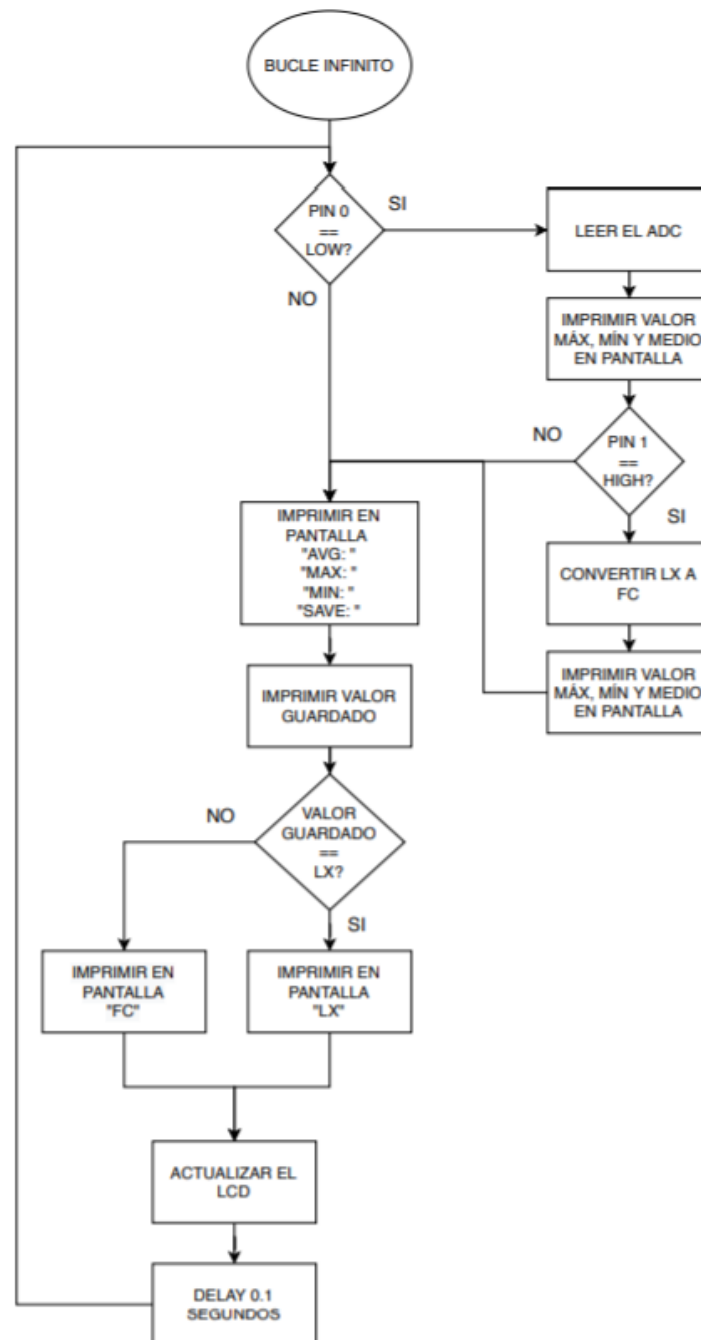


Figura 24: Flujograma del bucle infinito “loop ()” de código del microcontrolador.

5.4 Interfaz de la pantalla

Se ha desarrollado una interfaz mediante la programación del microcontrolador diseñada con la intención de que sea simple e intuitiva para el fácil uso por parte del usuario. Al encender el prototipo aparece la figura 25 correspondiente a la pantalla de inicio donde se observa el logotipo del dispositivo, el año en que se ha desarrollado y el responsable del proyecto.



Figura 25: Pantalla de inicio del prototipo. Esta imagen aparece al encender el prototipo y permanece en pantalla durante 1 segundo.

Pasado 1 segundo aparece en pantalla la figura 26 donde se observa el valor máximo (MAX), mínimo (MIN) y medio (AVG) además del valor a tiempo real y el valor guardado (SAVE). Por defecto las unidades de la medida aparecen en lux y el valor guardado es cero.

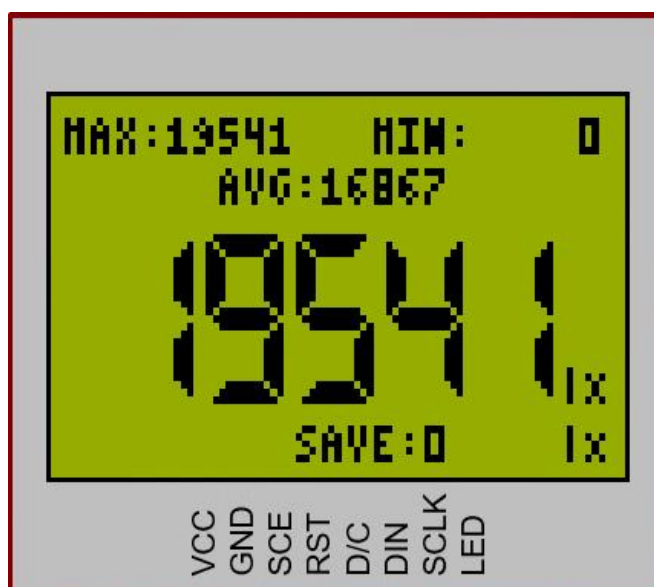


Figura 26: Pantalla de medida. Se observa el valor máximo, mínimo, medio y a tiempo real en lux. El valor guardado es cero puesto que el usuario no ha guardado ningún valor hasta el momento.

Al cerrar el switch del pin 0, la lectura cesa y se congela en pantalla el último valor medido y al abrir el switch la medida a tiempo real reanuda. Por otro lado, cuando el switch del pin1 está abierto, los valores en pantalla están en lux (a excepción del valor guardado que es independiente), esto está representado por el símbolo de la unidad (lx) al lado derecho del valor de medida a tiempo real. Cuando este mismo switch se cierra y se pone a masa el pin 1 los valores en pantalla están en footcandles, esto también está representado por el símbolo de la unidad (fc) al lado derecho del valor de medida a tiempo real. Por último, al cambiar el estado del switch conectado al pin 2 se guarda en pantalla el valor de la medida en ese mismo instante, así como las unidades en las que estaba cuando se guardó. En las figuras 27, 28 y 29 se muestran algunas de estas situaciones.

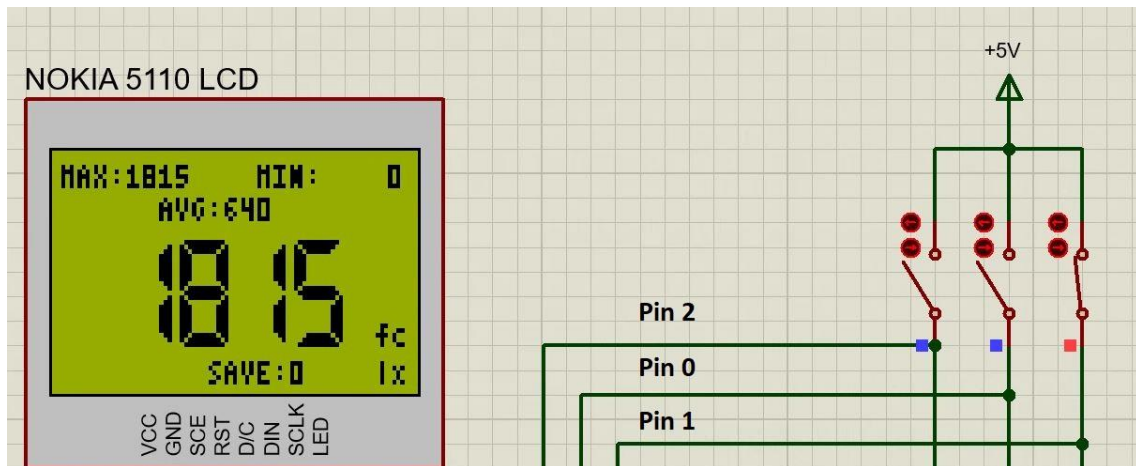


Figura 27: En esta situación, se ha accionado el switch del pin 1 y se ha convertido de lx a fc. Se puede observar que no se ha guardado ningún valor todavía puesto que el valor guardado en pantalla es 0 lx.

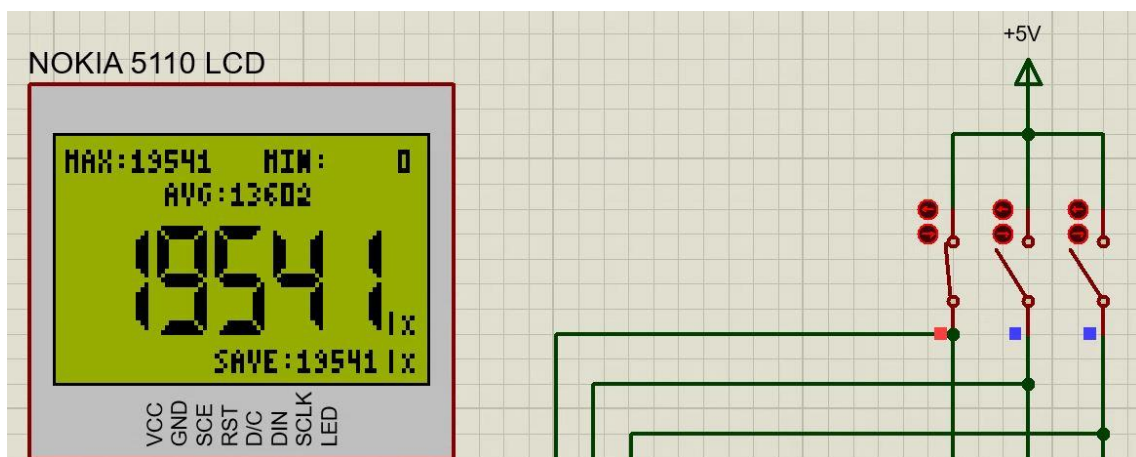


Figura 28: En esta situación se ha guardado el valor en pantalla que corresponde que la medida a tiempo real (19541 lx). Como se puede observar, el valor guardado va acompañado de las unidades en las que estaba la medida cuando se realizó el guardado.

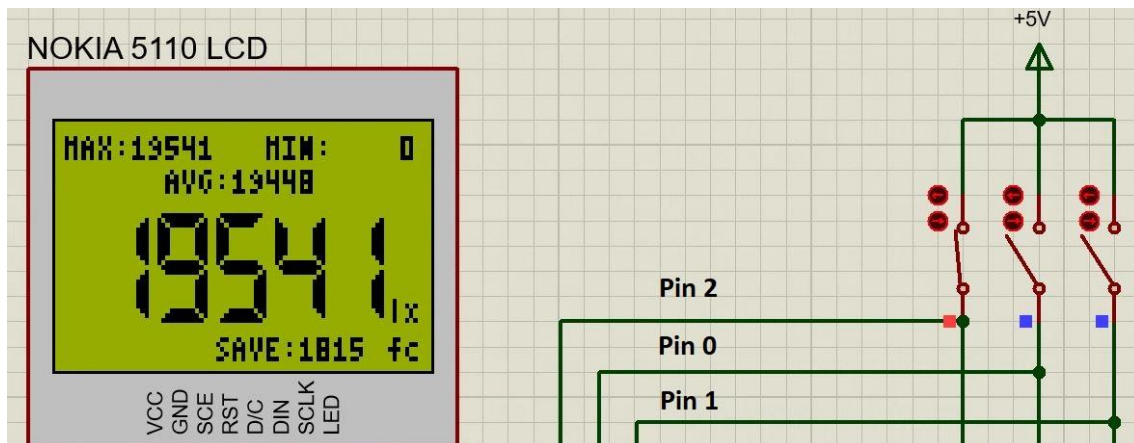


Figura 29: En esta situación se ha guardado el valor en footcandles y posteriormente se ha procedido a convertir el valor a luxes. Es por esto que se observa que el valor de la medida a tiempo real está en lx y el valor guardado está en fc.

6. Conclusiones

El principal problema de hacer uso del software proporcionado por la UPV es que no se posee una licencia particular, de forma que no es posible la adición de librerías ni componentes externos. Esto significa que algunos de los componentes elegidos durante la etapa de diseño se tuvieron que cambiar por otros puesto que no formaban parte del paquete de componentes incluidos en la licencia de la UPV. Pese a esto, se ha conseguido que el prototipo funcione como se había establecido al principio del proyecto.

Otro problema que ha dificultado el avance del proyecto ha sido la capacidad de cálculo del software debido al alto tráfico de la red de la UPV de estos últimos meses. Debido a esto, el software no era capaz de simular múltiples elementos simultáneamente, por lo que se ha tenido que simular cada etapa por separado y en algunos casos, como la simulación del interfaz con el usuario, se ha tenido que hacer probando cada funcionalidad por separado.

Referencias

1. <https://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf> (accedido el 17/06/2020)
2. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv271.pdf?ts=1599997024395&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F (accedido el 22/06/2020)
3. https://www.ti.com/lit/ds/sbas444d/sbas444d.pdf?ts=1600012339546&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F (accedido el 16/08/2020)
4. <https://www.fceia.unr.edu.ar/eca2/Files/Apuntes/> - AO REAL (accedido el 29/06/2020)
5. <http://www.osioptoelectronics.com/application-notes/an-photodiode-parameters-characteristics.pdf> (accedido el 30/07/2020)



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE LUXÓMETRO
BASADO EN FOTODIODO**

DOCUMENTO 2. PLANOS

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

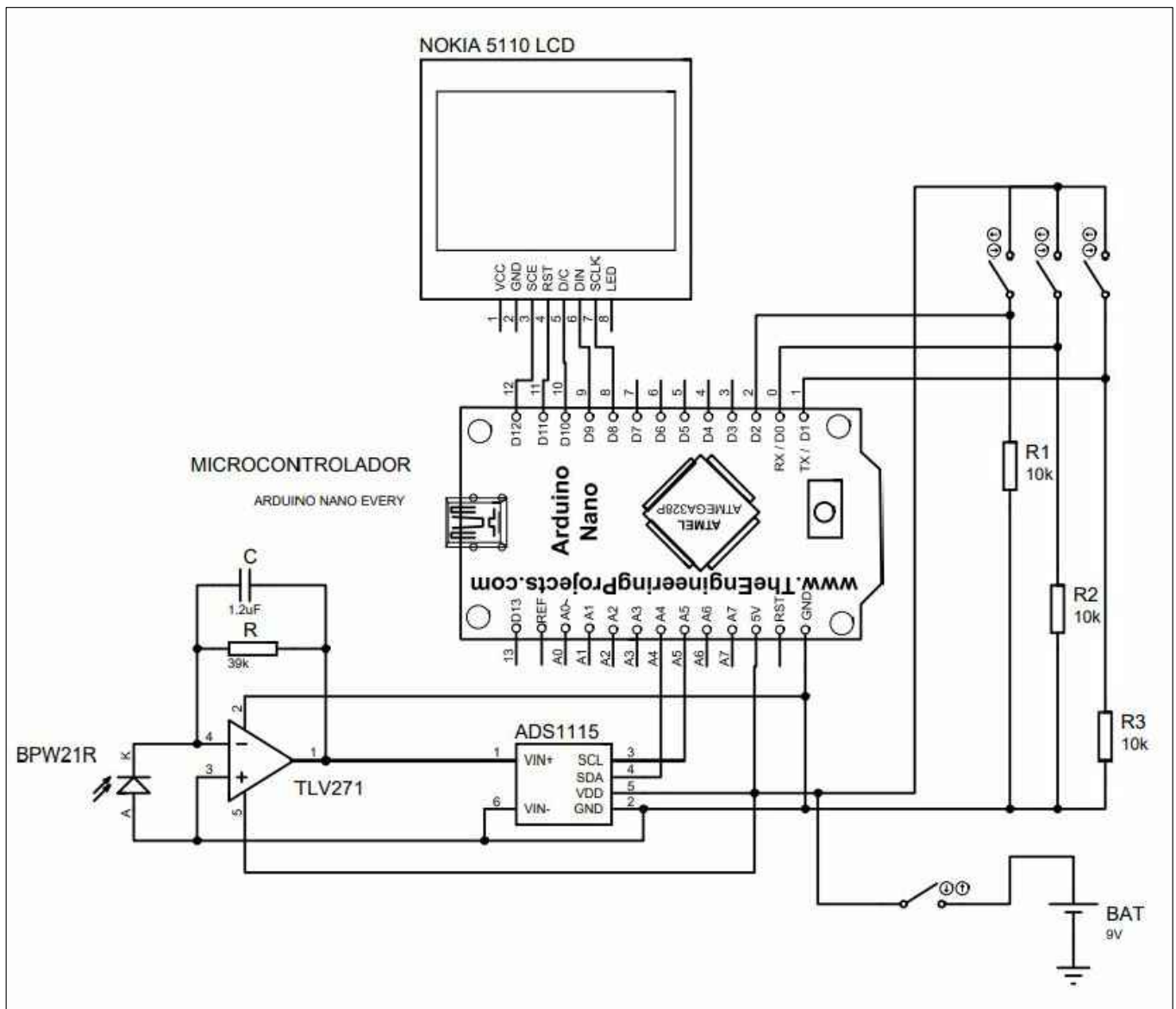
REALIZADO POR

ÁLVARO ALCALÁ GASTALDO

TUTORIZADO POR

ENRIQUE BERJANO ZANÓN

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020



COMPONENTE	VALOR			
FOTODIODO	BPW 21R	DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE LUXÓMETRO BASADO EN FOTODIODO		
AO	TLV271			
C1	1.2 μF	TITULAR: Universitat Politècnica de València		
R1	39 kΩ		Autor: ALCALÁ GASTALDO, ÁLVARO	Plano Nº 01



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE LUXÓMETRO
BASADO EN FOTODIODO**

DOCUMENTO 3. PLIEGO DE CONDICIONES

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

REALIZADO POR

ÁLVARO ALCALÁ GASTALDO

TUTORIZADO POR

ENRIQUE BERJANO ZANÓN

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

Documento 3: Pliego de condiciones

1. Definición y alcance del pliego.....	38
2. Condiciones y normas de carácter general	38
3. Condiciones particulares	38
3.1. Especificaciones técnicas	38
3.1.1. Condiciones de los materiales	38
3.1.2. Condiciones de ejecución.....	40
3.2. Condiciones facultativas	40

1. Definición y alcance del pliego

La presente especificación técnica se refiere a la producción de un luxómetro de mano basado en fotodiodo y fijar las condiciones técnicas mínimas que debe cumplir el producto. El ámbito de aplicación de este documento se extiende a todos los sistemas eléctricos y electrónicos que forman parte del producto. En ocasiones determinadas se podrán adoptar soluciones diferentes a las exigidas en este documento, siempre que se justifique debidamente su necesidad y siempre y cuando no impliquen una disminución de la calidad del mismo.

2. Condiciones y normas de carácter general

Se deberán observar durante la ejecución del proyecto la siguiente normativa.

- UNE-EN 60065:2015. Aparatos de audio, vídeo y aparatos electrónicos análogos.
- UNE-EN 61439. Conjuntos de aparamenta de baja tensión.
- Real Decreto 110/2015 de 20 de Febrero sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.
- Real Decreto 187/2016 6 de Mayo por el que se regulan las exigencias de seguridad del material eléctrico destinado a ser utilizado en determinados límites de tensión. Esto implica la necesidad de un marcado CE.
- Reglamento electrotécnico de baja tensión RD 842/2002 de 2 de Agosto de 2002.

3. Condiciones particulares

3.1. Especificaciones técnicas

Las condiciones técnicas especificadas a continuación se refieren al montaje de un luxómetro de mano basado en fotodiodo.

3.1.1. Condiciones de los materiales

- Resistencias:

Los valores de las resistencias se han determinado en el documento 1 “Memoria”. Las resistencias utilizadas en el montaje del prototipo serán resistencias de película de carbón que pertenecen a la serie E24. Tendrán una potencia nominal de 0.25 W y una tolerancia máxima de $\pm 5\%$. Comprobar su correcto funcionamiento haciendo uso de un multímetro.

- Condensador:

El condensador utilizado en el montaje del prototipo deberá tener el valor determinado en el documento 1 “Memoria” y deberá ser un condensador de película de polipropileno. Se recomienda el uso del condensador de Panasonic de la serie ECWF(A) o similar. Medir su correcto funcionamiento haciendo uso de un multímetro.

- Amplificador operacional:

El amplificador operacional utilizado en la etapa del amplificador de transimpedancia y el filtro paso bajo del prototipo deberá ser el TLV271 de Texas Instruments tal y como se ha especificado en el documento 1 “Memoria”. En caso de no disponer de este amplificador operacional, se permite el uso del TSV911 de STMicroelectronics o similar. Para comprobar su correcto funcionamiento se ha de montar en configuración de Buffer (ganancia unitaria) y, haciendo uso de un osciloscopio, medir la salida para una entrada senoidal de 1 V y 1 kHz. Se ha de obtener una señal de salida igual a la entrada pero que cancele el semiciclo negativo de esta.

- Fotodiodo:

El fotodiodo utilizado como fotodetector del prototipo será el especificado en el documento 1 “Memoria”, siendo este el BPW 21R del fabricante Vishay. Para comprobar que funciona correctamente se ha de realizar el montaje y comprobar que se obtienen resultados similares a los obtenidos en la simulación.

- Convertidor analógico digital:

Se utilizará el ADS1115 del fabricante Texas Instruments o similar para el montaje del prototipo. Para comprobar que funciona correctamente se deberá obtener un valor de 32768 a la salida digital para una entrada analógica de 5.5 V en el caso de utilizar el ADS1115.

- Microcontrolador:

Para el montaje del prototipo se hará uso del microcontrolador Arduino Nano Every exclusivamente debido a que el programa desarrollado para el microcontrolador solo funciona para esta placa. Para comprobar que la placa funciona como es debido se probará el programa “Blink” que proporciona el IDE Arduino y se comprobará que los resultados son los esperados.

- Pantalla LCD:

La pantalla LCD que se utilizará será la Nokia 5110 LCD exclusivamente debido a que el programa desarrollado está diseñado para esta pantalla. Para comprobar su correcto funcionamiento se realizará el montaje del prototipo y se comprobará que la pantalla los mismos resultados a los de la simulación.

- Botones:

Para el montaje del prototipo se hará uso de cuatro interruptores de botón tipo SPST. La marca o modelo no están especificadas siempre que se cumpla con las especificaciones mencionadas.

- Batería de 9 V:

Se utilizará una batería de Cloruro de Tionilo-Litio de 9 V de 1.2 Ah.

3.1.2. Condiciones de ejecución

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de todos los componentes del prototipo, se procederá al montaje del mismo en una placa de pruebas. Una vez realizado el montaje y comprobado que los resultados son los esperados y coinciden con los resultados de la simulación realizada en el documento 1 “Memoria”, se procederá al diseño de una PCB para el prototipo y, posteriormente, se volverá a comprobar que funciona correctamente.

3.2. Condiciones facultativas

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

Correspondientes a la parte contratista:

- Conocer la normativa aplicable.
- Presencia o localización de los responsables o sus representantes durante la ejecución del proyecto.
- Obligación de disponer un documento donde se reflejen las indicaciones, aclaraciones o modificaciones del proyecto.
- Obligación de seguir en todo momento las indicaciones del proyecto y de la dirección facultativa.
- Notificación previa a la iniciación, finalización, realización de pruebas, controles, recepciones o certificaciones del proyecto o de algunas de sus partes.
- Obligación del contratista de reponer todos aquellos materiales o trabajos que no se ajusten a las calidades especificadas en el proyecto.
- Aceptación del director del proyecto como máxima autoridad técnica del proyecto.
- Derecho a recibir los pagos comprometidos en las fechas pactadas.

Correspondiente a la parte de la dirección facultativa:

- Supervisar todos los aspectos del proyecto que puedan afectar a la fiabilidad, calidad y seguridad durante su ejecución.
- Cumplimentar los certificados de dirección exigidos por la normativa vigente o por el pliego de condiciones técnicas.
- Encontrarse presente en los momentos del desarrollo del proyecto que se convenga.
- Asumir la responsabilidad derivada de ser la máxima autoridad técnica en materia de interpretación de las indicaciones dadas en el proyecto.
- Realizar el seguimiento necesario para intentar obligar a la contrata a cumplir los plazos pactados.
- Informar periódicamente al cliente de la marcha de los trabajos y de cuantas contingencias surjan y puedan afectar al coste y prestaciones del sistema.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE LUXÓMETRO BASADO EN FOTODIODO

DOCUMENTO 4. PRESUPUESTO

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

REALIZADO POR

ÁLVARO ALCALÁ GASTALDO

TUTORIZADO POR

ENRIQUE BERJANO ZANÓN

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

En este documento se expone el presupuesto del proyecto donde se muestra la estimación de los costes de ejecución. La tabla 4 muestra aquellos componentes necesarios para la producción del prototipo y el importe de cada uno. En la tabla 5 se presentan los materiales de laboratorio que han sido necesarios alquilar para el desarrollo del proyecto y el importe que esto ha supuesto. La tabla 6 es el resumen del presupuesto, donde se muestra el Presupuesto de Ejecución Material (PEM) y el Presupuesto de ejecución por contrata, en el que se incluyen los gastos generales, el beneficio industrial y el IVA. En la tabla 7 se reúnen los honorarios de la empresa encargada del desarrollo y dirección del proyecto. La tabla 8 muestra el importe total del presupuesto general.

Tabla 4: Componentes.

Componente	Precio/Unidad	Unidades	Subtotal
Amplificador Operacional TLV271IDBVT	0,75 €	1	0,75 €
Fotodiodo BPW 21R	10,64 €	1	10,64 €
Convertidor analógico digital ADS1115IDGST	5,26 €	1	5,26 €
Microcontrolador Arduino Nano Every	9,00 €	1	9,00 €
Pantalla Nokia 5110 LCD	8,90 €	1	8,90 €
Interruptor pulsador	0,57 €	4	2,28 €
Batería 9 V 1.2 Ah	11,77 €	1	11,77 €
Resistencias		4	
Resistencia 39 kΩ	0,151 €	1	0,15 €
Resistencia 10 kΩ	0,01 €	3	0,03 €
Condensador 1.2 μF	1,525 €	1	1,52 €
		Subtotal	50,308 €
Medios auxiliares sobre costes directos	5%		2,51 €
		Total	52,81 €

Tabla 5: Alquiler de equipos de laboratorio.

Concepto	Precio/Unidad	Tiempo	Subtotal
Osciloscopio Tektronix mod. TBS 1072B-EDU	12 €	10 h	120 €
Fuente de alimentación ALTAI mod. HEP-603	6 €	10 h	60 €
Generador de funciones Promax mod. GF-230	6 €	10 h	60 €
Ordenador portátil Mountain Iridium	50 €	5 meses	250 €
Licencia software Proteus Design Suite	5.314,00 €	5 meses	2.214,16 €
		Subtotal	2.704,16 €
Medios auxiliares sobre costes directos	5 %		135,20 €
		Total	2.839,36 €

Tabla 6: Resumen del presupuesto.

Concepto	Importe
Componentes	52,81 €
Alquiler de equipos de laboratorio	2.839,36 €
Presupuesto de ejecución material	2.896,17 €
13 % de gastos generales	376,50 €
6 % de beneficio industrial	173,77 €
Subtotal	3.446,44 €
21 % IVA	723,75 €
Presupuesto de ejecución por contrata	4.170,19 €

Tabla 7: Honorarios de la empresa.

Concepto		Importe
Proyecto	8 % sobre PEM	231,69 €
IVA	21 % sobre Proyecto	48,65 €
Total honorarios de Proyecto		280,34 €
Dirección de Proyecto	10 % sobre PEM	289,61 €
IVA	21 % sobre Dirección de Proyecto	60,82 €
Total honorarios Dirección de Proyecto		350,43 €
Total honorarios de la empresa		1.338,81 €

Tabla 8: Presupuesto general.

Concepto	Importe
Presupuesto de ejecución por contrata	4.170,19 €
Honorarios de la empresa	1.338,81 €
Total presupuesto general	5.509 €

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de CINCO MIL QUINIENTOS NUEVE EUROS (5.509 €).



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE LUXÓMETRO
BASADO EN FOTODIODO**

ANEXO I. CÓDIGO DEL MICROCONTROLADOR

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

REALIZADO POR

ÁLVARO ALCALÁ GASTALDO

TUTORIZADO POR

ENRIQUE BERJANO ZANÓN

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

```
#include "LCD5110_Graph.h"

#include "Wire.h"

#define ads1110 0x48

int pin0 = 0;
int pin1 = 1;
int pin2 = 2;

byte highbyte=0;
byte lowbyte=0;
byte configRegister=0;

LCD5110 myGLCD(8,9,10,11,12);
extern uint8_t SmallFont[];
extern unsigned char TinyFont[];
extern uint8_t BigNumbers[];
extern uint8_t MediumNumbers[];

int data=0;
int value=0;
float voltage=0;
float lux=0;
float fc=0;
float Max=0;
float Min=20000;
float Max_fc=0;
float Min_fc=1858;
float avg=0;
float avg_fc=0;
float i=0;
float x=0;
float a=0;
```

```

float b=0;

volatile int c=0;

volatile float svd=0;

void setup()
{
  pinMode(0,INPUT); //Congelar/Descongelar Valor medido
  pinMode(1,INPUT); //Conversión lx-fc y viceversa
  pinMode(2,INPUT); //Guardar valor medido
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2),save,CHANGE);
  Wire.begin();
  myGLCD.InitLCD();
  myGLCD.clrScr();
  myGLCD.setFont(SmallFont);
  myGLCD.print("LUX METER", CENTER, 20);
  myGLCD.drawRect(14, 18, 70, 28);
  for (int i=0; i<6; i++)
  {
    myGLCD.drawLine(72, 18+(i*2), 83, 18+(i*2));
    myGLCD.drawLine(4, 28-(i*2), 13, 28-(i*2));
    value = value+i;
  }
  myGLCD.setFont(TinyFont);
  myGLCD.print("(C)2020 by", CENTER, 36);
  myGLCD.print("Alvaro Alcala", CENTER, 42);
  myGLCD.update();
  delay(1000);
}

void loop()
{

```

```

if(digitalRead(0)==LOW) { //Congelar/Descongelar Valor medido
myGLCD.clrScr();
ReadSensor(highbyte,lowbyte,configRegister);
myGLCD.printNumI(Min,RIGHT,1);
myGLCD.printNumI(Max,16,1);
myGLCD.printNumI(avg,40,8);
myGLCD.print("lx",77,35);
if(digitalRead(1)==HIGH) {
ConvertValue(lux);
myGLCD.setFont(TinyFont);
myGLCD.printNumI(Min_fc,RIGHT,1);
myGLCD.printNumI(Max_fc,16,1);
myGLCD.printNumI(avg_fc,40,8);
myGLCD.print("fc",77,35);
}
}

myGLCD.setFont(TinyFont);
myGLCD.print("AVG:",24,8);
myGLCD.print("MAX:",LEFT,1);
myGLCD.print("MIN:",48,1);
myGLCD.print("SAVE:",36,43);
myGLCD.printNumI(svd,56,43);
if (c==0){
myGLCD.print("lx",77,43);
}
if (c==1) {
myGLCD.print("fc",77,43);
}
myGLCD.update();
delay(100);
}

```

```

float ReadSensor(byte highbyte,byte lowbyte,byte configRegister) {
  Wire.requestFrom(ads1110, 3);
  highbyte = Wire.read();// high byte * B11111111
  lowbyte = Wire.read();// low byte
  configRegister = Wire.read();
  data = highbyte * 256;
  data = data + lowbyte;
  voltage = data * 2.048;
  voltage = voltage / 32768.0;
  lux = voltage*(20001.0/2.048);
  vmedio_lx(lux);
  max_min_lx(lux);
  myGLCD.setFont(BigNumbers);
  myGLCD.printNumI(lux,CENTER,16);
  myGLCD.setFont(TinyFont);

  return lux;
}

```

```

float ConvertValue(float lux){
  myGLCD.clrScr();
  fc=lux*0.092903039997495;
  vmedio_fc(fc);
  max_min_fc(fc);
  myGLCD.setFont(BigNumbers);
  myGLCD.printNumI(fc,CENTER,16);

  return fc;
}

```

```

void save(){

```



```

if(digitalRead(1) == HIGH){
    svd=fc;
    c=1;
}
else {
    svd=lux;
    c=0;
}
}

```

```

float vmedio_lx (float lux) {
    i++;
    b=b+lux;
    avg=b/i;

    return avg;
}

```

```

float vmedio_fc (float fc) {
    x++;
    a=a+fc;
    avg_fc=a/i;

    return avg_fc;
}

```

```

float max_min_lx (float lux) {
    if (lux>Max){
        Max=lux;
    }
    if (lux<Min) {
        Min=lux;
    }
}

```

```
}  
return Max, Min;  
}  
  
float max_min_fc (float fc) {  
    if (fc>Max_fc){  
        Max_fc=fc;  
    }  
    if (fc<Min_fc) {  
        Min_fc=fc;  
    }  
    return Max_fc, Min_fc;  
}
```