



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Facultad de Ciencias

GRADO EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO
**INDUSTRIALIZACIÓN DE
SISTEMA DE
CARACTERIZACIÓN PARA
LEDs DE AUTOMOCIÓN
SOBRE PCB**

Presentado por:
D. Pablo Hidalgo Rodulfo

Tutor:
Prof. D. Andrés María Roldán Aranda

Curso académico 2020/2021



UNIVERSIDAD DE GRANADA

GRADO EN INGENIERIA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

INDUSTRIALIZACIÓN DE SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN PARA LEDs
DE AUTOMOCIÓN SOBRE PCB

Autor: Pablo Hidalgo Rodulfo

Director: D. Andrés María Roldán Aranda

Departamento: Electrónica y Tecnología de los Computadores

Palabras clave: GranaSAT, Automoción, Luxómetro, Altium Designer, SolidWorks, Electrónica, ESP32, PCB, Diseño.

Resumen:

El principal objetivo de este proyecto es rediseñar un sistema capaz de medir diferentes parámetros referidos a la intensidad luminosa de LEDs de automoción, abarcando todas las fases de desarrollo del sistema, abarcando el proceso de fabricación, el rediseño de la electrónica y de la mecánica del dispositivo, la adaptación del software al nuevo sistema y la elección del hardware.

Se va a desarrollar el producto a partir del prototipo existente en el laboratorio de GranaSAT, el cual fue creado por el antiguo compañero Francisco José Gámez Porcel. Ésta primera versión va a ser rediseñada de cara a una futura industrialización del producto.



UNIVERSIDAD DE GRANADA

GRADO EN INGENIERIA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

INDUSTRIALIZATION OF A CHARACTERIZATION SYSTEM FOR
AUTOMOTIVE LEDs ON PCB

Author: Pablo Hidalgo Rodulfo

Director: D. Andrés María Roldán Aranda

Department: Electronics and Computer Technologies

Keywords: GranaSAT, Vehicle, Headlamp, Luxometer, Altium Designer, SolidWorks, Electronics, ESP32, PCB, Design.

Abstract:

The aim of this document is redesigning a system capable of measuring different parameters referred to the light intensity of automotive LEDs, following all the phases on a product design, manufacturing, electronic redesign and mechanic of the device. Also, choosing the hardware and software adaptation to the new system.

The product is going to be developed based on an initial prototype at GranaSAT laboratory, which was designed by my colleague Francisco José Gámez Porcel. First version of the product is going to be redesigned in order to achieve a futur industrializarion of the product.



UNIVERSIDAD DE GRANADA

GRADO EN INGENIERIA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL


**AUTORIZACIÓN DE LECTURA DE
TRABAJO FIN DE CARRERA**

D. Andrés María Roldán Aranda profesor del Departamento de Electrónica y Tecnología de los Computadores de la Universidad de Granada, como director/es del Trabajo Fin de Grado titulado "Industrialización de sistema de caracterización para LEDs de automoción sobre PCB" y realizado por el alumno D. Pablo Hidalgo Rodulfo

CERTIFICA/N: que el citado Trabajo Fin de Grado, ha sido realizado y redactado por dicho alumno y autorizan su presentación.

Granada,

Fdo. Prof





UNIVERSIDAD DE GRANADA

GRADO EN INGENIERIA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO EN LA BIBLIOTECA

Yo, D. Pablo Hidalgo Rodulfo con DNI 76656270F, autor del Trabajo Fin de Grado titulado “Industrialización de sistema de caracterización para LEDs de automoción sobre PCB” realizado en la Universidad de Granada

DECLARO: explícitamente que asumo la originalidad del trabajo, entendida en el sentido de que no ha utilizado fuentes sin citarlas debidamente.

AUTORIZO: al depósito de dicho Trabajo en la Biblioteca de la Universidad de Granada, y de la visualización a través de Internet.

Granada,

Fdo. D. _____

Agradecimientos:

En primer lugar, quería agradecer a mi familia. A mis padres, por su apoyo incondicional, y a mi hermana, por animarme en los momentos de dificultad.

Por otra parte, en estos meses también han sido fundamentales mis amistades cercanas. Agradezco su cercanía y los buenos momentos, que si bien este año no han sido muchos por las circunstancias, me han ayudado a despejarme y a afrontar con ánimo el día a día.

Asimismo, quería mencionar al excelente grupo de compañeros que he conocido en GranaSAT. Desde el primer momento han sido serviciales y me han ofrecido su ayuda siempre que lo he necesitado. No ha sido sencillo compaginar mi primera experiencia laboral con la realización del proyecto: el tiempo del que disponía para acceder al laboratorio era limitado y en ocasiones, insuficiente. No obstante, la presencia de mis compañeros en los que poder apoyarme ha sido muy importante.

Por último, agradecer a Andrés su tiempo y su ayuda constante, pero sobre todo por la oportunidad que me ha dado de aprender electrónica enfocada al ámbito laboral.

Índice

Autorización Lectura	vii
Autorización Depósito Biblioteca	ix
Resumen	xi
Agradecimientos	xv
Índice	xvii
Lista de Figuras	xxi
Lista de Tablas	xxv
Glosario	xxvii
Acrónimos	xxix
1 Introducción	1
1.1 Motivación	2
1.2 Estado del arte	2
1.2.1 Objetivos	2
1.2.2 Sistemas de iluminación en la industria de la automoción	3
1.2.3 Medición de la luz. Conceptos básicos.	5
1.2.4 Prototipo inicial	7

1.3	Metas del proyecto	9
1.4	Estructura del proyecto	10
2	Requisitos del cliente	13
2.1	Especificaciones mecánicas	14
2.2	Especificaciones de hardware	14
2.3	Especificaciones de software	15
3	Rediseño mecánico	17
4	Rediseño electrónico	21
4.1	Diseño de los subsistemas	21
4.1.1	Microcontrolador	21
4.1.2	Alimentación del dispositivo	23
4.1.2.1	Conector MicroUSB	23
4.1.2.2	Carga de la batería	23
4.1.2.3	Nivel de la batería	25
4.1.3	USB a Puerto Serial	25
4.1.4	Bus I2C	26
4.1.4.1	RTC	27
4.1.4.2	Sensor de luz	29
4.1.5	Interfaz con el usuario	31
4.1.5.1	LCD NOKIA 5110	31
4.1.5.2	Botón rotatorio	32
4.1.5.3	Buzzer	34
4.1.6	Memoria	34
4.1.7	Convertidor reductor	36
4.1.8	Consumo total del sistema	37
4.1.9	Batería	38

4.1.10	Sistema de encendido y apagado	39
4.2	Diseño de la PCB	43
5	Verificación del diseño	47
6	Fabricación de la PCB	49
6.1	Fabricación en el laboratorio	49
6.2	Fabricación por proveedor externo	51
6.3	Resultado final	53
7	Adaptación del software	55
7.1	Envío de las mediciones vía WiFi	56
7.2	Sistema de encendido y apagado	56
7.3	Nivel de la batería	57
7.4	Diagrama de flujo del funcionamiento	58
8	Conclusión y siguientes pasos	59
9	Presupuesto	61
9.1	Coste material	61
9.2	Coste de mano de obra e infraestructuras	62
9.3	Coste de programas y licencias	62
	Referencias	63

Lista de Figuras

1.1	Logo de GranaSAT	2
1.2	Prototipo inicial del producto [1]	3
1.3	Producción de faros delanteros de automoción [6]	4
1.4	Sistema de iluminación LED [6]	4
1.5	Faros delanteros de automóvil con tecnología LED [6]	5
1.6	Ley de la Inversa del Cuadrado	6
1.7	Ley del Coseno de Lambert [7]	7
1.8	Pieza que alberga los sensores [1]	7
1.9	Piezas del manipulador [1]	8
1.10	Manipulador completo [1]	8
1.11	Mando del prototipo inicial [1]	9
1.12	Diagrama de Gantt del proyecto	11
3.1	Modelo de carcasa 1591XXBBK del fabricante Hammond Manufacturing [8]	17
3.2	SolidWorks 2021	18
3.3	Modelo 3D de la carcasa en SolidWorks	19
3.4	Máximas dimensiones de la PCB dentro de la caja [8]	19
3.5	Carcasa 1591XXBBK abierta [8]	20
4.1	Altium Designer 19	21
4.2	ESP32-WROVER-E [4]	22

4.3	Arduino Mega 2500	22
4.4	Conector MicroUSB tipo B 47346-0001	23
4.5	Circuito del módulo de carga completo	24
4.6	Integrado CH340C para conversión USB-UART	25
4.7	Pines del integrado CH340C [?]	26
4.8	Integrado MCP7940N de MicroChip	27
4.9	Circuito completo para el RTC	28
4.10	Modelo del oscilador escogido	28
4.11	Expresión para cálculo de condensadores de carga	28
4.12	Sensor TSL2561	30
4.13	Conector Minidin de 6 pines	30
4.14	Pantalla OLED de Adafruit Industries	32
4.15	Pantalla LCD Nokia 5110	32
4.16	Esquema de funcionamiento de botón rotatorio	33
4.17	Botón rotatorio del fabricante ALPS ALPINE	34
4.18	Buzzer KXG1205	34
4.19	Conector MicroSD de Molex	34
4.20	Funcionamiento del bus de comunicación SPI	35
4.21	Convertidor reductor AP3429/A	36
4.22	Aplicación típica del convertidor reductor AP3429/A	37
4.23	Expresión del divisor de tensión para fijar resistencias R ₁ y R ₂	37
4.24	Consumo de potencia del sistema completo	38
4.25	Batería LiPo 3,7V [3]	39
4.26	Circuito para el sistema de encendido y apagado	39
4.27	Circuito simulado en LTSPICE	40
4.28	Ilustración de las reglas de diseño	43
4.29	Vista superior de la PCB	44
4.30	Vista inferior de la PCB	44

4.31	Vista perspectiva de la PCB	45
5.1	Vista del ensamblaje abierto	47
5.2	Vista del ensamblaje final en SolidWorks	48
5.3	Sección del diseño en SolidWorks	48
6.1	Previsualización PCB en CircuitCAM	49
6.2	Máquina CNC del laboratorio GranaSAT	50
6.3	Máquina CNC fabricando la PCB	50
6.4	Vista superior PCB fabricada en GranaSAT	51
6.5	Vista inferior PCB fabricada en GranaSAT	51
6.6	Logo fabricante JLCPCB	52
6.7	Vista superior PCB fabricada por JLCPCB	52
6.8	Vista inferior PCB fabricada por JLCPCB	52
6.9	Vista superior de la PCB final	53
6.10	Vista inferior de la PCB final	54
7.1	Diagrama de flujo del funcionamiento	58

Lista de Tablas

1.1	Metas del proyecto	9
2.1	Requisitos generales del cliente	13
3.1	Comparativa carcasa prototipo inicial y actual	18
4.1	Comparativa microcontrolador inicial y actual	22
4.2	Propiedades del controlador de carga TP4056	24
4.3	Comparativa de sensores de luz	31
4.4	Propiedades convertidor reductor AP3429/A	36
4.5	Reglas de diseño de la PCB	43

Glosario

0603 Tamaño de dispositivo 0603 mils (2013 métrico): 0.06" × 0.03" (1.5 mm × 0.08 mm). Empleado para resistencias de potencia típica de 1/16 W.

0805 Tamaño de dispositivo 0805 mils (2013 métrico): 0.08" × 0.05" (2.0 mm × 1.25 mm). Empleado para resistencias de potencia típica de 1/10 o 1/8 W.

Altium Designer® 19 software EDA utilizado para el diseño de PCB a partir de esquemáticos. Permite diseño 3D así como simulaciones electrónicas.

Grado de protección IP Estándar definido para el grado de protección frente a polvo y agua del equipamiento eléctrico o electrónico de uso industrial. El primer dígito numérico describe el nivel de protección ante polvo y el segundo el nivel de protección frente a líquidos, normalmente agua.

GranaSAT Es un laboratorio en el que llevan a cabo proyectos multidisciplinarios de estudiantes de distintos grados, donde pueden adquirir y ampliar sus conocimientos. Está coordinado por el profesor Andrés María Roldán Aranda.

LTSPICE Es un software de simulación de circuitos electrónicos analógicos basado en SPICE, producido por el fabricante de semiconductores Analog Devices. Es el software SPICE más ampliamente distribuido y utilizado en la industria..

Sensor En el contexto de este proyecto, se considera un sensor a todo aquel dispositivo capaz de medir el valor de la intensidad luminosa que desprende un LED en un instante concreto.

SolidWorks® Software CAD desarrollado por Dessault Systèmes utilizado para el diseño mecánico 3D.

Stencil Lámina de acero inoxidable en la que hay varias aperturas para cada SMD de la placa. Una vez que está alineado con la PCB, se usa para transferirle la pasta de soldadura.

Acrónimos

EDA Electronic Design Automation.

EEPROM Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory.

GPIO General Purpose Input Output.

HTML HyperText Markup Language.

I²C Inter-Integrated Circuit.

IP Internet Protocol.

LCD Liquid Crystal Display.

LED Light-Emitting Diode.

MOSFET Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor.

OLED Organic Light Emitting Diode.

PCB Printed Circuit Board.

RTC Real Time Clock.

SCL Serial CLock Line.

SDA Serial Data Line.

SMD Surface Mount Devices.

SOT Small Outline Transistor.

SPI Serial Peripheral Interface.

SPICE Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis.

SSID Service Set Identifier.

THT Through-Hole Technology.

UART Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.

WiFi Wireless Fidelity.

Capítulo 1

Introducción

Este Trabajo de Fin de Grado es una muestra de los conocimientos adquiridos durante los años del Grado y, especialmente, durante estos últimos meses con la realización del proyecto. Éste trata de mostrar el proceso de ingeniería que hay detrás del diseño y desarrollo de un producto. Concretamente, se parte de un primer prototipo anterior creado por el antiguo compañero Francisco José Gámez Porcel, en el laboratorio de [GranaSAT](#). A partir de dicha base, se estudia todas las mejoras y adaptaciones posibles tanto en la funcionalidad como en el diseño electrónico y de hardware.

Para ello, se ha tratado de seguir una metodología concreta, centrada principalmente en reducir las dimensiones y el coste, a la misma vez que se mejoran las prestaciones del producto.

Para llevar un orden, el proyecto ha sido desarrollado respetando las diferentes etapas dentro de del proceso de diseño: en primer lugar, se ha estudiado el prototipo inicial, para seguidamente reflexionar sobre las nuevas funcionalidades a implantar. Posteriormente, se ha realizado el rediseño electrónico paralelamente al del hardware y finalmente, se ha concluido con la adaptación del software y el montaje mecánico. Este documento respeta dicho orden temporal, lo cual permite al lector comprenderlo con facilidad.

Este Trabajo de Fin de Grado ha sido realizado en el laboratorio de [GranaSAT](#), un lugar en el que coinciden estudiantes universitarios de distintas áreas de la dispuestos a ampliar su formación, dentro de la Ingeniería Electrónica y Aeroespacial.



Figura 1.1 – Logo de *GranaSAT*

1.1 Motivación

El siguiente Trabajo de Fin de Grado concluye los estudios del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial en la Universidad de Granada. Para mí, realizar este proyecto, además del interés que de por sí me genera, ha sido una muestra del aprendizaje durante estos años de duro trabajo.

Personalmente, me ha servido para aprender desde un punto de vista diferente a estos años atrás, me ha hecho empezar a pensar desde un enfoque más profesional que académico.

Sin embargo, lo que más me ha atraído del proyecto, sin ninguna duda, es el poder tocar distintos campos como son el diseño del circuito impreso, la electrónica, la programación, el diseño y la fabricación de un producto... y todo ello aprendiendo a utilizar programas que son realmente útiles en el ámbito profesional.

1.2 Estado del arte

1.2.1 Objetivos

El importante crecimiento del sector del automóvil y de los dispositivos que se usan en él, hizo pensar que sería una buena idea trabajar en un dispositivo dentro de este área. En esta línea se comenzó a desarrollar en 2019 un primer sistema capaz de medir la intensidad luminosa en LEDs de automoción. Este primer prototipo, llevado a cabo por el antiguo compañero Francisco José Gámez Porcel, está compuesto por dos dispositivos conectados entre sí: un manipulador utilizado para medir la intensidad luminosa y un mando que permite al cliente interactuar con él.



Figura 1.2 – *Prototipo inicial del producto [1]*

Partiendo de esta base, se ha estudiado en profundidad el funcionamiento de dicho dispositivo, los aspectos a mejorar, y se ha realizado un rediseño del mando, enfocado a una futura producción del producto.

1.2.2 Sistemas de iluminación en la industria de la automoción

Hoy en día, se está observando una importante evolución en el sector de la automoción. Esto implica la integración de las últimas tecnologías en términos de seguridad, innovación y eficiencia. En cuanto a los sistemas de iluminación en el automóvil, la fuente de luz más usada es la tecnología LED, debido a su tamaño, capacidad y eficiencia. Este tipo de iluminación permite a los distintos fabricantes crear diseños capaces de dividir un área iluminada en diferentes secciones, tal y como se logra con la tecnología MatrixLED. Ésta última requiere que todos los LEDs posean la mismas propiedades de iluminación para no deformar el área iluminada. Para ello, durante su desarrollo se utilizan diferentes sensores capaces de medir la iluminación, simulando la respuesta del ojo humano a dichas fuentes de luz. El manípulo diseñado en el primer prototipo está compuesto por 5 sensores, habiendo seguido un proceso de caracterización y calibración, recomendables para conseguir una mejor aproximación a las características de iluminación reales de cada [LED](#).



Figura 1.3 – Producción de faros delanteros de automoción [6]

No obstante, el sistema de iluminación en esta industria no ha sido siempre la tecnología LED. De hecho, los primeros vehículos tenían la misma capacidad luminosa que una vela, como era el caso del Cadillac de 1905. Posteriormente, aparecieron las conocidas bombillas incandescentes, las cuales generaban una iluminación considerablemente baja. Más adelante, llegaron las primeras luces intermitentes en 1939, empezando a ser consideradas una parte importante del automóvil. En 1962 aparecieron las bombillas halógenas, las cuales ofrecían una mayor iluminación que las incandescentes, con un mismo consumo de potencia. Al mismo tiempo, surgieron las primeras luces traseras en EEUU, aunque no fue hasta 1980 cuando su uso comenzó a incrementarse.

En 1991 se abrieron nuevos horizontes en los sistemas de iluminación de los automóviles con la aparición de las luces de Xenón. El flujo luminoso de estas últimas eran significativamente superior al de todas las anteriores, en torno a los 3000lm en lugar de 1000lm. El rango de visibilidad se incrementó a 125m en las luces de cruce y a 250m en las luces de largo alcance. En definitiva, todo esto significó un avance importante en las condiciones de seguridad, especialmente en la conducción nocturna.



Figura 1.4 – Sistema de iluminación LED [6]

Por último, apareció la tecnología actual, las luces LEDs, con las que se ha conseguido mejorar los sistemas de iluminación con un reducido consumo de potencia, unas bajas pérdidas por calor, una mayor vida útil y una iluminación con más brillo y nitidez. Esta tecnología ofrece un mayor campo visual respecto a las luces de Xenón y en situaciones de lluvia o niebla, se producen menores deslumbramientos. Una de las principales características principales de las luces LEDs es que no requieren mantenimiento y están diseñadas para tener la misma vida útil que el automóvil.



Figura 1.5 – Faros delanteros de automóvil con tecnología LED [6]

A partir del sistema de iluminación LED convencional, se ha desarrollado la tecnología MatrixLED en los faros delanteros. Dicha tecnología produce las luces de largo alcance con pequeños diodos emisores de luz agrupados en lentes. El principal objetivo de estos faros es iluminar la carretera correctamente sin cegar a otros conductores. Ésta tecnología ha derivado en una variante, conocida por Pixel LED, que goza al sistema de iluminación de una mayor resolución en la luz emitida.

1.2.3 Medición de la luz. Conceptos básicos.

La misión principal del dispositivo es la de medir parámetros relacionados con la intensidad luminosa en los sistemas de iluminación LEDs de automoción. Para ello, es necesario hacer una introducción previa a los conceptos básicos relacionados con la intensidad luminosa.

La luz es solamente una porción de las distintas ondas electromagnéticas que circulan por el espacio. El espectro electromagnético cubre un amplio rango, abarcando desde ondas de radio, con un metro de longitud de onda, hasta rayos X, con menos de un billón de metros de longitud de onda. La radiación óptica se encuentra entre estas longitudes de onda.

La fotometría es la ciencia que se encarga de medir dicha radiación, la cual es percibida por el ojo humano, mientras que la radiometría mide toda la radiación electromagnética, incluyendo la radiación óptica.

En radiometría, la **irradiancia** se define como la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie. Su unidad en el SI es el vatio por metro cuadrado (W/m^2).

Para medir esta magnitud hay que tener en cuenta la influencia de la distancia. Para ello, la **Ley de la Inversa del Cuadrado** define la relación entre la irradiancia desde una fuente puntual y la distancia. Establece que la intensidad por unidad de área es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. [7]

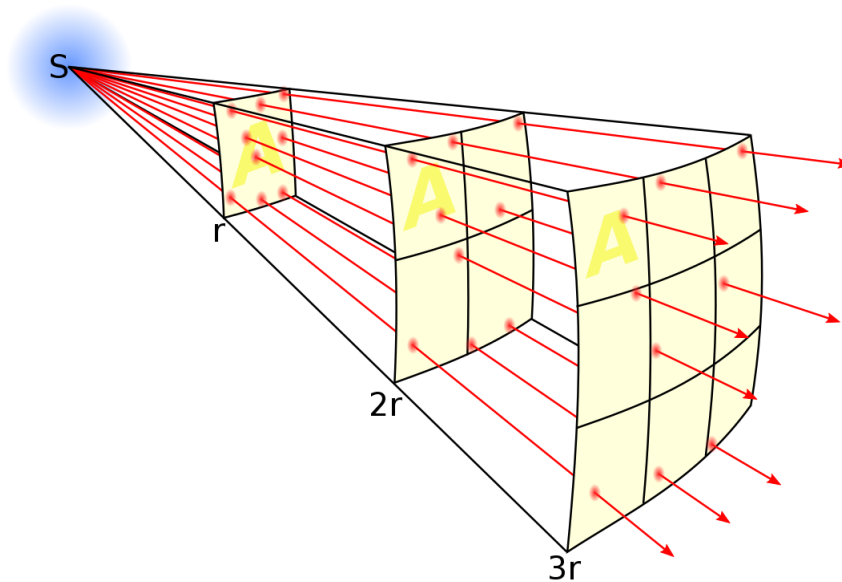


Figura 1.6 – Ley de la Inversa del Cuadrado

Concretamente, se rige por la siguiente expresión donde E representa la irradiancia en W/m^2 , mientras que I corresponde a la intensidad luminosa y d^2 al cuadrado de la distancia desde la fuente hasta la superficie iluminada:

$$E = \frac{I}{d^2}$$

Por otra parte, para abordar correctamente el término de la irradiancia también hay que tener en cuenta la influencia del ángulo de incidencia en la superficie. La **Ley del**

Coseno de Lambert establece que la cantidad de flujo incidente en una superficie varía en función del ángulo de incidencia. Como se puede observar en la siguiente imagen, cuanto mayor es dicho ángulo, menor será la cantidad radiación incidente:

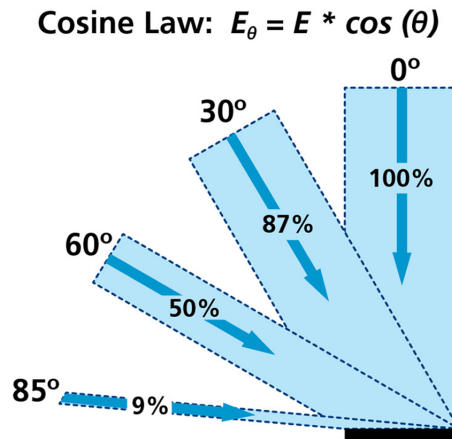


Figura 1.7 – Ley del Coseno de Lambert [7]

1.2.4 Prototipo inicial

En definitiva, el primer prototipo del manipulador, realizado por Francisco José Gámez Porcel, se apoyó en esta base teórica para poder alcanzar un diseño fiable. Se llevó a cabo un análisis y caracterización del sensor utilizado, concretamente el TSL2561. A partir de ahí, se desarrolló el prototipo del manipulador que alberga 5 sensores distribuidos en el interior del manipulador teniendo en cuenta tanto la distancia desde la fuente puntual, en este caso un LED, y el ángulo de incidencia.

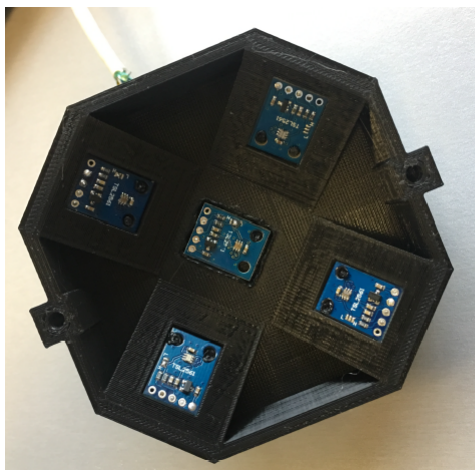


Figura 1.8 – Pieza que alberga los sensores [1]

En la imagen anterior se puede observar la disposición de los sensores en el interior del manipulador. Concretamente, se sitúa un sensor a una distancia de 6 cm del LED, con un ángulo de incidencia de 0° , por tanto, como se ha explicado con anterioridad, la radiación incidente será máxima. Los otros 4 sensores están ubicados en torno al sensor anterior, con una inclinación de 60° respecto a la irradiación incidente.

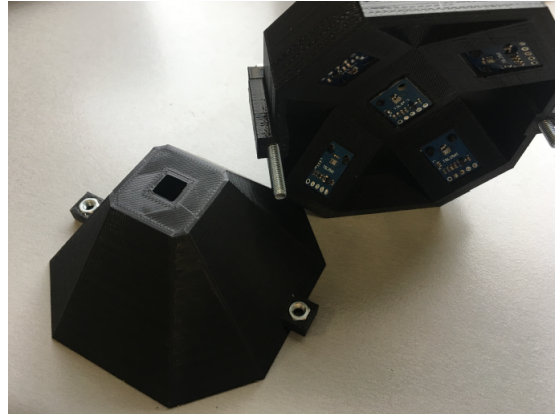


Figura 1.9 – Piezas del manipulador [1]

El manipulador está diseñado de tal forma que en su interior, donde se encuentran los sensores, se alcance la oscuridad necesaria para poder obtener mediciones sin alteraciones ocasionadas por la luz exterior. Como se puede apreciar en la imagen anterior, las dos piezas van atornilladas dejando el hueco suficiente para que favorezca la entrada de toda la radiación incidente procedente del LED.

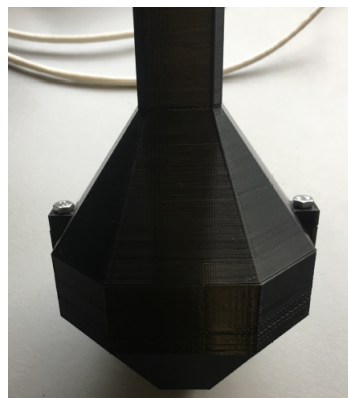


Figura 1.10 – Manipulador completo [1]

Por otra parte, se diseñó también un primer prototipo del mando que permite la interacción con el cliente. Éste va conectado por cable al manipulador, recibiendo por él la información procedente de los sensores. Dicho prototipo inicial va a ser rediseñado para

conseguir mejorar sus prestaciones de cara a una industrialización del producto.



Figura 1.11 – Mando del prototipo inicial [1]

1.3 Metas del proyecto

Tras haber introducido el objetivo principal de este Trabajo de Fin De Grado, este capítulo describe las principales metas no técnicas del proyecto a nivel personal. En la siguiente tabla se muestra el listado de resultados esperados por el autor al realizar este proyecto, desde el punto de vista académico y profesional.

Ref.	Objetivo
Obj.1	Integrarse en un entorno de trabajo, el laboratorio de GranaSAT, en el que ampliar la formación del Grado.
Obj.2	Familiarizarse con programas de uso profesional, concretamente para el diseño de circuitos integrados, en Altium Designer y para el diseño mecánico, en Solidworks.
Obj.3	Desarrollar con claridad la suficiente documentación del proceso completo, la cual puede ser necesaria durante el mismo proyecto o simplemente útil para futuros diseños.
Obj.4	Ganar experiencia en la realización de proyectos y, especialmente, aprender a gestionar los distintos problemas y complicaciones que pueden surgir durante un proyecto.
Obj.5	Demostrar todos los conocimientos adquiridos durante los años del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial.
Obj.6	Realizar el Trabajo de Fin de Grado satisfactoriamente.

Tabla 1.1 – Metas del proyecto

1.4 Estructura del proyecto

1

Este proyecto, dividido en seis capítulos y un apéndice, analiza progresivamente el sistema desarrollado desde diferentes puntos de vista. Estos capítulos son los siguientes: This project, divided into six chapters and an addendum, progressively analyzes the system under development from different points of view, addresses the design tasks and finalizes with the successful completion of the product.

- **Capítulo 1.** Este capítulo tiene la función de introducir y de mostrar los objetivos generales y los motivos que han llevado a abarcar este proyecto. En este apartado también está incluido el estado del arte, así como una pequeña introducción al método de ingeniería seguido durante el desarrollo del producto y al prototipo inicial del producto, que sirve como punto de partida del proyecto.
- **Capítulo 2.** El segundo capítulo se centra en describir detalladamente los requisitos necesarios que deben cumplir el producto a desarrollar, tanto a nivel mecánico, como a nivel de software y hardware.
- **Capítulo 3.** A continuación, se comienza la fase de rediseño del producto. Concretamente, se parte del rediseño del hardware del mando de interacción con el cliente, con lo cual el resto del diseño debe cumplir las limitaciones físicas del hardware escogido.
- **Capítulo 4.** El cuarto capítulo trata sobre el rediseño electrónico, teniendo que cumplir con los requisitos que se habrán expuesto con anterioridad en los capítulos anteriores. Este rediseño electrónico tiene como objetivo mejorar las prestaciones del producto además de añadir nuevas funcionalidades al primer prototipo. Para ello, se realiza una nueva elección de componentes además de una adaptación de los circuitos electrónicos para cumplir con todas las nuevas funcionalidades del producto.
- **Capítulo 5.** A continuación, se realiza una verificación del diseño y se comprueba con detalle que el diseño mecánico cuadra con el diseño electrónico realizado.
- **Capítulo 6.** Una vez se ha verificado el diseño, el siguiente paso será fabricar la PCB y soldar todos los componentes. En este capítulo se encaran dicho proceso de fabricación con detalle, diferenciando entre la fabricación en el laboratorio de GranaSAT y la fabricación por un proveedor externo. Posteriormente, se desarrolla el proceso de soldar los componentes en la placa de circuito impreso, acción realizada también en el laboratorio.
- **Capítulo 7.** Este capítulo se encarga de explicar toda la adaptación de software realizada, partiendo de la programación del primer prototipo.
- **Capítulo 8.** Finalmente, este capítulo incluye las principales conclusiones extraídas del Trabajo de Fin de Grado, así como algunos futuros pasos a dar a partir del proyecto desarrollado.
- **Capítulo 9,** en el cual se detalla el presupuesto y el coste asociado al proyecto.

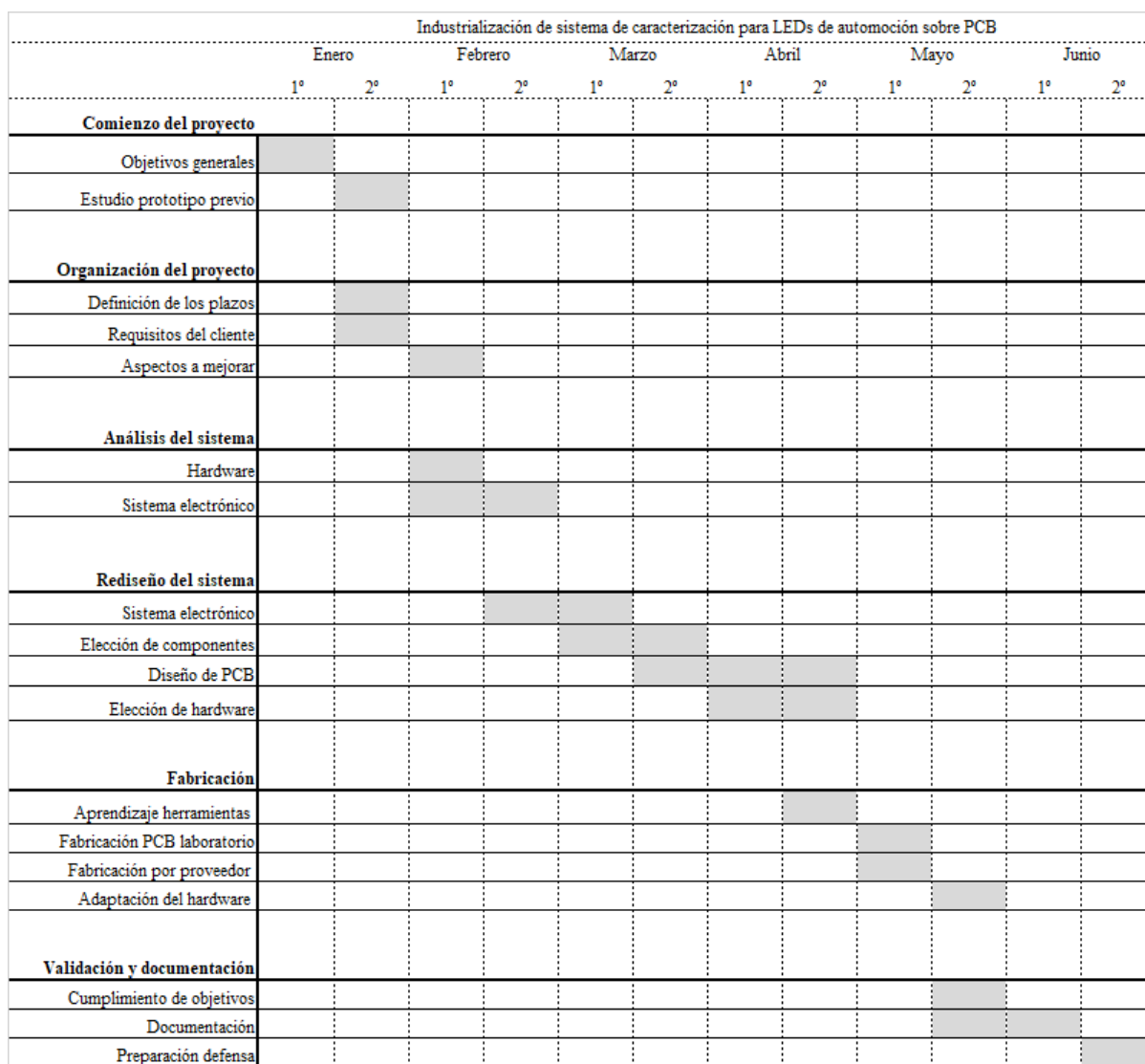


Figura 1.12 – Diagrama de Gantt del proyecto

1

Capítulo 2

Requisitos del cliente

La primera versión del producto es el punto de partida: se van a realizar mejoras sobre dicho dispositivo de tal forma que tenga una fácil incorporación en un ámbito profesional.

Por otra parte, cabe destacar que la empresa multinacional Valeo ha suministrado los LEDs de automoción, imprescindibles para la calibración del dispositivo.

Partiendo de la versión anterior y después de analizar en profundidad el uso que se le dará al producto, se ha confeccionado la siguiente tabla de requisitos principales del cliente:

Ref.	Requisitos generales
Obj.1	En primer lugar, el producto debe ser portátil, algo que ya cumple el prototipo inicial, y ligero, por lo que se adaptará considerablemente en tamaño y peso.
Obj.2	Debe tener un bajo consumo.
Obj.3	Debe ser intuitivo.
Obj.4	Los datos medidos pueden ser guardados.
Obj.5	Debe utilizarse un cargador convencional para la recarga de la batería del dispositivo.
Obj.6	El producto debe ser cómodo de usar.
Obj.7	No debe requerir demasiada preparación para usarse.
Obj.8	Las mediciones realizadas deben estar accesibles por PC.

Tabla 2.1 – *Requisitos generales del cliente*

A continuación, se van a detallar los requisitos del sistema, distinguiendo entre tres tipos de especificaciones: mecánicas, de hardware y de software.

2.1 Especificaciones mecánicas

Dentro de las necesidades mecánicas, tenemos en cuenta todo lo relacionado con la estructura externa del producto, protección y forma mecánica del sistema, el cual está compuesto por dos subsistemas. A continuación, se expone un listado con los requisitos mecánicos a tener en cuenta:

- Se debe rediseñar el sistema principal que albergará el procesador, batería y otros elementos relacionados con el procesamiento de datos. Por otra parte, se encuentra el segundo sistema, el manípulo creado en el prototipo anterior, que posee los sensores de luz en su interior.
- Los dos sistemas anteriores deben poder ser agarrados con una sola mano para facilitar su uso en situaciones de poco espacio, lo cual ya se logró en el primer prototipo. No obstante, el rediseño del sistema principal va a brindar al producto una mayor manejabilidad, en cuanto a una reducción de tamaño y peso.
- El sistema principal debe estar protegido por una carcasa resistente a golpes y al polvo.
- El sistema debe ser lo suficientemente ergonómico para poder ser utilizado por una sola persona: con una mano se sostiene el dispositivo y con la otra se interactúa con él.
- El sistema principal debe tener una pantalla para mostrar las mediciones de datos que se van realizando a tiempo real.
- Asimismo, el dispositivo deberá poseer un botón para que el cliente pueda interactuar con el sistema.

2.2 Especificaciones de hardware

A continuación, se expone el listado de requisitos de hardware para cumplir con las necesidades del cliente:

- El sistema debe poseer una pantalla para mostrar los datos.
- El dispositivo se controla por medio de un botón.

- Para guardar las mediciones será necesario un sistema de memoria microSD. Además, las mediciones también serán accesibles por PC vía WiFi.
- Para poder desconectar el sistema principal del sistema que alberga los sensores, serán necesarios dos conectores, uno macho y otro hembra.
- Para ser un sistema portátil, será necesaria una batería para alimentarlo.
- Al introducir una batería, habrá que incluir un sistema de carga y otro para adaptar la tensión de la batería a la tensión a la que trabaja el sistema.
- El sistema estará controlado por un procesador, en nuestro caso, un microcontrolador implementado en la PCB.
- El dispositivo albergará los sensores en su interior y necesitará más de un sensor para obtener mediciones fiables.
- Se deberá incorporar un dispositivo capaz de proporcionar al sistema la fecha y hora en todo momento.

2.3 Especificaciones de software

Para controlar todo el hardware que posee nuestro producto, necesitaremos que el software cumpla las siguientes pautas:

- El programa debe estar correctamente ordenado en menús.
- Hay que tener en cuenta el uso que se le dará al producto, ya que se diseñará una máquina de estados acorde a su uso.
- Se ajustarán todos los parámetros de los sensores para explotar todas sus funcionalidades. Esta tarea fue llevada a cabo en el primer prototipo, gracias al análisis y caracterización del sensor.
- Se programará un sistema para guardar las mediciones en la memoria microSD, con sus fechas y horas correspondientes.
- Asimismo, se programará otro sistema para que todas las mediciones sean accesibles via WiFi en el PC.

2

Capítulo 3

Rediseño mecánico

Este capítulo ocupa la primera fase relacionada con la adaptación del sistema principal, a partir del prototipo inicial. Lo primero al comenzar un diseño de este tipo es escoger la forma externa del producto, decidir las dimensiones, el material... En definitiva, escoger la carcasa del mando y ésta será el elemento principal que restringirá el resto de elementos del sistema, los cuales deberán adaptarse a sus propiedades. Es una parte especialmente importante dentro del diseño, ya que es una decisión sobre la imagen que da el producto al exterior.

Tras analizar diferentes modelos de carcasas de distintos fabricantes y teniendo en cuenta los puntos con los que debe cumplir, se decide escoger inicialmente el modelo 1591XXBBK del fabricante Hammond Manufacturing. Más información del modelo elegido en el Apéndice.



Figura 3.1 – Modelo de carcasa 1591XXBBK del fabricante Hammond Manufacturing [8]

	Prototipo inicial	Prototipo final
Peso	81,2 g	63,5 g
Dimensiones	113 mm x 85 mm x 43 mm	113 mm x 63 mm x 31 mm
Material	Plástico ABS	Plástico ABS
Grado de protección	IP54	IP54

Tabla 3.1 – Comparativa carcasa prototipo inicial y actual

Es necesario destacar las diferencias entre las características de la carcasa escogida respecto a la del prototipo inicial. Para conseguir lograr una adaptación satisfactoria del producto para un futuro uso del mismo, es necesario reducir sus dimensiones y su peso a unas medidas razonables para una cómoda utilización cotidiana por parte del cliente.

En la tabla anterior se exponen las principales diferencias entre los modelos de las carcasas. El modelo escogido cumple el objetivo de reducir en cuanto a tamaño y peso respecto del modelo original. El material ABS es resistente a golpes y es óptimo para la función que va a desempeñar y posee un **Grado de protección IP 54** frente a agua y polvo suficiente para uso industrial.

Más adelante, se exportarán tanto el modelo de la carcasa como el resto de componentes del mando a un mismo programa mecánico, con el objetivo de unificar las distintas partes del diseño y verificar que cuadra con las restricciones físicas impuestas por la carcasa. Para ello, se utilizará el programa de modelado mecánico SolidWorks 2021®.



Figura 3.2 – SolidWorks 2021

Para ello, a partir de la WEB del fabricante se ha descargado el modelo 3D de la caja 1591XXBBK. Se muestra en la siguiente imagen:

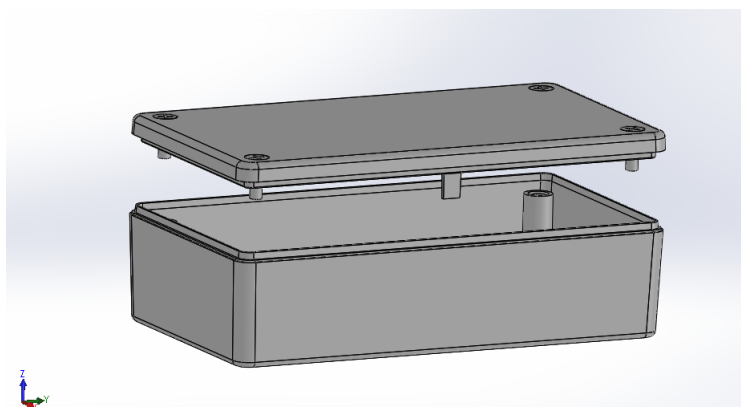


Figura 3.3 – Modelo 3D de la carcasa en SolidWorks

En el siguiente capítulo, se realizará el diseño electrónico sobre una placa de circuito impreso. Ésta deberá tener unas dimensiones máximas limitadas por la propia carcasa. Además, al haber escogido una carcasa de menores dimensiones a la inicial, inevitablemente las dimensiones de la PCB también deberán reducirse notablemente reducidas, por lo tanto, será especialmente importante realizar un rediseño de la PCB y una elección de los componentes coherente, para evitar problemas.

Como se puede observar en la siguiente imagen extraída del datasheet del fabricante, las medidas máximas de la placa de circuito impreso son las siguientes y serán utilizadas posteriormente para establecer las dimensiones y los agujeros de la PCB necesarios para fijarla en el interior de la carcasa.

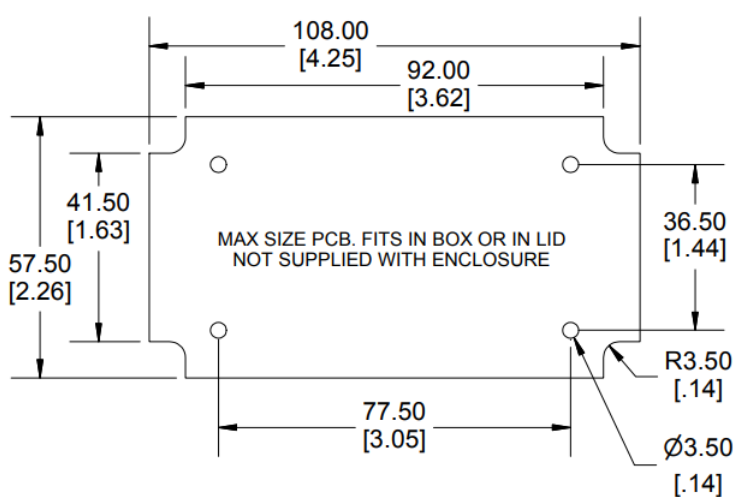


Figura 3.4 – Máximas dimensiones de la PCB dentro de la caja [8]

En la imagen siguiente se puede apreciar las hendiduras existentes en el interior de la caja, con el propósito de atornillar la PCB en su interior. Para ello, en el datasheet aconsejan la realización de las perforaciones con dimensiones de tornillo M3. Además, se deberán realizar las perforaciones necesarias para dar salida a los conectores y la pantalla existentes en el interior de la caja.



Figura 3.5 – *Carcasa 1591XXBBK abierta [8]*

Por último, se ha reflexionado en la forma de atornillar la PCB en la carcasa: se ha optado por utilizar torretas M3x15 de nylon y tuercas para sostener la PCB a la altura deseada. No obstante, todo el proceso de adaptación de la caja será desarrollado en profundidad en el apartado 5. Verificación del diseño y adaptaciones.

Capítulo 4

Rediseño electrónico

Tras haber definido el diseño mecánico del sistema, este cuarto capítulo abarca toda la fase de diseño de la electrónica del dispositivo: desde la elección de los componentes, hasta el desarrollo de cada subsistema y el diseño de la PCB. Para ello, se utilizará el programa Altium Designer 19®.



Figura 4.1 – Altium Designer 19

4.1 Diseño de los subsistemas

A la hora de escoger los componentes, hay que tener en cuenta su empaquetado de cara a las fases de diseño de la PCB y de fabricación. Además, hay que escoger componentes comerciales y elegir los proveedores que los suministren en unos tiempos razonables, para poder industrializar el producto en un futuro. Para este proyecto en particular, los proveedores serán RS Amidata, Farnell y Mouser Electronics.

4.1.1 Microcontrolador

El microcontrolador escogido es el ESP32 de la familia Espressif Systems. Concretamente, el modelo escogido es el módulo ESP32-WROVER-E. Esta familia de



Figura 4.2 – ESP32-WROVER-E [4]

microcontroladores destaca principalmente por su bajo costo y consumo de energía.

El prototipo inicial utilizaba la placa de desarrollo Arduino Mega 2560 basada en el microcontrolador ATmega2560.

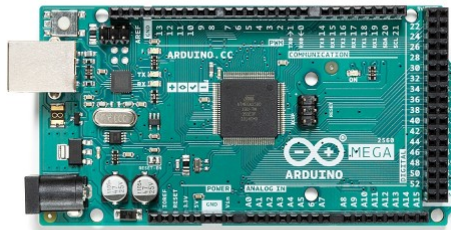


Figura 4.3 – Arduino Mega 2500

En la siguiente tabla, se ha llevado a cabo la comparación de las prestaciones de los dos microcontroladores para mostrar los motivos que nos han llevado a decantarnos por ese cambio. Como se puede observar en la tabla, el ESP32 mejora significativamente las prestaciones del microcontrolador anterior además de tener un precio menor. Asimismo, de cara a una futura industrialización del producto, es menos práctico incluir una placa de Arduino Mega 2500 no integrada a la PCB, además de que complica el objetivo de conseguir un diseño de pequeñas dimensiones.

	ATmega2560	ESP32-WROVER-E
Tensión de funcionamiento	5V	3 - 3.6V
Pines digitales	54	24
Pines analógicos	15	16
Max corriente por pin	40mA	40mA
Memoria Flash	256KB	4MB
EEPROM	8KB	4KB
Max Freq Reloj	16MHz	160MHz
Precio actual	15,52€	4,54€

Tabla 4.1 – Comparativa microcontrolador inicial y actual

Otro de los principales motivos por los que se ha optado por el módulo ESP32-WROVER-E es su integración WiFi, y dentro de los microcontroladores ESP32, se ha escogido dicho módulo por presentar un mayor número de pines GPIO de entrada/salida respecto a otros conocidos como el ESP32-WROOM. Cabe destacar la presencia de dos cores ESP32-DoWD-V3 respecto a otros microcontroladores, si bien no se le da uso para esta aplicación concreta .

4.1.2 Alimentación del dispositivo

En este apartado, se va a tratar todo lo relacionado con la alimentación del dispositivo, así como su adaptación para que funcione correctamente.

4.1.2.1 Conector MicroUSB

En primer lugar, se va a decidir cómo alimentar el dispositivo. Para ello, se va a utilizar una batería, la cual se recargará a través de un conector MicroUSB tipo B. Éste también se utilizará para cargar el programa en el microcontrolador.

El conector escogido es el modelo 47346-0001 del fabricante Molex. Permite una corriente máxima de 1A para los pines de señales y de 1,8A para los pines de alimentación.



Figura 4.4 – Conector MicroUSB tipo B 47346-0001

4.1.2.2 Carga de la batería

La batería que se usará es una LiPo de 3,7V. Para realizar la carga de la batería se utilizará el integrado TP4056 que actúa como controlador de la carga. Es necesario incluir un circuito integrado de protección, conocido como el DW01A para proporcionar una seguridad necesaria en las baterías de litio. Además, éste integrado de protección debe trabajar con dos MOSFET de canal N externos, el integrado FS8205A para controlar la línea de tierra a la batería. Al usar los dos MOSFET, la línea de tierra se desconecta durante las condiciones de cortocircuito, sobrecarga y sobredescarga. A continuación, se muestra el circuito construido a partir de las recomendaciones de la hoja técnica del fabricante:

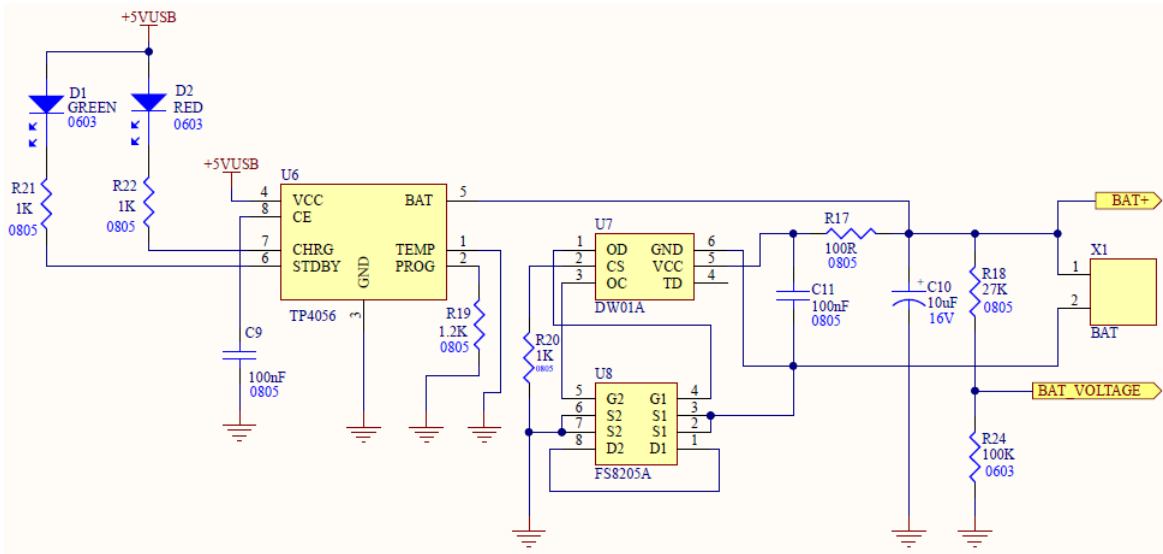


Figura 4.5 – Circuito del módulo de carga completo

El módulo de carga completo, fruto de la combinación de los dos integrados, dotará al sistema de las siguientes propiedades:

4

- Conseguir una corriente constante durante el proceso de carga de una batería de litio.
- Protección frente a sobredescargas y sobrecargas. Para ello, los pines de control OD y OC del integrado DWO1A se conectan a las puertas de los dos MOSFETs del FS8205A, que detienen el flujo de corriente a la batería si hubiera algún problema.
- Protección frente a cortocircuitos.
- Controlar el nivel de carga de la batería, es decir, cuando la tensión de ésta sea menor a 2,9V, el módulo trabajará con una corriente de carga de 130mA hasta que la tensión alcance el valor de 2,9V y, a partir de ahí, la corriente de carga aumentará linealmente.

	TP4056
Tensión de entrada	0,3V - 8 V
Tensión de salida	4,2V
Max corriente de salida	1,2A
Empaquetado	SOP8

Tabla 4.2 – Propiedades del controlador de carga TP4056

Por otra parte, el pin STDBY del controlador de carga TP4056 se comporta como circuito abierto hasta que la carga de la batería finaliza. En ese momento, pasa a valor

bajo gracias a un switch interno del integrado y deja circular la corriente por el LED verde, mostrando que la batería ha terminado de cargarse. El pin CHRG, por su parte, tiene un funcionamiento opuesto, es decir, se mantiene a valor bajo durante el proceso de carga, alimentando el LED rojo e indicando que la batería está siendo cargada. Cuando se ha terminado el proceso, se comporta como circuito abierto gracias a un switch interno del integrado.

4.1.2.3 Nivel de la batería

Además, para cumplir con los requisitos establecidos al comenzar, es necesario conocer el nivel de la tensión de la batería en todo momento. Para ello, se utilizará un pin del microcontrolador de lectura analógica de dicha tensión. La batería LiPo utilizada es de 3,7V, sin embargo, en su correspondiente hoja técnica indica una tensión máxima de 4,2V cuando está totalmente cargada.

Hay que tener en cuenta que los pines del ESP32 trabajan con tensiones de 3,3V, por lo cual se realizará un divisor de tensión para conseguir valores de tensión válidos para el microcontrolador. Para ello, se han escogido valores de resistencias de 27kOhm y 100kOhm para las resistencias R18 y R24 del divisor. Se mostrará detalladamente más adelante en los esquemáticos.

4.1.3 USB a Puerto Serial

Para llevar a cabo la tarea de establecer la comunicación entre USB y el ESP32 por puerto serie, se ha decidido utilizar el integrado CH340C para hacer la conversión de USB a [UART](#).



Figura 4.6 – Integrado CH340C para conversión USB-UART

A continuación, se muestran las principales propiedades del CH340C, extraídas del datasheet del fabricante, además de información adicional útil para comprender nuestro diseño:

- Interfaz de dispositivo USB de velocidad completa
- Emula la interfaz UART estándar, utilizada para actualizar los periféricos en serie o ampliar la interfaz UART a través del bus USB.
- Puede alimentarse tanto con 5V como con 3,3V (nuestro caso).
- Trabaja normalmente con una corriente típica de 12mA, siendo la corriente max de 30mA por pin.
- Empaquetado SOP16.
- Los pines VD+ y VD- van conectados directamente a las señales de datos D+ y D- del bus USB. Son señales diferenciales, por lo que en el diseño de la PCB será tenido en cuenta: se trazarán las dos pistas de la misma anchura y longitud.
- Los pines TXD y RXD se conectan con los pines RXDo y TXDo del microcontrolador. La señal de salida del pin TXD actúa de transmisor asíncrono de datos. La señal de entrada del pin RXD, por su parte, actúa de receptor asíncrono de datos.
- Los pines DTR y RTS son señales digitales de salida hacia el microcontrolador, útiles para generar las funciones de ENABLE y RESET del microcontrolador. Será desarrollado más adelante.
- Los pines VCC y GND se conectarán a la alimentación de 3,3V y a masa respectivamente.
- El resto de pines del CH340C quedarán en abierto.

4

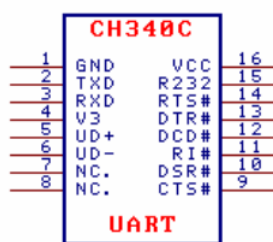


Figura 4.7 – Pines del integrado CH340C [?]

4.1.4 Bus I2C

El **I2C** es un puerto y protocolo de comunicación serial, a través de únicamente dos cables de comunicación, **SDA** y **SCL**. Además el protocolo permite conectar hasta 127 dispositivos esclavos con esas dos señales.

Para este proyecto en particular, el bus se utilizará para la comunicación entre el microcontrolador con el RTC (Real Time Clock) y los sensores de luz del manípulo, que actuarán de esclavos. Cada componente vinculado al bus I2C tiene una dirección fija desde 0 a 127.

Cabe destacar que el bus I2C es un bus terminado, por lo cual los cables SDA y SCL partirán desde el maestro (microcontrolador) pasando por cada esclavo, hasta llegar al último de ellos, donde se ubicarán las resistencias de pull-up de valor 4'7KOhms, recomendado para tensiones de 3,3V. Tanto estas resistencias como las del resto del diseño van a ser de tecnología SMD y de empaquetado 0805 o 0603.

4.1.4.1 RTC

Cuando se trabaja con largas cantidades de datos, en este caso mediciones de luz, es útil tener un registro de todas ellas con sus respectivas fechas y horas, así será más sencillo localizarlas después cuando sea necesario.

El sistema no va a estar permanentemente funcionando y no es capaz de mantener la fecha y hora actualizada en todo momento. Por ello, surge la necesidad de incorporar un RTC al diseño. Concretamente, se ha escogido el modelo del circuito integrado MCP7940N del fabricante Microchip. La dirección fija del bus I2C para dicho integrado es la 0x6F.

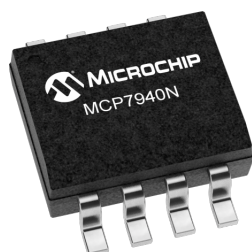


Figura 4.8 – Integrado MCP7940N de MicroChip

A continuación se muestra el circuito completo del RTC. Se ha construido siguiendo las recomendaciones de la hoja técnica del fabricante.

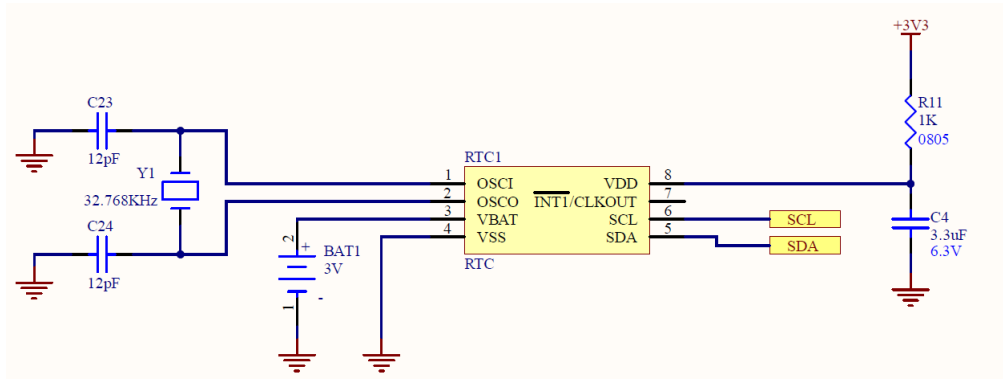


Figura 4.9 – Circuito completo para el RTC

Entre los pines OSCI y OSCO es necesario incorporar un oscilador, que utiliza la resonancia mecánica de un cristal vibratorio de material piezo eléctrico para crear una señal eléctrica con una frecuencia precisa, usada para controlar el tiempo. En la hoja técnica del MCP7940N se especifica un valor de 32,768 kHz para el cristal y un rango de 6-9 pF de capacitancia de carga, para asegurar el correcto funcionamiento del RTC.

4

Por tanto, se ha escogido el modelo **LFX TAL014219Bulk** del fabricante Würth Elektronik, que respecta las especificaciones anteriores del RTC. Concretamente, el oscilador presenta una capacitancia de carga de 6 pF y trabaja a una frecuencia de 32,768 kHz.



Figura 4.10 – Modelo del oscilador escogido

Los valores de los condensadores de carga C23 y C24 han sido escogidos a partir de los cálculos recomendados en la hoja técnica del MCP7940N, mostrados en la siguiente ecuación. Los valores de los condensadores de carga deben concordar con el valor de la capacitancia de carga (C_L) del oscilador para asegurar el correcto funcionamiento del RTC. Los valores escogidos son $C_{23} = C_{24} = 12 \text{ pF}$.

$$C_L = \frac{C_{23} \cdot C_{24}}{C_{23} + C_{24}}$$

Figura 4.11 – Expresión para cálculo de condensadores de carga

Por otra parte, para asegurar que el integrado MCP7940N siempre proporcione la fecha y hora correcta, es imprescindible que siempre esté en funcionamiento, incluso con el resto del sistema apagado. Para ello, se agrega una batería de 3V externa, el modelo CR2032 con su soporte de batería S8421-45R. Por último, los valores de la resistencia R11 y el condensador C4 han sido escogidos siguiendo las recomendaciones de la hoja técnica.

4.1.4.2 Sensor de luz

El **Sensor** de luz utilizado para realizar las mediciones es el **TSL2561** del fabricante Adafruit Industries. Este sensor transforma la intensidad luminosa en una señal digital que es transmitida a través del bus I2C. El dispositivo consta de dos fotodiodos: uno con respuesta infrarroja y otro con respuesta visible-infrarroja, codificada en un rango dinámico de 20 bits.

A través de un proceso interno del propio sensor, se realiza una integración entre las medidas de los dos fotodiodos, dando lugar a una salida de iluminancia, en la unidad de Lux, que aproxima la respuesta del ojo humano a esta intensidad. [1]

Sin embargo, en la mayoría de hojas técnicas se trabaja con el flujo luminoso (Lúmenes), por lo cual, se debe realizar una conversión de unidad de Lux a Lúmenes.

En primer lugar, se debe pasar de iluminancia (lux) a intensidad luminosa (candelas), relacionadas por la distancia (D) en metros:

$$I_v = E_v D^2$$

A continuación, se realiza la conversión a flujo luminoso teniendo en cuenta el ángulo de incidencia:

$$\Psi_v = 2 \pi I_v (1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right))$$

Ψ_v : flujo luminoso (lm)

E_v : iluminancia (lx)

I_v : candelas (cd)

Por otra parte, como se ha mencionado anteriormente, el manípulo posee en su interior cinco sensores TSL2561 en su interior. La direcciones fijas del bus I2C para este componente son: 0x29, 0x39 y 0x49. La dirección que utiliza cada sensor está controlada por el puente de soldadura etiquetado "ADDR". Cuando no hay soldadura

en este puente, el TSL2561 utilizará la dirección predeterminada de 0x39.

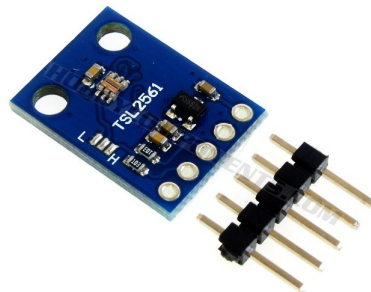


Figura 4.12 – Sensor TSL2561

4

Para usar una de las otras direcciones, se agrega soldadura para unir el pad central a uno de los dos pads laterales. Si pasa al lado "0", la dirección será 0x29. Si pasa al lado "1", la dirección será 0x49. Es importante no agregar soldadura en ambos lados a la vez.

En definitiva, utilizando las tres direcciones del bus I2C se pueden conectar tres sensores. Para incorporar dos sensores más al diseño, se aprovechan dos pines del microcontrolador para establecerlos como un bus I2C adicional via software, obteniendo dos señales SDA y SCL que se comportan como un bus de comunicación para los dos sensores restantes.

Los sensores se encuentran dentro del manípulo por lo cual, para conectarlos con la PCB y, en concreto, con el microcontrolador, se incorpora un **conector Minidin** al diseño. Éste permitirá llevar hasta los sensores tanto las señales SDA y SCL del bus I2C, como las señales SDA Y SCL del bus I2C via software. Además, habrá que conectar también las señales de 3,3V de los pines VCC de los sensores y las masas de los pines GND. Por tanto, será necesario un conector Minidin de 6 pines.



Figura 4.13 – Conector Minidin de 6 pines

Al no entrar en el diseño del manípulo, no se han modificado los sensores escogidos. No obstante, se ha realizado un estudio de los principales sensores de luz con mejores

prestaciones actualmente en el mercado. En la siguiente tabla se muestran las características del sensor actual y cinco alternativas razonables.

	Corriente	Tensión	Rango luz	Resolución	Precio	Fabricante
TSL2561	0,24 mA	2,7 - 3,6 V	0 - 40000 lx	0,005 lx	5,01 €	Adafruit Ind.
VEML7700	0,5 uA	2,6 - 3,6 V	0 - 167000 lx	0,005 lx	1,50 €	Vishay
VEML3235	1 uA	2,6 - 3,7 V	0 - 17867 lx	0,0021 lx	2,30 €	Vishay
VEML6035	0,5 uA	1,7 - 3,5 V	0 - 6710 lx	0,0004 lx	1,64 €	Vishay
SFH5711	0,41 mA	2,3 - 5,5 V	0 - 80000 lx	0,005 lx	1,50 €	OSRAM
OPT3007	1,8 uA	1,6 - 3,6 V	0 - 83865 lx	0,01 lx	1,87 €	Texas Instr.

Tabla 4.3 – Comparativa de sensores de luz

De cara a una futura mejora del producto final, se sugiere la utilización del VEML7700 del fabricante Vishay por su posibilidad de medir dentro de un gran rango de luz, con una gran resolución. No obstante, no se descartan las otras alternativas, también con prestaciones notables.

4.1.5 Interfaz con el usuario

En esta sección se tratarán los distintos módulos de interacción directa con el usuario. Estos son la pantalla LCD, el botón rotatorio y el buzzer.

4.1.5.1 LCD NOKIA 5110

La pantalla es un elemento importante dentro del diseño, ya que a través de ella, el cliente interactuará con el dispositivo, navegará por los menús, observará las mediciones realizadas... A continuación, se muestra la tabla comparativa entre posibles modelos de pantalla del mercado.

	Corriente	Voltage	Píxeles	Precio	Fabricante
Nokia 5110	6 mA	2,7V - 3,3V	84 x 84	5,08	Adafruit Industries
OLED Aliexpress	25 mA	2,7V - 3,5V	128 x 64	12,76	Aliexpress
OLED Adafruit	40 mA	2,6V - 3,3V	128 x 64	17,01	Adafruit Industries

Los criterios a la hora de escoger la pantalla son principalmente el precio, las dimensiones y la facilidad para adquirirlo en grandes cantidades, de cara a la industrialización del producto. Por esto último, la opción de Aliexpress ha sido descartada debido a sus elevados tiempos de envío.

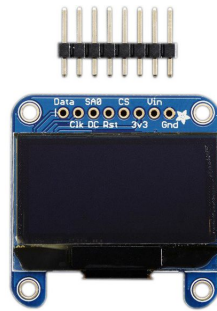


Figura 4.14 – Pantalla OLED de Adafruit Industries

Las pantallas **OLED** de Adafruit Industries son muy legibles debido al alto contraste de una pantalla OLED, un aspecto importante que la hace ser una opción a tener en cuenta. Sin embargo, sus reducidas dimensiones llevaron a descartarla finalmente.



Figura 4.15 – Pantalla LCD Nokia 5110

La pantalla escogida es el **LCD** Nokia 5110 de Adafruit Industries, principalmente por su bajo precio y sus dimensiones: 84x84 pixeles monocromáticos. Además, el consumo de corriente de esta pantalla es asumible para nuestro diseño.

Este modelo de LCD permite el ajuste de contraste vía software utilizando la función `setContrast(value)` con valores comprendidos entre 0 y 100. Más adelante, en la programación, se establecerá la opción de que el cliente pueda cambiar el contraste desde el menú.

4.1.5.2 Botón rotatorio

Uno de los principales elementos con los que interactuará el usuario es el botón rotatorio, más conocido como Rotary Encoder o Codificador Rotatorio. Éste es un dispositivo electromecánico que convierte el movimiento de giro de un eje en una señal

de salida digital o analógica.

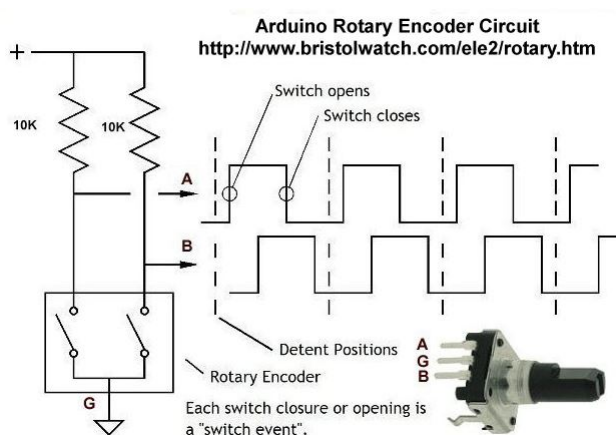


Figura 4.16 – Esquema de funcionamiento de botón rotatorio

Este dispositivo funciona alterando el desfase de 90° entre las dos señales, en función de si el giro se produce en un sentido u otro. En caso de presionar el botón, también envía una señal digital.

Concretamente, se ha escogido el modelo EC12E2424407 del fabricante ALPS ALPINE. Este dispositivo posee cinco terminales además de dos sujeciones en los laterales, que le proporcionarán un mejor agarre sobre la PCB. Es necesario que las tres señales de salida, que van conectadas a tres pines del microcontrolador, posean resistencias de pull-up de $10\text{K}\Omega$, tal y como aconseja el fabricante: para ello, hay dos opciones, introducirlas vía software o directamente introducirlas en el diseño, como en nuestro caso.

El botón rotatorio tiene la misión de permitir al cliente interactuar y navegar entre menus. Sin embargo, se ha decidido aprovecharlo para realizar otra función: encender y apagar el dispositivo vía software cuando se presiona el botón durante 3 segundos. Esto nos permite quitar el interruptor de ON-OFF del diseño y conseguir un dispositivo más moderno y parecido a los dispositivos electrónicos de hoy en día. Más adelante, se detallará esta nueva funcionalidad en la programación.

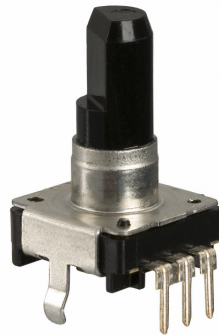


Figura 4.17 – Botón rotatorio del fabricante ALPS ALPINE

4.1.5.3 Buzzer

Asimismo, se ha decidido incorporar un buzzer, también conocido como zumbador, que emite un ligero sonido cada vez que el programa lee cualquier rotación o pulsación del botón rotatorio. Se ha escogido el modelo KXG1205 del fabricante KINGSTATE, sobre la PCB a través de dos patillas [THT](#).



Figura 4.18 – Buzzer KXG1205

4.1.6 Memoria

Entre las especificaciones exigidas por parte del cliente se encuentra el almacenamiento de las mediciones realizadas. Para ello, se va a trabajar con una tarjeta de memoria microSD y se va a incluir en el diseño de la PCB un conector de tarjetas MicroSD. Concretamente, el modelo 504528-0892 del fabricante Molex.

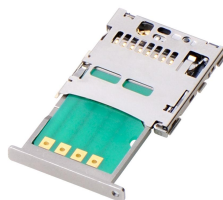


Figura 4.19 – Conector MicroSD de Molex

Este conector trabaja en un rango de tensión de 3,15V a 5V, apto para nuestro diseño. Posee ocho pines y un detector de tarjeta en el último pin conectado al microcontrolador.

Ha sido escogido entre otros modelos de conectores MicroSD ya que cuenta con un mecanismo para la detección de la tarjeta. Posee un interruptor interno al final del conector, que conecta el pin del detector de tarjeta a GND en caso de introducirse la tarjeta, detectando así el microcontrolador un cero o nivel bajo en dicho pin.

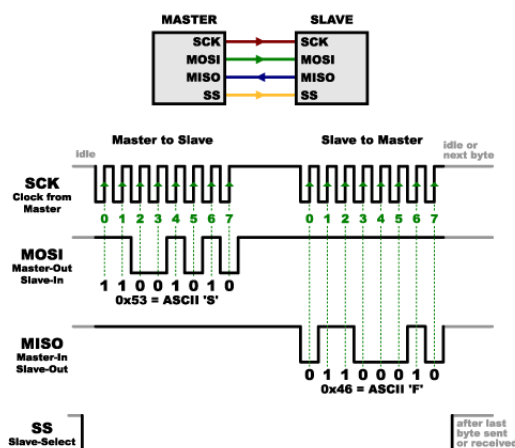


Figura 4.20 – Funcionamiento del bus de comunicación SPI

En este tipo de módulos, la transferencia de datos se realiza a través del bus SPI (Serial Peripheral Interface) entre el microcontrolador, que en este caso actúa como maestro, y la MicroSD, que actúa como esclavo. En el ESP32, existen unos pines específicos reservados para este tipo de comunicación. La sincronización y la transmisión de datos se realiza por medio de 4 señales:

- SCK (Clock): Es el pulso que marca la sincronización. Con cada pulso de reloj, se lee o se envía un bit.
- MOSI (Master Output Slave Input): Salida de datos del maestro y entrada de datos al esclavo.
- MISO (Master Input Slave Output): Salida de datos del esclavo y entrada al maestro.
- SS (Slave Select): Para seleccionar un esclavo, o para que el maestro le diga al Esclavo que se active.

La cadena de bits es enviada de manera síncrona con los pulsos del reloj, es decir con cada pulso, el maestro envía un bit. Para que empiece la transmisión el maestro baja la

señal SS a cero, con esto el esclavo se activa y empieza la transmisión, con un pulso de reloj al mismo tiempo que el primer bit es leído.

4.1.7 Convertidor reductor

La batería que se usará es una LiPo de 3,7V. Por tanto, hay que reducir su valor de tensión a la tensión a la que trabaja el microcontrolador, en este caso, 3,3V. Para ello, se incorporará un convertidor reductor DC-DC, para conseguir una tensión apta para el ESP32.

	AP3429/A
Tensión de entrada	2,7V - 5,5 V
Tensión de salida	0,6V - V_{in}
Max corriente de salida	2A
Empaquetado	SOT 23-5

Tabla 4.4 – Propiedades convertidor reductor AP3429/A

4

Concretamente, se ha escogido el integrado AP3429/A del fabricante Diodes Incorporated. En la anterior tabla se muestra sus características principales.

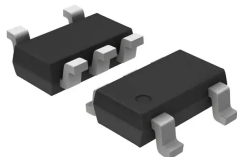


Figura 4.21 – Convertidor reductor AP3429/A

Para obtener la tensión de salida deseada, se diseñan los valores de las resistencias R_1 y R_2 mostradas en la siguiente imagen extraída del datasheet. Para ello, se realiza el división de tensión a la salida, para un valor V_{out} de 3,3V y una tensión umbral del pin FB de 0,6V, tal y como indica el fabricante.

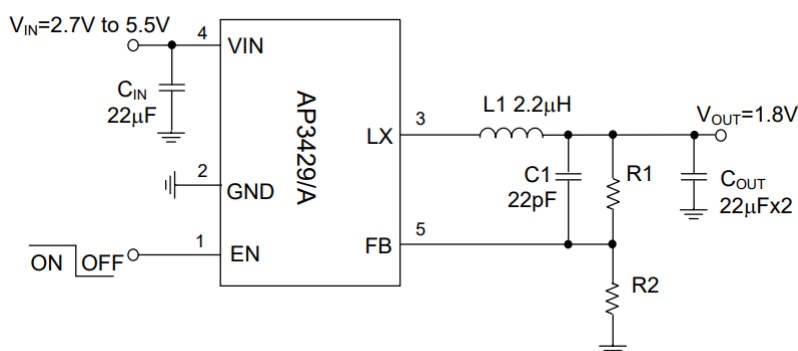


Figura 4.22 – Aplicación típica del convertidor reductor AP3429/A

En definitiva, se resuelve la expresión del divisor y se decide escoger unos valores de 90kOhm y 20kOhm para las resistencias R1 y R2 respectivamente.

$$\frac{V_{OUT}}{R1 + R2} = \frac{V_{FB}}{R2}$$

Figura 4.23 – Expresión del divisor de tensión para fijar resistencias R1 y R2

Por otra parte, el pin ENABLE (EN) del convertidor será aprovechado para alimentar con 3,3V o cortar la alimentación del sistema en función del nivel de tensión (alto o bajo) que reciba dicho pin. Esto será la función de Encendido/Apagado del sistema y será detallado más adelante.

La elección de este concreto modelo de convertidor reductor está directamente relacionada con la potencia que es capaz de suministrar al sistema. Para ello, es necesario realizar un listado de consumo de potencia de todos los componentes del sistema, mostrado en el siguiente capítulo. En este caso, el consumo máximo de corriente del sistema completo es menor a 1A. Por tanto, se ha escogido el modelo de convertidor reductor AP3429/A, el cual es capaz de suministrar hasta una corriente máxima de 2A, cumpliendo con holgura nuestras necesidades.

4.1.8 Consumo total del sistema

Como se ha comentado en el capítulo anterior, es especialmente importante estudiar el consumo de potencia del sistema completo a la hora de realizar un diseño de este tipo. Además de ser imprescindible para la elección del convertidor reductor, será necesario para dimensionar la batería, lo que se abordará en el siguiente apartado.

COMPONENT	UDS	CURRENT CONSUMPTION		POWER [mW]
		TYPICAL [mA]	MAX [mA]	
ESP32 WROVER	1	500	500	1650
LDC 5110 NOKIA	1	6	8	19,8
CH340C	1	7	20	23,1
RTC	1	0,15	0,15	0,495
MicroSD	1	1,5	1,5	4,95
TSL2561	5	1,2	3,3	3,96
ROTARY ENCODER	1	0,5	0,5	1,65
TP4056	1	0,15	0,5	0,75
DW01A	1	0,03	0,06	0,099
DC-DC CONVERTER	1	0,09	0,09	0,297
TOTAL		516,62	534,10	1705,10

Figura 4.24 – Consumo de potencia del sistema completo

4.1.9 Batería

Una vez se conoce el consumo del sistema, se puede realizar el dimensionado de la batería. Se ha escogido una batería Lipo con las siguientes especificaciones extraídas de la hoja técnica del fabricante:

- Voltaje nominal: 3,7 V
- Carga de la batería: 3000 mAh
- Potencia: 11,1 Wh
- Dimensiones: 80 mm x 50 mm x 6 mm
- Rango de temperatura: -25 a 60 C°
- Peso: 48 g

A partir de las características anteriores, se puede realizar una estimación de la duración de la batería para nuestro diseño concreto:

$$\text{Duración batería} = \frac{\text{Carga batería}}{\text{Consumo dispositivo}} = \frac{3000 \text{ mAh}}{500 \text{ mA}} = 6h$$

Es necesario precisar que los cálculos se han realizado para el peor caso en que el microcontrolador ESP32 trabajara a pleno rendimiento, utilizando todos sus módulos, lo cual para nuestro diseño, no va a ocurrir nunca. Por tanto, la duración de la batería será bastante superior a 6 horas.



Figura 4.25 – Batería LiPo 3,7V [3]

Asimismo, mientras se realiza el diseño electrónico no hay que olvidar la perspectiva mecánica; hay que tener en cuenta las dimensiones de la batería y las del resto del sistema, especialmente la carcasa y comprobar que todo sea correcto. Para ello, es conveniente apoyarse en un programa de diseño mecánico, en nuestro caso SolidWorks 2021. Este apartado será desarrollado más adelante en el capítulo 5. Verificación del diseño.

4.1.10 Sistema de encendido y apagado

El prototipo inicial se encendía y apagaba bruscamente con un interruptor ON-OFF convencional. Para acercar el dispositivo a la electrónica actual, se va a descartar el interruptor del diseño y se va a aprovechar la presencia del botón giratorio, que va a realizar la tarea de encender y apagar el microcontrolador vía software manteniéndolo pulsado durante tres segundos.

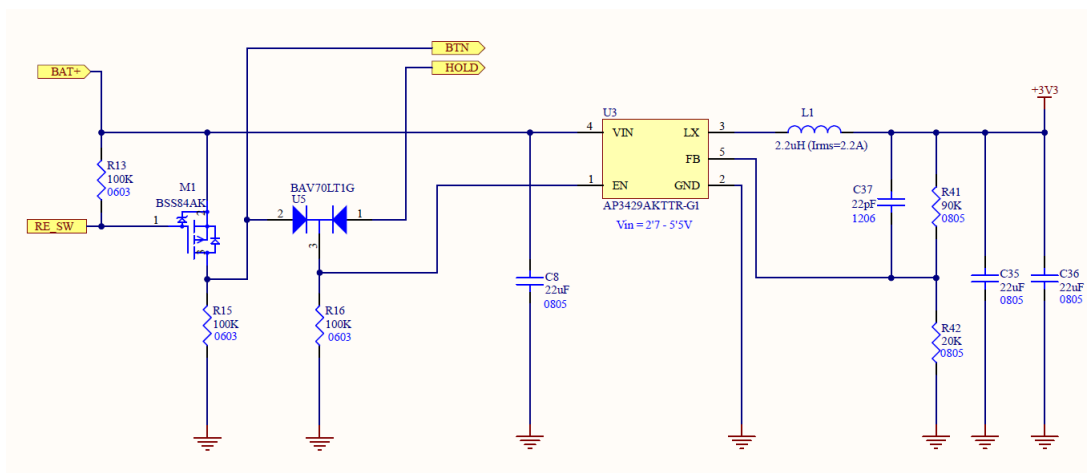
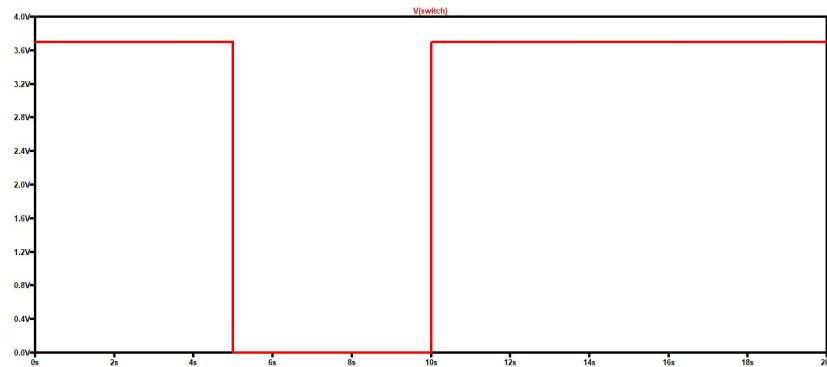


Figura 4.26 – Circuito para el sistema de encendido y apagado

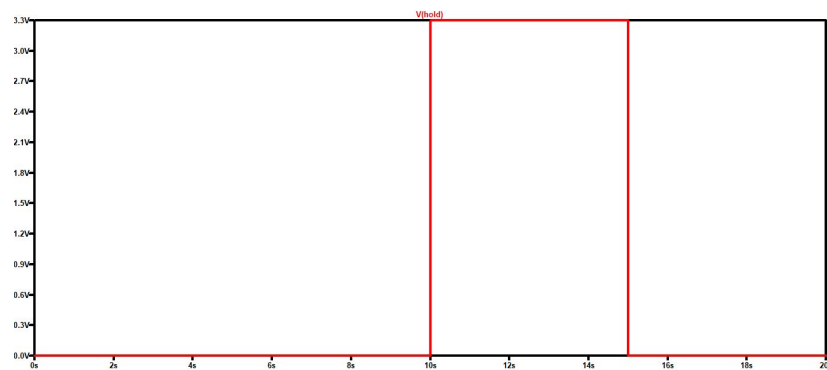
Como se puede observar en la imagen anterior, se han definido dos señales digitales: BTN y HOLD, de entrada y salida respectivamente, asociadas a dos pines del

A continuación, se muestra el comportamiento en tensión de las señales de pulsado del botón rotatorio, de la señal de HOLD y de la tensión de salida del convertidor respecto al tiempo.

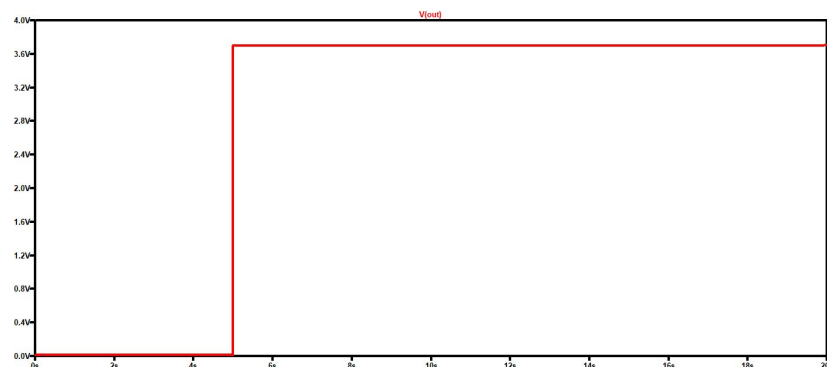
Tensión señal pulsador



Tensión señal hold



Tensión señal salida



Como se puede observar, en el instante inicial la tensión a salida está a nivel bajo, por

lo cual, el dispositivo está apagado. En el momento en el que se presiona el botón y se conecta la señal a masa, la tensión a la salida pasa a estar a nivel alto, encendiendo así el dispositivo. Cuando la señal del pulsador vuelve a su estado inicial, es decir, cuando se deja de presionar el botón, la señal HOLD pasa a nivel alto, manteniendo a su vez a la salida a nivel alto, o lo que es lo mismo, manteniendo el dispositivo encendido sin estar presionando el botón.

Otra de las ventajas de este sistema respecto al interruptor convencional es el ahorro en el consumo de la batería ya que cuando el dispositivo esté un determinado tiempo sin utilizarse, se va a mandar automáticamente al ESP32 al modo DEEP SLEEP.

Una vez se han escogido los subsistemas que conformarán la electrónica del producto, se realizará el diseño de los circuitos completos mediante el programa Altium Designer 19. En el anexo se muestran los esquemáticos exportados del programa.

4.2 Diseño de la PCB

Una vez han sido desarrollados los esquemáticos del proyecto, se procede a realizar el diseño de la PCB. Para ello, hay que definir las reglas de diseño teniendo en cuenta los criterios y limitaciones de su posterior fabricación. Para este proyecto, se realizará la fabricación tanto a través de una máquina CNC del laboratorio de GranaSAT como por encargo a la empresa JLCPCB. Esto será tratado más adelante en el capítulo 6. Fabricación de la PCB.

No obstante, en ambas fabricaciones se han mantenido las mismas reglas de diseño. Éstas se muestran en la siguiente tabla. Para una mayor comprensión, también se muestra una imagen representativa de las reglas de diseño.

	General	Alimentación
Track width	0,2 mm	0,6 mm
Clearance	0,15 mm	0,15 mm
Via hole size	0,4 mm	0,6 mm
Via diameter	0,6 mm	0,8 mm

Tabla 4.5 – Reglas de diseño de la PCB

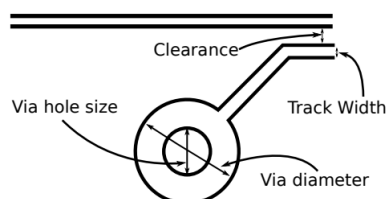


Figura 4.28 – Ilustración de las reglas de diseño

Definidas las reglas de diseño y las dimensiones de la PCB, determinadas por el tamaño de la carcasa, se procede a realizar el diseño de una placa de circuito impreso de dos capas (top y bottom layer), obteniendo el siguiente resultado.

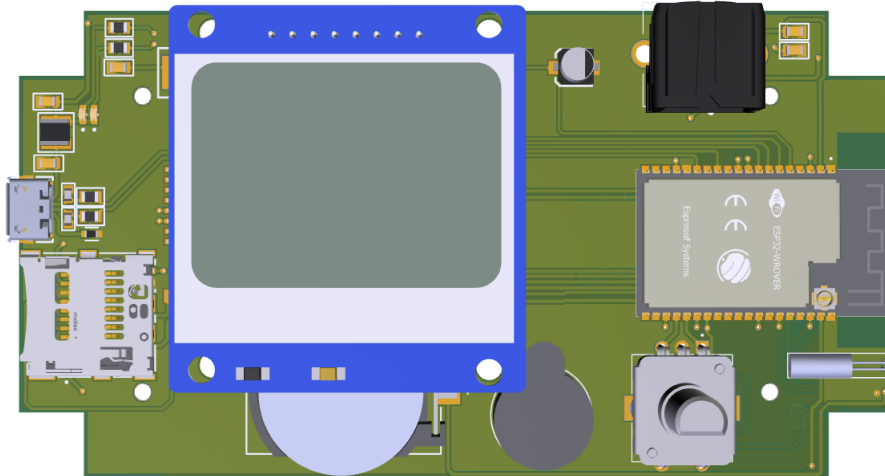


Figura 4.29 – Vista superior de la PCB

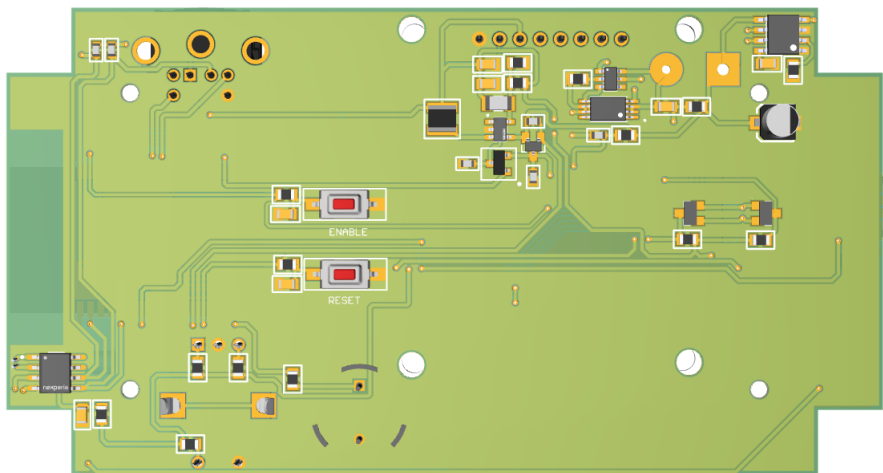


Figura 4.30 – Vista inferior de la PCB

Cabe destacar que se ha incluido un plano de masas tanto en la capa superior como inferior; primero para reducir el número de pistas de la PCB y, segundo, para reducir el nivel de ruido e interferencias. Por otra parte, en la región correspondiente a la antena del ESP32, se ha evitado colocar pista y plano de masas, por recomendación del fabricante.

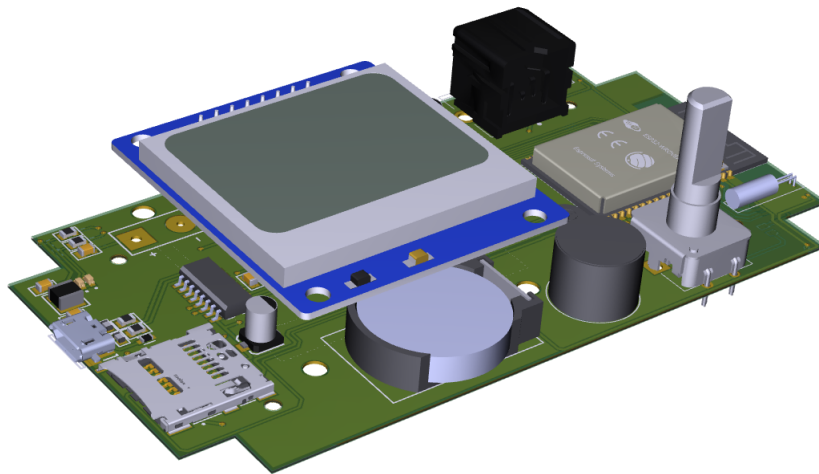


Figura 4.31 – Vista perspectiva de la PCB

4

Capítulo 5

Verificación del diseño

Antes de comenzar el proceso de fabricación de la PCB, es conveniente realizar una comprobación a nivel mecánico, por si fuera necesario introducir alguna modificación. Para ello, se ha exportado el modelo de la PCB en archivo .STEP y se ha incluido en el ensamblaje de SolidWorks de la carcasa, mostrado anteriormente.

En primer lugar, se ha calculado las posiciones en las cuales será necesario realizar aperturas en la carcasa, para los conectores MicroSD, MicroUSB, Minidin en los laterales de la carcasa, mientras que en la zona superior se harán aperturas para la pantalla y para el botón rotatorio. Se realizan dichas aperturas en el programa y se observa el resultado que se muestra en la siguiente imagen:

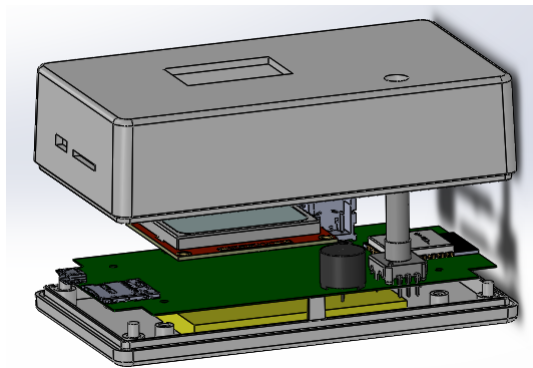


Figura 5.1 – Vista del ensamblaje abierto

Como se puede apreciar, se logra un diseño válido: se ha introducido la batería con sus respectivas dimensiones en la parte inferior del mando. Encima de ella se encuentra la PCB, sin estar apoyada, dejando unos milímetros de holgura, sobresaliendo la pantalla hasta la altura de la carcasa y los conectores en los laterales.

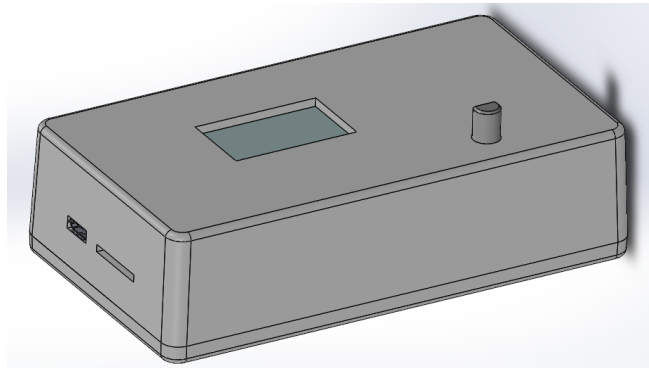


Figura 5.2 – Vista del ensamblaje final en SolidWorks

Para mantener la PCB fija en el interior de la carcasa, se ha optado por utilizar espaciadores o torretas M3x15 de nylon y tuercas que la sostendrán a la altura deseada. Se ha escogido el material de nylon por la posibilidad de ajustar su longitud (del orden de milímetros) a través de una lija, y así poder ajustar la pantalla a la altura de la carcasa con mayor precisión.

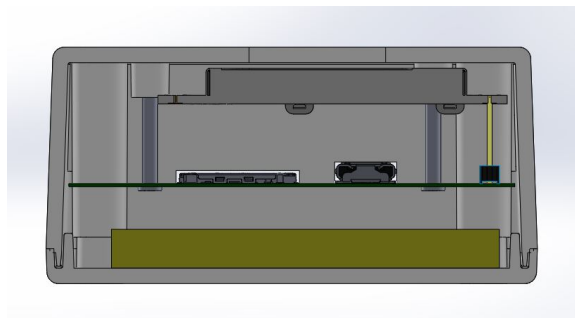


Figura 5.3 – Sección del diseño en SolidWorks

Una vez que se ha verificado la validez del diseño, se puede comenzar con la fabricación de la PCB.

Capítulo 6

Fabricación de la PCB

La fabricación de la PCB se va a realizar en primer lugar en el laboratorio de GranaSAT, a través de una máquina CNC. Posteriormente, se va a buscar una empresa que se encargue de la producción de la PCB.

De cara a una futura industrialización del producto, interesa que el proveedor sea capaz de producir PCBs a un precio asumible y con tiempos de entrega bajos.

6.1 Fabricación en el laboratorio

En primer lugar, se ha fabricado la PCB con la máquina CNC existente en el laboratorio de GranaSAT. Para ello, se han extraído los ficheros Drill y Gerber del diseño en Altium Designer, para introducirlos en el programa de CircuitCAM, un sistema de fabricación asistida por ordenador. En la siguiente imagen se observa la previsualización de la PCB en CircuitCAM.

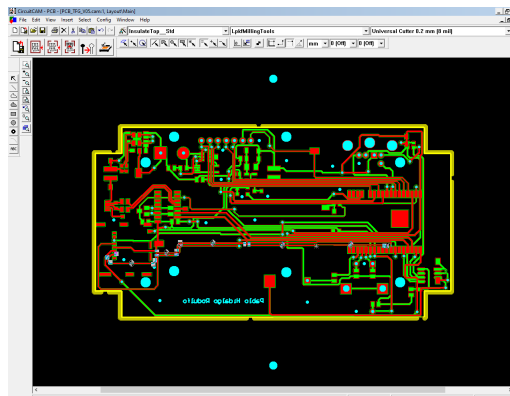


Figura 6.1 – Previsualización PCB en CircuitCAM

A continuación, se exportan los ficheros necesarios al programa RoutePro 2000, que se encarga de dar las instrucciones de rutear y taladrar a la máquina CNC.

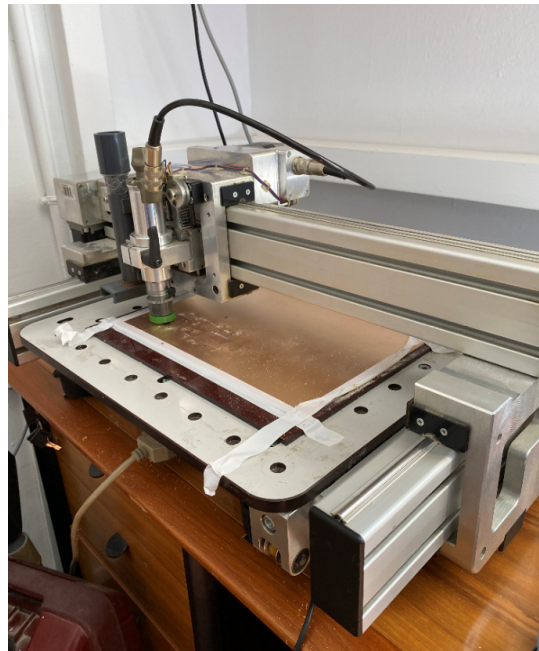


Figura 6.2 – Máquina CNC del laboratorio GranaSAT

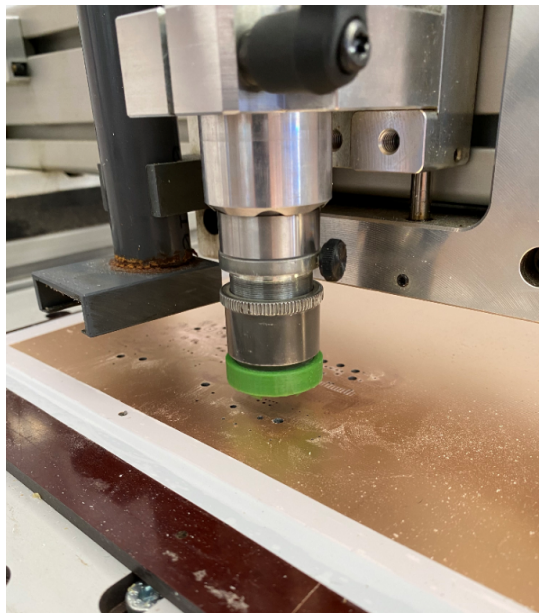


Figura 6.3 – Máquina CNC fabricando la PCB

En las siguientes imágenes se observa el resultado, tanto de la cara superior como inferior de la PCB:

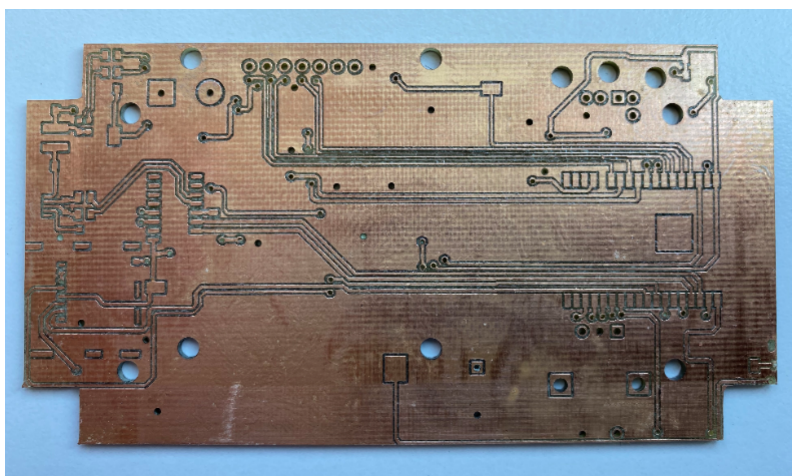


Figura 6.4 – Vista superior PCB fabricada en GranaSAT

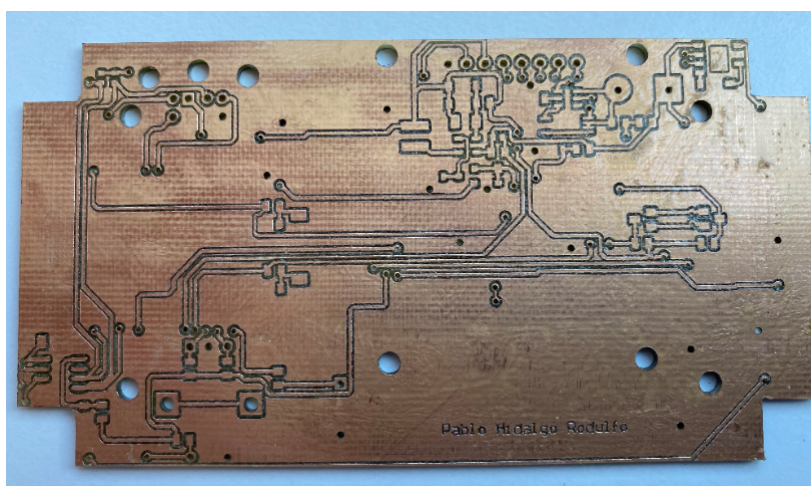


Figura 6.5 – Vista inferior PCB fabricada en GranaSAT

6.2 Fabricación por proveedor externo

Paralelamente, se ha buscado una empresa que se encargue de la producción de la PCB, valorando especialmente el bajo coste y tiempo de producción, manteniendo una buena calidad en la PCB. Por ello, se ha escogido el fabricante JLCPCB.



Figura 6.6 – Logo fabricante JLCPCB

A continuación, se puede observar el resultado de la PCB fabricada por JLCPCB:

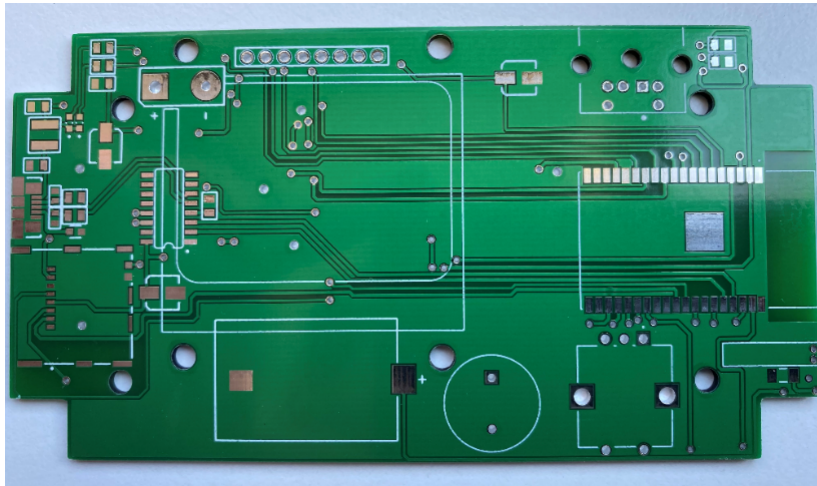


Figura 6.7 – Vista superior PCB fabricada por JLCPCB

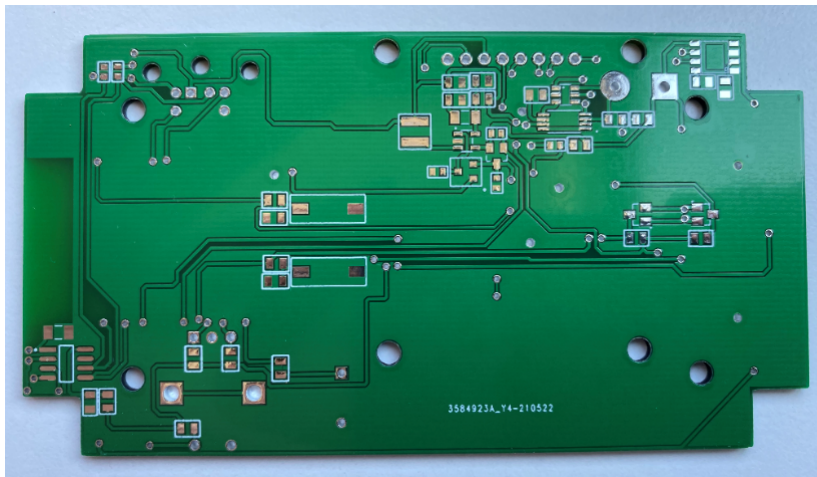


Figura 6.8 – Vista inferior PCB fabricada por JLCPCB

6.3 Resultado final

Al final se ha decidido terminar el prototipo con la PCB del fabricante JLCPCB y todos los componentes se han soldado por medio de pistola en el laboratorio de GranaSAT. No obstante, para una industrialización del producto, se valora soldar los componentes con la ayuda de un stencil, para reducir los tiempos en caso de una fabricación en cadena, ya que al soldar con un [Stencil](#), simplemente cae pasta de soldadura en los lugares necesarios y se introduce la PCB en el horno. El fabricante JLCPCB ofrece la posibilidad de incorporar el [Stencil](#) con los encargos de PCBs.

Una vez se han soldado todos los componentes, se muestra en las siguientes imágenes el resultado final.

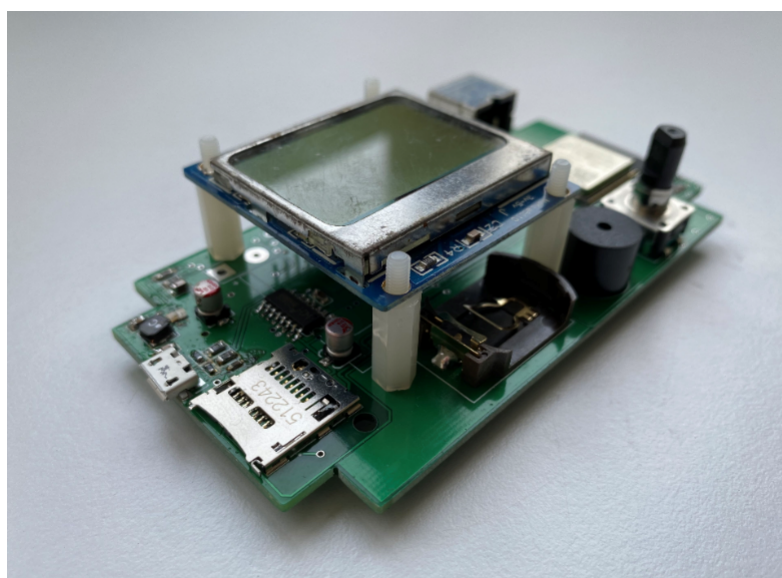


Figura 6.9 – Vista superior de la PCB final

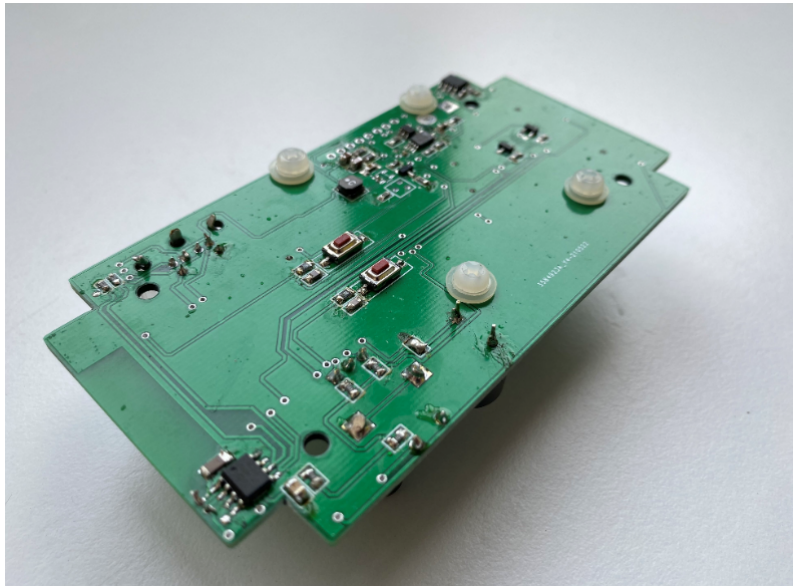


Figura 6.10 – *Vista inferior de la PCB final*

Capítulo 7

Adaptación del software

Al mismo tiempo que se realiza el rediseño de hardware y la fabricación de la PCB, se ha ido trabajando en el software que controla al dispositivo. Para ello, se ha aprovechado el software del prototipo inicial implementado para el microcontrolador anterior, el Arduino Mega, y se ha adaptado para el microcontrolador actual, el ESP32. Además, se han implementado módulos nuevos dentro del código, para incluir las nuevas funcionalidades para el prototipo actual.

Partiendo del prototipo inicial, el software debe ser accesible e intuitivo para el cliente. Para ello, se había diseñado una máquina de estados en la cual, dependiendo de movimiento que realice el botón rotatorio, el cliente navegue a través de unas funciones u otras. Ésta base se ha mantenido para el sistema actual y se han incorporado algunas mejoras.

A continuación, se muestran las especificaciones que cumple el software:

- Cuando se enciende, el sistema empieza en el *Measurement mode* para agilizar el uso del dispositivo.
- Dentro de los ajustes, se puede modificar los parámetros del sensor.
- También se puede ajustar los parámetros del sistema, tanto de la pantalla como de la fecha y hora. La configuración queda almacenada en la [EEPROM](#).
- Dentro de los ajustes, se puede modificar los parámetros del sensor.
- Se almacenan los datos de las mediciones realizadas en la microSD.
- Asimismo, existe el modo *Last saved mode* para visualizar las últimas mediciones guardadas.

- En caso de no detectarse la tarjeta MicroSD, el sistema dará un aviso.

A partir de las características anteriores se han añadido algunas novedades que se exponen en los siguientes apartados, concluyendo con un diagrama de flujos en el que se representa el funcionamiento del sistema completo.

7.1 Envío de las mediciones vía WiFi

Como se ha comentado anteriormente, una de las principales mejoras respecto al producto inicial es el envío de los datos que se van midiendo vía WiFi al mismo tiempo que se almacenan en la tarjeta MicroSD. Esto es realmente útil en un entorno de desarrollo industrial, en el que el cliente necesite ir visualizando las mediciones que se están realizando.

Para ello, el uso de un microcontrolador como el ESP32 con módulo WiFi de 2,4 GHz es fundamental. Se configura para funcionar como **punto de acceso (AP)**, creando así su propia red local a la que se conectará el dispositivo PC del cliente [12].

A nivel de software, en el momento en que se enciende el dispositivo se crea la red local con el **SSID** y la contraseña deseados, y se imprime por el monitor serial la IP generada. Una vez se conecte el PC a la red local, simplemente deberá ingresar la **IP** como página web, la cual muestra las mediciones realizadas a través de un sencillo código en **HTML**. El envío de datos vía **WiFi** se ha programado para realizarse en *Save data mode* al momento de guardarse los datos en la tarjeta MicroSD.

7.2 Sistema de encendido y apagado

Como se ha comentado anteriormente, se ha pasado del interruptor convencional ON-OFF a la utilización del botón para las funciones de encendido y apagado, pulsándolo durante tres segundos.

Para implementar la función de apagado, dentro del subsistema de lectura del botón se ha definido que cuando el evento sea de presionar el botón, a través de la función *Millis()* se cuente el tiempo que el botón está siendo pulsado: si el tiempo es inferior a tres segundos, entenderá la interacción como un *OK* mientras que si llega a tres segundos, enviará al dispositivo al **Deep Sleep Mode** del ESP32.

Cuando el ESP32 se encuentra en este modo, se cortan las actividades que consumen más energía mientras está en funcionamiento. No se llevan a cabo actividades de CPU ni de Wi-Fi, pero el coprocesador de energía ultrabaja (ULP) aún se puede encender. La memoria RTC también permanece encendida, por lo que solamente se puede utilizar los pines RTC GPIO del ESP32 para activar el sistema, por lo cual, se ha tenido especial

cuidado en la elección del pin asociado a la pulsación del botón.

En el caso de producirse un evento en dicho pin, se activa la CPU principal y se ordena activar la señal digital de salida HOLD a valor alto, manteniendo así la alimentación del sistema después de presionar el botón. Para definir el evento que debe de producirse, se ha utilizado la función *espsleepenablextowakeup(GPIONUM26,1)*, siendo el pin 26 del ESP32 el correspondiente a la señal de pulsación del botón.

7.3 Nivel de la batería

En el rediseño electrónico se reservó un pin del microcontrolador para trabajar como señal de lectura analógica. Por ello, ésta señal está conectada a la tensión de la batería, y a través de software, se lee y muestra el nivel de tensión de la misma en porcentaje. Se ha decidido que se muestre en la pantalla el porcentaje de batería cada vez que se encienda el dispositivo.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de la máquina de estados del programa, en el que se exponen los distintos modos de funcionamiento dependiendo de los diferentes menus. [1] Se han señalado en amarillo los nuevos módulos que se han incluido para el nuevo dispositivo. Por otra parte, en el Anexo se ha incluido un apartado correspondiente al desarrollo de la programación.

7.4 Diagrama de flujo del funcionamiento

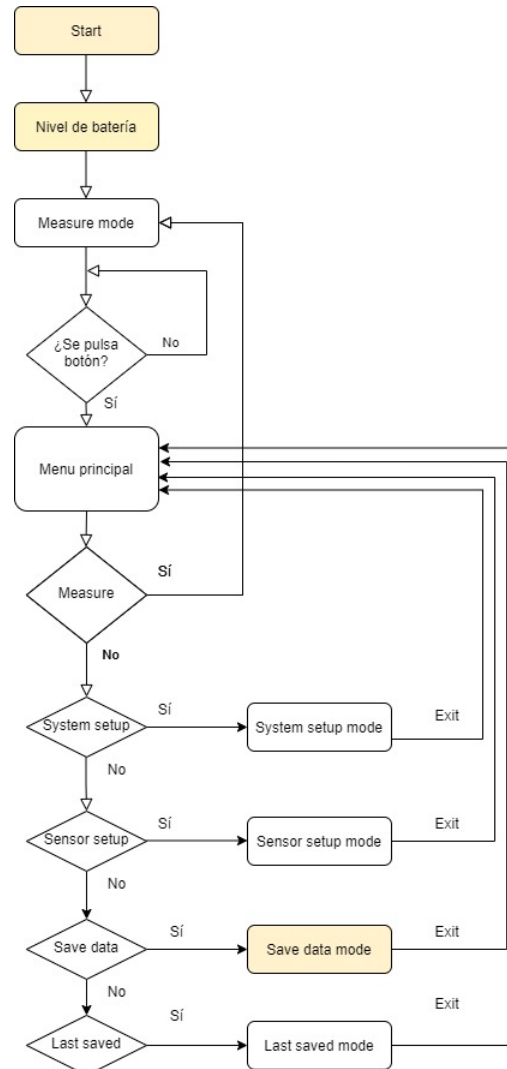


Figura 7.1 – Diagrama de flujo del funcionamiento

7

Aunque ha sido necesaria una adaptación de toda la programación, se ha mantenido la máquina de estados inicial y el funcionamiento de los distintos modos de funcionamiento. Por otra parte, se han incluido en amarillo los módulos en los cuales se han realizado modificaciones más importantes, expuestas en los anteriores apartados.

Capítulo 8

Conclusión y siguientes pasos

Se ha logrado realizar un rediseño del producto con unas dimensiones y peso inferiores a las del prototipo inicial, compuesto por componentes disponibles en el mercado y todo implementado en una misma PCB. Por tanto, se ha conseguido simplificar notablemente su diseño, facilitando así una futura industrialización del dispositivo.

En definitiva, las principales mejoras conseguidas en esta segunda versión del mando son las siguientes:

- Eliminación del interruptor ON-OFF para encender y apagar el dispositivo. Con ello, se ha logrado un diseño más actual aprovechando la pulsación del botón para realizar la tarea anterior por medio de interrupciones externas del microcontrolador.
- Envío de datos de las mediciones vía WiFi, herramienta muy valorable para facilitar la labor del usuario en un entorno de desarrollo industrial.
- Conocer el nivel de la batería restante, algo indispensable a día de hoy para un dispositivo portátil.
- Elección de componentes disponibles en el mercado y sobre todo, incluyendo cada uno de ellos sobre la propia PCB, evitando incluir módulos externos para conseguir un diseño lo más profesional posible.
- Reducción considerable de las dimensiones y del peso del dispositivo, tanto en la carcasa del dispositivo como en la PCB.

La continuación de este proyecto debe estar enfocada a la mejora del manípulo. En capítulos anteriores se ha comentado la existencia de sensores de luz en la actualidad

con mejores prestaciones en cuanto a rango y resolución respecto al escogido. Por tanto, la utilización de un sensor de luz que pueda realizar mediciones con mayor rango de intensidad luminosa mejoraría las prestaciones de nuestro producto final. Siguiendo esta línea, se podría trabajar en el rediseño del manípulo con el fin de hacerlo más ligero y manejable de cara a la comodidad del cliente.

A nivel personal, realizar este proyecto me ha llevado a aprender herramientas muy útiles de cara al futuro, especialmente el diseño de una PCB a través del programa de Altium Designer, la fabricación de mi primera placa de circuito impreso en el laboratorio de GranaSAT y el diseño mecánico de un producto con el programa de SolidWorks. Esta experiencia ha sido la mejor forma para concluir todos estos años de formación y de aprendizaje, y me dan la motivación necesaria para adentrarme en el mundo laboral.

Capítulo 9

Presupuesto

9.1 Coste material

En la siguiente tabla se desglosa los costes del proyecto asociados a los materiales:

Descripción	Ctd	Precio unitario	TOTAL
Caja Hammond 1591XXBBK ABS Black	1	5,18 €	5,18 €
Codificador giratorio mecánico Alps Alpine	1	1,34 €	1,34 €
Sensor luz TSL2561	5	3,70 €	18,50 €
Conector circular Minidin 6 pines	1	4,40 €	4,40 €
Conector MicroSD Molex 504528-0892	1	2,19 €	2,19 €
Conector Micro USB Tipo B, USB 2.0	1	0,85 €	0,85 €
Kit resistencias 0805 SMD/SMT	1	1,81 €	1,81 €
Kit resistencias 0603 SMD/SMT	1	0,96 €	0,96 €
Varistor 0603 20V	1	0,34 €	0,34 €
BSS84AK MOSFET P-CH -50 V -180 mA	1	0,19 €	0,19 €
Circuito de Calendario/Reloj RTC MCP7949N	1	0,63 €	0,63 €
LCD Nokia 5110	1	2,74 €	2,74 €
Batería Lipo 3,7V 3000mAh	1	11,50 €	11,50 €
Placa de circuito impreso JLCPCB	1	3,07 €	3,07 €
Convertidor reductor DC-DC 5.5V 2A	1	0,49 €	0,49 €
Kit condensadores cerámicos 0805	1	3,53 €	3,53 €
Kit condensadores cerámicos 0603	1	2,42 €	2,42 €
Microcontrolador ESP32-WROVER-E	1	2,42 €	2,42 €
LED verde SMD 570nm 20mA	1	0,15 €	0,15 €
LED rojo SMD 570nm 20mA	1	0,22 €	0,22 €
Pulsador 50mA 12VDC	2	0,45 €	0,90 €
Módulo de carga TP4056 DW01A FS8205A	1	4,53 €	4,53 €
Oscilador cristal 32.7680kHz 3.0 x 8.0mm	1	0,35 €	0,35 €
Sujección batería RTC S8421-45R	1	1,38 €	1,38 €
Inductor 2.2uH 50.4mOhms 20 2200mA	3	0,21 €	0,63 €
Zumbador KXG1205 45mA/8V	1	0,55 €	0,55 €
Chip CH340C Interfaz USB UART	1	1,45 €	1,45 €

El coste total asociado a los materiales es de 72,72 €.

9.2 Coste de mano de obra e infraestructuras

A continuación, se adjuntan los costes referidos al coste de la mano de obra y de las infraestructuras utilizadas. En este caso, los costes de mano de obra necesarios para la realización del proyecto han sido el propio autor y el supervisor del proyecto, mientras que para el desarrollo del mismo se han utilizado las instalaciones del laboratorio de GranaSAT. En la siguiente tabla se desglosan los costes anteriores:

Descripción	Horas	Coste
Ingeniero Electrónico Industrial	345	7.013 €
Supervisor del proyecto	80	2.800 €
Utilización del laboratorio	30	1.500 €

El coste total de la mano de obra y del uso de las infraestructuras es de 11313 €.

9.3 Coste de programas y licencias

En este último apartado de costes se incluyen los asociados a las licencias de los programas necesarios durante el proceso de diseño del producto. Se muestra en la siguiente tabla:

Descripción	Ctd	Coste
Licencia 3 meses SolidWorks 2021	1	1.010 €
Licencia 1 año Altium Designer 2019	1	1.747 €

El coste total de las licencias de los programas empleados es de 2757 €.

Por último, se muestra el coste total del proyecto en la siguiente tabla:

Descripción	Coste
Coste de material y hardware	72,72 €
Coste de mano de obra e infraestructuras	11.313,00 €
Coste de programas y licencias	2.757,00 €
COSTE TOTAL	14.142,72 €

Referencias

- [1] Francisco José Gámez Porcel. *Diseño de un sistema de caracterización para LEDs de automoción*. Granada, 2019.
- [2] What is a light sensor? Types and uses,
<https://www.seeedstudio.com/blog/what-is-a-light-sensor-types-uses>
- [3] A guide to understand LiPo Batteries,
<https://rogershobbycenter.com/lipoguide>
- [4] ESP32 Modules Information,
<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- [5] David W. Moore. *Headlamp history and harmonization*. University of Michigan, 1998.
<https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/49367/UMTRI-98-21.pdf>
- [6] The evolution of car light,
<https://idaoffice.org/posts/the-evolution-of-car-light/>
- [7] Light measurement. Basic Principles,
<http://www.dfisica.ubi.pt/hgil/Fotometria/HandBook/ch06.html>
- [8] Hammond Manufacturing,
<https://www.hamfmg.com/>
- [9] Altium Designer: step by step guide,
<https://www.ourpcb.com/altium-designer-tutorial-step-by-step-guide.html>
- [10] USB Serial: CH340 review,
<https://www.seeedstudio.com/blog/2020/09/30/usb-serial-what-is-ch340/>
- [11] Configuring and handling ESP32 GPIO interrupts,
<https://lastminuteengineers.com/handling-esp32-gpio-interrupts-tutorial/>
- [12] ESP32 access point web server,
<https://microcontrollerslab.com/esp32-soft-access-point-web-server/>

References

- [13] Pushbutton power switch,
<https://sites.google.com/site/wayneholder/pushbutton-power-on-off-for-arduino>
- [14] Módulo WiFi ESP32,
<https://www.industrialshields.com/blog-industrial-open-source/esp32-wifi>

Apéndice A

Esquemáticos PCB

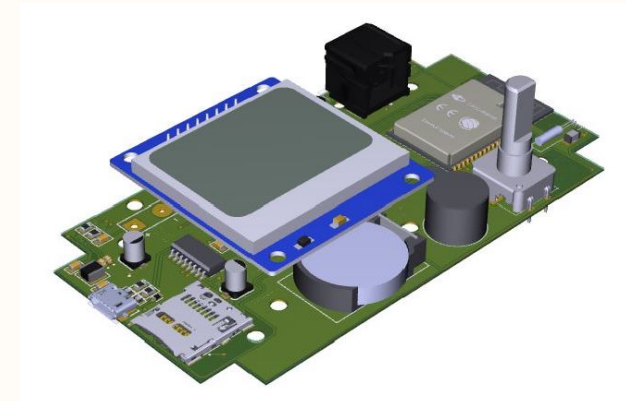
Industrialization of a Characterization System for Automotive LEDs

Page

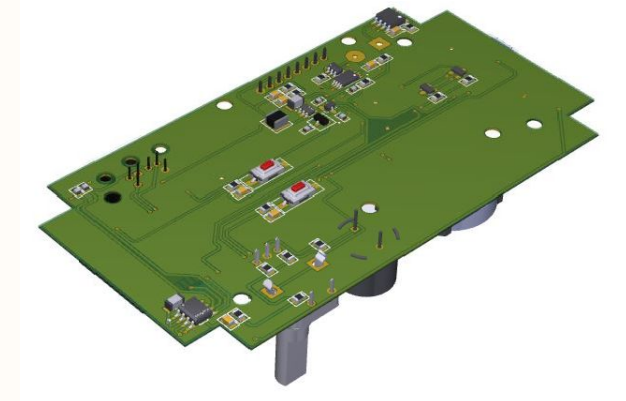
Index

1	COVER PAGE
2	BLOCK DIAGRAM
3	POWER BUDGET
4	PIN DESCRIPTION
5	ESP-32 WROVER MODULE
6	USB TO SERIAL
7	ENABLE - RESET
8	POWER SWITCH
9	BATTERY CHARGER
10	I2C SENSORS
11	NOKIA 5110 LCD
12	ROTARY ENCODER
13	MICRO SD

TOP VIEW

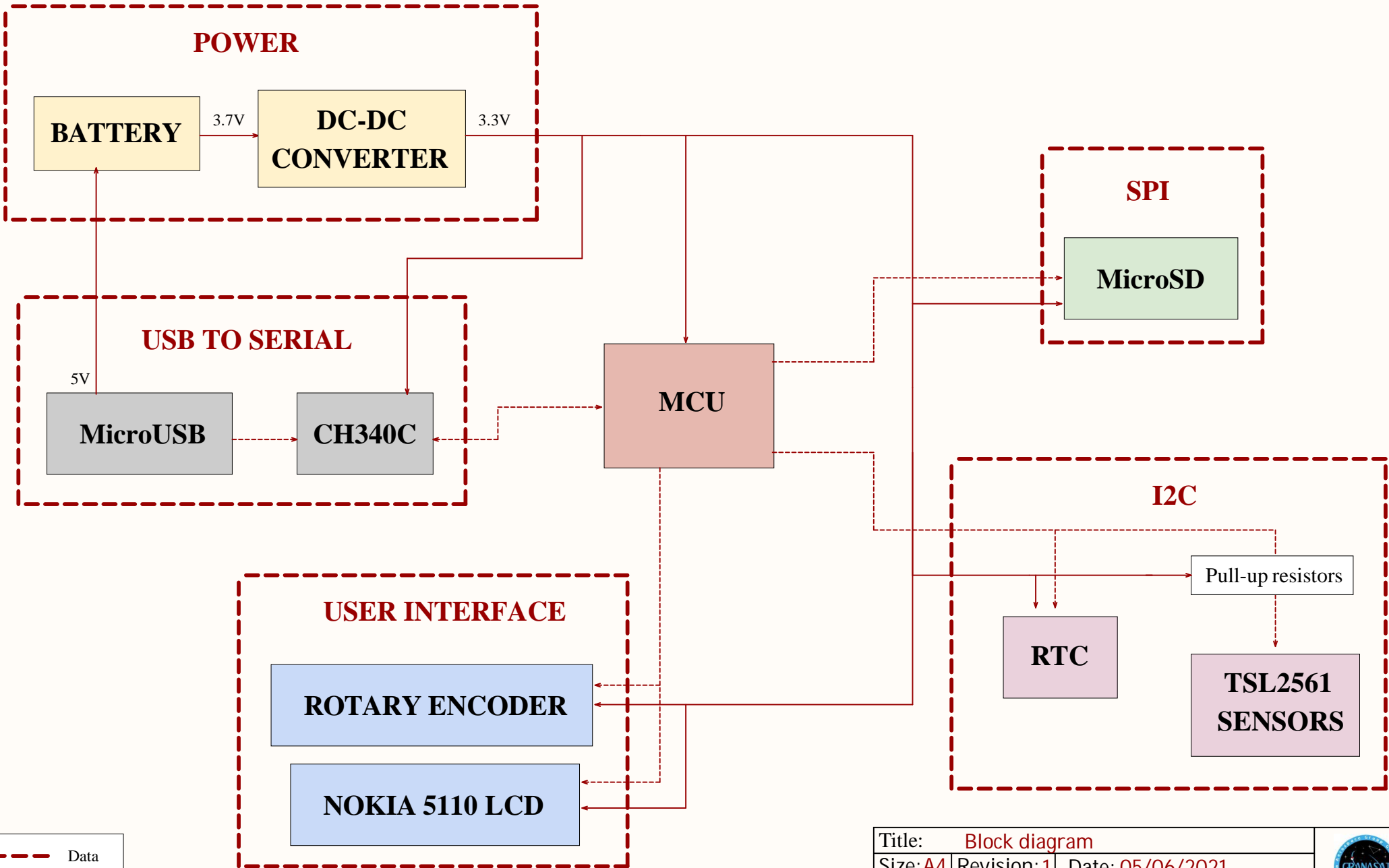


BOTTOM VIEW



Title: Cover Page		
Size: A4	Revision: 1	Date: 05/06/2021
Author: Pablo Hidalgo Rodulfo	Sheet: 1 of 13	





Title: Block diagram		
Size: A4	Revision: 1	Date: 05/06/2021
Author: Pablo Hidalgo Rodulfo	Sheet: 2 of 13	



Power budget


LiPo Battery



Rated voltage: 3.7V
Power: 11.1 Wh
Battery charge: 3000 mAh



DC-DC CONVERTER



In=16uA
Pn=52uW



ESP32 WROVER




In=500mA
Pn=1650mW

NOKIA 5110 LCD




In=6mA
Pn=19,8mW

CH340C




In=7mA
Pn=23,1mW

TSL2561 (x5)




In=1,2mA
Pn=3,96mW

MicroSD



In=1,5mA
Pn=4,95mW

RTC



In=0,15mA
Pn=0,49uW

COMPONENT	UDS	CURRENT CONSUMPTION		POWER [mW]
		TYPICAL [mA]	MAX [mA]	
ESP32 WROVER	1	500	500	1650
LDC 5110 NOKIA	1	6	8	19,8
CH340C	1	7	20	23,1
RTC	1	0,15	0,15	0,495
MicroSD	1	1,5	1,5	4,95
TSL2561	5	1,2	3,3	3,96
ROTARY ENCODER	1	0,5	0,5	1,65
TP4056	1	0,15	0,5	0,75
DW01A	1	0,03	0,06	0,099
DC-DC CONVERTER	1	0,09	0,09	0,297
TOTAL		516,62	534,10	1705,10

Title: **Power budget**
 Size: A4 | Revision: 1 | Date: 05/06/2021
 Author: **Pablo Hidalgo Rodulfo** | Sheet: 3 of 13



Pin description

µProcessor pin	Connection to module	Information
EN	Enable	Module enable signal. Active high.
IO0	Reset	Module reset signal. Active high.
CDET	MicroSD	Card detection pin from MicroSD.
MicroSD_CS	MicroSD	Card select pin from MicroSD
MicroSD_SCK	MicroSD	Serial clock from master (SPI bus)
MicroSD_MISO	MicroSD	SPI bus: master in, slave out
MicroSD_MOSI	MicroSD	SPI bus: master out, slave in
LCD_CLK	Nokia 5110 LCD	All SPI modules require a common clock, this clock source is supplied to this pin
LCD_LIGHT	Nokia 5110 LCD	Powers the backlight of the display (3.3V maximum).
LCD_DC	Nokia 5110 LCD	Used to switch between Data mode (high) and Command mode (low)
LCD_DIN	Nokia 5110 LCD	Input pin (MOSI) through which serial instructions are sent
LCD_RESET	Nokia 5110 LCD	Made low (0V) to select this particular display when more SPI peripherals are used.
LCD_CE	Nokia 5110 LCD	Resets the module. It an active low pin (resets when 0V is provided)
RE_DT	Rotary Encoder	Primary output pulse for determining the amount of rotation.
RE_CLK	Rotary Encoder	Same but it lags the CLK by a 90° phase shift.
RE_SW	Rotary Encoder	Active low push button switch output. When pushed, voltage goes low.
SDA_SW	I2C Sensors	Connection through I2C bus (via software) to send information from the sensors
SCL_SW	I2C Sensors	Connection through (via software) I2C bus to synchronize the sensors
SDA	I2C Sensors	Connection through I2C bus to send information from the sensors
RXD0	I2C Sensors	Receive data signal from I2C bus
TXD0	I2C Sensors	Transmit data signal from I2C bus
SCL	I2C Sensors	Connection through I2C bus to synchronize the sensors
BAT_LEVEL	Battery	Analog signal to read the battery level.
BTN	Power switch	Switch ON/OFF the microcontroller.
HOLD	Power switch	Digital signal to define the action of holding the ON/OFF button.
BUZZ	Buzzer	Digital signal to control the buzzer.

Fig 1. Pin description

Title: Pin description	
Size: A4	Revision: 1 Date: 05/06/2021
Author: Pablo Hidalgo Rodulfo	Sheet: 4 of 13



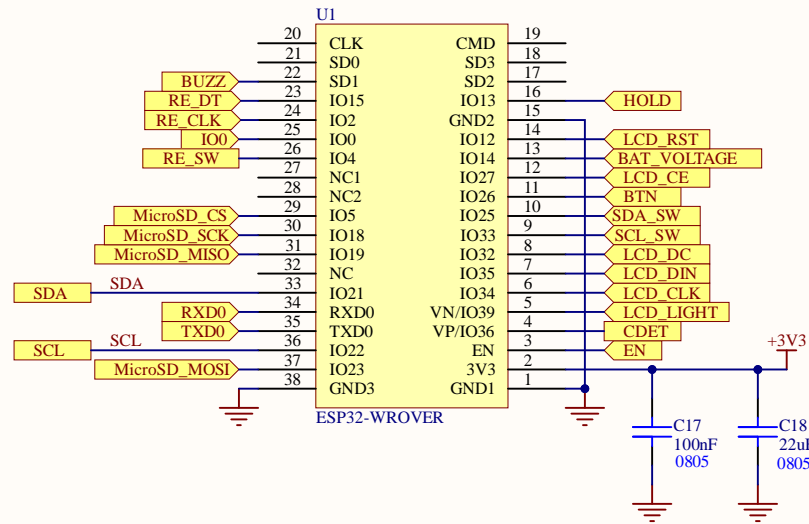
ESP32 WROVER

Component Info

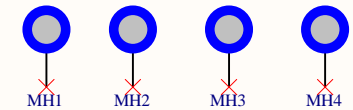


Fig 1. ESP32-WROVER-E

- WiFi and Bluetooth
- Dual Core LX6 of 32 bits at 160MHz
- RAM from 512kB to 8MB
- 18 ADC of 12 bits
- 2 DAC of 8 bits
- 36 GPIO
- SPI bus at IO18, IO19 and IO23 pins from the micro.
- IO21 and IO22 used for I2C bus.
- IO25 and IO33 for I2C software bus.



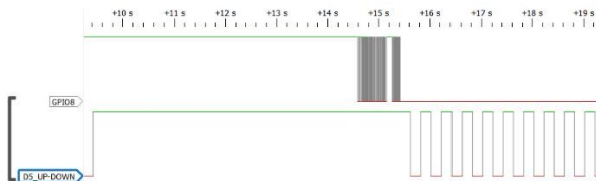
MOUNTING HOLES



C17 and C18 are decoupling capacitors used to provide 3'3V to the charge removing the noise. Their values has been chosen following ESP32 datasheet recommendations.

Pin election for buzzer

We haven't got enough GPIO pins at the micro for all ours signals. Because of that, It has been chosen SD1/SD1/GPIO8 pin for BUZZER signal. Following datasheet recommendations: GPIO8 is connected to the SPI flash so we had to check his behaviour and study if it is possible to use it for other uses. It has been cheked his behaviour at simulation above. When charging the program at the micro, it takes some seconds to finally become on a constant signal. In summary, it is possible to use that pin for buzzer signal.



D5 signal it has been used to compare both signals: when D5 is at high value, it means that program is beeing charging, so GPIO8 pin is not constant at that time.

BUZZER

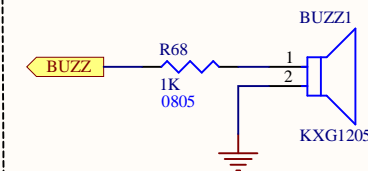


Fig 2. KXG1205 Buzzer

Title:	ESP32 WROVER		
Size:	A4	Revision:	1
Date:	05/06/2021		
Author:	Pablo Hidalgo Rodulfo	Sheet:	5 of 13



USB TO SERIAL



Fig 1. 473460001 Micro-USB

Micro-USB for recharging the battery and to program the ESP-32 WROVER.

Maximum current: Signal contacts 1.0A, Power contacts 1.8A

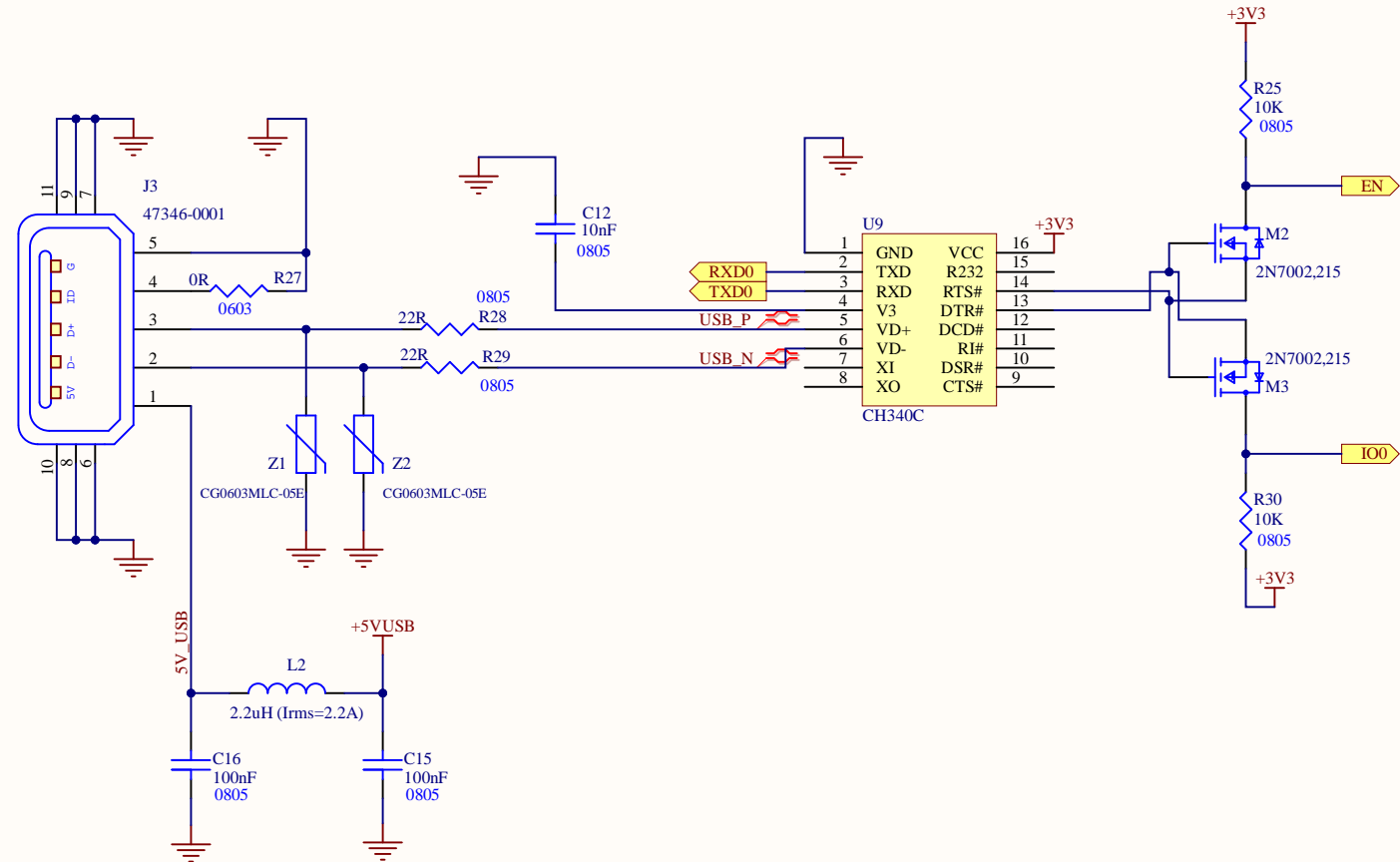


Fig 2. CH340C

Chip that realizes USB to UART interface. It supports 5V and 3.3V power supply.

12 mA typical working current

30 mA maximum working current



Title:	USB UART		
Size:	A4	Revision:	1
Date:	05/06/2021		
Author:	Pablo Hidalgo Rodulfo	Sheet:	6 of 13

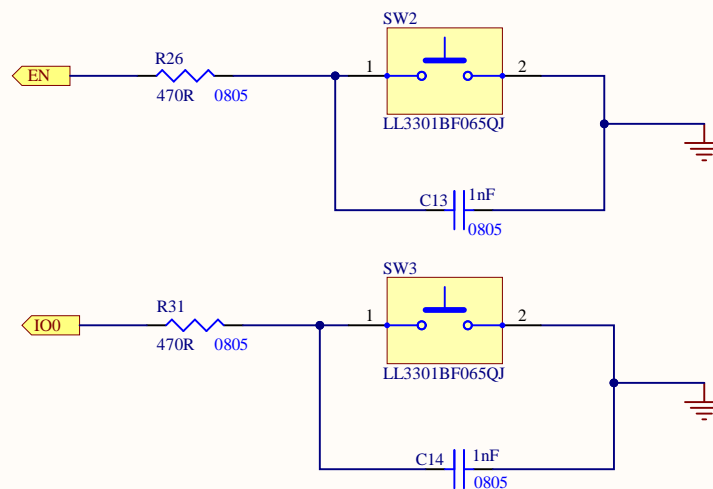


ENABLE - RESET



Fig 1. LL3301BF065QJ Switch

There are two switches: their functions are RESET and ENABLE buttons from the micro, so they are connected to GPIO pins.



DTR and RTS send digital signals to M2 and M3 mosfet gates: 3.3V (HIGH) or 0V (LOW).

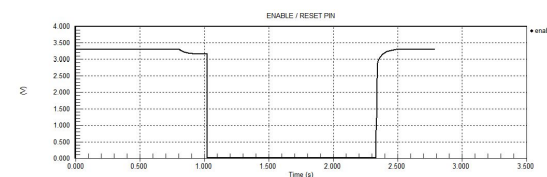
At normal working mode, DTR and RTS are on HIGH, so M2 and M3 are at cut-off operation mode. EN and IO0 stay on HIGH.

In case of RESET, it has to be pressed SW3 and RTS has turned to LOW, so M2 keeps at cut-off mode. IO0 keeps on HIGH and EN on LOW.

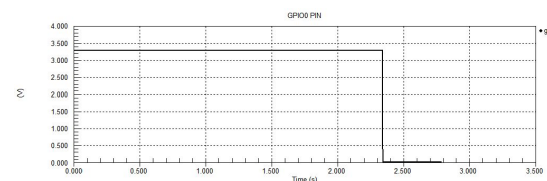
In case of ENABLE, it follows the same working principle, by pressing SW2 in stead of SW3. EN turns to HIGH and IO0 to LOW.

SIMULATION PLOTS

ENABLE PIN SIGNAL



IO0 PIN SIGNAL



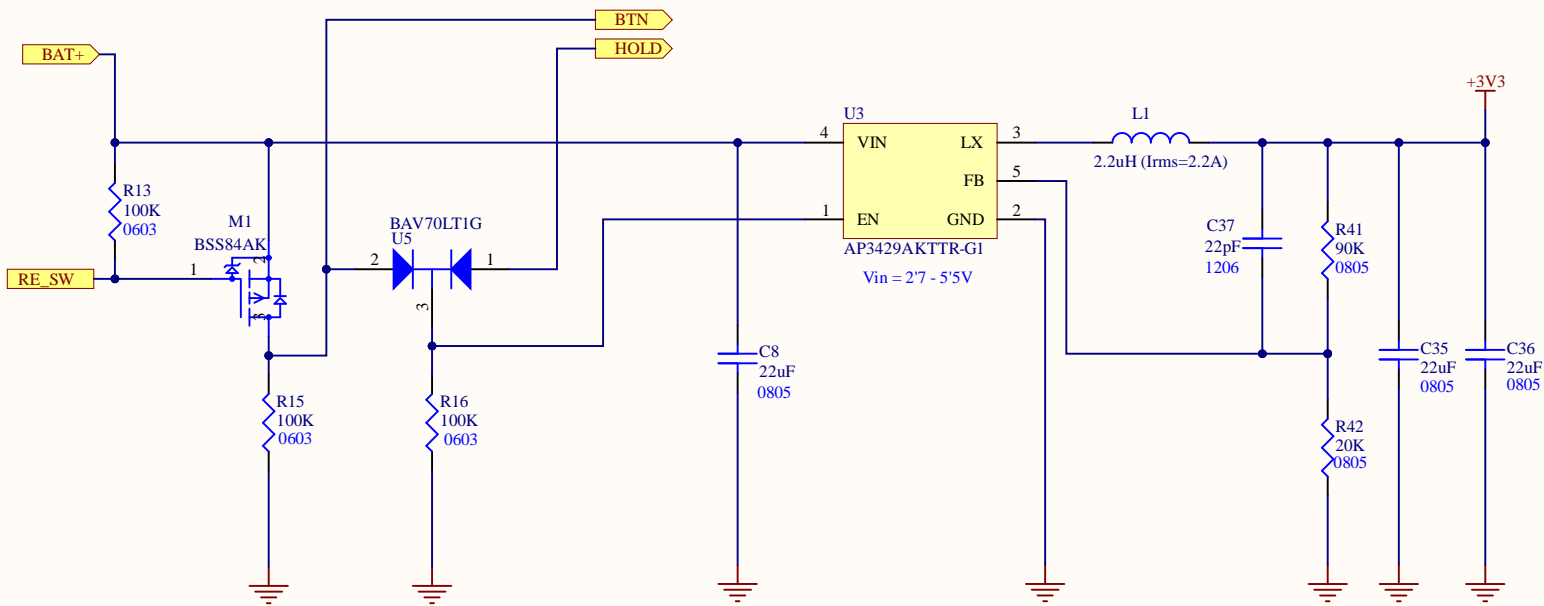
Title: Enable - Reset

Size: A4 Revision: 1 Date: 05/06/2021

Author: Pablo Hidalgo Rodulfo Sheet: 7 of 13



Power switch

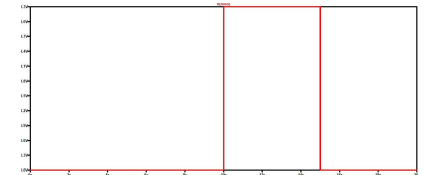


SIMULATION PLOTS

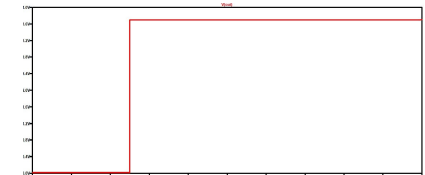
SWITCH VOLTAGE



HOLD SIGNAL VOLTAGE



OUTPUT VOLTAGE



AP3429/A is a DC-DC converter from an input voltage of 2.7 V to 5.5 V. It provides 3.3V at the output and up to 2A load current

Passive components have been chosen according to datasheet values.

Resistors R41 and R42 has been calculated with the following voltage divider:

$$\frac{V_{OUT}}{R41 + R42} = \frac{V_{FB}}{R42}$$

where $V_{out} = 3.3V$ and means the reduced voltage at the output. Also, $V_{fb} = 0.6V$ and means threshold voltage at FB pin (From datasheet). R41 has been fixed to 90K and R42 has been calculated by solving the equation.

WORKING PRINCIPLE

HOLD--- Digital output signal from the micro

BTN--- Digital input signal from the micro

To switch on the system, pushbutton has to be pressed for 5 seconds. At that moment, HOLD signal provides 3.3V from the micro and maintains the system powered on. BTN signal reads when the voltage is on HIGH or LOW, and it is employed for sending the system to sleep mode after 30 minutes.

We can check that behaviour at the simulation plots: it starts switched off until button is pressed for 5 seconds. At that moment, output voltage turns to high even when button is not pressed.

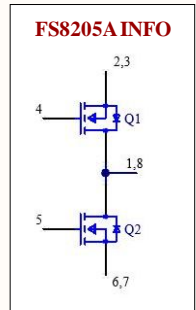
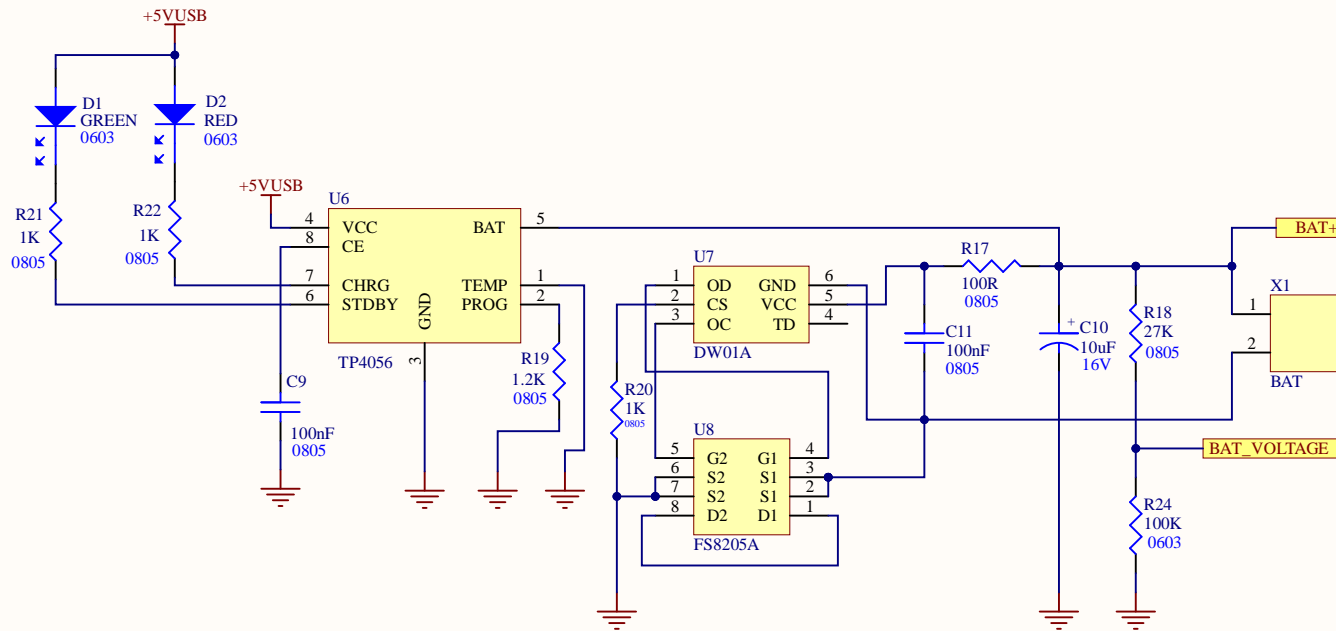
Title: Power Switch

Size: A4 Revision: 1 Date: 05/06/2021

Author: Pablo Hidalgo Rodulfo Sheet: 8 of 13



Battery charger



R21 and R22 values have been chosen following datasheet recommendations. All the module is built with those specific components so we are taking the same components to our design.

BATTERY VOLTAGE

IO14 pin used as analog read for the micro, so battery voltage is always known. Resistors R18 and R24 has been calculated with the following voltage divider:

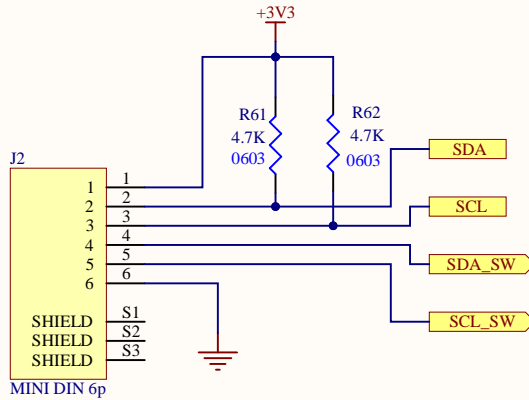
$$V_{BAT} = \frac{R24}{R24 + R18} V_{MAX}$$

where $V_{max} = 4.2V$ and means the maximum voltage that our battery can provide. R24 has been fixed to 100K and R18 has been calculated by solving the equation.

Title: Battery charger		
Size: A4	Revision: 1	Date: 05/06/2021
Author: Pablo Hidalgo Rodulfo	Sheet: 9 of 13	



TSL2561



Component Info

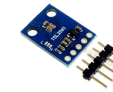
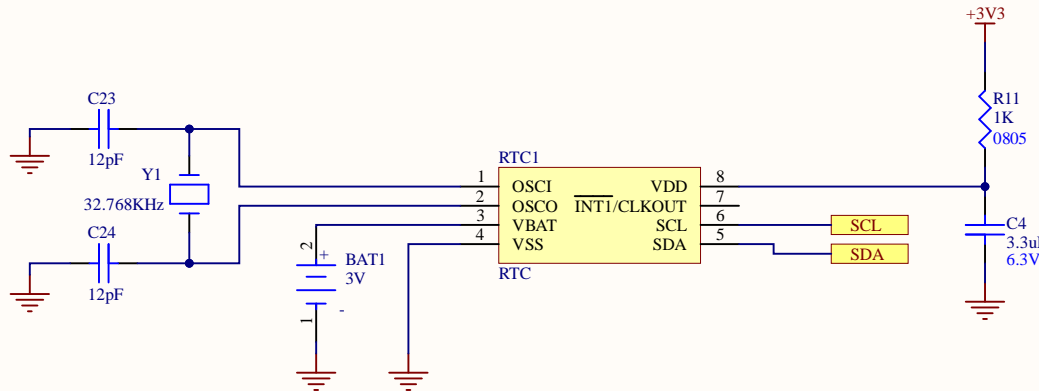


Fig 1. TSL_2561 Sensor

Powered with 3.3V.
 5 pins header for each sensor
 All the pins integrated on a MINIDIN connector
 I2C Address 0x29 0x39 0x49
 Two extra I2C address via software using 2 IO pins from

RTC



Component Info



Fig 6. MCP7940N

Powered with 3.3V.
 SCL and SDA pins from I2C bus have already pull up resistors in I2C_Sensors schematic.
 Battery holder S8421-45R
 R11 and C4 are recommended to limit the Slew Rate. If VDD drops too fast, the internal supply switch to the battery is not guaranteed.
 I2C Address 0x68

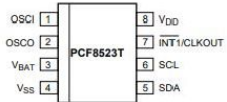


Fig 2. RTC pin configuration



Fig 3. LFXTL002995BULK
 32.768 kHz Crystal Oscillator



Fig 4. Battery holder S8421-45R
 Accommodates CR2032 and similar coin cell batteries.

Title: I2C Sensors		
Size: A4	Revision: 1	Date: 05/06/2021
Author: Pablo Hidalgo Rodulfo	Sheet: 10 of 13	



NOKIA 5110 LCD

Component Info



Fig 1. NOKIA 5110 LCD

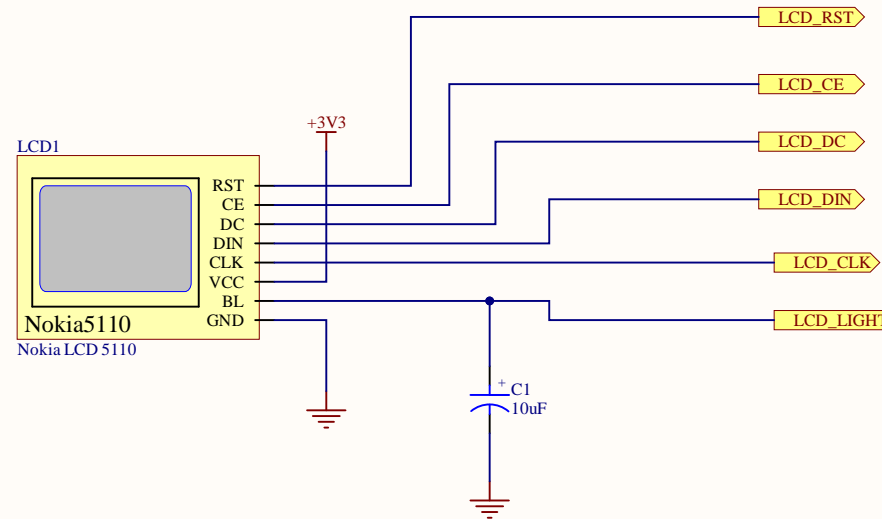
Not needed resistors to digital pins for protecting LCD at 3.3V.

LPF on LCD_LIGHT digital pin for setting the backlight from PWM signal.

Can be powered from 2.7V to 3.3V

Current consumption is 6mA

Consists of 84 rows and 84 columns (84×48) monochrome pixels



Title:	Nokia 5110 LCD				
Size:	A4	Revision:	1	Date:	05/06/2021
Author:	Pablo Hidalgo Rodulfo		Sheet:		11 of 13



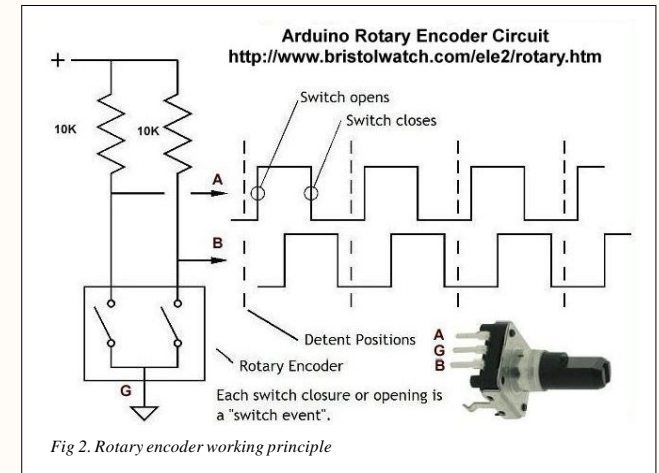
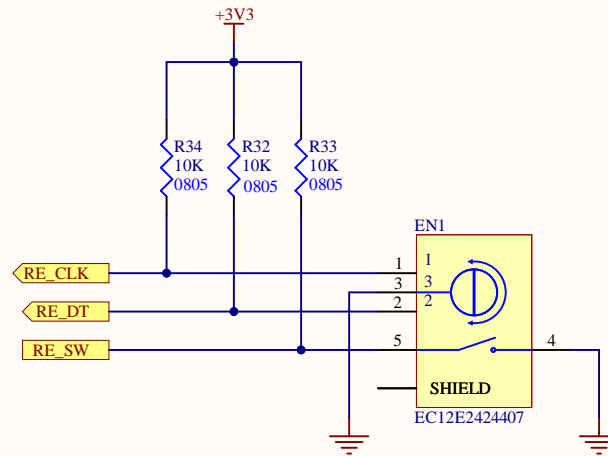
Rotary Encoder

Component Info



Fig 1. Rotary Encoder EC12E2424407

Input pull up resistors can be also setted via software.
It needs three GPIO pins from ESP32 WROVER.



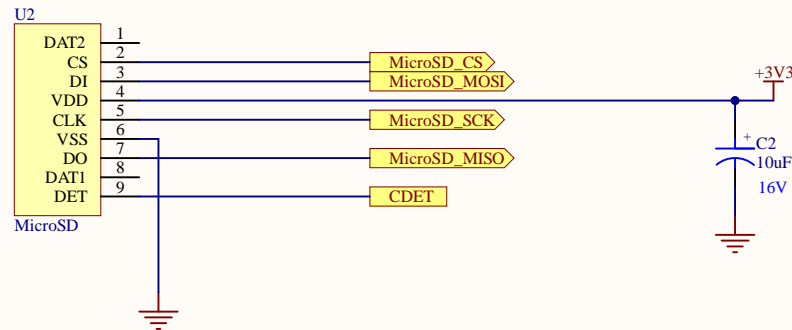
MicroSD

Component Info



Fig 1. Micro SD 504528-0892

Source voltage from 3.15V to 5V.
Mechanism for card detection.
It has 8 pins and a detect level (GND) and detect switch connected to pin 8.



Detection switch on pin 8. When the card is inserted, the internal switch move a tab to level the pin to GND. Also, it is connected to an IO pin from the micro to detect that 0.

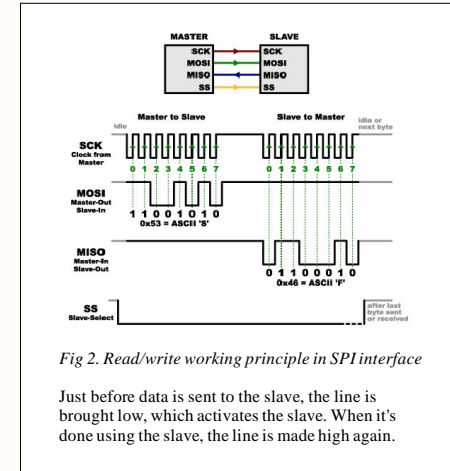


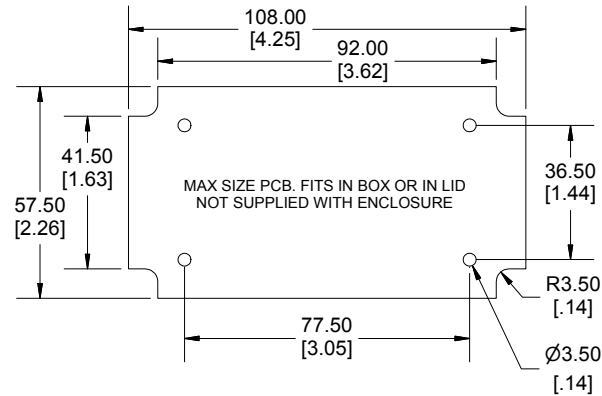
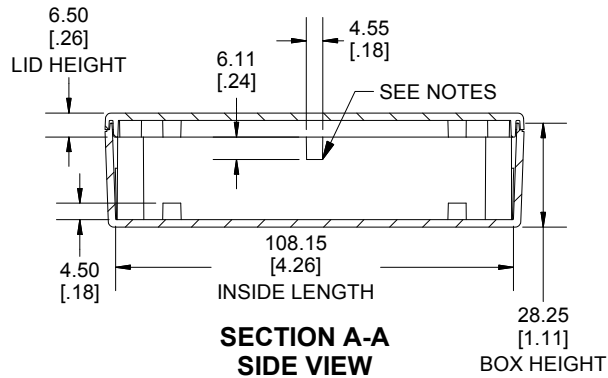
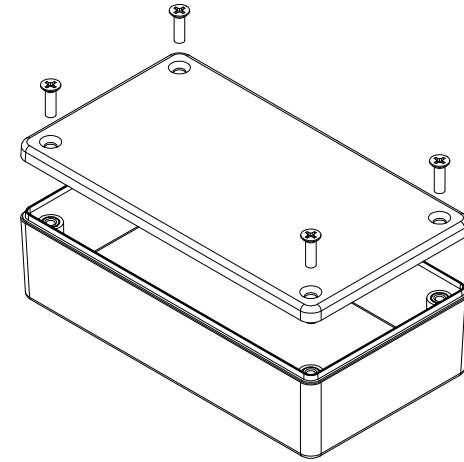
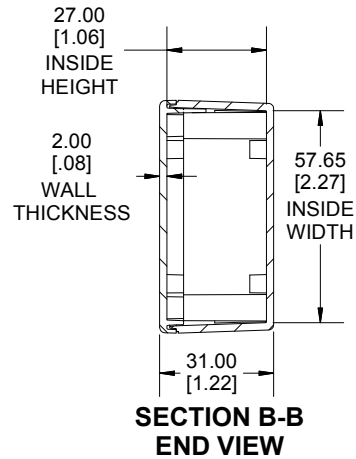
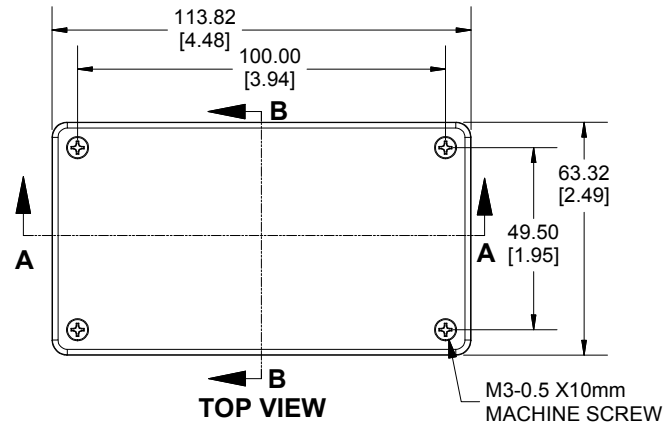
Fig 2. Read/write working principle in SPI interface

Just before data is sent to the slave, the line is brought low, which activates the slave. When it's done using the slave, the line is made high again.

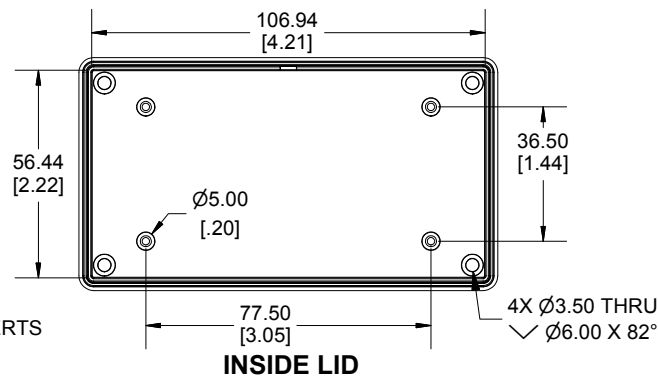
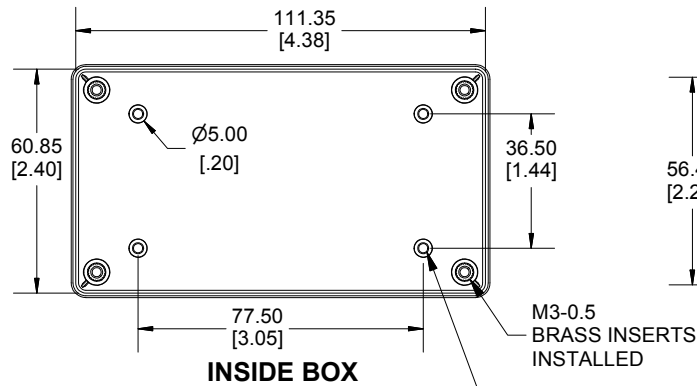


Apéndice B

Hoja técnica caja Hammond 1591XXB



Enclosures can be Factory Modified (Milling, Drilling, Printing etc.)
 Contact Factory mjm@hammondmfg.com for quotes
 Solid models of this enclosure available in STEP or IGES.
 (Part number and text placement/orientation on our products are subject to change, we do not recommend using them as a locating reference for modification purposes)



BOX AND LID PCB POSTS ACCEPT #4 X1/4" SELF-TAPPING SCREW

Dimensions:
 mm
 [inches]

NOTE	
Tab dimensions show maximum size, tab may vary.	
Purchased assembly includes box, lid, 4 cover screws and installed brass inserts.	
Enclosure molded from FRABS UL 94-V0 Plastic.	
Other materials / colours available consult factory.	
Recommended Torque : (43-50) Ozf.in / (30-35) cN.m	

PART NUMBERS	
1591XXB Enclosure	
Black Textured Enclosure	1591XXBBK
Gray Textured Enclosure	1591XXBGY
Translucent Blue Textured Enclosure	1591XXBTBU
ACCESSORIES	
Black Cover Screws [M3-0.5 X 10mm]	1591MS100BK (Pkg 100)
Plated Cover Screws [M3-0.5 X 10mm]	1591MS100 (Pkg 100)
Black ABS Mounting Flange	1591FBBK
Grey ABS Mounting Flange	1591FBGY
P.C. Board Screws	1593ATS50 (Pkg 50)
[#4 x 1/4" self-tapping (6.4mm)]	1593ATS100 (Pkg 100)

HAMMOND MANUFACTURING.

1591XXB

www.hammondmfg.com

Apéndice C

Código del dispositivo

A continuación, se muestran el código utilizado por el dispositivo inicial añadiendo las adaptaciones necesarias debidas al cambio del microcontrolador y a las nuevas funcionalidades comentadas anteriormente.

```
1
2 #include "../LCD5110/LCD5110_Graph/LCD5110_Graph.h"
3 #include "../LCD5110/LCD5110_Graph/LCD5110_Graph.cpp"
4 #include "../LCD5110/LCD5110_Basic/DefaultFonts.c"
5 #include "variables.h"
6 #include "PinOutConfig.h"
7 #include "menu.h"
8 #include <Wire.h>
9 #include <math.h>
10 #include "../Adafruit_Sensor-master/Adafruit_Sensor.h"
11 #include "../Adafruit_TSL2561-master/Adafruit_Sensor.h"
12 #include "../Adafruit_TSL2561-master/Adafruit_TSL2561_U.h"
13 #include "../Adafruit_TSL2561-master/Adafruit_TSL2561_U.cpp"
14 #include <EEPROM.h>
15 #include <MCP7940.h>
16 #include <WiFi.h>
17 #include <WebServer.h>
18 #include <SPI.h>
19 #include <SD.h>
20 #include <stdio.h>
21 #include <stdlib.h>
22
23 //Declared objects
24
25 MCP7940_Class MCP7940; // Create an instance of the MCP7940
26 DateTime now = MCP7940.now(); // Get the current time
27 File myFile;
28 LCD5110 lcd(34,35,32,12,27);
29
30 WiFiServer server(80); // Set web server port number to 80
31
32 const byte rowsgridLCD= rowsLCD/8;
33 const byte columnsgridLCD= columnsLCD/8;
34
35 //Sensors I2C ports
36 Adafruit_TSL2561_Unified tsl_1 = Adafruit_TSL2561_Unified(TSL2561_ADDR_LOW, 00001); //Sensor 1
37 Adafruit_TSL2561_Unified tsl_2 = Adafruit_TSL2561_Unified(TSL2561_ADDR_FLOAT, 00002); //Sensor 2
38 Adafruit_TSL2561_Unified tsl_3 = Adafruit_TSL2561_Unified(TSL2561_ADDR_HIGH, 00003); //Sensor 3
39 //Sensors connected to I2C Software
40 Adafruit_TSL2561_Unified tsl_4 = Adafruit_TSL2561_Unified(TSL2561_ADDR_HIGH, 00004); //Sensor 4
41 Adafruit_TSL2561_Unified tsl_5 = Adafruit_TSL2561_Unified(TSL2561_ADDR_FLOAT, 00005); //Sensor 5
42
43 //State variables
44 boolean MainMenuVar = false;
45 boolean SaveModeVar = false;
```

References

```
46 boolean LastSavedModeVar = false;
47 boolean SystemSetupVar = false;
48 boolean SensorSetupVar = false;
49
50 enum Button{ Unknown, Ok, Left, Right } btnPressed; // Enumerador con los diferentes botones
51 // disponibles
52 enum Screen{ Save, SimpleMeasure, DetailedMeasure, Setup }; // Enumerador con los distintos tipos de submenús
53 // disponibles
54 enum SetupScreen{ NumberGain, NumberIntegrationTime, Flag }; // Enumerador con los distintos tipos de ajustes
55 // dentro del menú de ajuste
56 enum SystemSetupScreen{ Language, Contrast, Backlight, Date};
57
58 void setup()
59 {
60 //buzzer
61 pinMode(buzzer, OUTPUT);
62 //battery voltage
63 pinMode(batPin, INPUT);
64 //SD module
65 pinMode(cdetectpin, INPUT);
66 pinMode(pinCS, OUTPUT);
67 //Serial Port
68 Serial.begin(9600);
69 //Power switch
70 pinMode(btnSignal, INPUT);
71 pinMode(holdSignal, OUTPUT);
72
73 print_wakeup_reason(); //Print the wakeup reason for ESP32
74 esp_sleep_enable_ext0_wakeup(GPIO_NUM_26, 1); // Wake up source configuration. In our case, the ESP32 wakes up
75 // for an external trigger.
76 digitalWrite(holdSignal, HIGH); //When button has been pressed, hold signal helps by keeping switched on the
77 // device.
78
79 readConfiguration(); // Load EEPROM configuration and setup it for the first time.
80
81 pinMode(pENCO_SW, INPUT); //Rotary encoder pins
82 pinMode(pENCO_DT, INPUT);
83 pinMode(pENCO_CLK, INPUT);
84
85 pinMode(LCDbacklightpin, OUTPUT); //LCD setup
86 lcd.InitLCD();
87 lcd.setFont(SmallFont);
88 analogWrite(LCDbacklightpin, LCDbacklight);
89
90 if (!ts1_1.begin()) {sensorfail=true;} // Sensor i2c_init();
91 if (!ts1_2.begin()) {sensorfail=true;}
92 if (!ts1_3.begin()) {sensorfail=true;}
93 if (!ts1_4.begin()) {sensorfail=true;}
94 if (!ts1_5.begin()) {sensorfail=true;}
95 //RTC
96 MCP7940.begin();
97 setupOscillator(); // Turn oscillator on if necessary
98 configureSensor(); // Setup the sensor gain and integration time
99 initWiFi();
100 }
101
102 void loop() {
103 BatteryLevel(); // It shows battery level when it is switched on.
104 if (MainMenuVar == false & SaveModeVar == false & SystemSetupVar == false & SensorSetupVar == false &
105 LastSavedModeVar == false ) {
106 MeasureMode();
107 }
108 if (MainMenuVar == true){
109 lcd.clrScr();
110 MainMenu();
111 }
112 if (SaveModeVar == true){
113 lcd.clrScr();
114 SaveMode();
115 }
116 if (LastSavedModeVar == true){
117 lcd.clrScr();
118 LastSavedMode();
119 }
120 if (SystemSetupVar == true){
121 lcd.clrScr();
122 SystemSetup();
123 }
124 if (SensorSetupVar == true){
125 lcd.clrScr();
126 SensorSetup();
127 }
128 }
```