

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño  
Universitat Politècnica de València

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLACA DE DESARROLLO PARA ROBÓTICA MÓVIL

Trabajo Final de Grado  
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: Pablo Esteve Reula

Director: Leopoldo Armesto Ángel

Junio 2021



## RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo crear una placa de desarrollo especializada en robótica móvil que incluya todas las funcionalidades y componentes necesarios para el funcionamiento y experimentación con este tipo de robots, disminuyendo al máximo los problemas que puedan aparecer.

La finalidad de este proyecto no es el de crear y programar un robot, sino la de crear una herramienta útil para todo el mundo que quiera entrar en el mundo de la robótica móvil, ya sea como pasatiempos o como forma de estudio y aprendizaje. Esta placa de desarrollo reduce las complicaciones que pueden surgir en este tipo de proyectos, ya sean con la alimentación y la batería, o las conexiones y programación, y ofrece el mayor número de posibilidades al usuario.

Estas funcionalidades incluyen partes como una batería recargable que proporciona energía al sistema, un controlador para motores de corriente continua o paso a paso, y conectores para las interfaces de comunicación más comunes (I2C, SPI) y para servomotores u otro tipo de sensores o actuadores. Con el uso de un microcontrolador con conexión Wi-Fi y Bluetooth, también se consigue aumentar las posibilidades que tendrá disponibles el usuario con la conectividad, aumentando el alcance de los proyectos que va a realizar.

## ABSTRACT

This project aims to create a development board specialized in mobile robotics that includes all the functionalities and components necessary for the operation and experimentation with this type of robots, reducing the problems that may appear as much as possible.

The purpose of this project is not to create and program a robot, but to create a useful tool for everyone who wants to get into the world of mobile robotics, either as a hobby or as a form of study and learning. This development board reduces the complications that can arise in this type of projects, whether with power and battery, or connectivity and programming, offering the greatest number of possibilities to the user.

These functionalities include parts such as a rechargeable battery which provides power to the system, a controller for DC or stepper motors, and connectors for the most common communication interfaces (I2C, SPI) and for servo motors or other types of sensors or actuators. With the use of a microcontroller with Wi-Fi and Bluetooth connectivity, it can also manage to increase the possibilities available to the user, increasing the scope of the projects to be carried out.

## CONTENIDO DEL PROYECTO

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| <u>1. MEMÓRIA</u> .....               | 5  |
| <u>2. PLANOS</u> .....                | 49 |
| <u>3. PLIEGO DE CONDICIONES</u> ..... | 61 |
| <u>4. PRESUPUESTO</u> .....           | 65 |

# 1. MEMÓRIA



## CONTENIDO DE LA MEMÓRIA

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | INTRODUCCIÓN .....                             | 11 |
| 1.1.   | MOTIVACIÓN.....                                | 11 |
| 1.2.   | OBJETIVO .....                                 | 11 |
| 1.3.   | CONTENIDO DE LA MEMÓRIA .....                  | 12 |
| 2.     | DISEÑO .....                                   | 13 |
| 2.1.   | LIMITACIONES .....                             | 13 |
| 2.2.   | ESQUEMA DE ENERGÍA .....                       | 14 |
| 2.3.   | PROGRAMACIÓN .....                             | 17 |
| 2.4.   | MICROCONTROLADOR Y CONECTIVIDAD .....          | 18 |
| 2.5.   | ALTERNATIVAS .....                             | 19 |
| 3.     | HERRAMIENTAS DE DESARROLLO.....                | 20 |
| 3.1.   | ALTIVM DESIGNER .....                          | 20 |
| 3.1.1. | LIBRERÍA DE ESQUEMÁTICO.....                   | 20 |
| 3.1.2. | LIBRERÍA DE COMPONENTES.....                   | 21 |
| 3.1.3. | ESQUEMÁTICO .....                              | 22 |
| 3.1.4. | DISEÑO PCB .....                               | 23 |
| 3.2.   | PCB TOOLKIT.....                               | 23 |
| 3.3.   | LTSPICE XVII .....                             | 24 |
| 4.     | SOLUCIÓN ADOPTADA.....                         | 24 |
| 4.1.   | ESQUEMÁTICO Y ELECCIÓN DE COMPONENTES .....    | 24 |
| 4.1.1. | BATERÍA (ICR18650-26F).....                    | 24 |
| 4.1.1. | CARGA DE LA BATERÍA (TP4056-42-ESOP8) .....    | 25 |
| 4.1.1. | CONVERTIDOR BOOST (LT1370CT7).....             | 26 |
| 4.1.1. | REGULADOR DE TENSIÓN (AMS1117-3.3) .....       | 29 |
| 4.1.1. | INTERFAZ USB-UART (FT232RL-REEL) .....         | 29 |
| 4.1.1. | CONTROLADOR DE MOTORES DC (L293D).....         | 30 |
| 4.1.2. | MICROCONTROLADOR (ESP32-WROOM-32D).....        | 31 |
| 4.2.   | CÁLCULOS TÉRMICOS .....                        | 33 |
| 4.2.1. | CÁRGA DE LA BATERÍA .....                      | 33 |
| 4.2.2. | CONVERIDOR BOOST.....                          | 35 |
| 4.2.3. | CONTROLADOR DE MOTORES DC.....                 | 37 |
| 4.3.   | DISEÑO PCB .....                               | 38 |
| 4.3.1. | LIMITACIONES DE MANUFACTURACIÓN Y DISEÑO ..... | 38 |
| 4.3.2. | DISEÑO .....                                   | 41 |

|      |                          |    |
|------|--------------------------|----|
| 5.   | PROTOTIPO .....          | 43 |
| 5.1. | PRUEBAS REALIZADAS ..... | 44 |
| 5.2. | CAMBIOS PROPUESTOS ..... | 47 |
| 6.   | CONCLUSIÓN .....         | 48 |

## LISTA DE TABLAS

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Tabla 1: | uso de energía de algunos actuadores y sensores, mostrando su modelo y corriente media consumida.....                        | 15 |
| Tabla 2: | comparativa entre diferentes tipos de baterías recargables dependiendo de su material y sus características principales..... | 16 |
| Tabla 3: | lista de las limitaciones principales de la empresa JLCPCB a la hora de crear una PCB.....                                   | 39 |
| Tabla 4: | lista de las anchuras de trazas más usadas en el proyecto y sus características y usos.....                                  | 40 |
| Tabla 5: | lista de los tamaños de vías más usados en el proyecto y sus características y usos.....                                     | 41 |

## LISTA DE FIGURAS

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 1:  | diagrama de bloques básico de la alimentación, desde la carga de la batería, hasta el convertidor y regulador para alimentar todos los componentes..... | 15 |
| Figura 2:  | diagrama de bloques propuesto para el diseño de la alimentación, teniendo en cuenta las características de cada uno de los bloques.....                 | 17 |
| Figura 3:  | diagrama de bloques completo teniendo en cuenta tanto la sección energética como la programación.....   | 18 |
| Figura 4:  | diagrama de bloques de la conectividad con el microcontrolador.....   | 19 |
| Figura 5:  | captura de pantalla durante la creación de un componente en la librería de esquemático con el Altium Designer.....                                      | 21 |
| Figura 6:  | captura de pantalla durante la creación de una huella de componente en la librería de PCB con el Altium Designer.....                                   | 22 |
| Figura 7:  | captura de pantalla durante la creación del esquema con el Altium Designer.....   | 22 |
| Figura 8:  | captura de pantalla durante el diseño PCB con el Altium Designer.....   | 23 |
| Figura 9:  | esquema de la batería con su interruptor y características.....   | 25 |
| Figura 10: | esquema completo del circuito de carga de la batería, basado en el circuito integrado TP4056-42-ESOP8.....  | 26 |
| Figura 11: | esquema de un convertidor conmutado de tipo Boost.....  | 27 |
| Figura 12: | esquema del convertidor Boost.....  | 29 |
| Figura 13: | esquema completo del regulador de tensión.....  | 29 |
| Figura 14: | esquema de la interfaz USB-UART a partir del circuito integrado FT232RL-REEL.....   | 30 |
| Figura 15: | esquema completo del circuito de control de motores DC basado en el circuito integrado L293D.....   | 31 |
| Figura 16: | esquema del microcontrolador y sus conexiones.....  | 32 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 17: esquema de los conectores y sus funciones. ....  | 33 |
| Figura 18: gráfica que muestra la máxima potencia disipada y resistencia térmica que tendrá el controlador respecto a la longitud del lado del disipador de la PCB..... | 38 |
| Figura 19: fotografía del prototipo antes de ensamblar los componentes por parte del usuario. ....  | 43 |
| Figura 20: fotografía del prototipo completamente ensamblado y funcional.....   | 44 |
| Figura 21: gráfica de corriente de carga y tensión de batería de la media de tres mediciones de ciclos completos.....   | 45 |
| Figura 22: gráfica comparativa del voltaje de salida frente a distintos valores de corriente de salida y tensión de la batería. ....                                    | 46 |



# 1. INTRODUCCIÓN

Desde estudiantes que quieren aprender sobre electrónica o automatización, hasta personas que quieren crear proyectos en su tiempo libre, la robótica móvil es un área de trabajo muy extendida en el mundo tecnológico. Permite crear máquinas automáticas que deben navegar un espacio concreto y realizar determinadas acciones con la información que obtienen de su entorno. Dentro de uno de estos robots hay multitud de partes que deben funcionar al unísono, desde los sensores que permitirán obtener información del mundo exterior, pasando por la propia estructura física del robot que determinará los límites por los que se podrá mover, hasta los circuitos electrónicos que funcionan como “cerebro” de la máquina. En este último punto, el circuito o placa de control, es en el que se va a basar este proyecto.

Cualquier persona que haya querido entrar en el mundo de la robótica móvil, se habrá dado cuenta del número inesperado de complicaciones que aparecen en este tipo de proyectos, empezando con la alimentación inalámbrica del robot mediante una batería, y continuando con la conectividad o la interfaz usuario-robot. Existen varios módulos o placas electrónicas que solucionan estos problemas como por ejemplo cargadores de baterías con fuentes de alimentación incorporadas, placas paralelas que incluyen controladores para diferentes actuadores, o placas de conexión (breakout boards) que facilitan la unión de todas estas partes, pero existen muy pocas que incorporen todas estas funcionalidades en un solo producto. También existe un grupo de personas interesadas en la programación o creación de algoritmos de navegación, pero no tanto en la parte electrónica.

La finalidad de este proyecto es la de diseñar y crear un prototipo de una placa de desarrollo que incluya todas estas funcionalidades que son fáciles de encontrar por separado, pero que realmente son difíciles de encontrar juntas. El producto que surge de este trabajo debe de ser una herramienta útil para toda aquella persona que quiera realizar un proyecto dentro de este ámbito, disminuyendo al máximo las complicaciones para aquella gente que no está interesada en la parte electrónica de la robótica móvil.

## 1.1. MOTIVACIÓN

El uso de robots móviles ha ido creciendo exponencialmente desde el siglo pasado cuando empezó su desarrollo. Muchas empresas fuera del sector tecnológico, como por ejemplo almacenes, están empezando a incorporar robots móviles en su sistema de transporte de mercancías para automatizar el proceso. Por esta razón, hay muchos estudiantes que deciden abordar esta materia para formar parte de este sector laboral. Este incremento se puede ver también reflejado en el incremento de cursos o grados universitarios sobre robótica y su alta demanda. Esto implica que hay mucha gente interesada en aprender sobre esta materia y, por lo tanto, en comprar productos como el que se ha diseñado en este proyecto. La fragmentación de este mercado y la alta demanda de placas de control de este estilo han sido los factores que han motivado principalmente este proyecto y han impulsado su desarrollo.

## 1.2. OBJETIVO

Con este proyecto se tiene como objetivo crear una placa de desarrollo enfocada a la robótica móvil que reduzca al mínimo las dificultades que aparecen durante el

desarrollo de uno de estos proyectos. También se quiere simplificar al máximo su uso para que sea más fácil para el usuario emplearla y, sobre todo, que sea útil y asequible.

Para cumplir con este objetivo, se han de abordar principalmente estos problemas:

- Como se trata de una placa de desarrollo para robots autónomos, se ha de incluir una batería para alimentar el sistema. Esta debe de tener la capacidad suficiente como para que el robot funcione durante un periodo de tiempo razonable y ha de proporcionar la suficiente corriente como para hacer funcionar varios motores o sensores a la vez sin problemas. También debe de incluir un sistema de carga fácil de usar y entender, y una fuente de alimentación para hacer funcionar el resto del circuito.
- Se ha de simplificar al máximo la relación entre el usuario y el circuito. Todas las conexiones deberán ser fácilmente accesibles, deberán estar correctamente marcadas en la serigrafía, y deberán ser fáciles de usar. Esto incluye conectores, interruptores, indicadores luminosos o botones. El tamaño y peso también se han de tener en cuenta, ya que en algunas ocasiones va a tener que estar montado en espacios reducidos.
- Respecto a su utilidad o versatilidad, hay que tener en cuenta el uso que se le va a dar a este producto. Servomotores, motores de corriente continua o motores paso a paso son algunos de los actuadores más usados en este ámbito. Por esto, habrá que incluir conectores y controladores para todos ellos, proporcionando así la flexibilidad suficiente como para poder llevar a cabo la mayoría de los posibles proyectos con ella. La conectividad del sistema también puede llevar los proyectos a otras dimensiones, como por ejemplo incluyendo Bluetooth al sistema para poder controlar el robot desde un teléfono móvil.

### 1.3. CONTENIDO DE LA MEMORIA

La memoria de este proyecto está dividida en varios apartados, cada uno enfocado a un aspecto del proceso de diseño y toma de decisiones.

En el apartado DISEÑO se van a mostrar las limitaciones que han surgido a la hora de abordar los objetivos del proyecto y se plantean varios diagramas de bloques y esquemas que forman la solución elegida para el problema, además de mostrar algunas alternativas propuestas. Esta solución se expande en el apartado SOLUCIÓN ADOPTADA, donde se realiza la selección de componentes y su esquema para cumplir con los criterios establecidos. Los distintos cálculos de diseño, el esquema eléctrico, y el diseño de PCB se encuentran aquí.

La explicación de cuáles han sido los programas informáticos que se han usado se da en HERRAMIENTAS DE DESARROLLO. En este bloque se muestran los flujos de trabajo que se han seguido para realizar los cálculos o simulaciones del proyecto, y se explica su utilidad y porque se han elegido estos programas frente a otros.

En PROTOTIPO se exponen cuáles han sido los resultados de las pruebas con el prototipo creado y se proponen diferentes cambios para ajustarse más a los objetivos de diseño.

Por último, en el apartado CONCLUSIÓN se explican de forma sintetizada todas las ideas llevadas a cabo durante este proceso y se realiza una breve reflexión sobre cuáles han sido los resultados.

## 2. DISEÑO

En el apartado de diseño se van a pasar a explicar cuáles han sido las limitaciones a la hora de diseñar el producto y el prototipo, y a crear un diagrama de bloques del sistema que tenga en cuenta las principales características de este.

### 2.1. LIMITACIONES

Como uno de los objetivos para este trabajo es crear un producto asequible, es importante elegir componentes que sean fácilmente accesibles y con el menor precio posible, siempre y cuando cumplan con las especificaciones determinadas. Para la creación del prototipo, también habrá que elegir una empresa de manufacturación de placas de circuito impreso (PCB) y varios distribuidores de componentes que van a limitar el proyecto con sus capacidades de producción, componentes y precios disponibles.

Para la manufacturación del prototipo en PCB, se ha decidido elegir la empresa JiaLiChuangPCB más conocida como JLCPCB (Hong Kong, China) que se dedica a la fabricación de PCB prototipo por encargo. Los precios de los prototipos son bastante asequibles ya que su modelo de empresa se centra en la producción de bajos volúmenes bajo demanda. Sus capacidades de producción también son lo bastante buenas, con tolerancias lo bastante ajustadas para este producto. También tienen un servicio de ensamblaje de componentes SMD con un amplio catálogo que me permite reducir el tiempo de soldadura a la hora de montar el prototipo.

Para la compra de componentes, me he centrado en tres distribuidores. El primero y principal de ellos es RS Components (Londres, Reino Unido), que posee de un gran catálogo de componentes electrónicos y, como dispone de varios almacenes en España, los tiempos de entrega y precios son más reducidos que en el resto de las principales empresas. El segundo distribuidor es Mouser Electronics (Texas, Estados Unidos), que dispone de componentes más específicos, pero con tiempos de espera un poco más largos. El tercero es DigiKey (Minnesota, Estados Unidos). Al igual que el segundo distribuidor elegido, dispone de productos más específicos que han sido más difíciles de encontrar cerca de España. Cabe destacar que las dos últimas empresas elegidas funcionan como respaldo de la primera, ya que ciertos componentes estaban fuera de stock durante la realización del trabajo. Estos componentes que faltaban también fueron encontrados en distribuidores locales más pequeños, pero con tiempos de entrega más largos, por lo que se decidió continuar con los elegidos. Una vez acabado el diseño, estos distribuidores locales serían la mejor opción ya que no sería tan importante el tiempo de espera, pero si el precio y comunicación con ellos.

Respecto al ensamblaje del circuito, existen principalmente dos tipos de componentes según su tipo de montaje, los de montaje superficial (SMD) y los de montaje en orificio

pasante (through hole). Los primeros son más difíciles de montar por el usuario con un soldador ya que son muy pequeños, pero sí que pueden ser fácilmente montados por máquinas de ensamblaje automáticas y son más baratos. Los segundos no pueden ser ensamblados de forma automática, pero son fácilmente montables por el usuario.

Teniendo esto en cuenta, hay que conseguir que todos los componentes posibles sean de montaje superficial para reducir el precio y tamaño del producto, y facilitar el montaje por el usuario. Algunos componentes más grandes como los conectores, que son de montaje en orificio pasante, pueden ser fácilmente montados por el usuario sin problemas.

Esto condiciona el diseño de componentes, limitando el número de ellos que cuadrarán con esta especificación. Para la realización del prototipo, si se elige algún componente de montaje en orificio pasante para facilitar el montaje de este, habrá que tener en cuenta que deberá tener un modelo igual o similar con las mismas características, pero con el tipo de montaje superficial para reducir el tiempo de montaje por el usuario.

Estas han sido las limitaciones de componentes y fabricación que se han tenido en el proyecto.

## 2.2. ESQUEMA DE ENERGÍA

Una de las partes más importantes en este diseño es la alimentación. Muchos proyectos de robótica móvil están limitados por este factor, ya sea con la potencia necesaria para mover todos los motores y hacer funcionar los sensores, o con la energía consumida por estos, que limita el tiempo de uso y experimentación con el robot.

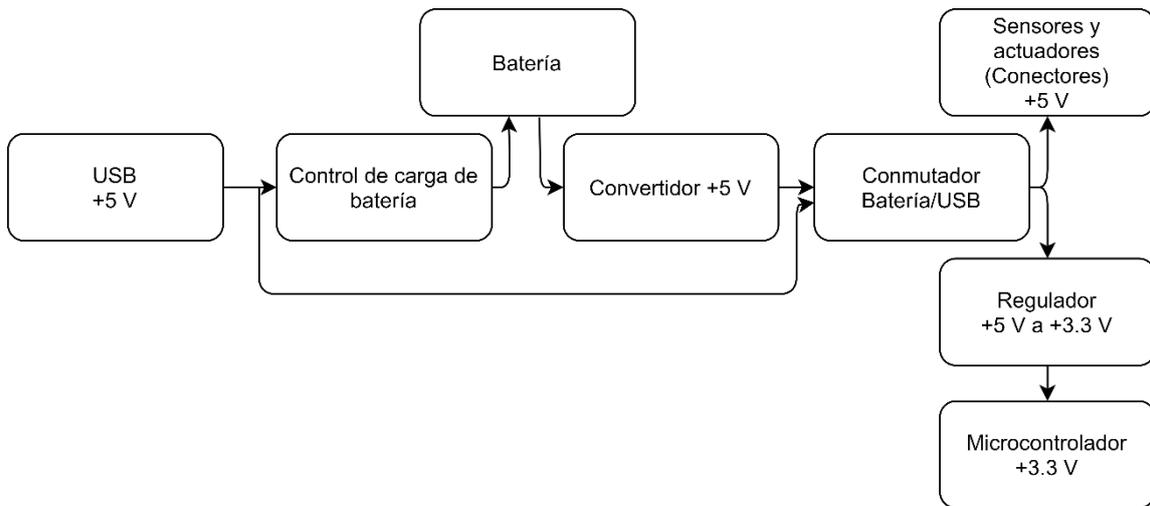
La mayoría de los actuadores y sensores que se usan en robótica funcionan alimentados a 5 V. Por otra parte, las baterías varían su valor de tensión dependiendo de su carga y no son estables ni consistentes. Por lo tanto, hay que situar un convertidor que transforme la energía recibida de la batería en una fuente de tensión fija de 5 V para alimentar el resto del circuito.

Por su parte, los microcontroladores son la parte indispensable de un proyecto de estas características, que ejecutan las instrucciones y toman las decisiones. Los más comunes funcionan a 3.3 V, un estándar ampliamente extendido por la industria. Por su bajo consumo energético comparado con el resto del sistema, un regulador desde los 5 V que usará el resto del sistema hasta los 3.3 V sería lo más adecuado.

La parte de la carga de la batería también es una parte muy importante. Este circuito ha de recibir energía desde algún conector fácil de usar como un microUSB, y controlar la carga de la batería.

Gran parte del tiempo de diseño con este tipo de robots se suele realizar en el banco de trabajo, comprobando que el código subido a la placa funciona correctamente y que no hay ningún problema antes de una prueba real. Para esto, se ha decidido usar un conmutador para seleccionar si la tensión de 5 V proviene de la batería o directamente del puerto USB. Con esto, el usuario podría realizar pruebas simples sin gastar batería, recibiendo toda la energía desde el conector microUSB.

En la Figura 1, se muestra el diagrama de bloques básico del apartado de la alimentación del circuito teniendo en cuenta todas las consideraciones hechas anteriormente.



*Figura 1: diagrama de bloques básico de la alimentación, desde la carga de la batería, hasta el convertidor y regulador para alimentar todos los componentes.*

Para continuar con el diseño de todos estos bloques, vamos a tener que hacer un pequeño estudio energético sobre los actuadores y sensores más empleados en robótica móvil. Esto nos permitirá realizar una aproximación sobre cuáles van a ser las formas más comunes en las que este circuito va a ser usado y, así, diseñar cada uno de estos bloques, determinando, por ejemplo, la capacidad de la batería o la potencia que esta debería de otorgar para que los proyectos que vaya a realizar el usuario en un futuro no se vean limitados por este factor energético.

Los servomotores son los actuadores por excelencia en este tipo de proyectos. También tenemos otros como las matrices LED, sensores ópticos o sensores de ultrasonidos para medir distancias. Para obtener un valor aproximado de la potencia que consumen estos, se han buscado algunos de los modelos más comunes y en la Tabla 1 se muestran los datos.

*Tabla 1: uso de energía de algunos actuadores y sensores, mostrando su modelo y corriente media consumida.*

| COMPONENTE                 | MODELO   | Corriente [mA] |
|----------------------------|----------|----------------|
| Servomotor                 | SG90     | 200            |
| Servo de rotación continua | FS90R    | 200            |
| Matriz LED                 | Max7219  | 330            |
| Sensor óptico              | TCRT5000 | 100            |
| Sensor de ultrasonidos     | SRHC04   | 15             |

Como se puede ver, las matrices LED junto con los servomotores son los que más potencia consumen. El límite máximo de servomotores se puede aproximar entre ocho o doce para los proyectos más grandes y, asumiendo unos pocos sensores más, la corriente de salida máxima para el conversor que transformará la energía de la batería en la fuente de tensión de 5 V deberá de ser de 3 A. Con este valor de corriente de salida se podrá

asegurar que la mayoría de proyectos se puedan llevar a cabo y no ser limitador por este factor.

Continuando con el diseño de este convertor, también es necesario que el rango de tensiones de entrada esté dentro del límite de los valores de la batería para poder aprovechar al máximo su capacidad. Respecto al tipo de convertor que se va a usar, hay que tener en cuenta que ha de ser lo más eficiente posible. Los convertidores conmutados disponen de una eficiencia relativamente alta en este rango de potencias y en especial un convertidor boost ya que la tensión de salida siempre será mayor que la de entrada.

La batería es uno de los puntos más importantes a la hora de diseñar un sistema como este. Su capacidad, rango de tensiones de funcionamiento, y corrientes máximas de carga y descarga son sus principales características. Existen muchos tipos de baterías recargables y, dependiendo de su material de fabricación, estas características pueden variar drásticamente.

Para esta aplicación, la corriente de descarga ha de ser lo más alta posible debido a la alta potencia necesaria, la tensión nominal lo más alta posible también para disminuir al máximo las pérdidas del convertidor (ya que cuanto más baja sea, más ineficiente será el convertidor), y con capacidad alta para hacer funcionar el robot durante el mayor tiempo posible. Analizando los datos de la Tabla 2, se puede deducir que la mejor elección está en las baterías de Ion de Litio (Li-Ion) debido a todos estos factores. Además, este tipo de baterías está ampliamente extendido y es muy probable que el usuario del circuito ya disponga de una de ellas, reduciendo así el coste.

*Tabla 2: comparativa entre diferentes tipos de baterías recargables dependiendo de su material y sus características principales.*

| MATERIAL | TENSIÓN NOMINAL [V] | CORRIENTE SALIDA | DENSIDAD ENERGÉTICA [Wh/Kg] |
|----------|---------------------|------------------|-----------------------------|
| Li-Ion   | 3.7                 | Alta             | 140                         |
| NiCd     | 1.2                 | Media            | 65                          |
| NiMH     | 1.2                 | Baja             | 90                          |
| Li-Po    | 3.6                 | Alta             | 115                         |

Este tipo de baterías están diseñadas para ser cargadas mediante un método llamado Corriente Constante-Tensión Constante (CC-CV), en el que, durante la primera parte del proceso de carga, la corriente es constante, mientras que en la segunda parte se mantiene una tensión de carga constante hasta que termine el proceso. Por esta razón, el circuito de carga que se elija deberá de seguir este proceso para asegurar el correcto proceso de carga.

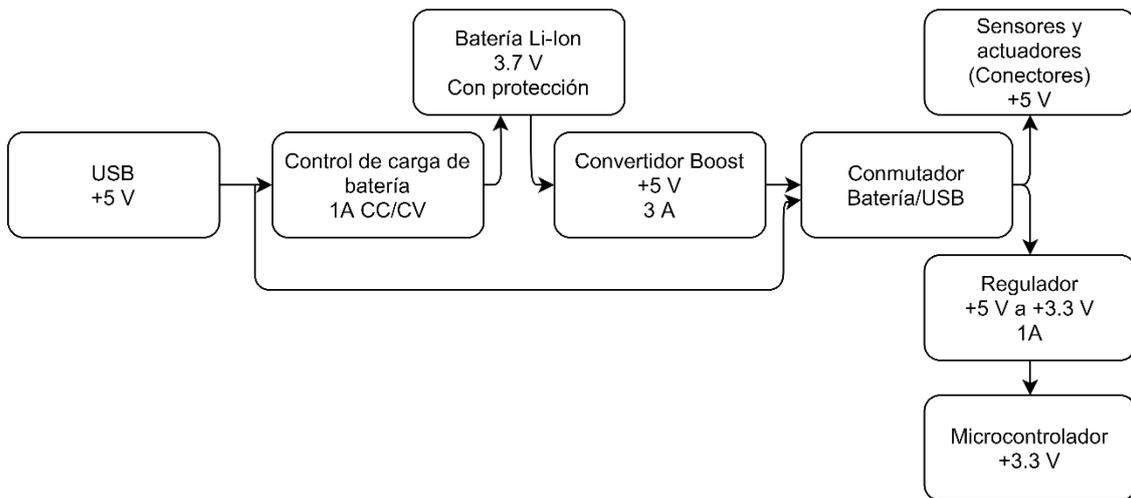
También es importante que este valor de tensión y corriente no sobrepasen los límites de la batería elegida, siendo la tensión no superior a los 4.2 V (que es la máxima de las baterías Li-Ion), y la corriente al límite del modelo escogido, aunque un valor de 1 A es una apuesta segura, con tiempos de carga no excesivamente largos y con la seguridad de que la batería elegida lo va a soportar.

Uno de los inconvenientes de este tipo de baterías es su ajustado rango de valores máximos. Los valores de tensión máximo y mínimo, los de corriente, y la temperatura,

son algunos de estos valores que no pueden ser sobrepasados bajo ningún concepto con peligro de fallo de la batería. Por esto, existen muchos modelos de baterías que disponen de circuitos integrados dentro del propio paquete de la batería que la protegen de todos estos factores y la desconectan completamente del circuito en caso de fallo. Debido a esta característica, se ha decidido optar por usar obligatoriamente una batería de este estilo para evitar problemas. El único sistema de protección será necesario a la hora de la carga para que no se exceda el valor límite de tensión. Esto será controlado por el circuito de carga.

Para acabar con el diseño del diagrama de bloques energético, faltaría determinar las características del regulador de tensión que ha de convertir los 5 V que se usarán para alimentar los motores y sensores del robot a 3.3 V para alimentar el microcontrolador. Debido a la baja potencia requerida para este componente, una corriente de salida de 1 A es más que suficiente para este propósito.

A continuación, en la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques propuesto como esquema energético del circuito.



*Figura 2: diagrama de bloques propuesto para el diseño de la alimentación, teniendo en cuenta las características de cada uno de los bloques.*

### 2.3. PROGRAMACIÓN

Gran parte del tiempo empleado en el desarrollo de un proyecto de robótica móvil se gasta en la programación y en el proceso de prueba y error de las funcionalidades que se le quieren incluir al robot. Por lo tanto, el proceso de programación deberá de ser rápido y sencillo.

La mayoría de los microcontroladores se programan a través de un puerto serie, en especial mediante el protocolo de comunicación Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (UART). Como ya disponemos de un conector microUSB en el circuito para la carga de la batería, podemos usarlo también como conector para programar el microcontrolador, comunicando el ordenador a través del sistema Bus Universal en Serie (USB). La única pieza que faltaría es una interfaz USB-UART, que transforme ambos sistemas de comunicación para poder establecer la conexión entre ambos sistemas.

Esta interfaz ha de ser bidireccional, permitiendo al microcontrolador recibir información desde el ordenador para ser programado, y enviarla hacia él para facilitar la depuración de los programas a verificar. También se ha de tener en cuenta que se quiere comunicar dos sistemas que funcionan a dos valores de tensión diferentes, por lo que habrá que emplear una interfaz que sea capaz de manejar este ajuste entre los 5 V del sistema USB y los 3.3 V del microcontrolador.

En la Figura 3 podemos encontrar el diagrama de bloques completo, teniendo en cuenta todas las consideraciones tomadas hasta este punto.

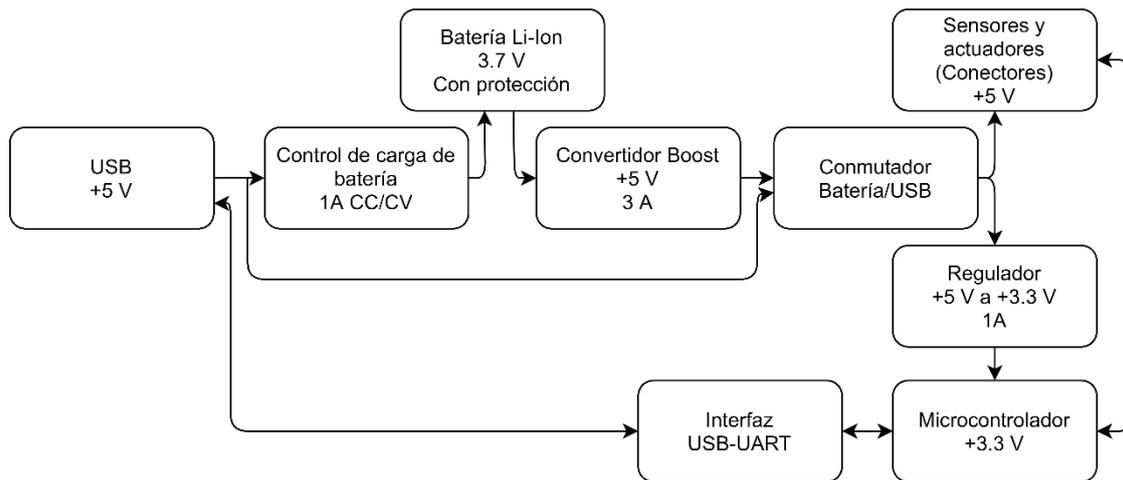


Figura 3: diagrama de bloques completo teniendo en cuenta tanto la sección energética como la programación.

## 2.4. MICROCONTROLADOR Y CONECTIVIDAD

Las conexiones que se pueden realizar con un microcontrolador se dividen principalmente en pines de entrada o salida de propósito general (GPIO), algunos de los cuales también incluyen funcionalidades extra como conversores analógicos-digitales (ADC) o digitales-analógicos (DAC), diferentes buses de comunicación serie o paralela como el Circuito Inter-Integrado (I2C) o la Interfaz de Periféricos en Serie (SPI) entre otros, y la conectividad inalámbrica como el Bluetooth.

Es importante que el microcontrolador elegido tenga el mayor número de funcionalidades posibles para cumplir el objetivo de versatilidad o utilidad de este proyecto. Por esto, deberá incluir suficientes de estas conexiones como para que los proyectos que se vayan a realizar con este circuito no se vean comprometidos.

Con doce pines GPIO libres nos aseguramos de tener suficientes conexiones para todos los componentes que se quieran conectar. El uso de los sistemas de comunicación I2C o SPI también están muy arraigados en el mundo de la robótica móvil y la electrónica, con multitud de sensores o actuadores que se comunican con el microcontrolador por este sistema, por lo que también deberían de estar disponibles. La conectividad Bluetooth o Internet también sería un gran añadido, permitiendo que los proyectos realizados con este circuito tengan menos limitaciones.

Otros tipos de actuadores ampliamente usados en la robótica móvil son los motores de corriente continua o los paso a paso. Por esto, se ha decidido incluir un controlador

para este tipo de motores, incrementando todavía más las prestaciones de esta placa de desarrollo.

La conectividad también hace referencia a los conectores que vamos a encontrar por el circuito. Todos estos pines GPIO y diferentes buses de comunicación deberán de estar disponibles en forma de conectores fácilmente accesibles. También sería fácil incluir conectores desde los raíles de 3.3 y 5 V para alimentar posibles circuitos externos.

En la Figura 4 se muestra el diagrama de bloques de la conectividad con el microcontrolador, teniendo en cuenta todos los aspectos detallados en este apartado.

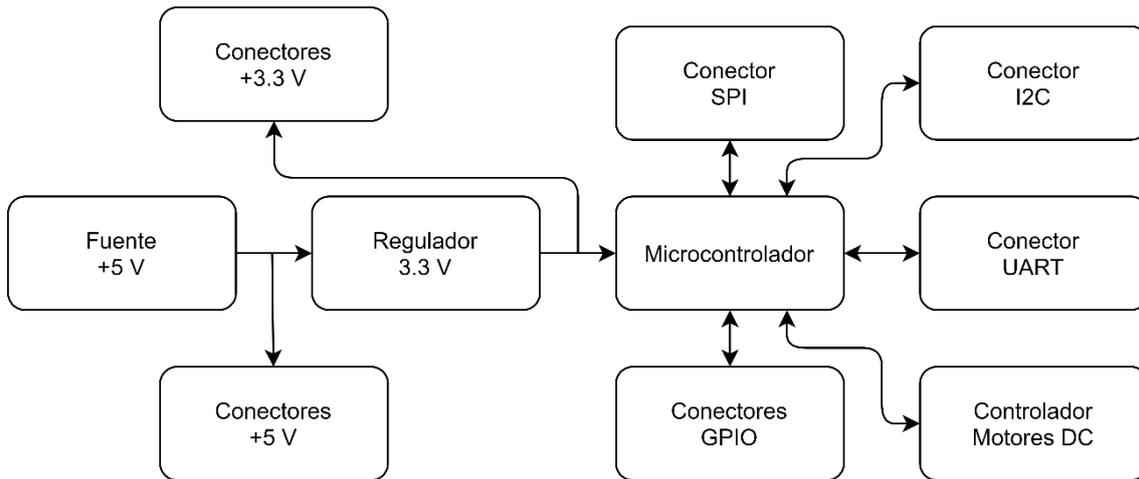


Figura 4: diagrama de bloques de la conectividad con el microcontrolador.

## 2.5. ALTERNATIVAS

Durante todo el proceso de desarrollo, se han planteado diferentes soluciones de diseño para cumplir con los objetivos planteados. En este apartado se muestran algunas de estas soluciones alternativas que han sido descartadas o modificadas hasta llegar al diseño final.

Una solución de diseño para abordar este problema es la de crear un sistema modular. Este proceso consiste en dividir cada uno de los bloques que componen este sistema y crear un circuito individual para cada uno de ellos que pueda ser unido con cualquier otro. Esta solución otorgaría la opción al usuario de comprar solo los módulos en los que esté interesado, evitando las partes que no necesite. Este diseño modular se ha descartado debido a que el tamaño total del circuito sería mayor y no existen tantos posibles módulos como cabría esperar: batería, microcontrolador, y controladores extra, siendo el microcontrolador el único obligatorio. Sí que permitiría ofrecer más tipos de controladores a parte del de motores DC que hay ahora, pero el beneficio no es lo bastante grande como para justificar esta elección. Además, el objetivo de simplificar al máximo el uso del producto se vería afectado con las complicaciones añadidas.

Como una de las mayores problemáticas del diseño se encuentra en la batería, se había planteado en un principio basarse en una fuente de alimentación comercial con batería. Esta decisión habría facilitado en gran parte el desarrollo del producto, pero influía negativamente en el objetivo de la facilidad de uso del producto. El diseño alrededor de este módulo comercial habría complicado el funcionamiento por parte del usuario y

habría hecho el producto más grande además de que, si el módulo comprado se descataloga, el producto diseñado perdería parte de su funcionalidad.

Por último, el circuito creado requiere que el modelo de batería elegido tenga un circuito de protección interno que controle sus límites de tensión y corriente, y su temperatura máxima. En un primer momento, se planteó diseñar e incluir esta protección en el propio circuito para así no limitar el tipo de baterías que se puedan usar, pero debido a la complejidad de este y que la mayoría de las baterías ya incluyen esta protección de serie, se acabó abandonando la idea a favor de la elegida.

### 3. HERRAMIENTAS DE DESARROLLO

Para el desarrollo de este proyecto, se han usado varios programas tanto para el diseño de la PCB, como para la simulación y la realización de algunos cálculos.

#### 3.1. ALTIUM DESIGNER

Para el desarrollo del esquemático y su implementación en una placa de circuito impreso, he decidido usar Altium Designer. La elección de este programa de diseño frente a otros ha sido tomada teniendo en cuenta que esta es una herramienta de desarrollo profesional ampliamente instaurada en esta industria que incluye todas las funcionalidades necesarias para realizar este proyecto.

Una vez llegados al punto del proyecto en el que se usa este programa, el esquemático del circuito ya debe estar diseñado y todos sus componentes seleccionados y simulados. El propósito de este programa es el del diseño de la PCB, no el de simular el esquema y tomar decisiones respecto a este.

El uso de este software se divide principalmente en cuatro apartados: la creación de una librería de esquemático, la creación de una librería de componentes, el esquema, y el diseño en PCB. Se va a pasar ahora a explicar cada uno de estos apartados y que pasos se han seguido para este diseño.

##### 3.1.1. LIBRERÍA DE ESQUEMÁTICO

Esta primera parte consiste en crear los símbolos que van a ser usados en el esquema. Para ello, tenemos que basarnos en la hoja de datos de cada uno de los componentes e insertar el número de conexiones o pines correspondientes con su nombre. Una vez creados todos, pasamos a crear un componente que no debe tener necesariamente la misma distribución que el componente real, sino que se pueden colocar todos los pines de la forma más cómoda para su posterior conexionado. Muchas veces es complicado elegir esta distribución de una manera óptima antes de crear el esquema, así que a veces se tiene que modificar el componente con posterioridad.

Una vez creado este componente, pasamos a modificar sus propiedades. Estas corresponden principalmente a su nombre, el designador (que es el indicador de referencia de cada componente), y el comentario que puede aparecer al lado del símbolo.

En la Figura 5 podemos observar cómo se ve el programa durante un proceso como este, incluyendo todos los pines correspondientes, la información necesaria del componente, y su distribución.

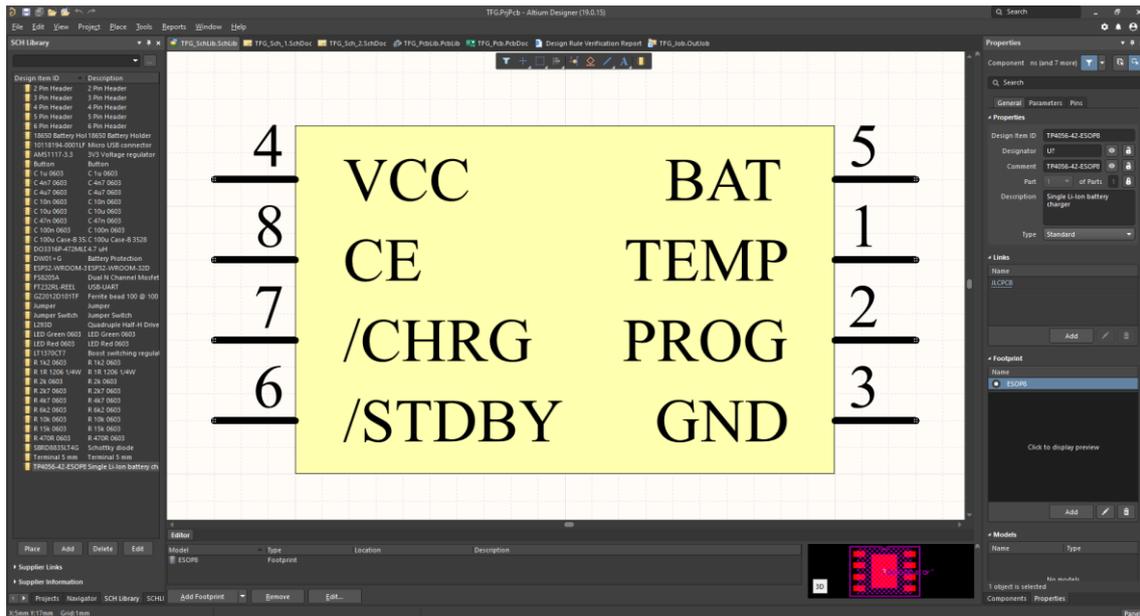


Figura 5: captura de pantalla durante la creación de un componente en la librería de esquemático con el Altium Designer.

### 3.1.2. LIBRERÍA DE COMPONENTES

Una vez creado el símbolo, pasamos a crear la huella o “footprint” del componente. Esta corresponde a la distribución física y es donde se situará el componente, así que tenemos que buscar sus dimensiones en la hoja de datos. Muchas veces se incluye una distribución recomendada, que incluye el tamaño de los agujeros o pads y su configuración recomendada.

A parte de esto, también debemos crear la serigrafía o “silkscreen”, que sirve para delimitar el espacio físico ocupado por el componente, creando así un indicador visual de su forma y posición. También se ha decidido insertar un modelo en 3D oficial para tener una referencia visual a la hora del diseño. Una vez creada cada huella, hay que vincularla con su símbolo correspondiente para luego ser usada durante el proceso de diseño.

A continuación, en la Figura 6 encontramos una captura de pantalla durante este proceso que muestra el flujo de trabajo seguido, colocando cada uno de los terminales en la posición adecuada para crear este símbolo físico que más tarde se ha vinculado con el símbolo del componente creado anteriormente.

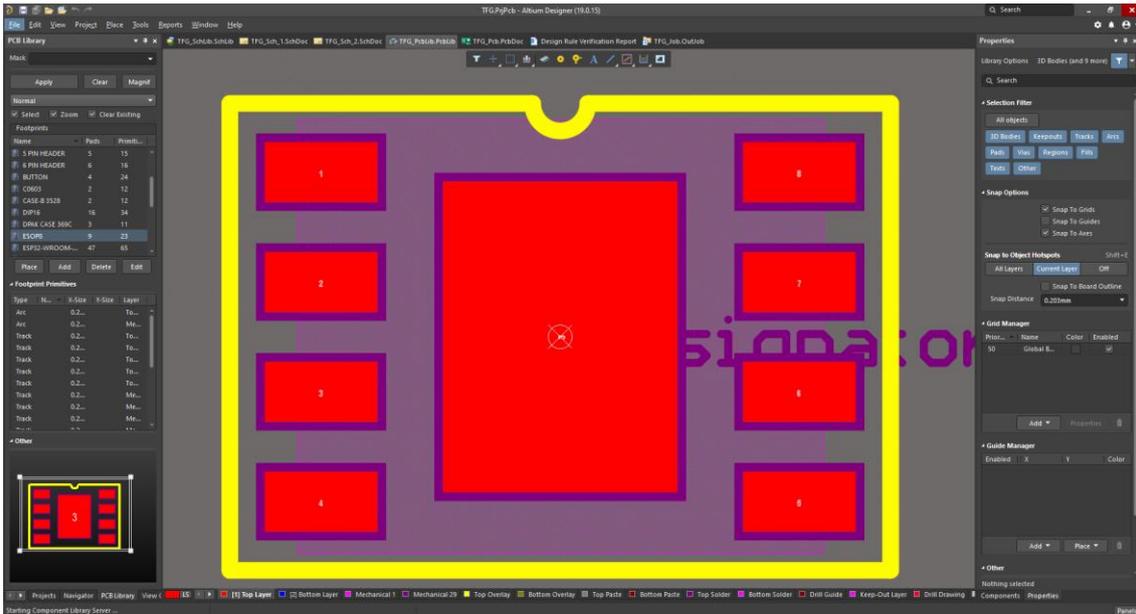


Figura 6: captura de pantalla durante la creación de una huella de componente en la librería de PCB con el Altium Designer.

### 3.1.3. ESQUEMÁTICO

En esta parte del diseño se han de insertar todos los componentes necesarios para el esquema y realizar las conexiones entre cada uno de los terminales indicados. En este punto no se realizan ni simulaciones ni cálculos, solo se plasma el esquema creado en el programa para su posterior diseño en la placa de circuito impreso. El proceso consiste en distribuir todos los componentes por secciones y crear así el plano del esquemático.

En la Figura 7 encontramos otra captura de pantalla durante este proceso para plasmar el texto anterior. Esta es solo una de las varias hojas que corresponden a este circuito, insertando cada uno de los componentes diseñados y creando un esquema eléctrico.

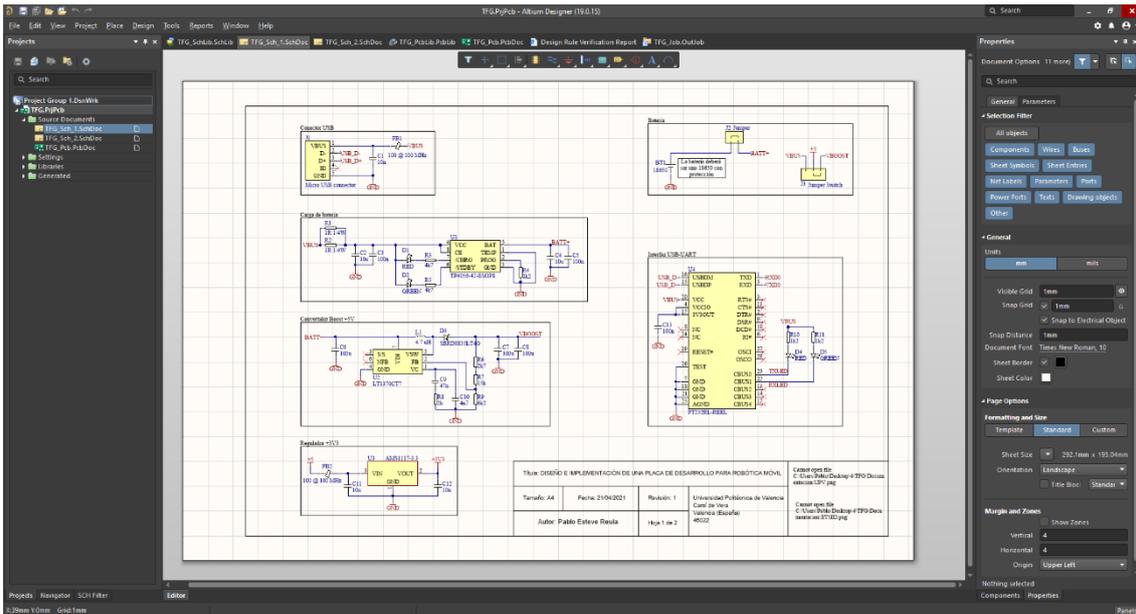


Figura 7: captura de pantalla durante la creación del esquema con el Altium Designer.

### 3.1.4. DISEÑO PCB

El último paso a la hora de crear un diseño en PCB es crear la distribución física y conexas con trazas y planos del circuito creado. Para ello, podemos importar el esquema creado hasta un editor de PCB que nos permitirá realizar toda esta parte del diseño, que es la que más tiempo requiere.

Una vez importados los componentes, se modifica tanto el tamaño de la placa para acomodar los componentes, las reglas de diseño que han de coincidir con la capacidad de manufacturación de la empresa que ha de crear el prototipo, y el número de capas del que va a constar, entre otras. Existen muchas consideraciones para tener en cuenta en este punto del trabajo, que se explicarán llegado el momento en el apartado DISEÑO PCB.

La Figura 8 muestra una imagen de cómo es este proceso, moviendo los componentes para conseguir la distribución óptima y creando las conexiones mediante trazas, planos y vías.

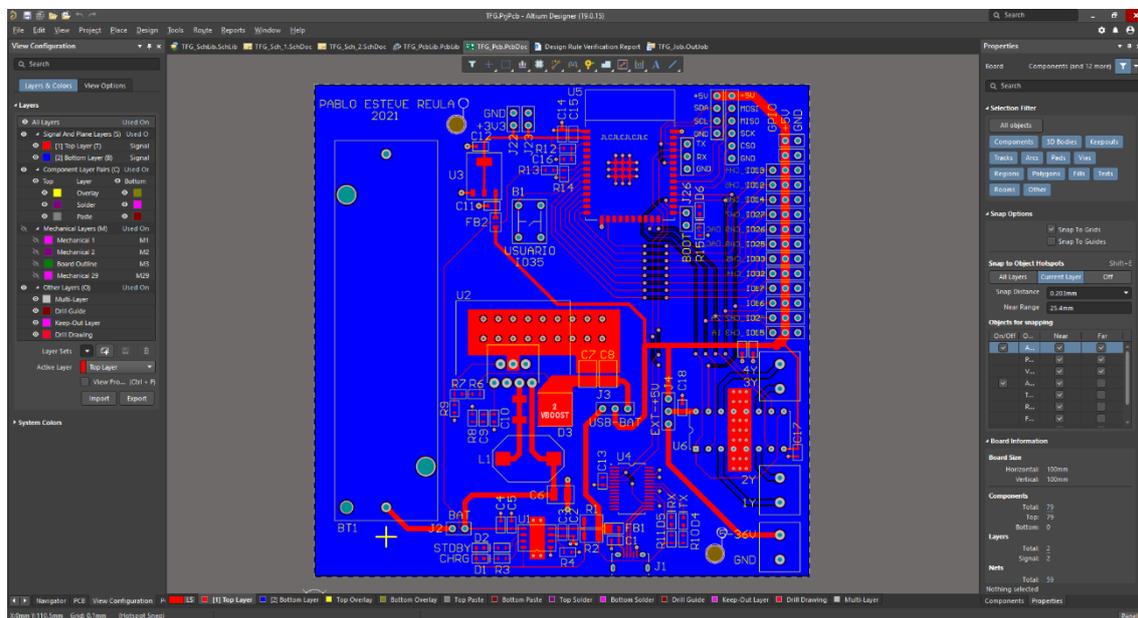


Figura 8: captura de pantalla durante el diseño PCB con el Altium Designer.

### 3.2. PCB TOOLKIT

El programa PCB Toolkit, más comúnmente conocido como “Saturn”, es un software gratuito de cálculos relacionados con el diseño PCB creado por la empresa Saturn PCB Design Inc. Este te permite realizar de forma sencilla cálculos sobre diferentes parámetros que afectan al diseño de una placa de circuito impreso.

Una parte del tiempo empleado en el diseño de una PCB se encuentra en determinar las características que deberían tener cada una de sus partes, por ejemplo, en el ancho de las trazas o el diámetro de las vías. Este software te permite calcular las propiedades que tendrá cada uno de los componentes de la PCB a partir de sus características.

Se ha usado para determinar las características de las trazas y vías, obteniendo sus características eléctricas a partir de sus dimensiones como por ejemplo diámetro o anchura.

### 3.3. LTSPICE XVII

El Programa de Simulación con Énfasis en Circuitos Integrados (SPICE), es un estándar internacional con el objetivo de simular circuitos electrónicos analógicos creado en 1973. Este estándar de simulación es uno de los más extendidos en el mundo de la electrónica analógica debido a sus grandes prestaciones y funcionalidades.

LTSPICE XVII, es un software de simulación creado por la empresa Linear Technology (LT) que se basa en este motor de simulación. Es gratuito, ampliamente considerado uno de los mejores simuladores analógicos, y con modelos de muchos componentes.

Durante este proyecto, se ha usado este programa para realizar simulaciones de la parte del convertidor boost. Debido a que el componente elegido está dentro del catálogo de esta empresa, ha sido fácil encontrar un modelo oficial para este componente.

El proceso de trabajo con este simulador consiste en recrear el circuito a simular a partir de los componentes con las características o modelos adecuados, y a partir de ahí simular los valores eléctricos de cada uno de los puntos requeridos.

## 4. SOLUCIÓN ADOPTADA

Una vez determinados los objetivos, las limitaciones, y creado un diagrama de bloques que cumpla con estas, pasamos a abordarlas planteando una solución.

### 4.1. ESQUEMÁTICO Y ELECCIÓN DE COMPONENTES

Durante el apartado de DISEÑO, se han explicado cuáles han sido las limitaciones impuestas para el proyecto y se han creado varios diagramas de bloques para cumplir con éstas y los objetivos. Estos diagramas corresponden con la Figura 3 y la Figura 4, donde se han tenido en consideración el esquema de energía y conectividad del sistema respectivamente. Con esta información y todas las decisiones de diseño que se han tomado en ese apartado, se van ahora a elegir los componentes que mejor se adapten al diseño y a crear un esquemático con estos, explicando también el funcionamiento de cada uno de ellos.

#### 4.1.1. BATERÍA (ICR18650-26F)

Empezando con la batería, como se ha de elegir un modelo que disponga de un circuito interno de protección que controle el valor de la temperatura o voltaje y que la desconecte inmediatamente en caso de sobrepasar sus valores límites, no es necesario usar un circuito de protección. Lo que sí que hay que tener en cuenta es en diseñar el resto del circuito para que nunca se llegue a este valor, limitando, por ejemplo, la corriente máxima de salida de la batería hacia el convertidor para que nunca se llegue a este punto de seguridad.

Las características que debe tener la batería son respecto a su material (Li-Ion), su alta corriente de salida, y, muy importante, su circuito interno de protección frente a cortocircuitos, temperatura, o límites de voltaje. Respecto a su capacidad, el usuario deberá escoger el valor que más le convenga, teniendo en cuenta el tiempo de uso que se le va a dar, el tiempo de carga que desea esperar, o el precio.

En el caso del prototipo, se ha decidido escoger la batería modelo ICR18650-26F de la empresa Samsung con una capacidad nominal de 2600 mAh y todas las funcionalidades anteriormente mostradas.

Esta batería está en un tamaño 18650. Este código de numeración estandarizado hace referencia a las dimensiones del paquete cilíndrico que toma esta. Por esto, habrá que elegir un porta pilas equivalente para acomodar la batería y realizar la conexión con el circuito. Para este propósito, se ha optado por una porta pilas genérico de montaje en orificio pasante que irá montado sobre la propia PCB. Esto facilitará la integración de la batería en el prototipo.

Respecto al esquemático, se ha decidido colocar un interruptor en serie con el terminal positivo para poder desconectar la batería en cualquier momento. Esto permitirá que no se descargue mientras no se esté usando y permitirá también una fácil desconexión en caso de fallo. En la Figura 9 se muestra el esquema explicado.

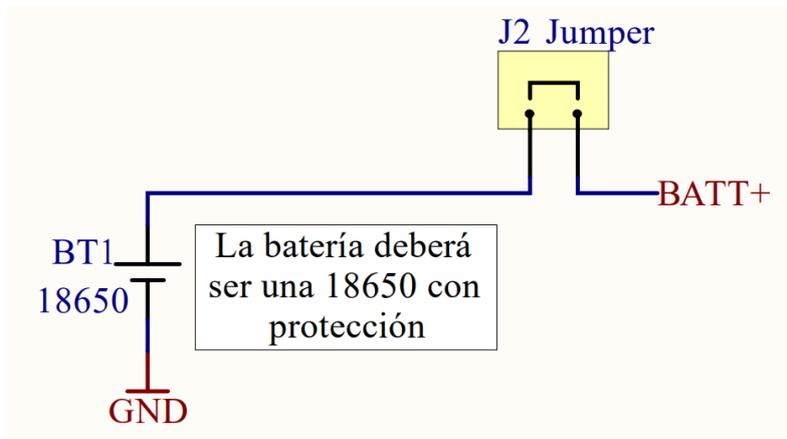


Figura 9: esquema de la batería con su interruptor y características.

#### 4.1.1. CARGA DE LA BATERÍA (TP4056-42-ESOP8)

Siguiendo las consideraciones de diseño, se ha elegido el circuito integrado TP4056-42-ESOP8, un cargador lineal de baterías Li-Ion de 1 A que incluye LEDs indicadores del estado de carga, funciona con pocos componentes externos, y está ampliamente disponible en los distribuidores de componentes elegidos.

Como se trata de un circuito que permite seleccionar diferentes corrientes máximas de carga, el primer paso es escoger y programar este valor. El pin 2 llamado “PROG” es el que determina este parámetro. Su funcionamiento se basa en conectar una resistencia entre este punto y la masa del circuito. El valor de esta resistencia determinará el valor de esta corriente mediante una ecuación, teniendo en cuenta que el límite de la corriente es de 1 A. Como la batería elegida permite llegar hasta este punto, se ha programado en este límite.

$$I_{BAT} = \frac{V_{PROG}}{R_{PROG}} \cdot 1200 \quad (1)$$

Como se puede ver en la ecuación anterior, el valor de corriente de carga de la batería está representado por la variable  $I_{BAT}$ , mientras que el valor de la resistencia de

programación viene dado por  $R_{PROG}$ . El valor  $V_{PROG}$  es el valor constante de 1 V que tenemos en esta patilla. Para obtener el valor de 1 A, necesitamos que esta resistencia tenga un valor de 1.2 k $\Omega$ .

$$I_{BAT} = \frac{1 V}{1200 \Omega} \cdot 1200 = 1 A \quad (2)$$

Este circuito también dispone de la posibilidad de detener la carga de la batería cuando esta llega a una temperatura superior a la máxima, pero debido a que ya es la propia batería la que controla este parámetro con su circuito de protección interno, no es necesario emplear esta funcionalidad. El pin 1 llamado “TEMP” es el que sirve para realizar esta función. Para desactivarla hay que conectar este pin directamente a masa como se indica en la hoja de datos.

Este componente también incluye la posibilidad de conectar dos LEDs para indicar el estado durante la carga, así que seguimos el circuito de aplicación típica para este caso. El pin 8 “CE” también sigue un proceso de diseño similar. Este sirve como interruptor para activar o desactivar el circuito. Como en este caso se quiere que siempre que esté conectado el cargador y la batería el circuito funcione, lo conectamos a un nivel lógico alto para configurarlo.

Finalmente, se han de conectar la entrada y salida de este bloque cargador. La entrada proviene desde el puerto microUSB que se usará como cargador, y la salida va directamente a la batería. Solo haría falta colocar varios condensadores de desacoplo en ambos lados para filtrar las posibles variaciones de alta frecuencia que pudieran aparecer. Los condensadores usados han sido los recomendados en la hoja de datos con su circuito de aplicación típico, con un valor de resonancia y resistencia equivalente en serie bajos.

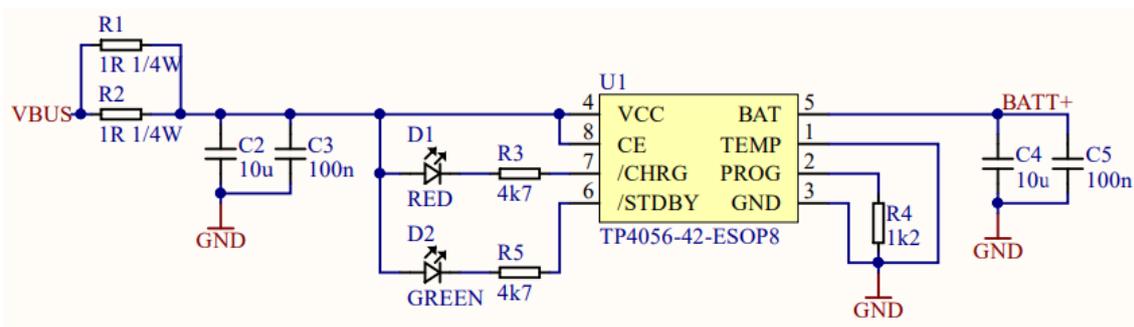


Figura 10: esquema completo del circuito de carga de la batería, basado en el circuito integrado TP4056-42-ESOP8.

En la Figura 10 se muestra el esquema completo basado en este circuito integrado. Cabe destacar que las resistencias marcadas como “R1” y “R2” están relacionadas con los CÁLCULOS TÉRMICOS del circuito y se explicarán más tarde en su propio apartado en detalle.

#### 4.1.1. CONVERTIDOR BOOST (LT1370CT7)

El objetivo de este convertidor es el de obtener la energía de la batería en una fuente de tensión fija de 5 V y con capacidad de generar hasta 3 A como se había determinado

en el apartado del diseño. Con su rango estricto de tensión de entrada y potencia, el circuito integrado elegido es el LT1370CT7, un regulador conmutado de alta frecuencia que funciona en modo corriente que cumple con todas estas características. Este modelo en específico está en parte pensado para este tipo de aplicaciones y tiene una versión SMD que puede ser ensamblada fácilmente una vez diseñado el producto. Para el montaje de este prototipo, se ha decidido usar la versión de montaje en orificio pasante ya que es más fácil de montar, y sus características son muy similares.

El funcionamiento básico de un convertidor conmutado de este estilo se basa principalmente en una bobina (L), que sirve para almacenar energía, un diodo (D), que controla el flujo de energía dentro del convertidor, y un interruptor (S), normalmente un transistor, que controla la conmutación. Este transistor puede conmutar o cambiar entre dos estados de funcionamiento distintos, el de conducción y el de corte. Durante la conducción, la bobina se carga de energía desde  $V_s$  mientras la carga (LOAD) recibe su energía desde el condensador (C). Durante el periodo de corete, la bobina transmite su energía a través del diodo para recargar el condensador y repetir así el proceso. En la Figura 11 se muestra el esquema eléctrico de este circuito.

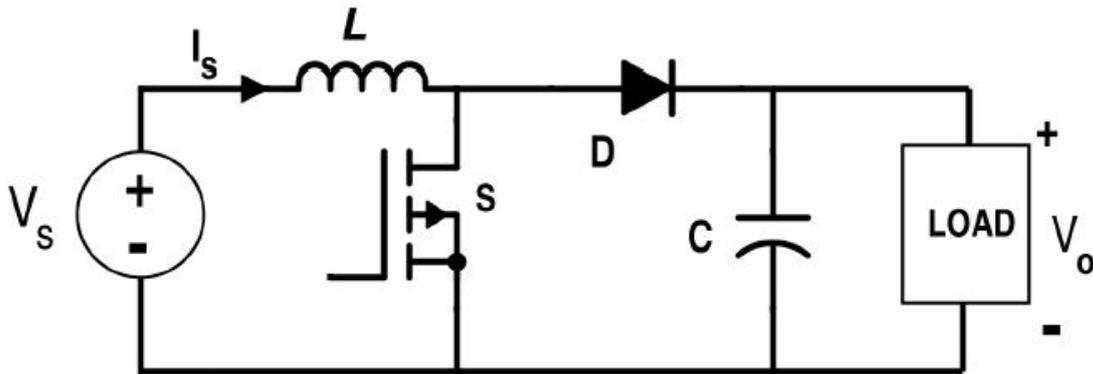


Figura 11: esquema de un convertidor conmutado de tipo Boost.

El circuito integrado elegido funciona como el interruptor y toda la lógica de control que necesita para controlar el sistema y asegurarse de que sea estable. Por lo tanto, habrá que elegir el resto de los componentes acorde con el propósito del convertidor y siguiendo las consideraciones de la hoja de datos.

Empezando con el inductor, existe una ecuación que permite calcular la corriente de pico ( $I_{PEAK}$ ) que va a pasar por la bobina para tomar decisiones a la hora de hacer una elección.

$$I_{PEAK} = I_{OUT} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} + \frac{V_{IN} \cdot (V_{OUT} - V_{IN})}{2 \cdot f \cdot L \cdot V_{OUT}} \quad (3)$$

Este valor va a depender de la corriente de salida ( $I_{OUT}$ ) que en este circuito se ha elegido como 3 A, la tensión de salida ( $V_{OUT}$ ) de 5 V, la tensión de entrada mínima ( $V_{IN}$ ) desde la batería de 3.3 V, la frecuencia de conmutación del convertidor ( $f$ ) de 500 kHz, y el valor de la bobina a elegir (L).

$$I_{PEAK} = 3 \cdot \frac{5}{3.3} + \frac{3.3 \cdot (5 - 3.3)}{2 \cdot 500 \cdot 10^3 \cdot 4.7 \cdot 10^{-6} \cdot 5} = 4.78 \text{ A} \quad (4)$$

Eligiendo un valor de inductor de 4.7  $\mu\text{H}$ , conseguimos que su valor de corriente pico a soportar sea de solo 4.78 A, un valor que muchos inductores soportan. El modelo elegido ha sido un DO3316P-472 (Coilcraft), un inductor que soporta hasta 4.8 A de corriente continua, superando los 3 A requeridos, y picos de hasta 5.4 A, pudiendo así funcionar correctamente con el valor de 4.78 A calculado.

Continuando con el diodo, aparte de tener que soportar los límites eléctricos de corriente y tensión, es importante que sea de conmutación rápida. Esta característica permitirá al diodo ser más eficiente durante las conmutaciones y no disipar tanta energía. El modelo sugerido por la hoja de datos para todos los casos es el SBRD8835LT4G, un diodo de barrera Schottky que cumple con todos estos parámetros.

El condensador de salida es el que determina el rizado de la señal de salida. El rizado es la variación provocada por la carga y descarga de este condensador debido a la conmutación del sistema. Se ha de elegir un condensador que sea capaz de disminuir al máximo este valor de rizado para conseguir que la salida sea lo más estable posible. El modelo AVX TPSD107M010R0100 es el recomendado para este uso, situando dos de ellos para la salida y uno para la entrada.

Como este regulador puede ser configurado para crear diferentes valores de salida, se ha de crear un divisor resistivo desde la tensión de salida hasta el pin 2 (FB) para seleccionar este valor. La tensión de salida a configurar ( $V_{OUT}$ ) depende de un valor fijo de referencia ( $V_{REF}$ ) de 1.245 V, y el valor de ambas resistencias, siendo  $R_1$  la superior y  $R_2$  la inferior del puente.

$$V_{OUT} = V_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (5)$$

Por último, existe un pin de compensación de frecuencia que sirve para ajustar la frecuencia de conmutación y conseguir que el sistema del convertidor sea estable. El circuito creado sigue la recomendación de la hoja de datos para llegar hasta el esquema de la Figura 12.

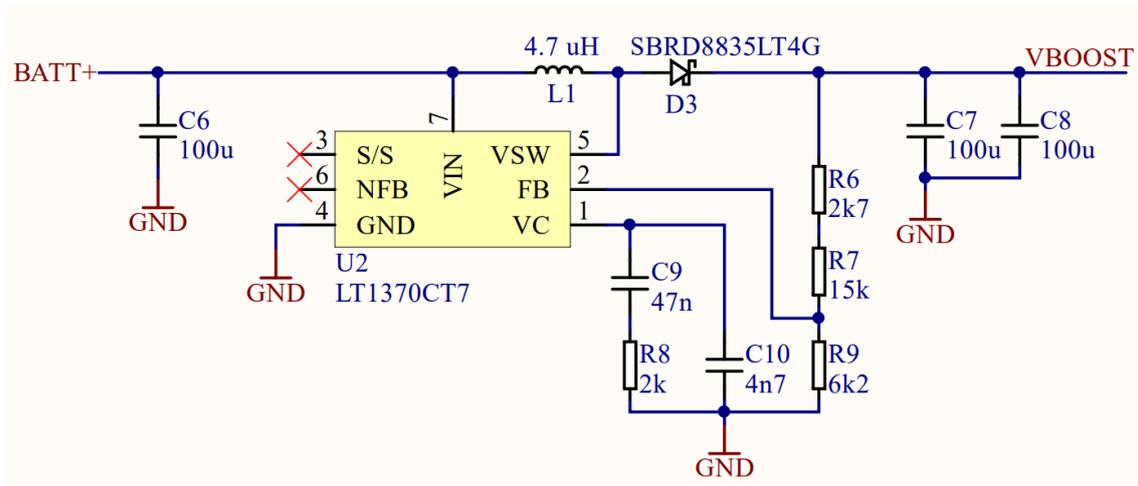


Figura 12: esquema del convertidor Boost

A partir de este esquema, se han realizado varias simulaciones con ayuda del programa LT Spice. Se ha podido comprobar cómo se llega al valor establecido de 5 V después de un transitorio de arranque de unos 0.5 ms, y se ha verificado el valor del rizado a los 5 mV.

#### 4.1.1. REGULADOR DE TENSIÓN (AMS1117-3.3)

Su función es la de regular el bus de 5 V a uno de 3.3 V para alimentar el microcontrolador. Debido a la baja corriente de salida que se requiere según el apartado de diseño, el componente AMS1117-3.3 es el más adecuado, siendo muy común, barato, pequeño, y eficiente.

Su uso de componentes externos también es muy bajo. Estos sirven para filtrar tanto la entrada como la salida del convertidor y, así, eliminar los ruidos de alta frecuencia en estos puntos. En la Figura 13 se muestra el esquema del regulador siguiendo las directrices de los circuitos de aplicación típicos de la hoja de datos.

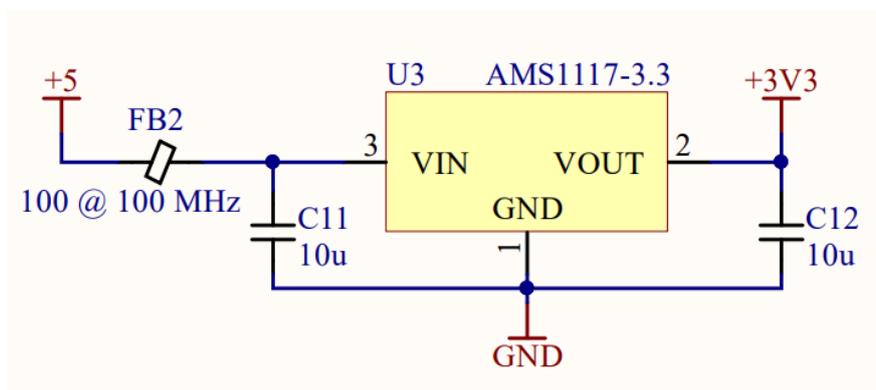


Figura 13: esquema completo del regulador de tensión.

#### 4.1.1. INTERFAZ USB-UART (FT232RL-REEL)

Repasando las consideraciones tomadas durante el diseño, esta interfaz ha de traducir de forma bidireccional la información desde el USB que usa el ordenador para

programar, hasta UART, que es el sistema de comunicación que una el microcontrolador para ser programado.

El circuito integrado elegido es el FT232RL-REEL, una interfaz ampliamente extendida por este tipo de proyectos, como en los Arduino Nano. Este componente puede establecer conexión con microcontroladores que funcionan a 3.3 V, y dispone de la posibilidad de incluir unos indicadores LED para determinar visualmente si se está realizando la transmisión.

Para indicar que se quiere comunicar con una interfaz a 3.3 V, se ha de conectar el pin 4 (VCCIO), que es la alimentación de la interfaz de entrada y salida, desde el regulador interno de 3.3 V que corresponde con el pin 17. La alimentación de este regulador proviene directamente desde el conector USB a través del pin 20 (VCC), que sirve tanto para este regulador como para el resto de la lógica interna del circuito.

Este circuito interfaz dispone de una gran variedad de funciones que se han decidido dejar a parte para este proyecto. Solo se han aprovechado los indicadores LED que se usarán para avisar al usuario de cuando se está produciendo una comunicación. En la imagen de la Figura 14 se muestra el circuito completo alrededor de este componente.

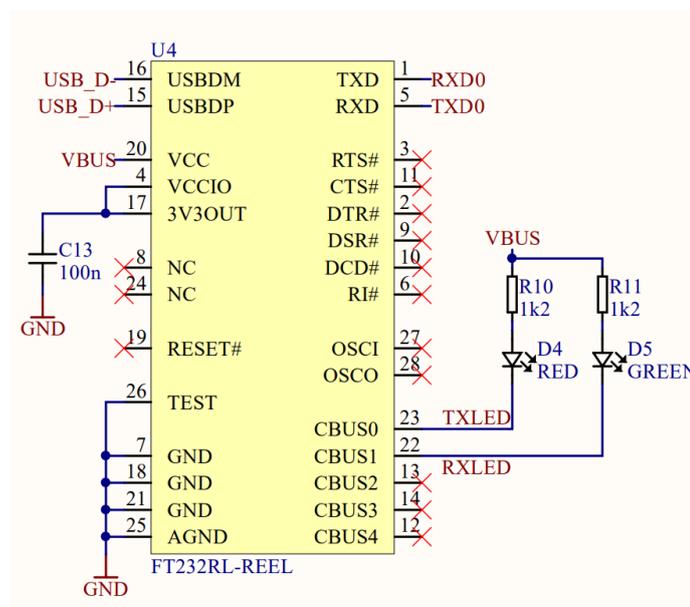


Figura 14: esquema de la interfaz USB-UART a partir del circuito integrado FT232RL-REEL

#### 4.1.1. CONTROLADOR DE MOTORES DC (L293D)

Los motores de corriente continua pueden ser controlados a partir de un circuito denominado puente en H, que sirve para seleccionar el sentido de giro del motor o incluso detenerlo a través de señales digitales. El componente L293D consta de cuatro medios puentes que permiten controlar hasta dos motores de corriente continua a la vez. También dispone de la posibilidad de ser alimentado con tensiones altas para hacer funcionar motores más grandes, abriendo así la posibilidad para funcionar desde una batería externa y con motores de alta potencia sin tener en cuenta la carga de la batería principal.

Otro uso para un doble puente en H es el de controlar un motor paso a paso con dos pares de polos. Esto incrementa las posibilidades de control de la placa de desarrollo y permite al usuario emplear actuadores de alta precisión en su proyecto.

En la Figura 15 se muestra el circuito completo de este apartado. Incluye tres conectores, uno de ellos para la posible alimentación externa con un interruptor para seleccionar entre esta o la interna, y otros dos para la conexión de los dos motores. El control se hace a través de cuatro entradas de control y una de habilitación procedentes del microcontrolador.

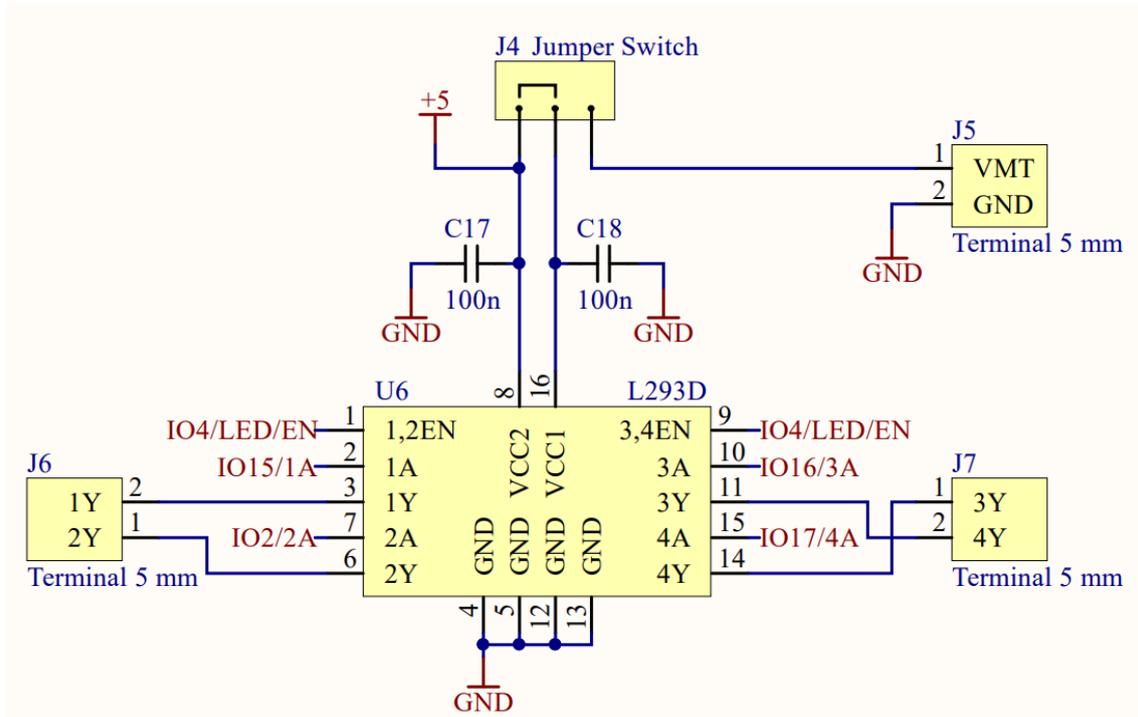


Figura 15: esquema completo del circuito de control de motores DC basado en el circuito integrado L293D,

#### 4.1.2. MICROCONTROLADOR (ESP32-WROOM-32D)

El microcontrolador es el componente que más consideraciones y limitaciones de diseño tiene impuestas. Su interfaz, conectividad o memoria son algunos de los factores limitantes para tener en cuenta.

La elección ha sido tomada con el módulo ESP32-WROOM-32D desarrollador por la empresa Espressif Systems. Este está basado en el microcontrolador ESP32-D0WD y dispone de todas las características requeridas para este trabajo. Este módulo incluye algunos de los componentes externos requeridos para su funcionamiento como un reloj externo para mejorar su precisión en temporización o la antena para Bluetooth. Esto permite disminuir el tamaño y lista de componentes del proyecto y limita las posibles áreas de error.

Su número de pines libres GPIO supera al establecido en el apartado de diseño de doce, dispone de buses I2C, SPI, y UART, y, con este módulo en especial, se incluye conectividad a Internet y Bluetooth. Otro factor que ha llevado a elegir este componente

es su facilidad a la hora de ser programado. Se puede configurar la IDE de Arduino para funcionar con este dispositivo, simplificando así la experiencia del usuario.

Continuando con el esquema creado, caben destacar los pines de los buses I2C, SPI y UART que irán directamente a los conectores correspondientes y los de propósito general, que tienen diferentes usos. En el pin IO34 se ha decidido conectar el terminal positivo de la batería a través de un puente resistivo para poder medir su valor de carga, y en el IO35 se ha colocado un botón que sirve como interfaz entre el usuario y el circuito. En la Figura 16 se encuentra el esquema completo de todo lo relativo al microcontrolador.

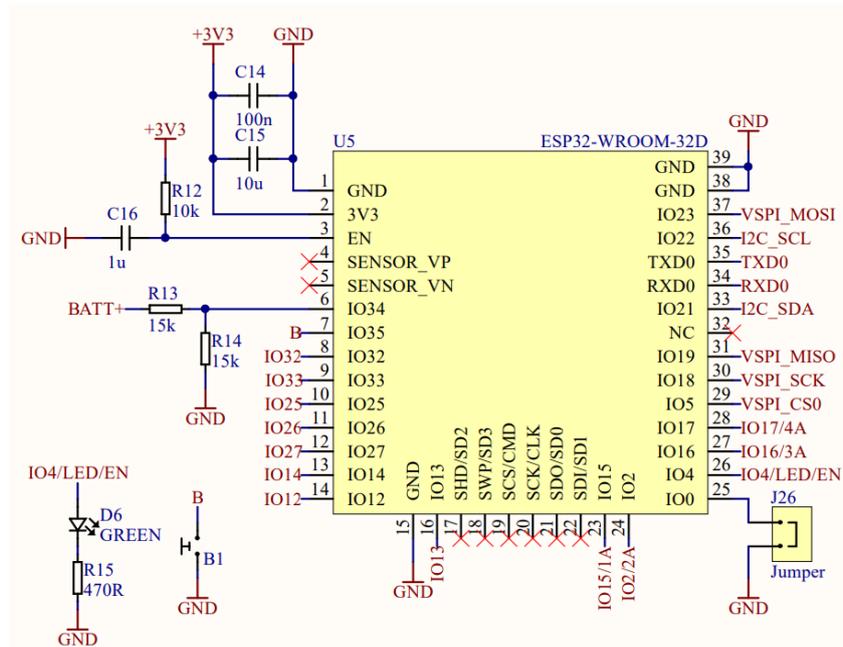


Figura 16: esquema del microcontrolador y sus conexiones.

Varios de estos pines tienen funciones múltiples, como por ejemplo en pin IO4 que sirve como señal de habilitación para el controlador de motores DC y como indicador luminoso con el LED. Las señales de control del puente en H también están unidas a un conector para que el usuario decida si usarlas para controlar los motores o como cuatro señales extras de propósito general. Todos los diferentes conectores y sus funciones están mostradas en el esquema de la Figura 17.

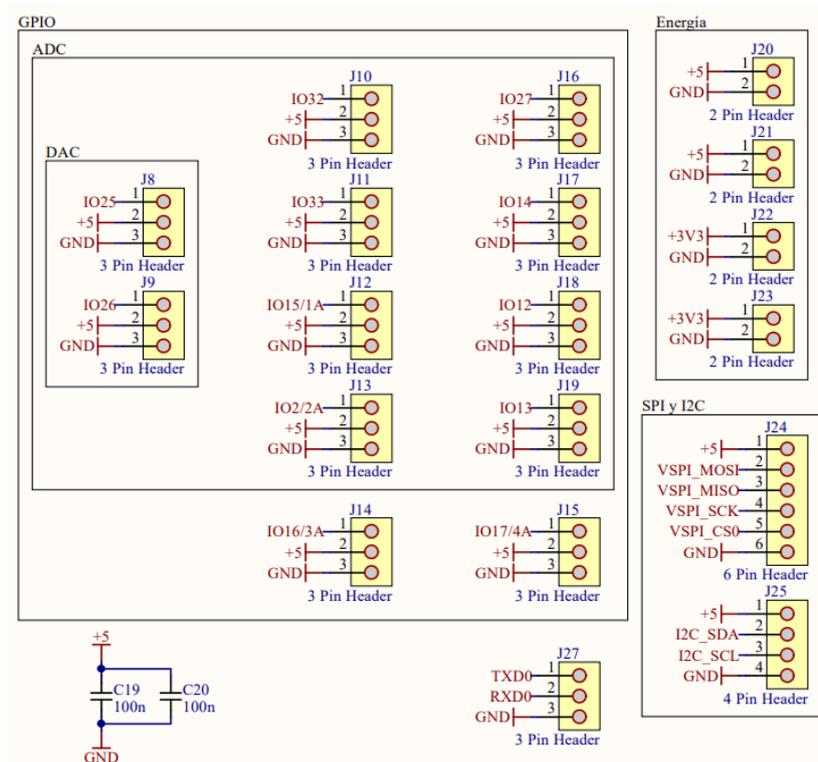


Figura 17: esquema de los conectores y sus funciones.

## 4.2. CÁLCULOS TÉRMICOS

Una parte muy importante dentro del diseño de un circuito electrónico es la realización de los cálculos térmicos. Todos los componentes tienen un valor máximo de temperatura que pueden alcanzar y, si este se supera, sus características eléctricas se pueden ver afectadas o incluso podría dejar de funcionar.

Principalmente, existen dos factores que afectan a la temperatura de un componente electrónico: la potencia disipada, que corresponde con la eficiencia del componente y provoca un aumento de la temperatura, y la resistencia térmica, que indica la capacidad de disipación térmica del componente y ayuda a este a enfriarse. El objetivo de estos cálculos es el de determinar si se va a llegar o no a este punto crítico de temperatura en los componentes y, así, tomar las decisiones necesarias para disminuir tanto la potencia disipada como la resistencia térmica hasta el punto en que este factor ya no sea un problema.

La preocupación con el parámetro de la temperatura se encuentra principalmente en componentes de alta potencia. En este proyecto, el circuito cargador de la batería, el convertidor boost, y el puente en H son los componentes que pueden llegar a sufrir de este problema y son los abordados en estos cálculos térmicos.

### 4.2.1. CARGA DE LA BATERÍA

Debido a la importancia de los cálculos térmicos en este circuito, existe un extenso apartado en la hoja de datos que recoge todos los procedimientos y consideraciones que se pueden tomar a la hora de limitar su aumento de temperatura. Como se explicaba en el apartado CARGA DE LA BATERÍA (TP4056-42-ESOP8) y se podía ver en la captura

del esquema de la Figura 10, uno de estos procedimientos recomendados consiste en colocar una resistencia en serie con la entrada que sirve para limitar la potencia disipada.

El funcionamiento de este cargador se basa en un regulador lineal que desperdicia toda la energía que no sea entregada a la batería. Con esta resistencia conseguimos dividir esta disipación de calor entre ambos componentes, alejando así al circuito integrado de su límite de temperatura. Esta mejora térmica tiene como consecuencia una limitación en la corriente máxima de carga y, por lo tanto, existe una ecuación que nos permite calcular este nuevo valor límite teniendo en cuenta esta nueva resistencia.

En esta ecuación, la nueva corriente de carga ( $I_{BAT}$ ) viene dada por la tensión de entrada ( $V_S$ ), la tensión de la batería ( $V_{BAT}$ ), la temperatura límite o máxima ( $T_{LIM}$ ), la temperatura ambiente ( $T_A$ ), la resistencia térmica entre la unión y el ambiente ( $\theta_{JA}$ ), y el valor de esta resistencia en serie ( $R_{CC}$ ). El objetivo a la hora de usar esta ecuación es el de determinar el valor de la resistencia para que no se supere la temperatura límite del circuito y obtener a partir de este la corriente de carga esperada.

$$I_{BAT} = \frac{(V_S - V_{BAT}) - \sqrt{(V_S - V_{BAT})^2 - \frac{4 \cdot R_{CC} \cdot (T_{LIM} - T_A)}{\theta_{JA}}}}{2 \cdot R_{CC}} \quad (6)$$

Según su hoja de datos, este dispositivo tiene un valor de Temperatura Límite de la Unión ( $T_{LIM}$ ) de 145 °C. La unión hace referencia al punto interior del circuito donde se encuentran los semiconductores y se realizan las conexiones entre ellos. La tensión de entrada ( $V_S$ ) también tiene un valor conocido de 5 V ya que se va a usar un conector USB que dispone de este valor de tensión. Las condiciones de temperatura ambiente ( $T_A$ ) se pueden asumir con un valor estandarizado de 25 °C.

Respecto a la resistencia térmica entre la unión y el ambiente ( $\theta_{JA}$ ), existen distintas variables que pueden modificar este valor. Por ejemplo, el uso de disipadores puede disminuirla, aumentando el área de contacto del circuito con el aire del exterior y ayudando así con la térmica. Otra técnica para disminuir este valor consiste en usar la propia PCB como disipador, realizando una conexión térmica entre el componente y la placa para transferir parte de esta energía disipada y así disminuir la temperatura.

Cada componente viene con un paquete distinto. El paquete hace referencia al encapsulado o forma física del producto, teniendo en cuenta su número y disposición de pines, y tamaño entre otros factores. Este circuito viene en un paquete llamado ESOP-8, que incluye un terminal de conexión justo en su parte inferior para realizar esta conexión térmica con la placa y disminuir así la resistencia térmica. Al usar esta característica, conseguimos disminuir este valor hasta los 125 °C/W. En el apartado DISEÑO PCB se muestra en detalle este procedimiento térmico de montaje.

En la realización de un cálculo térmico siempre se toman las condiciones menos favorables para asegurarse de que el valor de temperatura calculado corresponde con el peor posible. Teniendo en cuenta esto, el punto de máxima corriente de carga en una batería se da cuando está en su punto más bajo de carga. En el caso del tipo de batería elegido, este valor ( $V_{BAT}$ ) se encuentra en los 3.4 V aproximadamente.

Con todas estas consideraciones anteriores, solo falta calcular el valor de la resistencia ( $R_{CC}$ ) que consiga disminuir la temperatura del dispositivo por debajo del límite sin reducir su corriente de carga en exceso. Iterando entre distintos valores y buscando un equilibrio entre estos dos puntos, un valor de  $0.5 \Omega$  resulta ser el más adecuado, limitando la corriente hasta los  $0.8 A$ .

$$I_{BAT} = \frac{(5 - 3.4) - \sqrt{(5 - 3.4)^2 - \frac{4 \cdot 0.5 \cdot (145 - 25)}{125}}}{2 \cdot 0.5} = 0.8 A \quad (7)$$

Con esta modificación del circuito, conseguimos limitar el aumento de temperatura justo por debajo del límite establecido por la hoja de datos reduciendo al mínimo su impacto en el funcionamiento.

#### 4.2.2. CONVERTIDOR BOOST

El segundo circuito que forma parte de estos cálculos térmicos es el convertidor boost. Su valor de temperatura máxima en la unión es de  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ , mientras que el valor de su resistencia térmica entre la unión y el ambiente ( $\theta_{JA}$ ) es de  $30 \text{ }^\circ\text{C/W}$  para el modelo de montaje superficial y de  $50 \text{ }^\circ\text{C/W}$  para el de montaje en orificio pasante. Como se ha decidido que en el prototipo se va a usar el modelo de montaje en orificio pasante mientras que en el producto final se debería usar el modelo de montaje superficial, se han realizado los cálculos térmicos para ambos modelos.

La ecuación que nos permite determinar la temperatura en la unión ( $T_J$ ) toma como parámetros la temperatura ambiente ( $T_A$ ) que podemos tomar como  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , la potencia disipada por el circuito ( $P_D$ ), y la resistencia térmica entre la unión y el ambiente.

$$T_J = T_A + P_D \cdot \theta_{JA} \quad (8)$$

Para obtener el valor de la potencia disipada, se dispone de un apartado en la hoja de datos del dispositivo que nos ofrece una serie de ecuaciones y consideraciones para realizar el cálculo. La potencia que se disipa en este tipo de convertidores conmutados ( $P_D$ ) se divide en dos partes. La primera es la potencia de alimentación que depende tanto de la corriente de entrada ( $I_{IN}$ ), como de la tensión de entrada ( $V_{IN}$ ), y hace referencia a la energía que gasta el circuito de control del convertidor. La segunda es la potencia en conmutación ( $P_{SW}$ ), que hace referencia al instante en que el convertidor conmuta entre sus dos posibles estados. Cabe destacar que entre los periodos de conducción del circuito también se disipa potencia, pero debido a su pequeño valor en comparación al resto, se desprecia. Para este cálculo, se ha tomado como punto de trabajo el peor caso posible, donde tanto la corriente como la tensión de entrada son máximas, y se está usando la máxima energía.

$$P_D = I_{IN} \cdot V_{IN} + P_{SW} \quad (9)$$

Empezando con la corriente de entrada ( $I_{IN}$ ), según la hoja de datos solo depende del ciclo de trabajo del circuito (DC) que tiene un valor máximo de  $0.9$ , de la corriente del interruptor ( $I_{SW}$ ) con un posible valor máximo de  $6 A$ , i un valor constante de  $4.5 \text{ mA}$ .

$$I_{IN} = 4.5 \text{ mA} + DC \cdot \left(\frac{I_{SW}}{45}\right) \quad (10)$$

Sustituyendo estos valores para la ecuación obtenemos una corriente de entrada máxima de 0.1245 A que, junto al valor de tensión de entrada ( $V_{IN}$ ) máximo de 4.2 V que puede tomar la batería, ya permite calcular la potencia disipada por la alimentación.

$$I_{IN} = 0.0045 + 0.9 \cdot \left(\frac{6}{45}\right) = 0.1245 \text{ A} \quad (11)$$

Continuando ahora con la potencia en conmutación ( $P_{SW}$ ), esta depende de tres factores: la corriente del interruptor ( $I_{SW}$ ), que tomamos como 6 A al igual que antes, la resistencia del interruptor ( $R_{SW}$ ) de 0.065  $\Omega$ , y el ciclo de trabajo (DC) que, por la misma razón que antes, toma un valor máximo de 0.9.

$$P_{SW} = (I_{SW})^2 \cdot (R_{SW}) \cdot DC \quad (12)$$

Sustituyendo los valores obtenemos una potencia en conmutación máxima de 2.106 W.

$$P_{SW} = 6^2 \cdot 0.065 \cdot 0.9 = 2.106 \text{ W} \quad (13)$$

Con estos valores y sustituyendo en la ecuación de la potencia disipada total, calculamos que esta va a tomar un valor máximo de 2.6289 W.

$$P_D = 0.1245 \cdot 4.2 + 2.106 = 2.6289 \text{ W} \quad (14)$$

Habiendo obtenido este valor máximo de potencia, podemos ya calcular la temperatura en la unión para el componente con el encapsulado de montaje superficial y el montaje en orificio pasante respectivamente.

$$T_j = 25 + 2.6289 \cdot 30 = 103.867 \text{ }^\circ\text{C} \quad (15)$$

$$T_j = 25 + 2.6289 \cdot 50 = 156.445 \text{ }^\circ\text{C} \quad (16)$$

Se puede observar como el componente de montaje superficial, que es el que se pretende usar en el producto final, no superará el límite de temperatura de 125  $^\circ\text{C}$  y, por lo tanto, no necesitará ninguna modificación. Por su parte, el componente en orificio pasante, que es el que se usará para el prototipo, si deberá incorporar un disipador para disminuir la resistencia térmica del sistema.

Para obtener el valor de la resistencia térmica que debería tener el sistema, se ha reorganizado la ecuación para calcular la potencia disipada para obtener este nuevo valor máximo.

$$\theta_{JA} = \frac{T_J - T_A}{P_D} \quad (17)$$

Con la potencia máxima calculada antes, sabemos que si el sistema tiene un valor de resistencia térmica entre la unión y el ambiente menor que 38.04 °C/W, no se va a alcanzar en ningún momento la temperatura máxima.

$$\theta_{JA} = \frac{125 - 25}{2.6289} = 38.04 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (18)$$

A partir de este valor se pasa a estudiar el funcionamiento de un disipador. Ahora, la resistencia térmica entre la unión y el ambiente ( $\theta_{JA}$ ), dependerá de una suma de los valores de resistencia entre la unión y la cápsula ( $\theta_{JC}$ ), la cápsula y el disipador ( $\theta_{CD}$ ), y el disipador al ambiente ( $\theta_{DA}$ ).

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CD} + \theta_{DA} \quad (19)$$

Reorganizando los valores y tomando la resistencia entre la unión y la cápsula como 4 °C/W, que es un valor aproximado para este tipo de dispositivos, podemos saber que la suma entre la resistencia de la cápsula al disipador y del disipador al ambiente no debe superar los 34.04 °C/W.

$$\theta_{CD} + \theta_{DA} = \theta_{JA} - \theta_{JC} = 38.04 - 4 = 34.04 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (20)$$

Con este valor calculado, solo falta encontrar un radiador que cumpla con esta característica y pueda ser montado en el dispositivo elegido, que viene en un paquete TO-220. Debido a que este radiador solo se va a usar en el prototipo debido a que el componente que se va a usar en el producto final no necesita uno, se ha elegido uno sobredimensionado con un valor de 15 °C/W.

#### 4.2.3. CONTROLADOR DE MOTORES DC

El último de los componentes que requiere de este proceso de verificación térmica es el controlador de motores de corriente continua. Este dispositivo tiene la capacidad de controlar motores de alta potencia, por lo que también tiene la capacidad de disipar mucha energía.

Al igual que el cargador de la batería, su proceso de disipación usa la propia PCB como disipador térmico, aunque en este caso son los cuatro pines de masa los que, aparte de realizar su función eléctrica, realizan esta conexión térmica con la placa. Dependiendo del tamaño del plano al que se conecten estos cuatro pines, la resistencia térmica va a variar. Existe en la hoja de datos una gráfica que se muestra en la Figura 18 que indica cuál será la potencia máxima disipada y resistencia térmica del controlador dependiendo de la longitud del lado de esta superficie. Respecto a este punto, se va a tratar más a fondo en el apartado DISEÑO PCB.

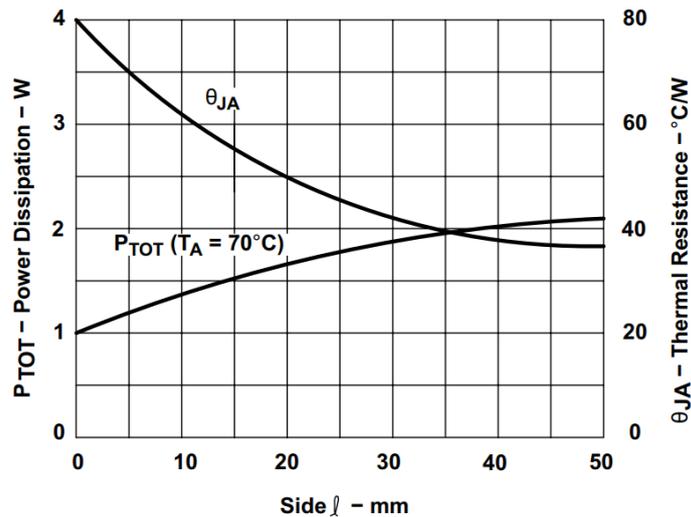


Figura 18: gráfica que muestra la máxima potencia disipada y resistencia térmica que tendrá el controlador respecto a la longitud del lado del dissipador de la PCB.

Debido a que el tamaño de los robots que se van a controlar con esta placa de desarrollo es pequeño y no requerirán grandes motores para funcionar, no es necesario que este valor de potencia disipada máxima sea excesivamente grande. Se ha optado por crear un cuadrado de lado 5 mm, que permitirá que la resistencia térmica entre la unión y el ambiente sea de 70 °C/W y la potencia máxima disipada sobre los 1.2 W. Esto permitirá controlar motores de baja potencia sin que se llegue a la temperatura máxima de la unión del circuito elegido de 150 °C.

#### 4.3. DISEÑO PCB

Una placa de circuito impreso (PCB) es un dispositivo que se encarga de acoger físicamente componentes electrónicos y permitir las conexiones eléctricas entre ellos. Este tipo de placas consta de varias capas: unas de ellas conductoras y hechas a partir de láminas de cobre que sirven para realizar estas conexiones, y otras de ellas formadas por materiales aislantes que separan las capas anteriores y permiten crear placas con varias capas conductoras.

Dentro de estas capas conductoras se encuentran las trazas, que son los caminos que permiten realizar las conexiones eléctricas entre los diferentes puntos del circuito. Por otra parte, las vías son agujeros que permiten conectar varias capas entre sí, pudiendo así saltar entre ellas con las trazas para facilitar el conexionado. Otra parte importante en una PCB son los pads. Estos son los puntos en los que se sueldan los componentes electrónicos y realizan la función de conectarlos eléctrica y mecánicamente al circuito.

Por su parte, la máscara de soldadura está formada por las capas superior e inferior de la placa. Típicamente de color verde, tiene la función de aislar las capas conductoras más externas del ambiente. En esta capa, solo existen agujeros en los pads o puntos en los que se han de soldar los componentes, ya que estos son los únicos lugares de las capas conductoras a los que se debe acceder. Por último, la capa de serigrafía es el dibujo que se imprime sobre ambas caras y sirve para anotar el circuito, marcando la localización de cada componente u otra información en forma de texto.

##### 4.3.1. LIMITACIONES DE MANUFACTURACIÓN Y DISEÑO

Las limitaciones que pueden aparecer en este tipo de diseños se dividen principalmente en dos categorías: las limitaciones de manufacturación y las consideraciones de diseño. Las primeras aparecen a raíz de las capacidades de producción de la empresa de manufacturación, mientras que las segundas son las que aparecen al elegir los objetivos y finalidad del proyecto.

Las limitaciones de manufacturación aparecen por culpa de la tolerancia, la resolución y la precisión en las máquinas que crean las placas de circuito impreso. Cada empresa de manufacturación de PCB tiene una lista de capacidades que indica cuáles son las limitaciones a la hora de hacer un pedido. Estas limitaciones pueden hacer referencia a, por ejemplo, los tamaños mínimos y máximos de varias partes o la separación entre ellas. En el caso de este proyecto, en la Tabla 3 se muestran las capacidades principales que tiene la empresa elegida para la manufacturación del prototipo. Todos estos datos han sido extraídos de su página web.

*Tabla 3: lista de las limitaciones principales de la empresa JLCPCB a la hora de crear una PCB.*

| LIMITACIONES                            | VALOR [mm] |
|---|------------|
| Diámetro mínimo de agujero              | 0.2        |
| Diámetro máximo de agujero              | 6.3        |
| Diámetro mínimo de vía                  | 0.4        |
| Distancia mínima entre agujeros         | 0.5        |
| Distancia mínima entre vías             | 0.254      |
| Distancia mínima entre pads             | 0.127      |
| Distancia mínima entre vía y traza      | 0.254      |
| Distancia mínima entre pad y traza      | 0.2        |
| Anchura mínima de traza                 | 0.127      |
| Distancia mínima entre trazas           | 0.127      |
| Distancia mínima entre pad y serigrafía | 0.15       |
| Distancia mínima entre serigrafías      | 0.1        |
| Distancia mínima entre traza y borde    | 0.2        |

La producción de placas con tolerancias muy estrictas puede tomar un largo tiempo o incrementar sustancialmente el coste, por lo que algunas de estas empresas, a pesar de tener la capacidad de llegar hasta puntos más precisos, deciden ofrecer la posibilidad de aumentar el valor de estas limitaciones a cambio de un tiempo de producción más corto y un menor precio. En este caso, estos valores entran dentro del rango de trabajo del proyecto debido a que se usan componentes que no requieren de valores más pequeños que los establecidos.

Esta lista de limitaciones indica las capacidades que tiene la empresa en la manufacturación y no se han de rebasar bajo ningún concepto. El incumplimiento de alguno de estos parámetros puede provocar que no se acepte el pedido o que este sea defectuoso. En el caso de que se cambie la empresa de manufacturación, estos datos habrán de ser actualizados a los correspondientes de la nueva empresa.

En los programas de diseño PCB existe un apartado llamado “reglas de diseño” en el que se pueden insertar estas limitaciones para verificar si se están cumpliendo o no.

Esta funcionalidad sirve solo como aviso y habrá de ser el diseñador el que modifique el circuito para adaptarse a estos límites. Si no se pueden cumplir los objetivos del proyecto con estas limitaciones de manufacturación, habrá que buscar otra empresa con un rango de limitaciones más adecuado.

Continuando con las consideraciones de diseño, la anchura de las trazas determina cuál es la resistencia de este conector y, por lo tanto, cuál es la corriente máxima que puede conducir. Las partes del circuito que requieren más corriente, como la alimentación, requerirán trazas más anchas que las de, por ejemplo, las señales de control.

En el caso de este circuito, se ha decidido basarse principalmente en 4 anchuras de traza, cada una con una corriente máxima mostrada en la Tabla 4. Las de 1.2 y 0.8 mm han sido usadas para la parte del convertidor boost mientras que la de 0.4 mm se ha usado para la carga de la batería, y la de 0.254 mm para las señales del microcontrolador. Se puede ver como la corriente máxima de estas partes está sobredimensionada ya que no existe ningún inconveniente a la hora de crear una traza más ancha, a parte del espacio físico que ocupa. Si el espacio físico resulta ser un problema, se puede modificar esta anchura para acomodarse a la situación, siempre que sus características eléctricas sigan siendo aceptables. Todos estos cálculos han sido hechos con el software PCB Toolkit como se muestra en el apartado HERRAMIENTAS DE DESARROLLO y teniendo en cuenta todas las características necesarias.

*Tabla 4: lista de las anchuras de trazas más usadas en el proyecto y sus características y usos.*

| ANCHURA DE LA TRAZA [mm] | CORRIENTE [A] | RESISTENCIA [mΩ/mm] | FUNCIÓN             |
|--------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 0.254                    | 1.99          | 2.03                | Microcontrolador    |
| 0.4                      | 2.74          | 1.18                | Carga de la batería |
| 0.8                      | 4.27          | 0.55                | Convertidor boost   |
| 1.2                      | 5.48          | 0.36                | Convertidor boost   |

Las vías también tienen esta limitación de corriente dependiendo del diámetro del agujero que las forman y el diámetro de la propia vía. En la Tabla 5 se muestran las tres en las se ha basado principalmente este diseño con sus características. Las más pequeñas sirven principalmente para crear el recorrido de las trazas de las señales de control de microcontrolador. Las señales de entrada y salida de este componente son de baja potencia y no requieren de conexiones de baja impedancia para su correcto funcionamiento. Las segundas se han usado principalmente para la carga de la batería, aunque también en otros lugares como la alimentación del microcontrolador. Estos puntos requieren conexiones de menor impedancia. Las últimas han sido exclusivamente usadas en la parte del convertidor boost para conseguir conexiones de baja impedancia debido a su alta potencia.

Tabla 5: lista de los tamaños de vías más usados en el proyecto y sus características y usos.

| CARACTERÍSTICAS DE LA VÍA<br>[mm] |                       | CORRIENTE<br>[A] | RESIS-<br>TENCIA<br>[mΩ] | FUNCIÓN             |
|-----------------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------|---------------------|
| DIÁMETRO DEL<br>AGUJERO           | DIÁMETRO<br>DE LA VÍA |                  |                          |                     |
| 0.35                              | 0.7                   | 2.35             | 1.14                     | Señales de control  |
| 0.5                               | 0.9                   | 2.85             | 0.81                     | Carga de la batería |
| 0.7                               | 1.2                   | 3.44             | 0.59                     | Convertidor boost   |

El número de capas que forman una PCB es decidido en función de la complejidad del circuito a crear o el tamaño que se quiere llegar a conseguir. Cuanto más complejo el circuito o más pequeño se quiera que sea, más capas serán necesarias. En el caso de este circuito, se ha limitado a dos capas. Este número ha sido elegido ya que se trata de un circuito lo bastante poco complejo como para no ser necesarias más, y el precio de su manufacturación también se ve reducido con esta decisión. Su tamaño, a pesar de que se requiera minimizarlo al máximo, no es necesario excederse. Un tamaño no superior a un cuadrado de 10 cm de lado es un objetivo equilibrado entre tamaño y complejidad.

#### 4.3.2. DISEÑO

El diseño de una placa de circuito impreso se puede separar en diversos pasos y es el punto de un proyecto de estas características que más tiempo requiere. Todo este proceso consiste en situar, mediante el uso del programa de diseño PCB elegido, todos los componentes en la posición adecuada dentro de la placa y crear las conexiones necesarias entre todos ellos. Existen una gran variedad de factores para tener en cuenta durante este proceso.

La distribución de componentes es uno de los primeros pasos. Consiste en colocar aproximadamente todos los componentes en una posición adecuada. Esta distribución debe situar todos los componentes que requieran una conexión entre ellos cerca entre sí y también ha de tener en cuenta que el usuario que maneje circuito debe acceder a algunas partes de él y manipular algunos componentes. Los conectores han de quedar fácilmente accesibles para que las conexiones con ellos sean sencillas, los interruptores deben ser fácilmente manipulables, y los LEDs fácilmente visibles. Este punto es muy importante a la hora de alcanzar el objetivo de crear un producto accesible y fácil de usar.

Además del espacio horizontal de los componentes, también se ha de tener en cuenta el vertical. Todos los componentes se van a alzar una determinada distancia desde la superficie de la placa y es indispensable que no interfieran entre ellos. Durante este proceso de distribución es cuando se ha de asegurar esta compatibilidad física. La incorporación de modelos 3D de los componentes puede ayudar durante este paso.

Continuando con otro de los puntos de un diseño PCB, hay que seleccionar la anchura de las trazas de cada unión teniendo en cuenta la corriente máxima que se espera

por este camino. Una vez elegida, hay que asegurarse que el camino que sigan sea el adecuado. Se ha de minimizar su longitud en la medida de lo posible y hay que evitar que pasen cerca de otras trazas o componentes. El electromagnetismo puede provocar interferencias entre estos componentes. Las señales de alta potencia pueden afectar de forma negativa a las señales de alta frecuencia, interfiriendo en su correcto funcionamiento.

Debido a que se ha decidido usar una placa de dos capas, podemos dividir las para que cada una tenga una función distinta. La superior, donde se encuentran los componentes, va a ser usada exclusivamente para realizar las conexiones con las trazas principales, mientras que en la inferior se va a crear un plano de masa que, ocasionalmente, puede incluir alguna traza para facilitar el conexionado.

La masa de un circuito electrónico es el punto eléctrico desde el que todos los voltajes son referenciados. Por esta razón, todas las partes de un circuito requieren algún tipo de conexión con este punto para funcionar. El plano de masa tiene principalmente tres utilidades. La primera de ellas es práctica, ya que, como se ha dicho antes, la masa es un punto eléctrico muy usado por todo el circuito y es muy sencillo realizar una conexión con una vía a un plano que ocupe toda la superficie. La segunda es por sus características eléctricas, ya que, para el correcto funcionamiento del circuito, es necesario que la conexión con la masa del circuito tenga la menor impedancia posible para que todos los puntos del circuito tengan una masa igual. La tercera es para evitar las interferencias electromagnéticas, ya que este plano funciona como un escudo que protege al circuito frente a las interferencias externas. La conexión con este plano de masa se realiza con vías desde la capa superior.

Para cumplir la baja impedancia de este plano, hay que conseguir que sea lo más ininterrumpido posible, evitando incluir el máximo número de trazas y evitando que estas bloqueen de alguna forma el camino de la corriente.

En los circuitos de alta potencia como en convertidor boost, hay que conseguir que el área que forma el circuito de trazas en la zona de alta frecuencia sea lo más pequeña posible. Este camino de alta frecuencia provoca emisiones electromagnéticas y disminuye las especificaciones del circuito aumentando su impedancia.

La serigrafía también es punto para tener en cuenta. Este término hace referencia a la escritura que existe en la capa superior del circuito y sirve para indicar tanto la delimitación física de los componentes para saber el espacio que va a ocupar cada uno, como el designador de cada uno de ellos que sirve para numerar todos estos componentes, como para indicar otras características de forma visual como la función de un interruptor.

A parte de para la delimitación y la designación de componentes, en este trabajo se ha empleado la serigrafía para anotar la función de los LEDs de carga, la función de los LEDs de programación, la función de los interruptores de la fuente de alimentación y el controlador de motores de corriente continua, el botón, y la función de todos los conectores. Al igual que en la distribución, este proceso sirve para cumplir el objetivo de facilidad a la hora de usarlo.

Ya que la finalidad de este circuito es la de ser montado en un robot para controlarlo, es importante que este proceso sea fácil de llevar a cabo. Por esto, se ha de conseguir que el tamaño de la placa sea lo más reducido posible, en este caso siendo un cuadrado de 10



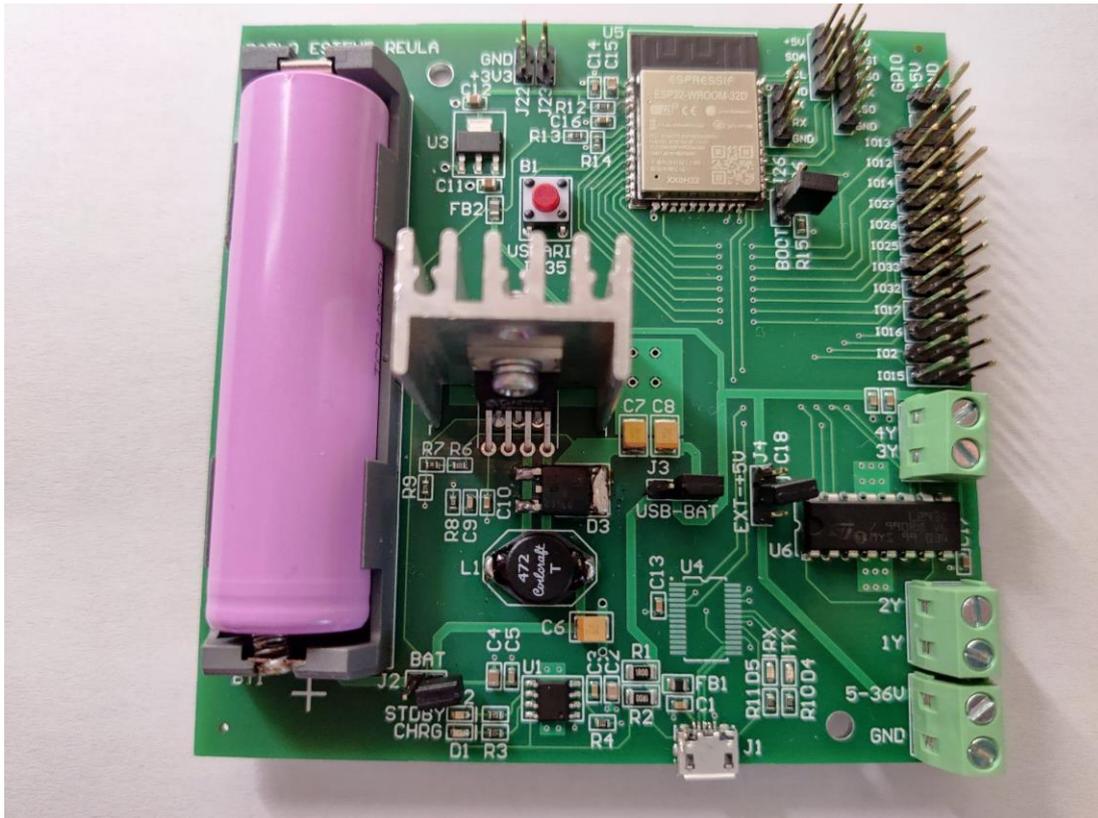


Figura 20: fotografía del prototipo completamente ensamblado y funcional.

## 5.1. PRUEBAS REALIZADAS

Para verificar el funcionamiento del prototipo, se han hecho una serie de pruebas, desde el montaje hasta la verificación de cada una de las partes por separado y en conjunto. Para esto, las herramientas utilizadas han sido un soldador y estaño para el montaje, un multímetro digital para realizar diferentes medidas de tensión y corriente, y una fuente externa para alimentar el controlador de motores de corriente continua en su modo de funcionamiento externo. También se han empleado varios servomotores y motores de corriente continua para verificar un correcto control sobre ellos y un teléfono móvil para conectarse al Bluetooth del microcontrolador, además de otros sensores y actuadores.

La primera prueba realizada se ha llevado a cabo durante el montaje. Una vez recibidos todos los componentes, se han colocado y soldados en su posición. Algunos de los componentes de montaje superficial han sido un poco delicados de montar, pero una vez se cree un producto final, estos deberían ser todos ensamblados por la empresa de construcción de PCB. Respecto a los de montaje en orificio pasante, la dificultad ha sido la esperada teniendo en cuenta que el usuario deberá de tener de antemano cierto conocimiento sobre este tema y las herramientas necesarias.

Pasando ahora a la parte de la alimentación del circuito, se han realizado tres pruebas de carga de la batería para comprobar que la curva de carga era correcta y no se sobrepasaban los valores límite del sistema. Se han medido los valores de tensión y corriente en intervalos de 10 min durante tres ciclos completos de carga para mostrar en la Figura 21 la media de estas tres pruebas.

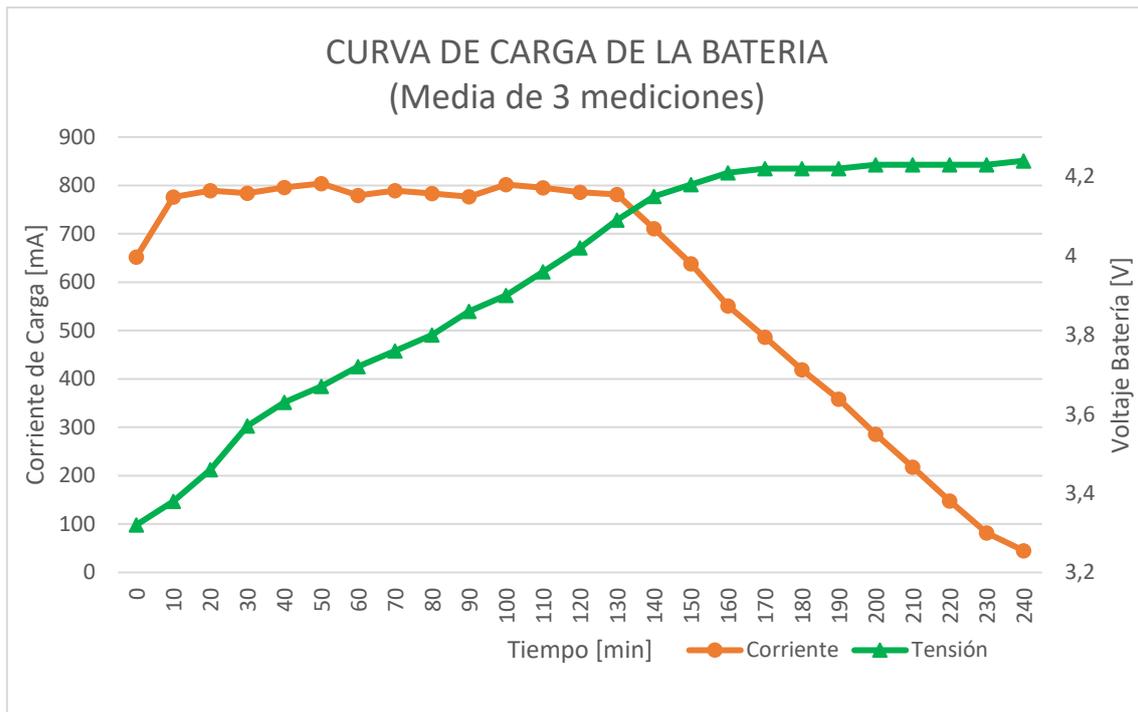


Figura 21: gráfica de corriente de carga y tensión de batería de la media de tres mediciones de ciclos completos.

Se pueden diferenciar los dos estados de corriente constante y tensión constante con los que funciona el cargador. La corriente está limitada sobre los 800 mA en su punto más alto y va descendiendo hasta que se completa la carga, mientras que la tensión de la batería va subiendo desde los aproximadamente 3.3 V que supone la batería descargada hasta los 4.2 V y los mantiene durante el periodo de tensión constante. La duración de todo este proceso está cerca de los 240 min o las 4 h.

Continuando con la fuente de alimentación boost, se ha hecho una prueba de descarga con diferentes valores de carga en la batería y diferentes corrientes de salida. Este proceso ha consistido en colocar diferentes valores de resistencias en el rail de 5 V, y medir la corriente y la tensión en este para verificar que esta se mantiene estable. Se ha repetido este proceso para diferentes valores de carga de la batería para medir la influencia de este parámetro frente a la salida del convertidor. En la Figura 22 se muestra una gráfica con todos estos datos.

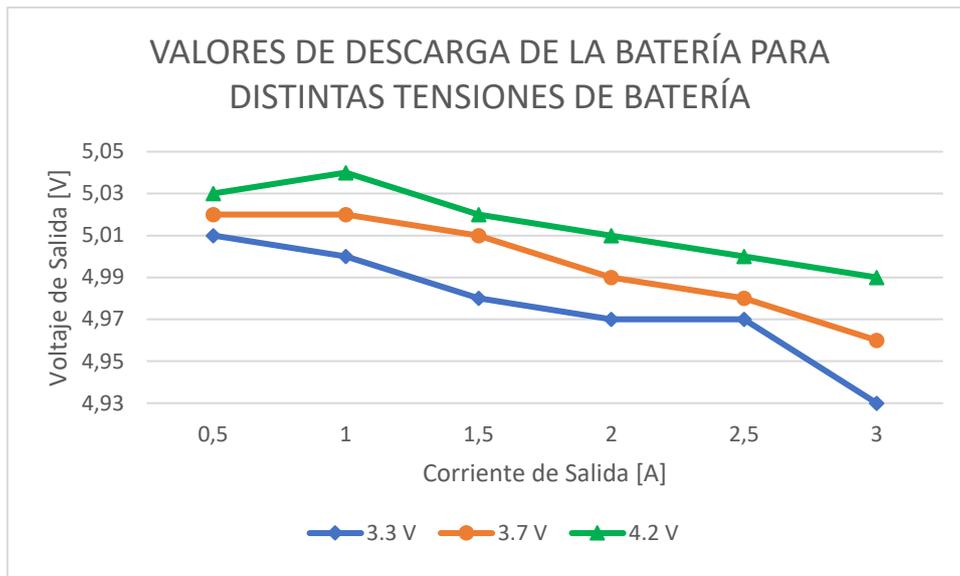


Figura 22: gráfica comparativa del voltaje de salida frente a distintos valores de corriente de salida y tensión de la batería.

Como se puede observar, el valor de 5 V se ha mantenido muy estable incluso en las peores condiciones, demostrando ser un diseño adecuado y robusto.

Ambas pruebas de carga y descarga de la batería también han servido para verificar los cálculos térmicos. El sistema no ha dejado de funcionar en ningún momento, ni bajo las condiciones de máxima potencia.

Para la verificación del proceso de programación, ha aparecido un problema de última hora para conseguir el circuito integrado que funciona como interfaz con el microcontrolador. Para solucionar esto, se ha comprado un pequeño módulo que se basa en el mismo circuito integrado que el que se ha diseñado y se han realizado las mismas conexiones que las diseñadas en el circuito. A pesar de este inconveniente, el sistema de programación ha sido completamente equivalente al diseñado y ha permitido continuar con normalidad con las pruebas.

Para la programación, se ha usado la IDE de Arduino con el módulo de control de ESP32 instalado, como se había planteado en un principio. Esto ha permitido crear varios códigos de prueba para verificar el funcionamiento de todo el sistema. En este proceso de programación, se ha usado el interruptor de “boot” o arranque para seleccionar si el microcontrolador estaba en modo programación o ejecución. El proceso de programación consiste en seleccionar el modo programación antes de subir el programa y, después, devolverlo al modo ejecución para funcionar con normalidad.

Este proceso ha resultado tedioso ya que, durante el periodo de depuración de un programa, es común subir varias versiones del código para verificar su funcionamiento. Respecto a la programación, se ha podido realizar la conexión bidireccional correctamente, recibiendo el programa para ejecutarlo y enviando datos de vuelta al ordenador por el canal serie para mostrarlos por el monitor.

Las conexiones del microcontrolador con el resto de los componentes también han sido revisadas con el multímetro, verificando la continuidad entre varios puntos y comprobando que no hay conexiones involuntarias.

Se han creado programas básicos o se han gastado ejemplos incluidos en el entorno de programación para verificar tanto los conectores para los servomotores, como la conexión Bluetooth e Internet. Estas pruebas han sido menores y solo han consistido en verificar que su funcionamiento era el esperado.

El controlador de motores de corriente continua también ha sido verificado con una prueba con un motor de corriente continua y alimentación tanto interna como externa. Se ha comprobado la capacidad de cambiar el sentido de giro de los motores y también se ha hecho una prueba de carga para verificar que los cálculos térmicos eran correctos y no se excedía la temperatura máxima. También se ha comprobado su funcionalidad extra con el control de un motor paso a paso de dos pares de polos.

Respecto a los buses SPI e I2C, se ha conectado una pantalla y un sensor de temperatura digital respectivamente para verificar que la conectividad con estos sistemas de comunicación era correcta y permitían establecer conexión con el microcontrolador.

Por último, también se han tenido en cuenta las comodidades que se han tenido como usuario a la hora de manejar el circuito. Los conectores estaban situados en una posición y con una distribución que han facilitado su uso, al igual que el marcado en la serigrafía. Como en vez de interruptores se ha decidido usar “jumpers”, que son pequeños conectores que son fáciles de incorporar en un circuito y fáciles de montar, el uso de estos se ha presentado incómodo a la hora de manejarlos. Los indicadores LED se han encontrado siempre en posiciones fáciles de ver y ha sido intuitivo determinar su funcionamiento gracias al marcado en la serigrafía.

## 5.2. CAMBIOS PROPUESTOS

Comparando los resultados obtenidos con los objetivos impuestos al principio del trabajo, se puede observar cómo se ha conseguido cumplir con todos los objetivos y especificaciones del proyecto. Los únicos cambios que se proponen son cambios menores que tratan de mejorar la experiencia usando el circuito con respecto al prototipo.

La batería ha tenido un funcionamiento perfecto, cumpliendo con los objetivos de diseño de potencia de salida y capacidad, pero su peor problema ha sido su montaje. Debido a la elección de usar un porta pilas de montaje en la PCB, esta batería ocupa mucho espacio y es bastante pesada. Una solución sería situar un conector donde cada persona pueda usar el tipo de batería que elija (siempre que cumpla con las especificaciones requeridas). Esto permitiría usar diferentes formatos de batería y, a la vez, disminuir el tamaño de la placa de desarrollo facilitando así su montaje sobre un robot. Un mayor uso de agujeros de montaje y una mejor distribución también pueden ayudar en este aspecto, reduciendo el tamaño final y ayudando así al montaje.

El uso de “jumpers” en vez de interruptores convencionales también ha disminuido la comodidad a la hora de usar el circuito. Con la simple sustitución de esta parte, se mejoraría en gran parte la comodidad. La programación también ha resultado ser un proceso lento y tedioso, debiendo manejar el pin de “boot” de forma manual. Como el

circuito integrado de programación consta de varias conexiones de control que pueden realizar este proceso de forma automática, con una simple modificación del esquemático se podría aumentar la comodidad a la hora de programar el robot con cambios mínimos en el diseño. Solo habría que conectar el pin “boot” a una de estas salidas de control que se habían decidido no usar en un principio.

Mirando ahora el proceso de carga de la batería, el uso de un puerto microUSB ha demostrado ser muy cómodo para el usuario a la hora de realizar las cargas, y los indicadores LED sobre el estado de la batería son fáciles de entender y funcionan correctamente. El valor límite de tensión de la batería y su curva de carga también se respetan. El único problema encontrado está en el tiempo de carga. Como normalmente se usan baterías de alta capacidad, el tiempo de carga es muy alto. Esto se podría solucionar sustituyendo el circuito integrado de control de carga de la batería por otro modelo superior, que mantenga las mismas funcionalidades que el actual, pero que disminuya el tiempo de carga.

Continuando con la fuente boost, las diferentes pruebas de carga han demostrado que cumple con los parámetros establecidos de 5 V/3 A independientemente del valor de carga de la batería. Su único problema está en que el circuito integrado principal es de tipo orificio pasante y ha de incluir un disipador para disipar parte del calor generado. Esto ya se ha tenido en cuenta a la hora del diseño, así que solo sería necesario sustituir un modelo por otro, eliminando así también el uso del disipador y reduciendo el tamaño total.

Todos estos cambios propuestos son modificaciones menores que se ha decidido no implementar en este proyecto. Por esta razón, los planos incluidos son los correspondientes al prototipo.

## 6. CONCLUSIÓN

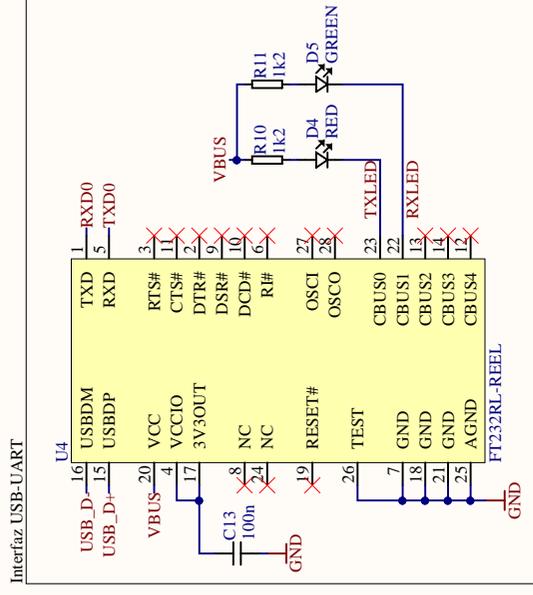
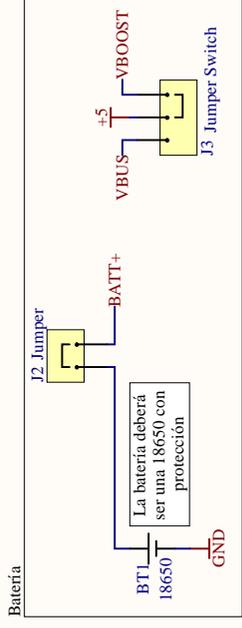
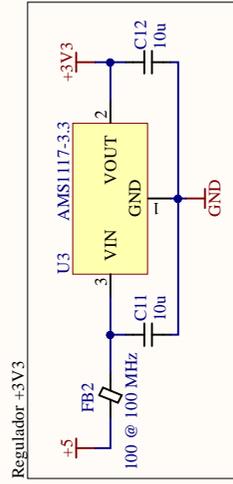
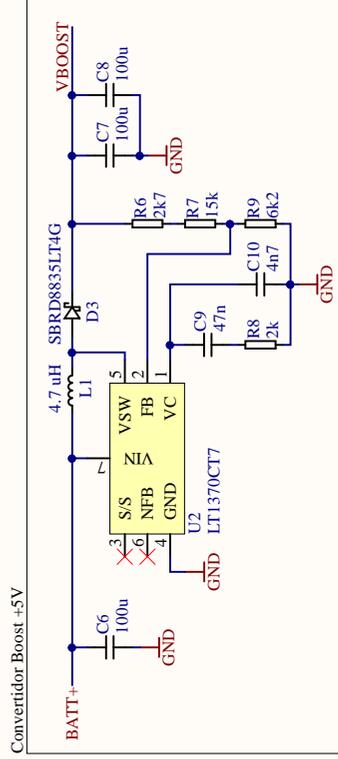
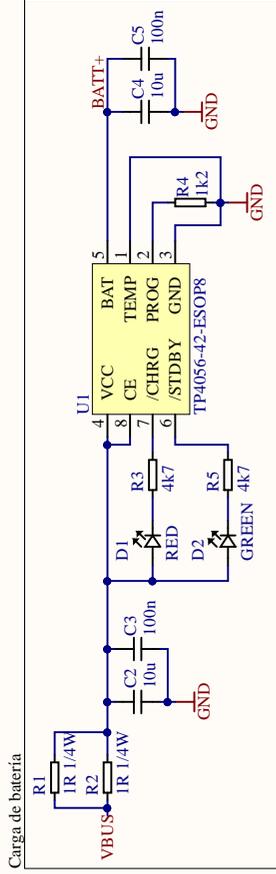
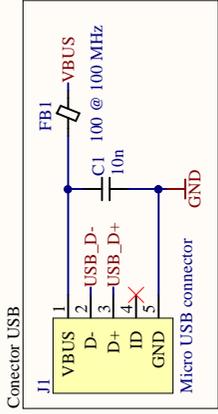
Una vez finalizado el proyecto, se pueden sacar varias conclusiones a partir de todo el proceso de desarrollo y diseño, y de los resultados obtenidos.

Todos los objetivos planteados han sido cumplidos con la solución adoptada. Esta afirmación se puede corroborar a través de las pruebas de verificación realizadas sobre el prototipo. El uso del producto ha resultado ser muy intuitivo, su utilidad elevada, y su precio asequible, incluyendo todas las funcionalidades planteadas durante el diseño. Además, aplicando los cambios propuestos se puede llegar a crear un producto que se ajuste todavía mejor a las especificaciones con cambios menores.

Respecto al proceso desarrollo, el diseño del circuito ha requerido una gran inversión en tiempo, aunque no tanto en dinero por el hecho de que uno de los objetivos era el de crear un producto asequible. El proyecto ha permitido combinar conocimientos de electrónica y robótica en un circuito funcional que cubre una necesidad real.

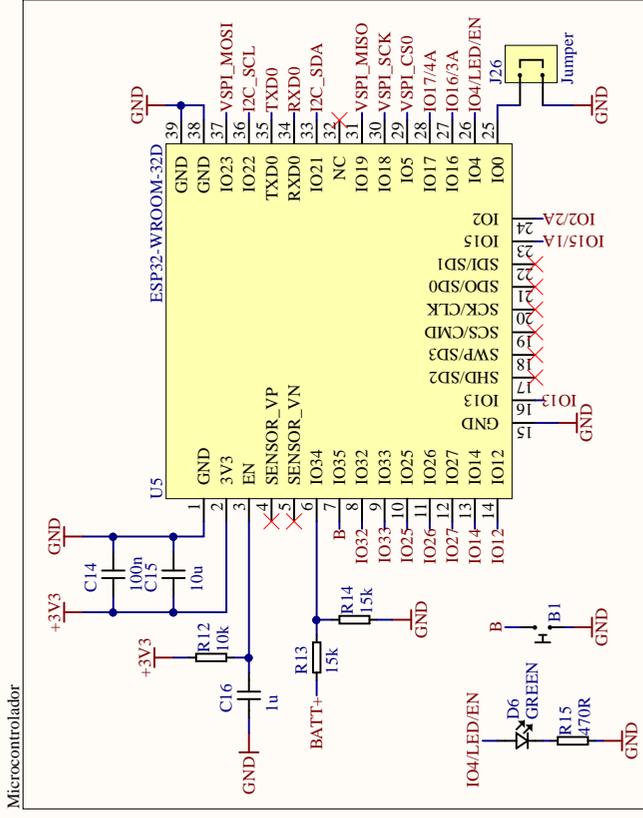
## 2. PLANOS





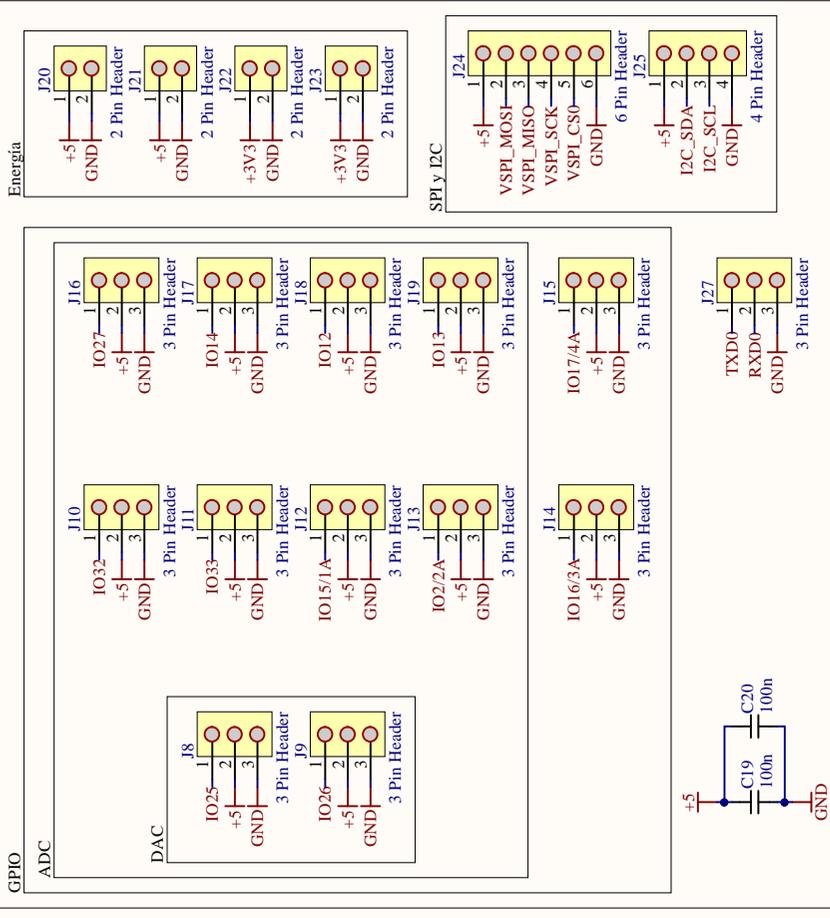
|  |   |
|--|---|
| Título: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLACA DE DESARROLLO PARA ROBÓTICA MÓVIL |   |
| Tamaño: A4   | Revisión: 1   |
| Fecha: 21/04/2021  | Universidad Politécnica de Valencia<br>Cami de Vera<br>Valencia (España)<br>46022 |
| Autor: Pablo Esteve Reula  | Hoja 1 de 2   |



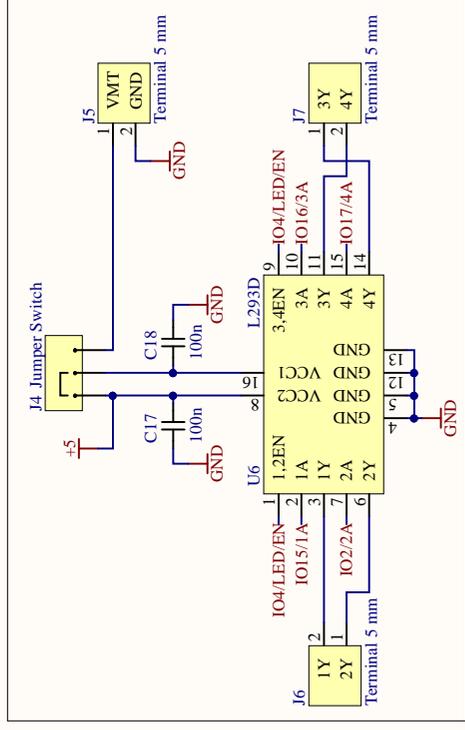


Microcontrolador

Conectores

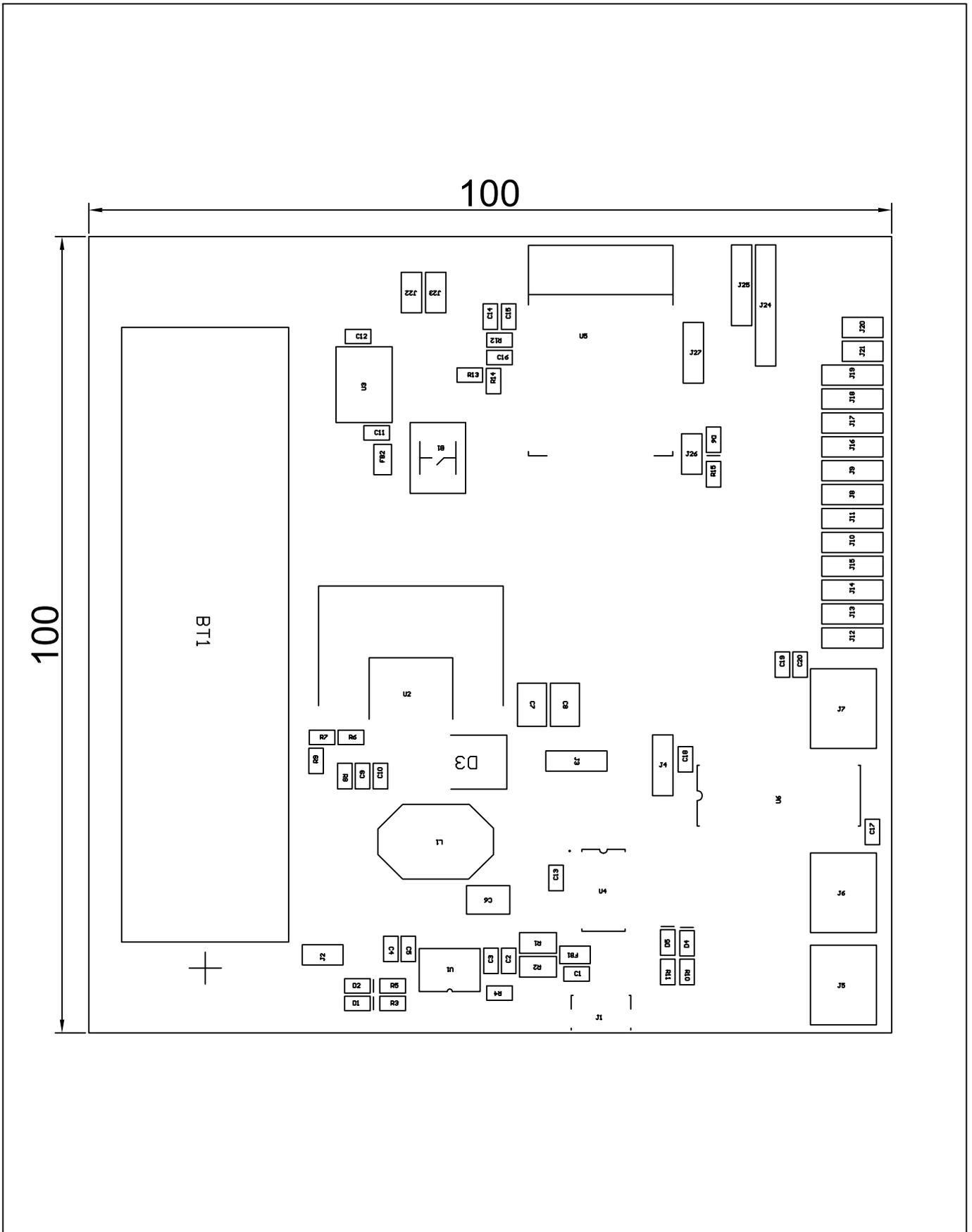


Puente en H



|  |                   |   |  |
|--|-------------------|---|--|
| Título: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLACA DE DESARROLLO PARA ROBÓTICA MÓVIL |                   | Revisión: 1   |  |
| Tamaño: A4   | Fecha: 21/04/2021 | Universidad Politécnica de Valencia<br>Cami de Vera<br>Valencia (España)<br>46022 |  |
| Autor: Pablo Esteve Reula  |                   | Hoja 2 de 2   |  |





Título: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLACA DE DESARROLLO PARA ROBÓTICA MÓVIL

ASSEMBLY DRAWING

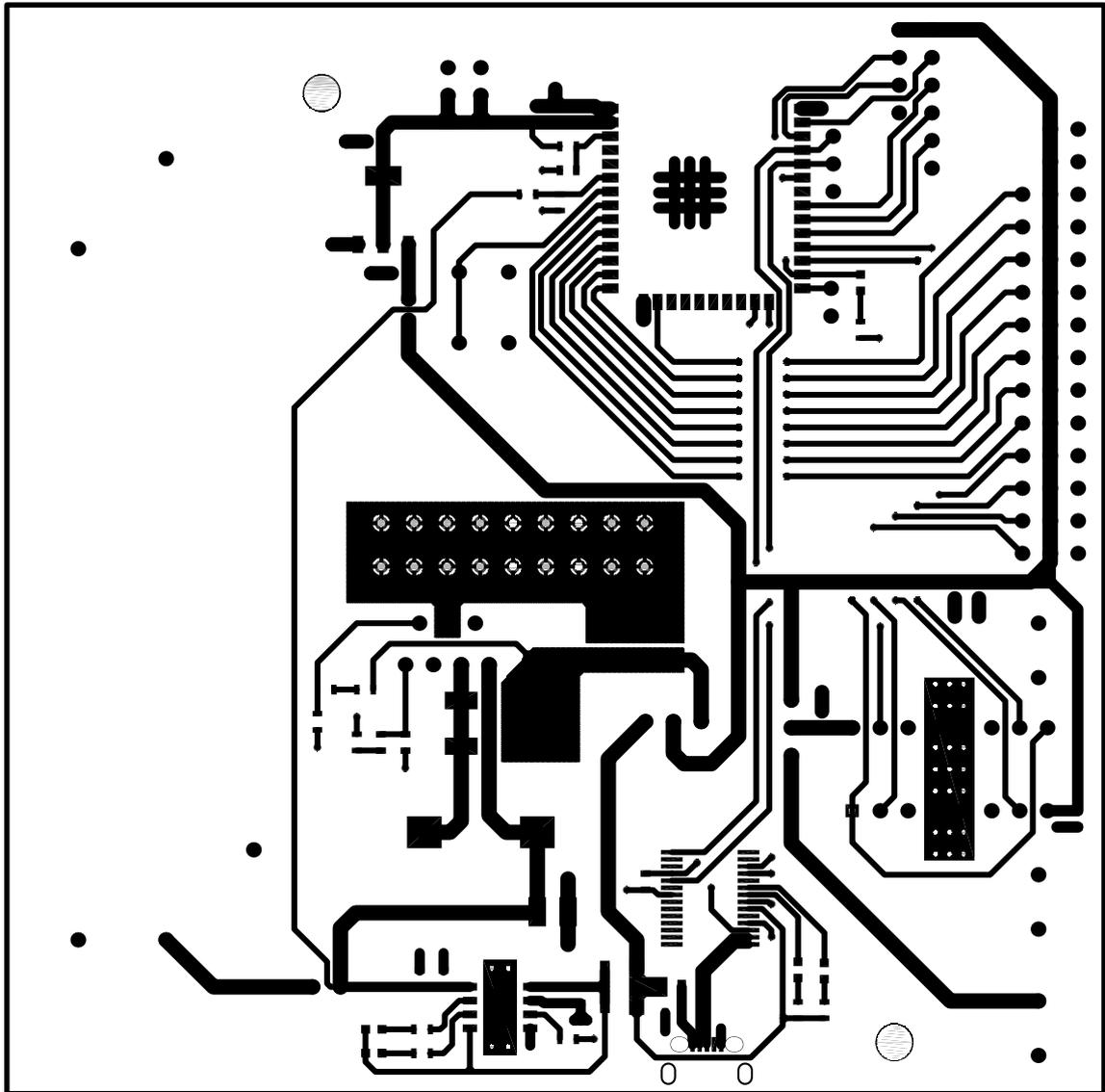
Tamaño: A4

Escala: 3:2

Autor: Pablo Esteve Reula

Fecha: 25/05/2021





Título: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLACA DE DESARROLLO PARA ROBÓTICA MÓVIL

TOP LAYER

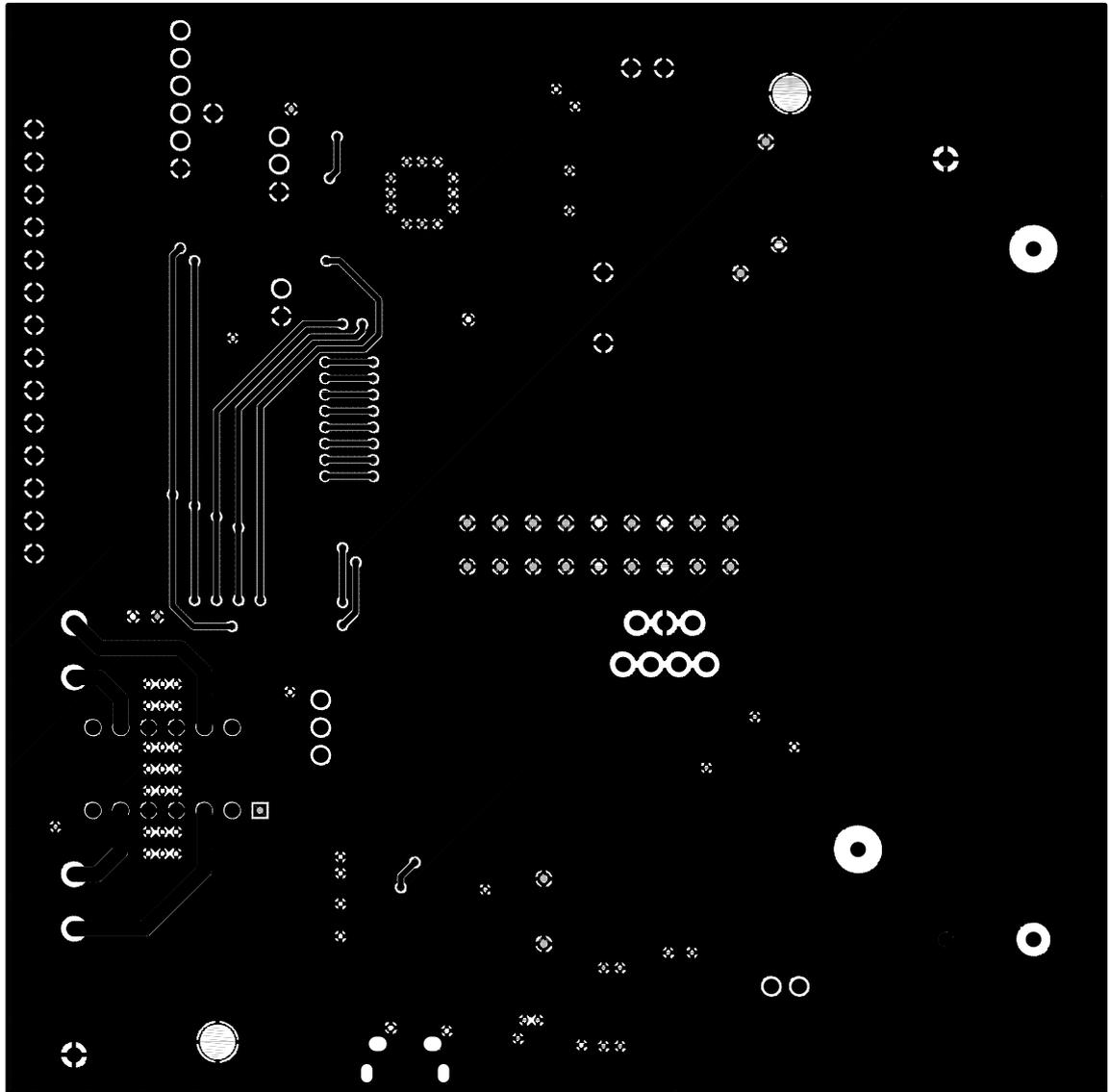
Tamaño: A4

Escala: 3:2

Autor: Pablo Esteve Reula

Fecha: 25/05/2021





Título: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLACA DE DESARROLLO PARA ROBÓTICA MÓVIL

BOTTOM LAYER

Tamaño: A4

Escala: 3:2

Autor: Pablo Esteve Reula

Fecha: 25/05/2021



# 3. PLIEGO DE CONDICIONES



## PLIEGO DE CONDICIONES

En el pliego de condiciones se recogen cuáles son las condiciones técnicas y legales de este proyecto.

El promotor es el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISA) en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), mientras que el proyectista será Pablo Esteve Reula, alumno de esta universidad. La modalidad de entrega del proyecto será de “llave en mano”, con un plazo de entrega de tres meses y con un adelanto del 50% del presupuesto proyectado.

La normativa que se ha seguido para la realización del proyecto es la siguiente:

UNE-EN IEC 61204-3:2018 Fuentes de alimentación de baja tensión con salida en corriente continua. Parte 3: Compatibilidad electromagnética (CEM).

UNE 157701:2006 Criterios generales para la elaboración de proyectos de instalaciones eléctricas de baja tensión.

UNE-EN 61204/A1:2002 Dispositivos de alimentación de baja tensión de salida en corriente continua. Características de funcionamiento.

Los componentes usados deberán ser iguales o equivalentes a los diseñados, tanto en tamaño como en especificaciones técnicas. El material se atenderá a la normativa de las especificaciones legales y deberá estar conforme con las aclaraciones de la memoria técnica.

Respecto al control de calidad, la fabricación y ensamblaje deberán revisarse manualmente para verificar que se cumplen con las especificaciones de diseño y se deberán comprobar los buses de tensión de +5 y +3.3 V, las conexiones, y las funcionalidades de conexión Bluetooth y Internet antes de entregar el producto.

El uso del producto se deberá mantener siempre dentro de las limitaciones de diseño. La fuente de alimentación no deberá sobrepasar la corriente máxima, y las salidas y entradas del microcontrolador deberán mantenerse siempre dentro de los límites del dispositivo.



# 4. PRESUPUESTO



## PRESUPUESTO

A continuación, se muestra el precio del prototipo creado, incluyendo componentes, PCB, y montaje.

| PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO |                        |               |            |
|---|------------------------|---------------|------------|
| COSTE DE MATERIALES Y MONTAJE             |                        |               |            |
| COMPONENTE                                | PRECIO UNITARIO [€/ud] | CANTIDAD [ud] | PRECIO [€] |
| Condensador 10n 0603                      | 0,008                  | 1             | 0,008      |
| Condensador 10u 0603                      | 0,008                  | 5             | 0,04       |
| Condensador 100n 0603                     | 0,008                  | 8             | 0,064      |
| Condensador 100u Case-B 3528              | 0,45                   | 3             | 1,35       |
| Condensador 47n 0603                      | 0,008                  | 1             | 0,008      |
| Condensador 4n7 0603                      | 0,008                  | 1             | 0,008      |
| Condensador 1u 0603                       | 0,008                  | 1             | 0,008      |
| LED Rojo 0603                             | 0,098                  | 2             | 0,196      |
| LED Verde 0603                            | 0,098                  | 3             | 0,294      |
| Diodo Schottky SBRD8835LT4G               | 1,11                   | 1             | 1,11       |
| Núcleo de ferrita 100 @ 100 MHz           | 0,049                  | 2             | 0,098      |
| Conector MicroUSB                         | 0,279                  | 1             | 0,279      |
| Conector Jumper                           | 0,033                  | 2             | 0,066      |
| Terminal 5 mm                             | 0,289                  | 3             | 0,867      |
| Conector 3 Pines                          | 0,04845                | 13            | 0,62985    |
| Conector 2 Pines                          | 0,0323                 | 6             | 0,1938     |
| Conector 6 Pines                          | 0,0969                 | 1             | 0,0969     |
| Conector 4 Pines                          | 0,0646                 | 1             | 0,0646     |
| Bobina 4.7u                               | 1,57                   | 1             | 1,57       |
| Resistencia 1R 1/4W 1206                  | 0,026                  | 2             | 0,052      |
| Resistencia 4k7 0603                      | 0,0065                 | 2             | 0,013      |
| Resistencia 1k2 0603                      | 0,0065                 | 3             | 0,0195     |
| Resistencia 2k7 0603                      | 0,0065                 | 1             | 0,0065     |
| Resistencia 15k 0603                      | 0,0065                 | 3             | 0,0195     |
| Resistencia 2k 0603                       | 0,0065                 | 1             | 0,0065     |
| Resistencia 6k2 0603                      | 0,0065                 | 1             | 0,0065     |
| Resistencia 10k 0603                      | 0,0065                 | 1             | 0,0065     |
| Resistencia 470R 0603                     | 0,0065                 | 1             | 0,0065     |
| Botón                                     | 0,09                   | 1             | 0,09       |
| Porta pilas                               | 2,65                   | 1             | 2,65       |
| TP4056-42-ESOP8                           | 0,33                   | 1             | 0,33       |
| LT1370CT7                                 | 10,23                  | 1             | 10,23      |
| AMS1117-3.3                               | 0,097                  | 1             | 0,097      |
| FT232RL-REEL                              | 2,99                   | 1             | 2,99       |
| ESP32-WROOM-32D                           | 3,48                   | 1             | 3,48       |
| L293D                                     | 3,59                   | 1             | 3,59       |
| Batería                                   | 8,8                    | 1             | 8,8        |

|                |       |   |          |
|----------------|-------|---|----------|
| PCB            | 0,332 | 1 | 0,332    |
| Ensamblaje     | 5,71  | 1 | 5,71     |
| TOTAL PRTOTIPO |       |   | 45,38665 |

Cabe destacar que el precio del producto final no sería igual de elevado que el del prototipo, ya que con la compra de componentes en altos volúmenes y la sustitución de algunos de ellos con su versión adecuada para el producto final, se reduciría bastante el precio.

También se ha tenido en cuenta el precio de diseño, con el coste del software usado y las horas de diseño.

| PRESUPUESTO DE DISEÑO |                      |                  |            |
|-----------------------|----------------------|------------------|------------|
| COSTE SOFTWARE        |                      |                  |            |
| CONCEPTO              | PRECIO ANUAL [€/año] | CANTIDAD [meses] | PRECIO [€] |
| Altium Designer       | 3000                 | 2                | 500        |
| TOTAL SOFTWARE        |                      |                  | 500        |

| COSTE HORAS DE TRABAJO  |                       |              |            |
|-------------------------|-----------------------|--------------|------------|
| CONCEPTO                | PRECIO UNITARIO [€/h] | CANTIDAD [h] | PRECIO [€] |
| Diseño del sistema      | 40                    | 100          | 4000       |
| Elección de componentes | 40                    | 50           | 2000       |
| Diseño del esquema      | 40                    | 50           | 2000       |
| Diseño PCB              | 40                    | 100          | 4000       |
| TOTAL HORAS DE TRABAJO  |                       |              | 12000      |
| TOTAL DISEÑO            |                       |              | 12500      |