

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

### *PLATAFORMA RECONFIGURABLE PARA ROBOT IOT DE COMPETICIÓN*

**Alumno:** Sola, León, Asier

**Director:** Jiménez, Verde, Jaime

**Curso:** 2018-2019

**Fecha:** Bilbao, 24 de junio de 2019

# Resumen Laburpena Abstract

Este documento recoge el diseño del circuito impreso (PCB) del prototipo de un robot IoT mini-sumo como parte fundamental de una hipotética infraestructura para la realización de una competición de robots.

La selección de componentes y todo el proceso de diseño se ha realizado intentando otorgar al usuario el máximo nivel de personalización y sencillez a la hora de programarlo.

**Palabras Clave:** PCB, IoT, personalización.

Dokumentu honek mini-sumo IoT robot baten prototipoaren zirkuitu inprimatuaren (PCB) diseinua aurkezten du, robot lehiaketa hipotetiko baten oinarritzko parte izanez.

Komponenteen hautaketa eta diseinu prozesu oro erabiltzaileari ahal den gehienezko egokiera eta programatzean erreztasuna emateko egin da.

**Gako-hitzak:** PCB, IoT, pertsonalizazioa.

This document presents the design of the printed circuit board (PCB) of a mini-sumo IoT robot prototype as the fundamental part of a hypothetical infrastructure for the realization of a robot competition.

The component selection and whole design was made looking for grant the user high customize level and simplicity when programming.

**Keywords:** PCB, IoT, customize

# Índice

<b>Resumen Laburpena Abstract</b>	<b>1</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>4</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>6</b>
<b>Lista de acrónimos</b>	<b>7</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
<b>2. Contexto</b>	<b>9</b>
<b>3. Objetivos y alcance</b>	<b>10</b>
<b>4. Beneficios</b>	<b>11</b>
4.1. Técnicos . . . . .	11
4.2. Sociales . . . . .	11
4.3. Económicos . . . . .	11
<b>5. Análisis de alternativas</b>	<b>12</b>
5.1. Unidad de procesamiento y control . . . . .	12
5.2. Fuentes de alimentación . . . . .	13
<b>6. Descripción de la solución</b>	<b>16</b>
6.1. Diseño del esquemático . . . . .	16
6.2. Diseño del PCB . . . . .	24
<b>7. Descripción de tareas</b>	<b>33</b>
7.1. Fases y tareas del proyecto . . . . .	33
7.2. Diagrama de Gantt . . . . .	34

<b>8. Presupuesto</b>	<b>36</b>
8.1. Recursos humanos . . . . .	36
8.2. Recursos técnicos . . . . .	36
8.3. Gastos . . . . .	37
<b>9. Conclusiones</b>	<b>38</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>39</b>
<b>10.Anexo I: Coste de fabricación del PCB</b>	<b>40</b>
10.1. Coste componentes . . . . .	40
10.2. Coste PCB . . . . .	42

# Lista de figuras

1.	Raspberry y Arduino . . . . .	8
2.	Ejemplo de implementación de una norma y su efecto sobre el sistema. . .	13
3.	ATSAMW25H18-MR210PB . . . . .	13
4.	Eficiencia TPS63031 . . . . .	14
5.	Eficiencia LTC3536 . . . . .	14
6.	Eficiencia TPS63061 . . . . .	15
7.	Comunicación entre micro de usuario, micro de control y un periférico. . .	16
8.	Esquema del sistema. . . . .	17
9.	Esquema del bloque de alimentación . . . . .	17
10.	Esquema del micro de usuario . . . . .	18
11.	Esquema del micro de control . . . . .	19
12.	Periféricos del diseño. . . . .	21
13.	Interacción entre Robot 1 y Robot 2 a través de los periféricos LED IR, IR SENSOR y MOTOR DRIVER. . . . .	22
14.	Gráfica característica Voltaje de salida-Distancia al objeto de los sensores de distancia laterales. . . . .	23
15.	Robot con siguelíneas implementado en otro PCB. . . . .	24
16.	Huella de una resistencia de métrica 0603. . . . .	25
17.	Huellas con distintos indicadores de polaridad. . . . .	25
18.	Huellas de ambas fuentes de alimentación. . . . .	25
19.	Huella del conector USB. . . . .	26
20.	Huella del micro de control. . . . .	26
21.	Huella del SoM donde se encuentra el micro de usuario. . . . .	26
22.	Información acerca del encapsulado y huella del SoM. . . . .	27
23.	Outline y dimensiones del PCB. . . . .	28
24.	Planos de alimentación. . . . .	29

25.	Los componentes resaltados en rojo fueron los primeros en emplazarse. . . . .	30
26.	Emplazamiento final de los componentes. . . . .	30
27.	Rutado del cristal. . . . .	31
28.	Serigrafía del conector del sensor ultrasonidos (J10) y siguelíneas (J5). . . . .	32
29.	PCB de ambos siguelíneas. . . . .	32
30.	Precio fabricación 5 PCB de cuatro capas. . . . .	42

# Lista de tablas

1.	Patillaje del micro de usuario . . . . .	19
2.	Patillaje micro de control . . . . .	20
3.	Periféricos y sus correspondientes señales . . . . .	20
4.	Control PWM de la rotación del motor . . . . .	23
5.	Control del movimiento a través de los motores. . . . .	23
6.	Distribución de horas del proyecto. . . . .	34
7.	Presupuesto de horas de diseño. . . . .	36
8.	Amortización del equipo utilizado. . . . .	36
9.	Presupuesto total del proyecto. . . . .	37

# Lista de acrónimos

**TIC** Tecnologías de la información y comunicación

**PCB** Printed Circuit Board

**IoT** Internet of Things

**BoM** Bill of Materials

**SoC** System on Chip

**SoM** System on Module

**GPIO** General Purpose Input/Output

**JTAG** Joint Test Action Group

**SWD** Serial Wire Debug

**SBW** Spy-Bi-Wire

**LED** Light Emitting Diode

**IR** Infrared

**THT** Through-Hole Technology

**SMD** Surface-Mount Device

**USD** United States Dollar

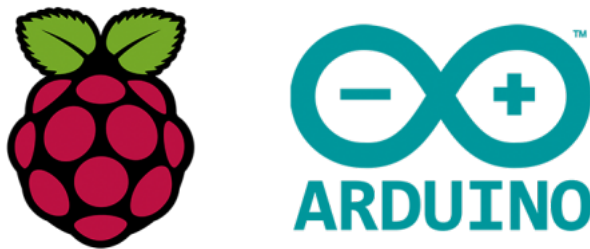
**ADC** Analog-Digital Converter



# 1. Introducción

En los últimos años se ha hecho un esfuerzo por acercar las nuevas tecnologías a usuarios sin apenas conocimiento tecnológico. Desde proyectos libres como Arduino y Raspberry se ha buscado dicho acercamiento a áreas como la telemática, programación y electrónica.

El sector académico ha hecho eco de este esfuerzo, añadiendo a su programa escolar actividades sobre electrónica y programación, acercando así a los más jóvenes – en colegios e institutos- así como a más adultos – a través de talleres u otras actividades-



**Figura 1:** Raspberry y Arduino

La gran comunidad y apoyo detrás de ambos proyectos permite a usuarios con nula experiencia empezar desde cero sin temor a perderse en el proceso de aprendizaje, y a usuarios más avanzados compartir y mejorar sus diseños. El espíritu "libre" les ha permitido calar en la comunidad educativa como una alternativa barata y sencilla.

## 2. Contexto

En el mundo actual las TIC están presentes en nuestro día a día. Desde que nos despertamos estamos en contacto con hardware y software que nos facilitan el día a día.

La importancia de conocer el mundo que nos rodea y, por tanto, el mundo de las TIC, ha llevado a muchas instituciones educativas a añadir a sus programas clases de programación y robótica, con el fin de acercar a los jóvenes a la comprensión del mundo tecnológico en el que viven.

Pero no solo las instituciones. Asociaciones y personas cuyo objetivo es la divulgación tecnológica y la robótica educativa están diseñando sus propias herramientas, ya sean robots, impresoras 3D, etc; creando una gran comunidad "maker" que cada vez añade más y más adeptos a sus filas.

Si bien este acercamiento está dando sus frutos, en ciertas ocasiones nos podemos encontrar con la falta de interés en estas áreas. Por ello se buscan otros caminos para despertar el interés, por ejemplo, la competitividad. Añadir un toque de competitividad al ámbito de la electrónica educativa logra un mayor interés en el aprendizaje y la capacidad de aportar nuevas ideas.

### 3. Objetivos y alcance

El principal objetivo de este proyecto es el de diseñar el PCB de un prototipo de robot mini-sumo que disponga de los periféricos y sensores necesarios para su interacción con el exterior y una unidad control y procesamiento que permita su programación.

El proceso seguido podría dividirse en dos bloques, quedando el alcance de cada uno de ellos de la siguiente manera:

- **Elección de componentes:** realizar una selección adecuada de componentes que aseguren el buen funcionamiento del diseño teniendo en cuenta siempre el factor económico con vistas a generar un archivo BoM que contenga toda la información acerca de los distintos componentes escogidos.
- **Diseño del PCB:** emplazar y rutar los distintos componentes y pistas de acuerdo a las recomendaciones y especificaciones de los fabricantes al objeto de generar una serie de archivos *Gerber* que contengan la información necesaria para la futura fabricación del PCB.

## 4. Beneficios

### 4.1. Técnicos

En el marco de la robótica educativa la disponibilidad de recursos y materiales es esencial para el desarrollo de nuevas y mejores ideas. Así, mediante este proyecto se ha generado un diseño que puede servir como referencia para futuros proyectos, ampliando así los recursos disponibles.

### 4.2. Sociales

Añadir otras alternativas al mundo de la robótica educativa abre nuevas vías para captar el interés de niños y jóvenes y acercarles hacia el mundo de las TIC, logrando así asentar conocimientos generales que les servirá en su desarrollo como futuros ingenieros e usuarios de las TIC.

### 4.3. Económicos

Si una empresa decidiera su comercialización lograría mayores beneficios y cuota de mercado. El menor coste de fabricación en comparación con algunas alternativas del mercado también<sup>1</sup> hace del diseño una opción para instituciones y colegios que quieran incorporar la robótica educativa a su programa.

---

<sup>1</sup>Comparado con robot mini-sumo del artículo web <https://www.xataka.com/seleccion/aprender-robotica-programacion-vacaciones-verano-guia-recursos-libros-juegos-para-ninos-jovenes>

## 5. Análisis de alternativas

Durante la búsqueda de los distintos componentes se ha prestado especial atención en los bloques más críticos de cualquier diseño electrónico: la **unidad de procesamiento y control** y las distintas **fuentes de alimentación**.

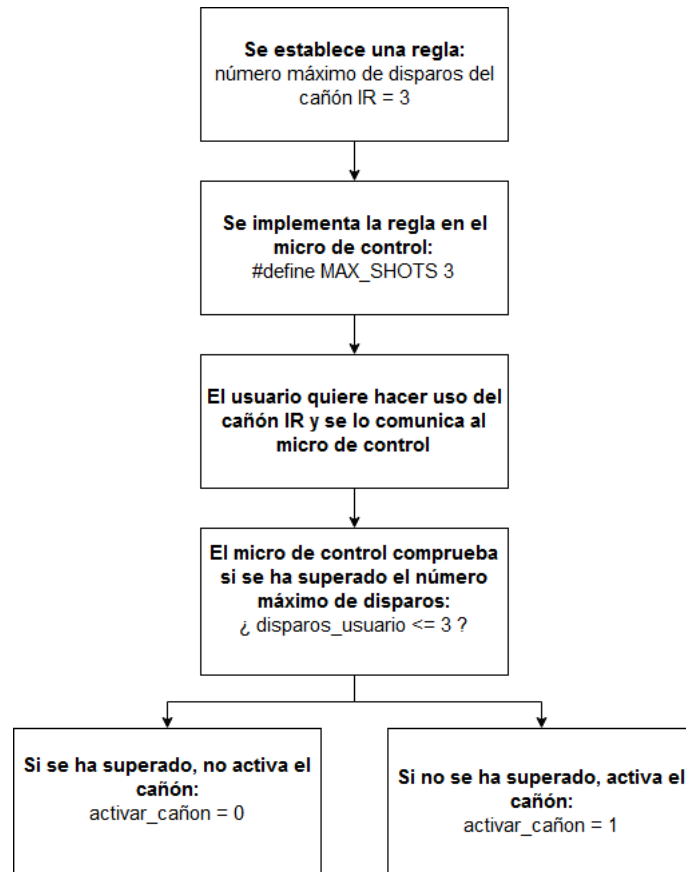
La gran variedad de componentes existentes para ambos bloques propició una pre-selección que permitiera analizar varias alternativas dentro del mismo bloque, sobretodo en la **unidad de procesamiento y control**.

### 5.1. Unidad de procesamiento y control

En este apartado, se exponen las diferentes alternativas estudiadas para el diseño de dicho bloque. Se tuvo en cuenta tanto la complejidad de introducir y adaptar la elección al diseño como la complejidad de cara al usuario a la hora de entender el funcionamiento y su programación.

- **Microcontrolador:** un único microcontrolador (de ahora en adelante *micro*) que realizase las funciones de control y procesamiento. Debía ser un micro sencillo de programar para el usuario y que fuera lo bastante potente como para poder administrar todos los periféricos conectados a él. Tras buscar entre las distintas opciones se analizaron dos de ellos, ambos de Microchip: **ATmega328P** y **ATSAMD21G18**.
- **Microcontrolador y FPGA:** se planteó la posibilidad de usar una FPGA (iCE40LP de Lattice Semiconductor) que contuviera bloques de control de los periféricos y que se comunicara con el micro vía I2C o SPI.
- **Dos microcontroladores:** por último se pensó en separar la unidad de control y procesamiento, de manera que el usuario pudiera programar el robot bajo unas *reglas o normas* que le impedirían utilizar todos los periféricos. Ésta alternativa se analiza con la vista puesta en una posible competición en la que ciertas normas o reglas no permitan al usuario hacer lo que desee con el robot. Por ello existiría un micro a programar por el usuario y un micro *maestro* de control. Un ejemplo de este funcionamiento se muestra en la figura 2.

Tras analizar las distintas alternativas se escogió el uso de dos microcontroladores puesto que permitía separar las tareas de control (tareas independientes del usuario, como el control de las vidas o la habilitación del controlador de motores) y el programa del usuario. El micro seleccionado para la unidad de control fue el **MSP430** de Texas Instruments y para el usuario se escogió el *System on Module* **ATSAMW25-MR210PB** de Microchip. Éste SoM está compuesto por el micro ATSAMD21G18 comentado anteriormente y un SoC WiFi que añade mayores posibilidades al usuario.



**Figura 2:** Ejemplo de implementación de una norma y su efecto sobre el sistema.

Si bien uso de la FPGA hubiera supuesto un gran valor educativo añadido y hubiera abierto puertas hacia un mayor conocimiento de las FPGA, su dificultad de implementación en el diseño y comprensión por parte de usuarios menos avanzados motivó su descarte.

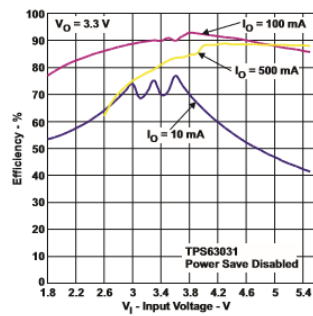


**Figura 3:** ATSAMW25H18-MR210PB

## 5.2. Fuentes de alimentación

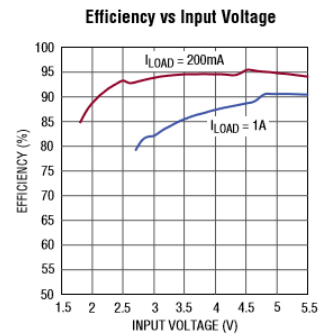
Puesto que algunos integrados se alimentaban a 3.3V y otros a 5V han sido necesarias dos fuentes de alimentación distintas, una para cada plano de alimentación.

- Fuente de alimentación 3.3V:** esta fuente era la encargada de la alimentación de ambos micros. Entre la fuente **LTC3536** de Linear Technology y la fuente **TPS63031** de Texas Instruments se escogió la primera, puesto que, a pesar de presentar una ligera mayor eficiencia su precio era bastante mayor.



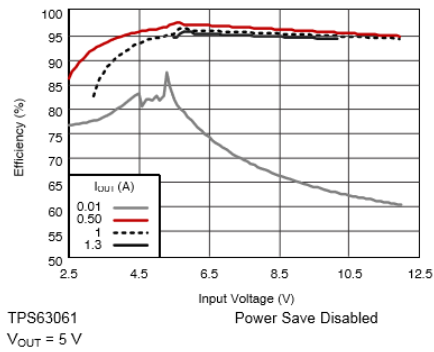
$V_{OUT} = 3.3\text{ V}$

**Figura 4:** Eficiencia TPS63031



**Figura 5:** Eficiencia LTC3536

- **Fuente de alimentación 5V:** se escogió la fuente **TPS63061** de Texas Instruments por su buena eficiencia y su barato coste.



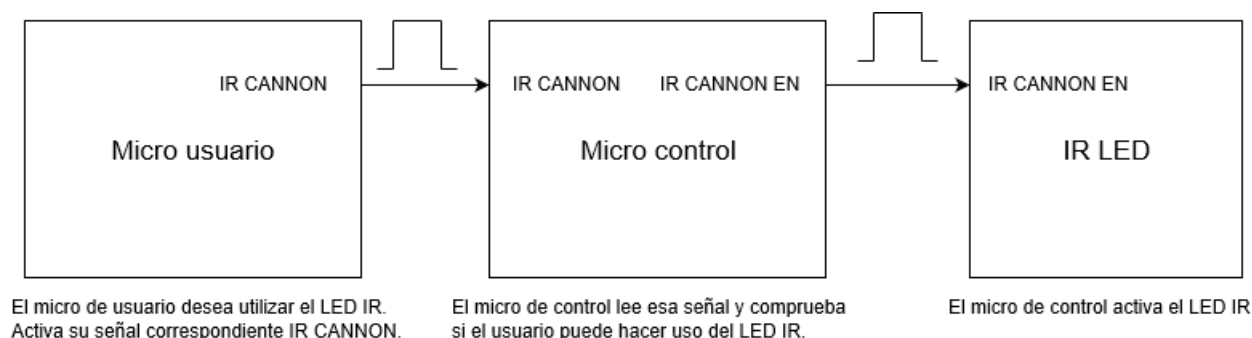
**Figura 6:** Eficiencia TPS63061



## 6. Descripción de la solución

El sistema está formado por los siguientes bloques: **Alimentación, Micro de usuario, Micro de control** y **Periféricos**.

El funcionamiento se basa en la interacción y comunicación entre el micro de usuario y el micro de control. Un ejemplo de ello se ha mostrado anteriormente en la figura 2. Esta interacción se realiza mediante la conexión directa de patillas entre el micro de usuario y el micro de control, por lo que a una escritura sobre la patilla del micro de usuario prosigue una lectura de la misma señal por parte del micro de control. En la figura siguiente se expone un ejemplo de comunicación:



**Figura 7:** Comunicación entre micro de usuario, micro de control y un periférico.

Siguiendo las etapas descritas en la sección 3. Objetivos y alcance, se expone el desarrollo del diseño, desde el esquema electrónico hasta el rutado del PCB.

### 6.1. Diseño del esquemático

Para el diseño del esquemático se usó el software de diseño OrCAD Capture CIS y se siguió las recomendaciones descritas por los fabricantes de los componentes en los datasheets. Para una mejor organización se hizo un diagrama completo del diseño, antes de dividirlo por bloques

Los bloques que se exponen a continuación son: **Alimentación, Micro de usuario, Micro de control** y **Periféricos**.

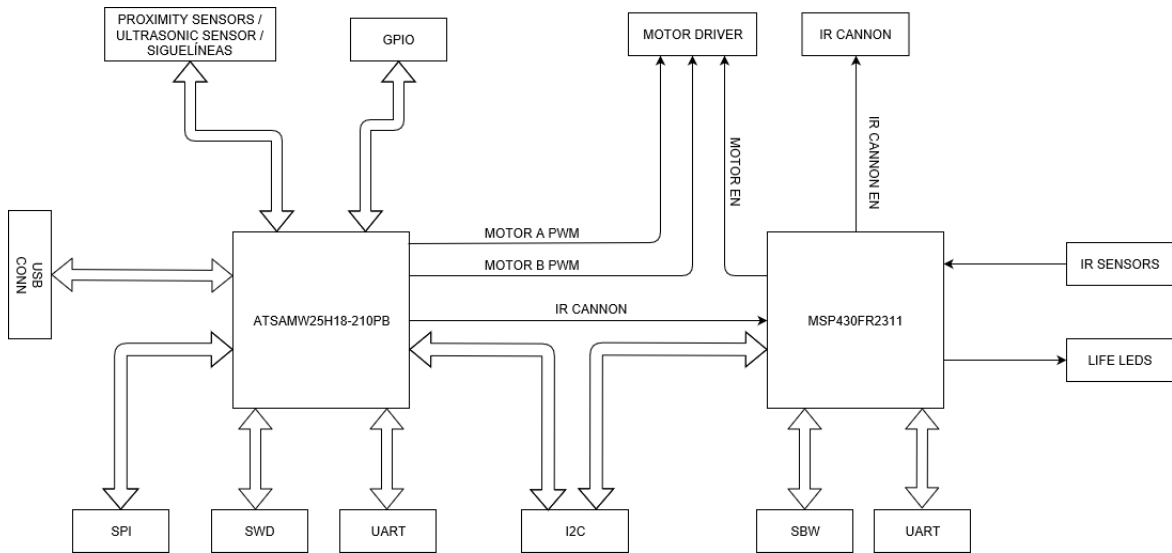


Figura 8: Esquema del sistema.

### 6.1.1. Alimentación

Compuesto por ambas fuentes de alimentación (3V3 y 5V), y dos conectores que alimentan al sistema: un conector mini-USB y conector Jack para una batería. Se añadió un circuito comparador que permitía cambiar automáticamente la alimentación a USB si éste se encontraba conectado, de manera que no se malgastara la batería.

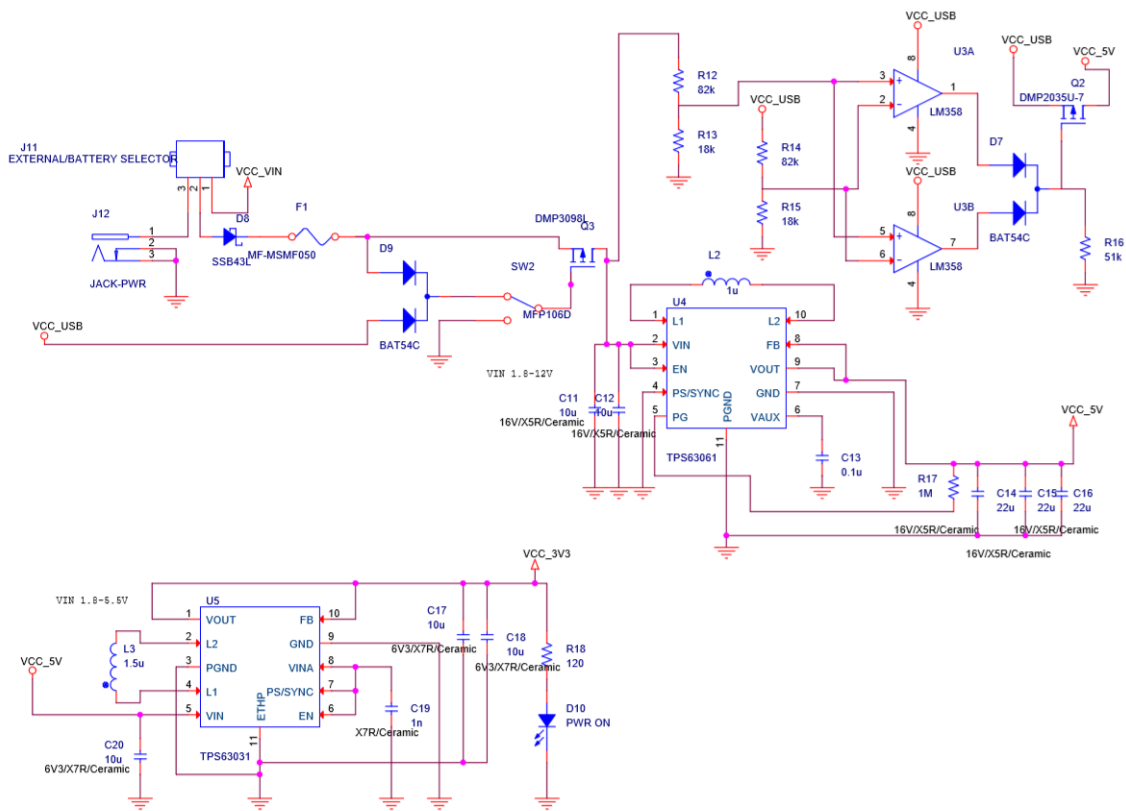


Figura 9: Esquema del bloque de alimentación

## 6.1.2. Micro de usuario

Como se comentó en el apartado 5. Análisis de alternativas, el micro de usuario es el SAMD21G contenido en el SoM ATSAMW25H18-210PB. La conexión USB permite la programación desde el entorno *Arduino*. También dispone de conector JTAG/SWD de 10 patillas típico de los micros ARM para *depurar*, programar y carga del bootloader. Siguiendo las recomendaciones del fabricante, se dejaron pines sin conexión y se insertaron dos condensadores de 20pF y un cristal de 32.768kHz para el reloj del micro.

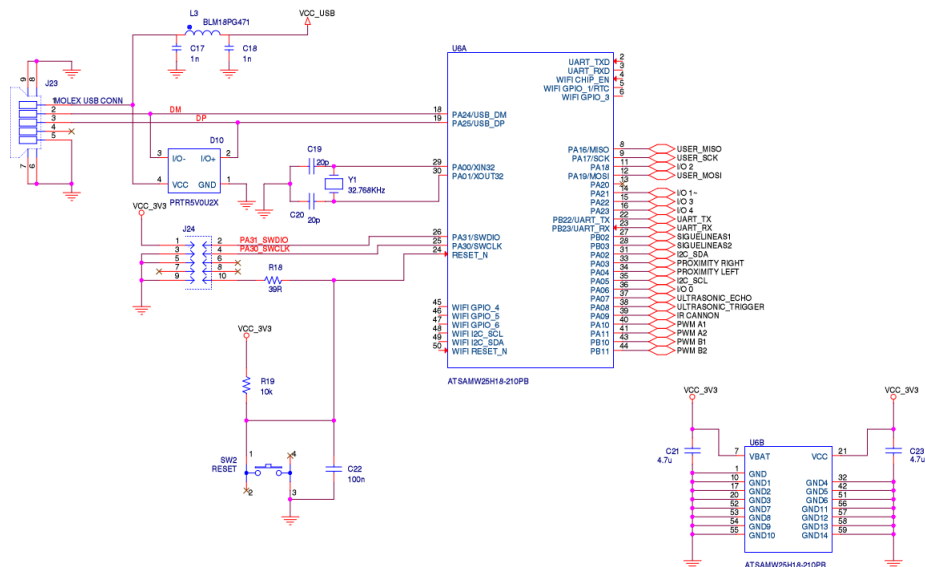


Figura 10: Esquema del micro de usuario

Como líneas de comunicación se dispone de I2C, UART y SPI. La señal *IR CANNON EN* hace referencia a la habilitación del LED infrarrojo (del que se hablará en el apartado de Periféricos). El micro de usuario puede hacer uso de los siguientes periféricos: cañón infrarrojo, sensores de proximidad (izquierda y derecha), sensor de ultrasonidos, siguelíneas y ambos motores<sup>1</sup>. Las patillas sin una función específica se llevaron a un conector como pines GPIO. El patillaje del micro con sus distintas señales se puede ver en la tabla 1.

<sup>1</sup>Para usar los motores es necesaria la habilitación de los mismos por parte del micro de control.

Pin	Pin description	Signal
1	GND	GND
2	UART_TXD	NC
3	UART_RXD	NC
4	WIFI CHIP_EN	NC
5	WIFI GPIO_1/RTC	NC
6	WIFI GPIO_3	NC
7	VBAT	3V3
8	PA16/MISO	USER_MISO
9	PA17/SCK	USER_SCK
10	GND	GND
11	PA18	I/O 2
12	PA19/MOSI	USER_MOSI
13	PA20	NC
14	PA21	I/O 1~
15	PA22	I/O 3
16	PA23	I/O 4
17	GND	GND
18	PA24/USB_DM	USB_DM
19	PA25/USB_DP	USB_DP
20	GND	GND
21	VCC	3V3
22	PB22/UART_TX	TX
23	PB23/UART_RX	RX
24	RESET_N	RESET
25	PA30/SWCLK	SWCKL

Pin	Pin description	Signal
26	PA31/SWDIO	SWDIO
27	PB02	SIGUELINEAS1
28	PB03	SIGUELINEAS2
29	PA00/XIN32	XIN32
30	PA01/XOUT32	XOUT32
31	PA02	PROXIMITY SENSOR 1
32	GND	GND
33	PA03	PROXIMITY SENSOR 2
34	PA04	I2C_SDA
35	PA05	I2C_SCL
36	PA06	I/O 0
37	PA07	ULTRASONIC_ECHO
38	PA08	ULTRASONIC_TRIGGER
39	PA09	IR CANNON
40	PA10	PWM A0
41	PA11	PWM A1
42	GND	GND
43	PB10	PWM B0
44	PB11	PWM B1
45	WIFI GPIO_4	NC
46	WIFI GPIO_5	NC
47	WIFI GPIO_6	NC
48	WIFI I2C_SCL	NC
49	WIFI I2C_SDA	NC
50	WIFI RESET_N	NC
51	GND	GND

Tabla 1: Patillaje del micro de usuario

### 6.1.3. Micro de control

A diferencia del micro de usuario, que dispone de USB o JTAG/SWD para su programación, el micro de control hace uso de la interfaz SBW, accesible a través de las señales *TEST* y *RESET\_MSP*.

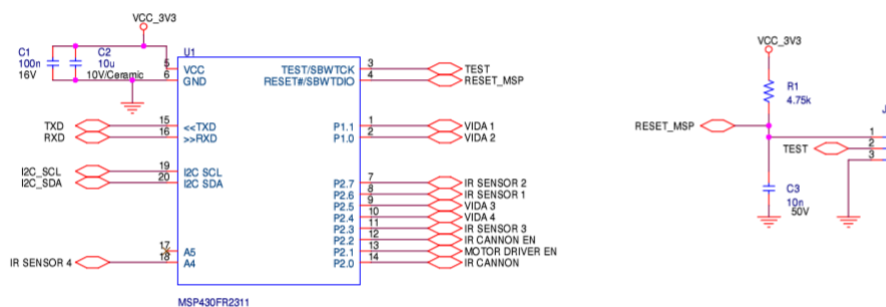


Figura 11: Esquema del micro de control

El micro de control es el encargado de los sensores IR y de excitar el LED IR para el uso del cañón infrarrojo. Del micro de control depende también la habilitación del controlador de los motores, a través de la señal *MOTOR DRIVER EN*, así como los LEDs que representan las vidas del robot. La señal *IR CANNON EN* es la señal de activación/desactivación del LED IR desde el micro de usuario.

Pin	Pin description	Signal
1	P1.1	VIDA 1
2	P1.0	VIDA 2
3	TEST/SBWTCK	TEST
4	RST/SBWT DIO	RESET
5	DVCC	VCC
6	DVSS	GND
7	P2.7	IR SENSOR 2
8	P2.6	IR SENSOR 1
9	P2.5	VIDA 3
10	P2.4	VIDA 4
11	P2.3	IR SENSOR 3
12	P2.2	IR CANNON EN
13	P2.1	MOTOR DRIVER ENABLE
14	P2.0	IR CANNON
15	TXD	TXD
16	RXD	RXD
17	A5	NC
18	A4	IR SENSOR 4
19	I2C SCL	I2C_SCL
20	I2C SDA	I2C_SDA

**Tabla 2:** Patillaje micro de control

#### 6.1.4. Periféricos

El listado de periféricos disponibles es el siguiente: sensores IR, LED IR, sensores de proximidad, sensor de ultrasonidos, driver de motores, LEDs y GPIOs. A ello se suma las distintas interfaces de UART, I2C y SPI, accesibles a través de distintos conectores. A continuación se muestra una tabla con las distintas señales y el micro que las gobierna:

Periférico	Señal	Micro
Ultrasonidos	ULTRASONIC_TRIGGER	Micro usuario
Ultrasonidos	ULTRASONIC_ECHO	Micro usuario
UART User	UART_RX	Micro usuario
UART User	UART_TX	Micro usuario
Proximity Sensor Right	PROXIMITY RIGHT	Micro usuario
Proximity Sensor Left	PROXIMITY LEFT	Micro usuario
Sensor IR 1	IR SENSOR 1	Micro control
Sensor IR 2	IR SENSOR 2	Micro control
Sensor IR 3	IR SENSOR 3	Micro control
Sensor IR 4	IR SENSOR 4	Micro control
LED IR	IR CANNON EN	Micro control
LED 1	VIDA 1	Micro control
LED 2	VIDA 2	Micro control
LED 3	VIDA 3	Micro control
LED 4	VIDA 4	Micro control

Periférico	Señal	Micro
Motor Driver	PWM A0	Micro usuario
Motor Driver	PWM A1	Micro usuario
Motor Driver	PWM B0	Micro usuario
Motor Driver	PWM B1	Micro usuario
Motor Driver	MOTOR DRIVER EN	Micro control
UART Master	RXD	Micro control
UART Master	TXD	Micro control
GPIO	I/O 0	Micro usuario
GPIO	I/O 1~	Micro usuario
GPIO	I/O 2	Micro usuario
GPIO	I/O 3	Micro usuario
GPIO	I/O 4	Micro usuario
Siguelíneas	SIGUELINEAS1	Micro usuario
Siguelíneas	SIGUELINEAS2	Micro usuario

**Tabla 3:** Periféricos y sus correspondientes señales

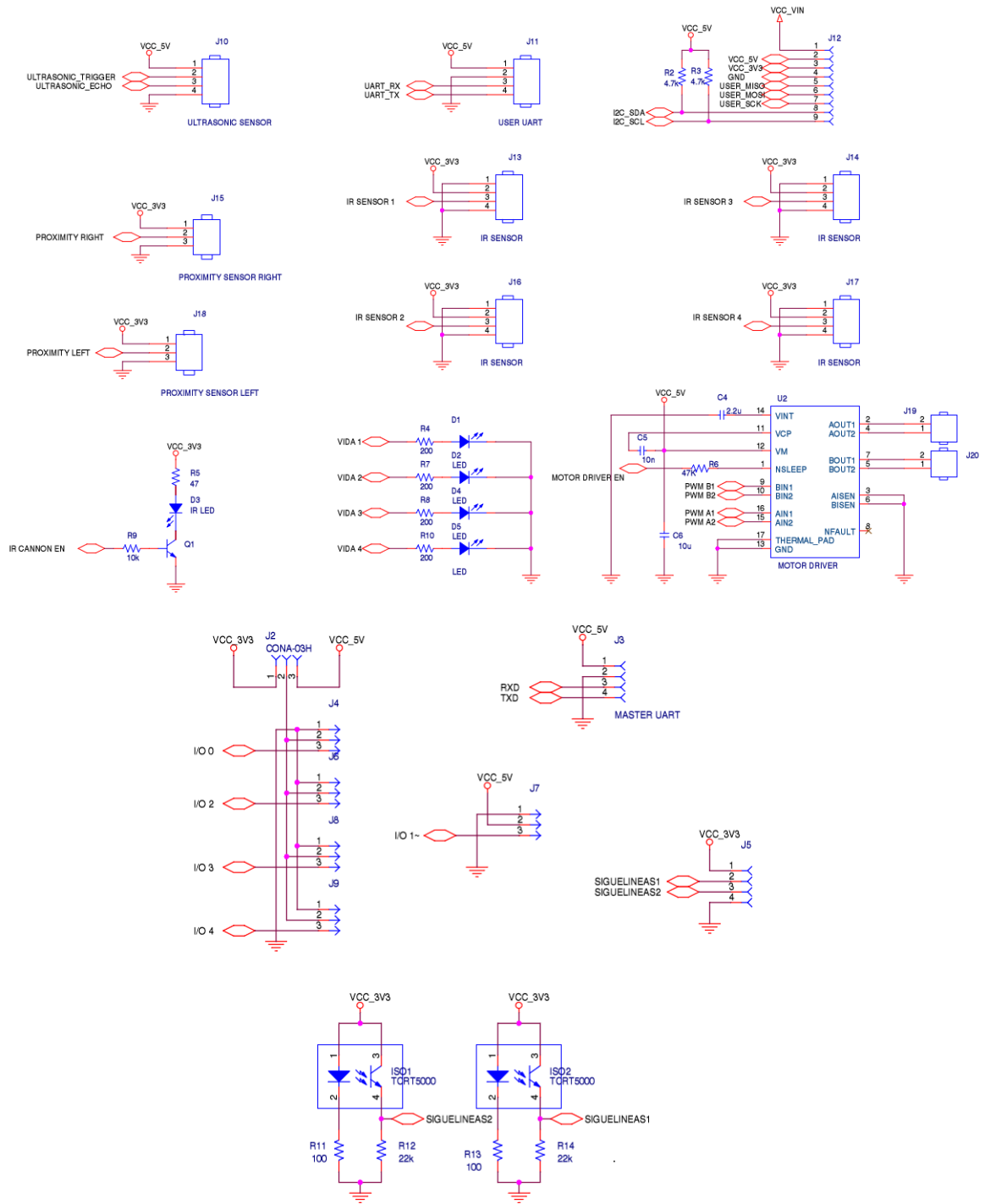
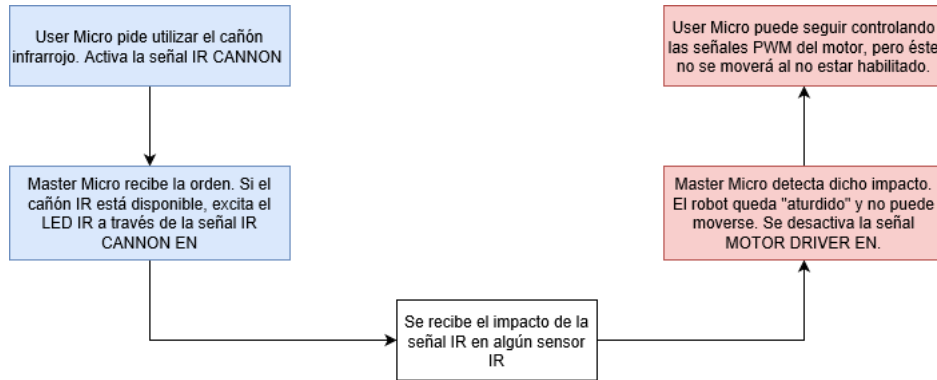


Figura 12: Periféricos del diseño.

La distribución de los periféricos entre los dos micros se realiza en base a la idea de qué periféricos son "necesarios" para el correcto funcionamiento del robot y cuáles no; por ello los LED de las vidas y la habilitación del controlador de motores son gobernados por el micro de control. A continuación, se muestra una propuesta de funcionamiento de los periféricos LED IR, IR SENSOR y MOTOR DRIVER.



**Figura 13:** Interacción entre Robot 1 y Robot 2 a través de los periféricos LED IR, IR SENSOR y MOTOR DRIVER.

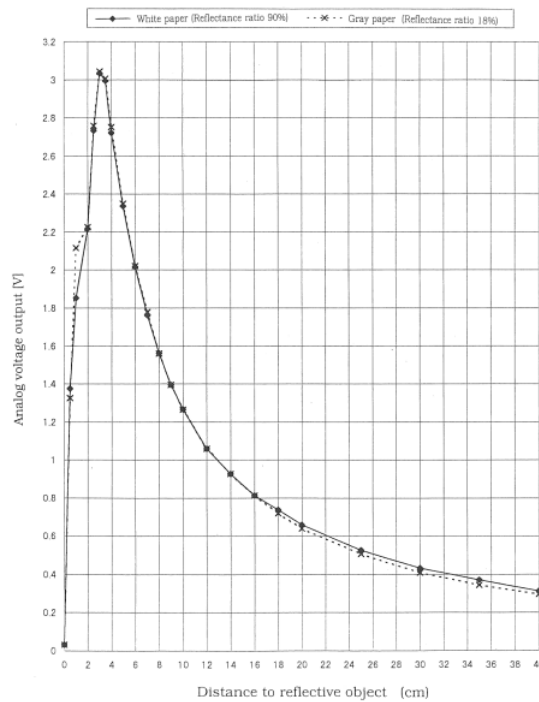
Otro posible efecto podría ser la reducción de una vida, apagando uno de los LED de vidas. Existen una gran variedad de posibilidades a la hora de implementar los distintos efectos de los periféricos, todas ellas a disposición del usuario y programables por software.

El sensor ultrasónicos, como bien indica su nombre, emite un ultrasonido que recibe de vuelta al chocar contra un objeto. Basta con leer la señal del sensor, cuya forma es un pulso de duración igual al tiempo (en microsegundos). Con una simple fórmula matemática, el usuario dispondrá de la distancia entre el robot y el objeto medido:

$$distancia(cm) = \frac{duration(\mu s)/2}{V_{sonido}(cm/\mu s)}$$

La duración se divide a la mitad puesto que tiene en cuenta el camino de retorno tras chocar contra el objeto.

Los sensores de proximidad proporcionan una tensión de salida según la distancia a la que encuentran un objeto. Al estar conectados a patillas del micro que disponen de ADC internos permite al usuario recibir un valor proporcional a la distancia medida.



**Figura 14:** Gráfica característica Voltaje de salida-Distancia al objeto de los sensores de distancia laterales.

El controlador de motores permite controlar dos motores mediante señales PWM. Cada par de salidas están unidas a un bloque terminal donde se conecta el motor. Dependiendo de la configuración de cada par de señales de entrada el motor rotará en un sentido o en otro. Las configuraciones se muestra en la tabla siguiente:

xIN1	xIN2	Action
PWM	0	PWM Forward
0	PWM	PWM Reverse

**Tabla 4:** Control PWM de la rotación del motor

Y dependiendo del movimiento de cada motor, el robot se moverá en las distintas direcciones.<sup>2</sup>

Motor A	Motor B	Action
Forward	Forward	Forward
Forward	Reverse	Turn Left
Reverse	Forward	Turn Right
Reverse	Reverse	Back

**Tabla 5:** Control del movimiento a través de los motores.

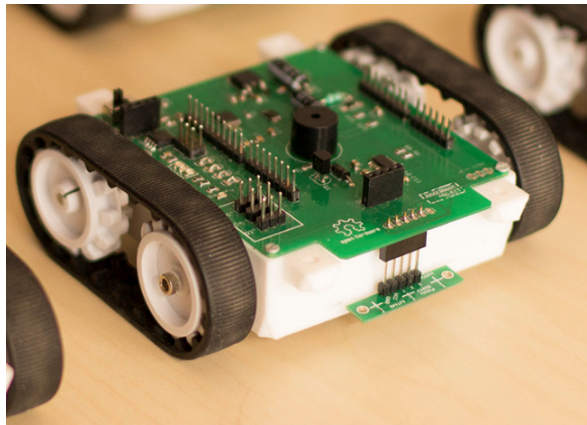
Los siguelíneas son dispositivos que hacen uso de optoacopladores. Éstos disponen

<sup>2</sup>El Motor A corresponde al motor derecho y el Motor B al izquierdo.



de un diodo LED que emite luz y un fototransistor que actúa como interruptor. Al rebotar la luz emitida contra una superficie el fototransistor se excita dependiendo de la intensidad de la luz. Un ejemplo sencillo es una superficie blanca con una línea negra: el fototransistor apenas recibirá luz si se encuentra sobre la superficie negra (la luz es absorbida); en cambio, recibirá prácticamente la totalidad de la luz sobre la superficie blanca (la luz es reflejada).

La implementación de los siguelíneas fue algo más compleja respecto al resto de periféricos. Puesto que consta de dos optoacopladores, el periférico debía estar lo más cercano al suelo posible. Por ello, se decidió diseñar otro PCB para sustentar dichos optoacopladores. La conexión entre el PCB de los siguelíneas y el PCB "madre" se realiza mediante un conector.



**Figura 15:** Robot con siguelíneas implementado en otro PCB.

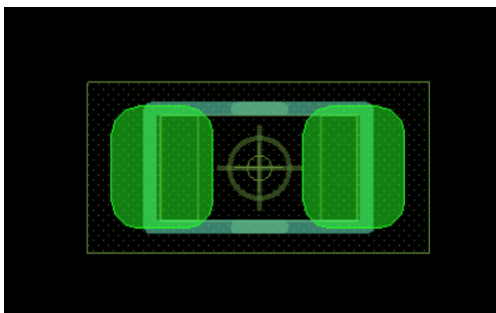
Por último, los GPIO están dispuestos en conectores de tres patillas: dos para la alimentación del periférico (VCC y GND) y la propia señal (I/O x). Puesto que existen periféricos de distinta alimentación, se optó por añadir un selector de tensión de 3V3 o 5V para cuatro de los cinco GPIO y así no limitar el número de periféricos utilizables. La señal I/O 1~, al ser PWM, se conectó directamente a 5V con la intención de poder añadir un servo-motor.

## 6.2. Diseño del PCB

En este apartado se abordará todo lo relacionado con el diseño final, desde la creación de las huellas de los componentes hasta el emplazamiento y rutado de éstos.

### 6.2.1. Diseño de huellas

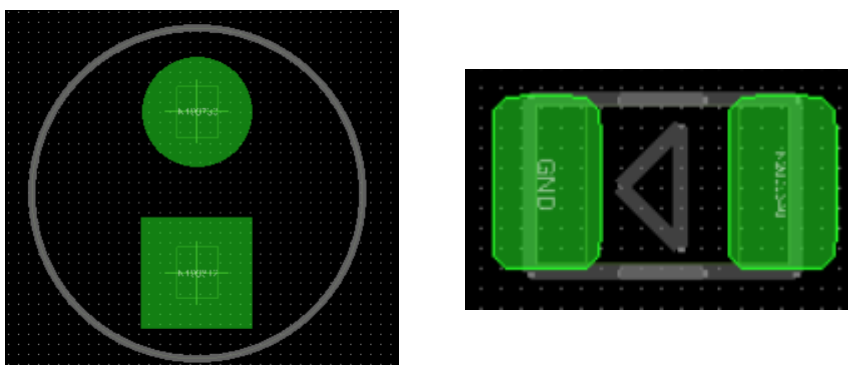
Para el diseño de huellas se utilizó el software OrCAD PCB Editor. Se comenzó diseñando las huellas de los componentes pasivos por su sencillez. La mayoría de los componentes pasivos tienen una métrica de 0603 (mayoritariamente resistencias y condensadores.)



**Figura 16:** Huella de una resistencia de métrica 0603.

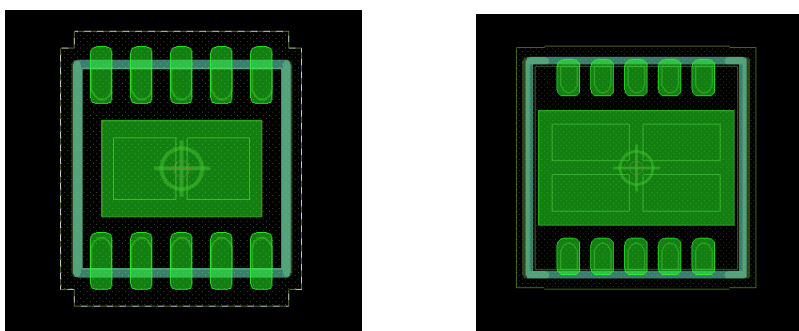
A continuación, se muestran algunas huellas que, por su importancia en el sistema o su complejidad de diseño, merecen ser expuestas.

A las huellas de los componentes con polaridad (condensadores y LEDs) se les añadió un indicador de polaridad. Para el LED IR, al ser un componente con encapsulado THT, se diseñó un pad rectangular para indicar el cátodo, mientras que para los LED de encapsulado SMD se añadió un indicador en forma de dibujo.



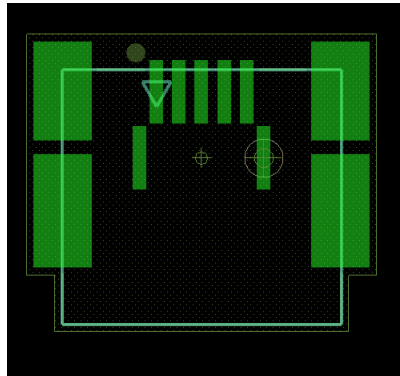
**Figura 17:** Huellas con distintos indicadores de polaridad.

Ambas fuentes de alimentación contaban con un *Exposed Thermal Pad* que el fabricante recomendaba conectar a GND. Este pad sirve como disipador de calor del dispositivo.



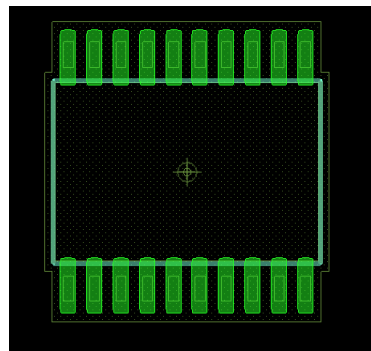
**Figura 18:** Huellas de ambas fuentes de alimentación.

El conector USB también presentaba *Exposed Thermal Pad*. Se añadió un indicador para identificar la patilla 1 del conector a la hora de montarlo.



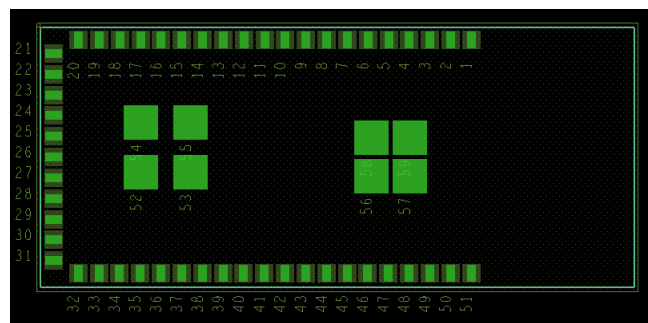
**Figura 19:** Huella del conector USB.

El micro de control, a diferencia del micro de usuario, tenía un encapsulado SOP-20 cuya huella es más convencional.



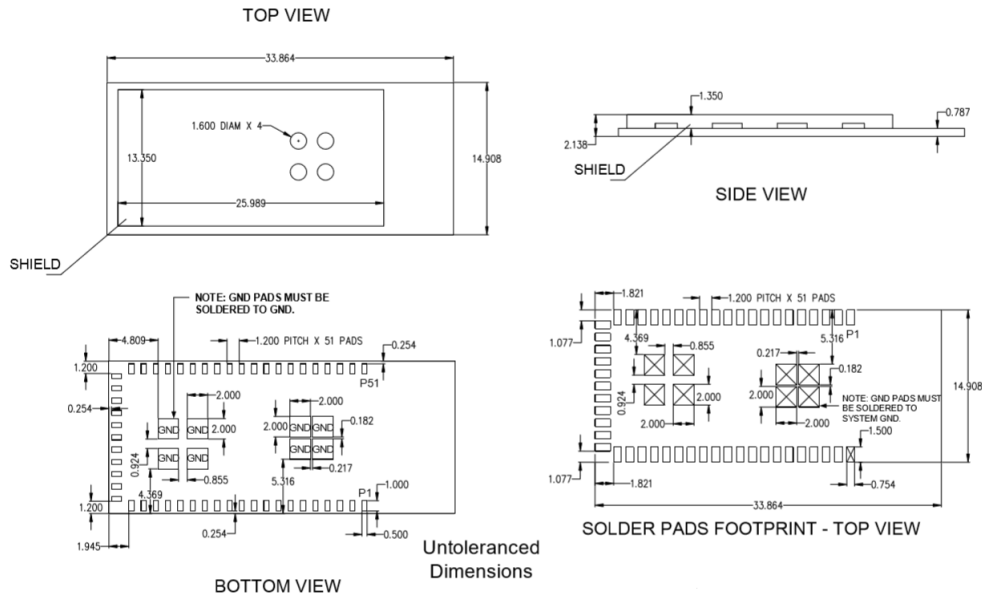
**Figura 20:** Huella del micro de control.

En cambio, el micro de usuario, al ser un SoM, tenía un encapsulado -y por tanto una huella- particular del fabricante. El hecho de no estar normalizada sumado a sus grandes dimensiones y a su gran número de patillas complicó su diseño. Al igual que las fuentes de alimentación, presentaba unos *Exposed Thermal Pad*.



**Figura 21:** Huella del SoM donde se encuentra el micro de usuario.

Para el diseño de este último fue necesario seguir al detalle las indicaciones del fabricante presentes en su *datasheet*. Sus medidas no eran exactas y presentaba ciertas asimetrías (véanse los *Exposed Thermal Pad*), por lo que fue necesario realizar bastantes cálculos para su diseño.



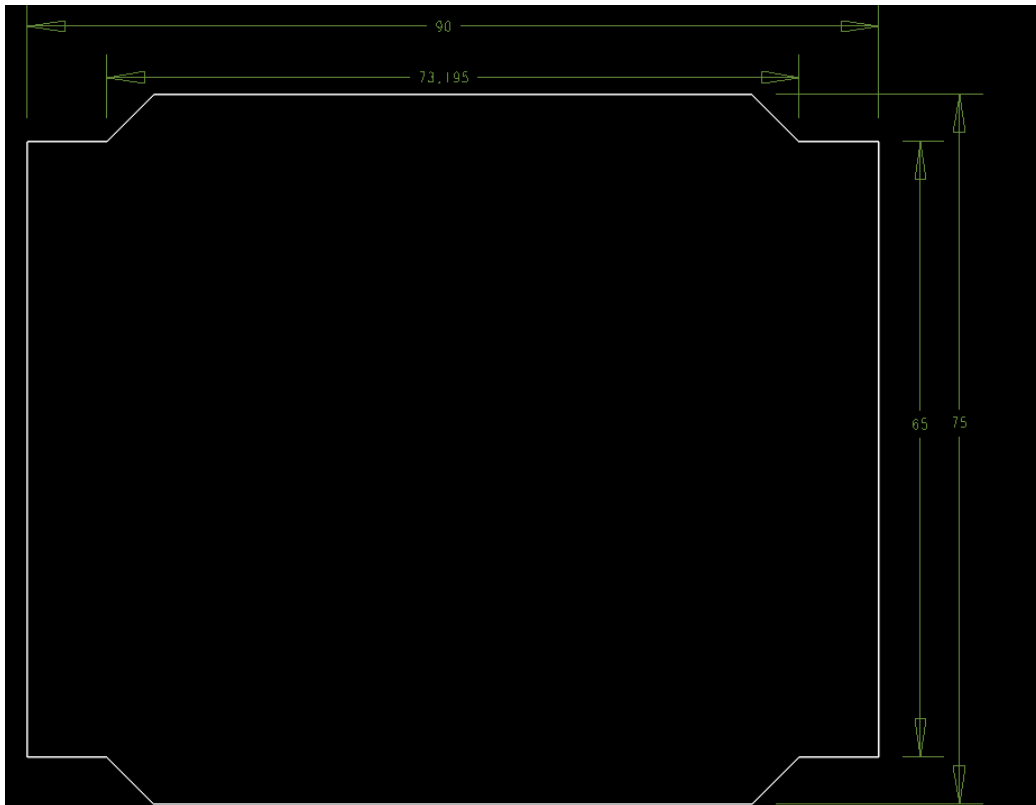
**Figura 22:** Información acerca del encapsulado y huella del SoM.

## 6.2.2. Emplazamiento y rutado

Para el emplazamiento de los componentes y su rutado se hizo uso del mismo software que para diseñar las huellas, OrCAD PCB Editor.

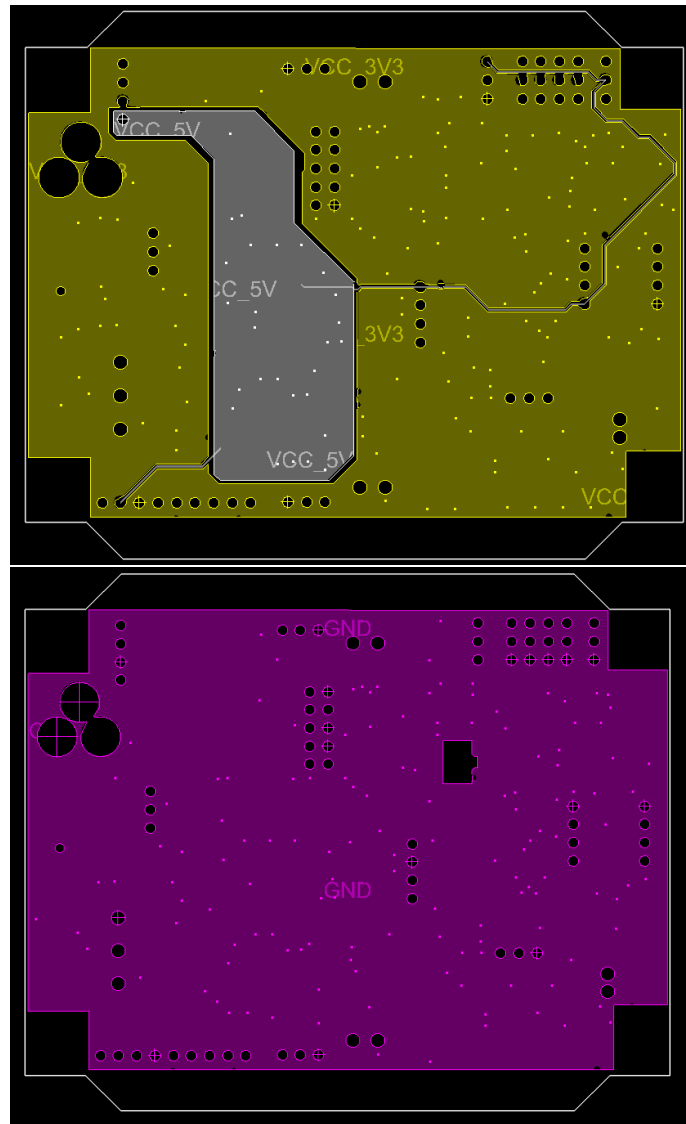
Se comenzó eligiendo las dimensiones aproximadas del PCB (figura 23). Unas dimensiones excesivas facilitarían el emplazamiento y el rutado, pero supondría una gran cantidad de espacio sin aprovechar que podría acarrear un coste innecesario. Por ello, se optó por unas dimensiones de 100x100 mm que una vez emplazados los componentes y rutado todas las señales se modificarían para adecuarse al diseño.

Finalmente el PCB se diseñó bajo unas dimensiones de 90x75 mm, si bien resultó tener una forma *poligonal* en vez de cuadrada. Ésto se debe a que se decidió colocar los conectores GPIO a los laterales del PCB lo más alejado posible del resto de componentes para una más sencilla maniobrabilidad. Se escogió un diseño de cuatro capas: Top, Vcc, Gnd y Bottom. Las capas intermedias corresponden a los planos de alimentación (figura 24) del PCB, si bien en la capa Vcc existen dos planos: uno de 3V3 y otro de 5V.



**Figura 23:** Outline y dimensiones del PCB.

Primeramente se emplazaron los componentes que por su funcionalidad implicaría una manipulación física por parte del usuario (conectores GPIO, USB, conector de alimentación, botón de reset, conectores de los motores, etc) y aquellos que por su tamaño no serían tan sencillos de emplazar más adelante (como el ATSAMW25H18-210PB). También se colocaron cuatro agujeros en cada una de las esquinas para poder anclar el PCB a un chasis mediante tornillos.

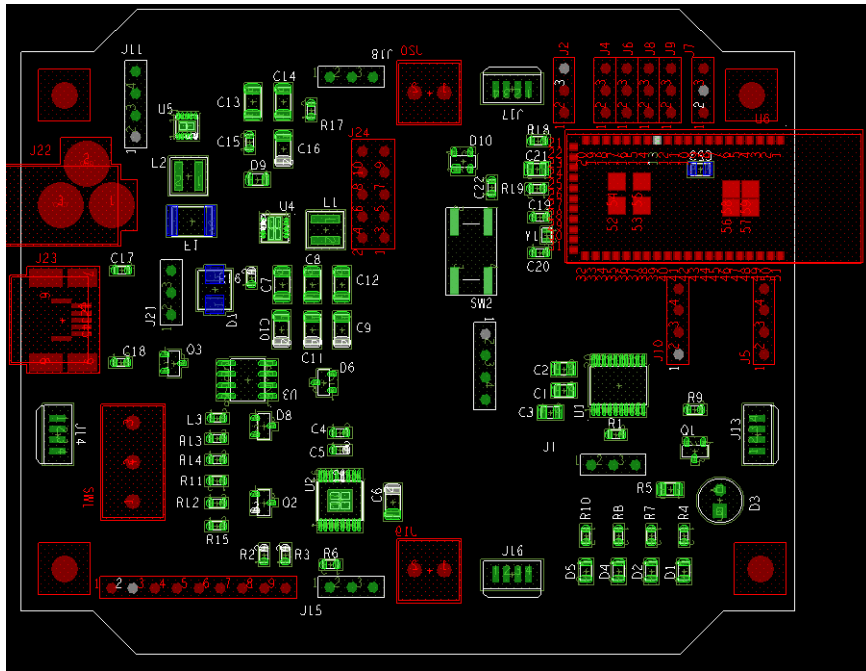


**Figura 24:** Planos de alimentación.

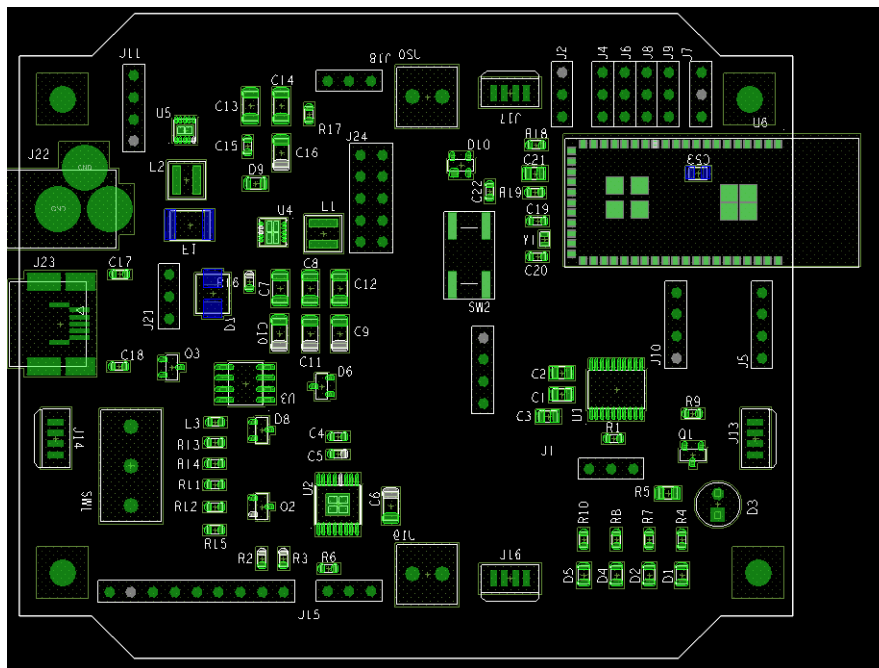
A continuación, se emplazaron los distintos integrados. Para un mayor orden, se agruparon aquellos que compartieran plano de alimentación, emplazando las fuentes lo más cerca de la entrada de alimentación. Al final, se emplazaron los componentes pasivos restantes, así como los distintos diodos, periféricos y transistores. Los condensadores de desacoplo de los integrados se colocaron lo más cerca de sus integrados correspondientes, tal y como recomiendan los fabricantes en sus datasheets. El emplazamiento final se puede ver en la siguiente figura 26

Una vez emplazados los componentes se procedió a rutarlos. Para rutar las señales se prestó especial atención a las siguientes indicaciones:

- Señales de alta corriente que conectan las fuentes de alimentación con la entrada de alimentación.
- Pares diferenciales como las señales del USB.
- Rutado del reloj del micro de usuario.
- Rutado de los condensadores de desacoplo.



**Figura 25:** Los componentes resaltados en rojo fueron los primeros en emplazarse.

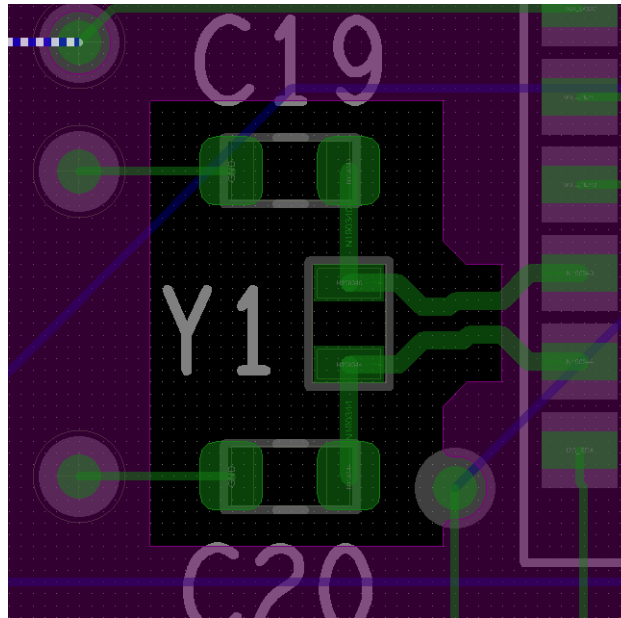


**Figura 26:** Emplazamiento final de los componentes.

Para las señales de alta corriente se estimó que corriente máxima fuera de 2A, lo que supondría una anchura de aproximadamente 1.2mm de pista. Dichas pistas se sitúan en la parte izquierda del PCB, donde se encuentran los conectores y la alimentación. Tras atravesar las fuentes dicha anchura se reduce, puesto que las fuentes están configuradas para una corriente aproximada de 800mA de salida.

En cuanto a los pares diferenciales nos encontramos con las señales del conector USB DP, DM y del cristal del micro de usuario. Estos pares de señales se configuraron como pares diferenciales en el propio software de diseño y se rularon simultáneamente.

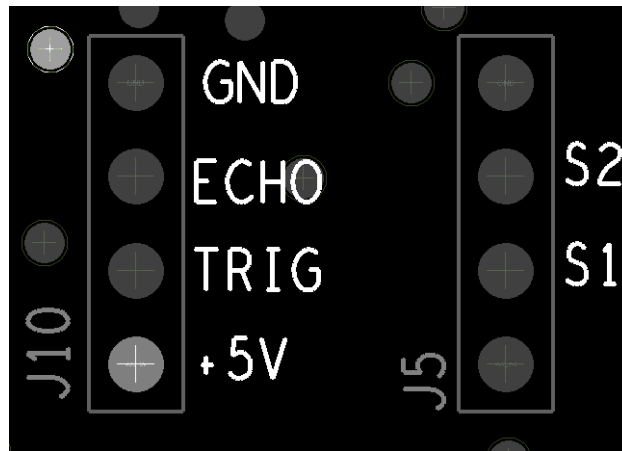
El rutado del cristal del micro de usuario se realizó bajo las recomendaciones de rutado de cristales aprendidas en la asignatura *Tecnología de Sistemas Electrónicos* -aislar el cristal de planos de tierra, colocar los condensadores lo más cerca posible al cristal y conectarlos al plano de tierra a través de vías-.



**Figura 27:** Rutado del cristal.

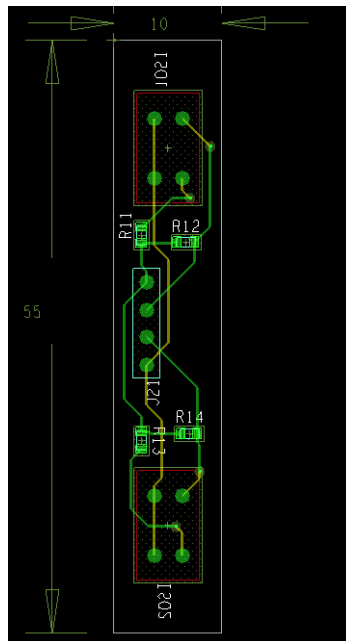


Tras el emplazamiento de todos los componentes y rutado de todas las señales se procedió a añadir la serigrafía de las señales de los conectores.



**Figura 28:** Serigrafía del conector del sensor ultrasónicos (J10) y siguelíneas (J5).

Una vez finalizado el diseño del PCB principal se comenzó con el diseño del PCB de los siguelíneas. Como he mencionado en el apartado 6.1.4 los siguelíneas serían insertados en un PCB aparte y conectados al PCB madre a través de un conector.



**Figura 29:** PCB de ambos siguelíneas.

# 7. Descripción de tareas

A continuación, se expone la planificación llevada a cabo a lo largo del proyecto. El trabajo se ha dividido en diferentes fases, las cuales a su vez están divididas en tareas. Al final de la sección también se presenta un diagrama de Gantt con el fin de contemplar la planificación del proyecto y la duración de cada una de las tareas.

## 7.1. Fases y tareas del proyecto

Con el objetivo de estructurar el trabajo, se ha dividido el mismo en las siguientes fases:

### ■ Análisis

- **Elección de componentes:** los adecuados de acuerdo con los objetivos de funcionamiento del robot.
- **Análisis de alternativas:** se comparan las partes críticas del diseño al objeto de escoger la opción que mejor encaja en el diseño.
- **Búsqueda de diseños de referencia:** otros esquemas donde se utilicen partes iguales o semejantes con el objetivo de entender mejor el funcionamiento de dichos elementos y así poder realizar un mejor diseño.

### ■ Diseño de la solución

- **Diseño del esquema:** mediante OrCAD se representa electrónicamente el PCB, siempre siguiendo las pautas y consejos de diseño proporcionados por los fabricantes de los distintos componentes, a través de los *datasheets*.
- **Diseño de las huellas de los componentes:** si bien algunos componentes - resistencias, condensadores, bobinas...- suelen tener huellas normalizadas se ha optado por realizarlas todas íntegramente, de acuerdo con las medidas proporcionadas en los *datasheets*. Esta etapa consumió más tiempo del esperado por la dificultad de alguna huella particular del fabricante.

### ■ Síntesis de la solución

- **Diseño del PCB:** se realiza la asignación de huellas a cada componente del esquema, se deciden las medidas y forma del PCB y se ubican todos los componentes según las recomendaciones de los fabricantes. Por último, se crean los distintos planos de alimentación y se ruta el PCB.
- **Generación de archivos finales:** los necesarios para la fabricación del diseño.

- **Documentación**

- **Redacción del TFG:** Se elabora el documento final del proyecto.

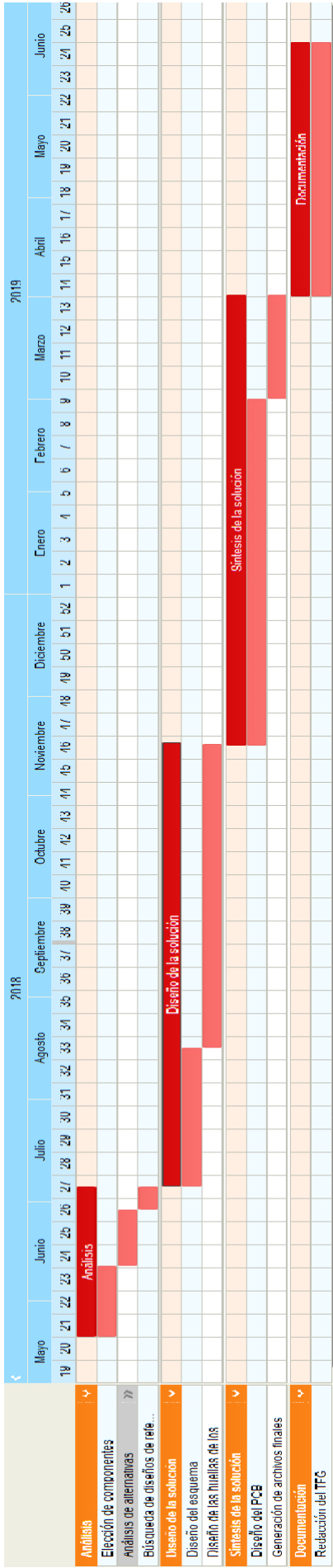
- **Reuniones de coordinación:** periódicamente para solucionar cualquier problema encontrado, o con el fin de decidir por dónde avanzar en el proyecto.

## 7.2. Diagrama de Gantt

Se presenta el diagrama Gantt de la planificación de las distintas tareas y subtareas del proyecto junto a un aproximación de las horas que ha llevado cada una:

<b>Tareas</b>	<b>Duración(h)</b>
<b>Análisis</b>	<b>42</b>
Elección de componentes	20
Análisis de alternativas	16
Búsqueda de diseños de referencia	6
<b>Diseño de la solución</b>	<b>123</b>
Diseño del esquema	43
Diseño de las huellas de los componentes	80
<b>Síntesis de la solución</b>	<b>125</b>
Diseño del PCB	100
Generación de archivos finales	25
<b>Documentación</b>	<b>70</b>
Redacción del TFG	70
<b>Total</b>	<b>360</b>

**Tabla 6:** Distribución de horas del proyecto.



## 8. Presupuesto

A continuación se presenta el resumen de los costes originados al realizar este proyecto. Se han repartido en recursos humanos y técnicos.

### 8.1. Recursos humanos

Al fin de establecer el coste de las horas de trabajo de los implicados se ha asimiliado el sueldo del alumno al de un alumno aún no graduado en prácticas, y el del director al sueldo de un ingeniero veterano:

Cargo	Coste(€/h)	Dedicación(h)	Total (€)
Director del proyecto	50	50	2500
Alumno	5	360	1800
		<b>Total</b>	<b>4300</b>

**Tabla 7:** Presupuesto de horas de diseño.

### 8.2. Recursos técnicos

En la realización del proyecto se han utilizado dos equipos indistintamente, dependiendo de si el trabajo se realizaba en casa o fuera. Ambos equipos contaban con el software necesario.

- **Portátil personal:** prácticamente todo el trabajo se ha realizado en este equipo, tanto el diseño como la documentación.
- **Ordenador personal de escritorio:** este segundo equipo se ha utilizado cuando se ha trabajado en casa.

Concepto	Adquisición(€)	Vida útil(años)	Utilización(d)	Total(€)
Portátil personal	900	4	300	184,95
Ordenador de escritorio	1000	5	30	16,50
Licencia OrCAD Capture & PCB Editor	1350	1	270	998,65
			<b>Total</b>	<b>1200,1</b>

**Tabla 8:** Amortización del equipo utilizado.

### 8.3. Gastos

Se entiende por gastos los recursos que no pueden ser reutilizados en otro proyecto. En este trabajo no se ha requerido ningún equipo o software específico que no pueda ser utilizado en trabajos futuros, por lo que se consideran nulos los gastos.

Sin embargo si que se añade una partida del 10 % del total a posibles imprevistos, quedando el presupuesto total del proyecto de la siguiente manera:

<b>Concepto</b>	<b>Total(€)</b>
Horas de diseño	4300
Amortizaciones	1200,1
<b>Subtotal</b>	5500,1
Imprevistos(10%)	550,01
<b>Total</b>	<b>6050,11</b>

**Tabla 9:** Presupuesto total del proyecto.

## 9. Conclusiones

Hoy en día las TIC juegan un papel fundamental en el desarrollo de cualquier actividad. La robótica educativa, fundamental para promocionar vocaciones tecnológicas, demanda nuevos accesorios y prestaciones que se adapten a las necesidades de los usuarios. La tarjeta diseñada une la robótica competitiva y la robótica educativa, complementando a aquellos usuarios que, o bien solo tienen interés competitivo y les introduce a la robótica educativa, o tienen conocimientos de robótica y desean ponerlos a prueba.

Una tarjeta que permita la implementación de reglas en el mismo robot facilita la supervisión y el control de la competición, asegurando la integridad de la competición y evitando las trampas. Además, los periféricos incorporados y sus conectores GPIO convierten a la tarjeta en una buena opción tanto para competición como para únicamente el ámbito educativo.

El coste final de fabricar la tarjeta no supera los 85€, por lo que resulta asequible para el mercado de robótica educativa. Si se quisiera enfocar únicamente al ámbito educativo, podría prescindirse de ciertos componentes que abaratarían aún más su coste.

En cuanto a la factibilidad de fabricación, es viable fabricar el circuito impreso en cuatro capas con varias huellas no normalizadas y mediante interconexiones de complejidad media.

# Bibliografía

[1] *Arduino Introduction. What is Arduino?*

<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

[2] *Raspberry Pi Foundation.*

<https://www.raspberrypi.org/about/>

[3] *Arduino MKR1000 Schematic*

<https://content.arduino.cc/assets/MKR1000-schematic.pdf>

[4] Rodríguez de Luis, Eva. *Aprender robótica y programación en las vacaciones de verano: guía de recursos, libros y juegos para niños y jóvenes.*

<https://www.xataka.com/seleccion/aprender-robotica-programacion-vacaciones-verano-guia-recursos-libros-juegos-para-ninos-jovenes>

[5] Texas Instruments. *MSP430 datasheet*

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf>

[6] Microchip Technology. *ATSAMW25-MR210PB datasheet*

[http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42618-SmartConnect-ATSAMW25-MR210PB\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42618-SmartConnect-ATSAMW25-MR210PB_Datasheet.pdf)

[7] BilbaoDynamics. *Jaegger-MKII*

<https://github.com/BilbaoDynamics/Jaeger-MKII>



# 10. Anexo I: Coste de fabricación del PCB

A continuación se presenta el coste de fabricación del PCB, tanto el coste de los componentes, como el coste del PCB. Se ha supuesto una tirada de 5 PCB, puesto que es el mínimo que permite la empresa manufacturera<sup>1</sup>.

## 10.1. Coste componentes

Item	Qty	Reference	Precio c/u(€)	Precio total(€)
1	1	C1	0.795	0.795
2	1	C2	0.184	0.184
3	1	C3	0.118	0.118
4	1	C4	0.319	0.319
5	1	C5	0.235	0.235
6	1	C6	2.278	2.27
7	2	C7,C8	0.31	0.62
8	3	C9,C10,C11	0.90	2.70
9	1	C12	0.934	0.934
10	3	C13,C14,C16	0.411	1.236
11	1	C15	0.09	0.09
12	2	C17,C18	0.287	0.575
13	2	C19,C20	0.225	0.45
14	2	C21,C23	0.240	0.480
15	1	C22	0.166	0.166
16	4	D1,D2,D4,D5	0.154	0.615
17	1	D3	0.382	0.382
18	2	D6,D8	0.188	0.376
19	1	D7	0.465	0.465
20	1	D9	0.154	0.154
21	1	D10	0.434	0.434
22	1	F1	0.44	0.44
23	6	J1,J4,J6,J7,J8,J9	0.231	1.385
24	1	J2	0.113	0.113
25	2	J3,J5	0.11	0.22

<sup>1</sup>Se ha escogido la empresa *SeedStudio* <https://www.seedstudio.com>

Item	Qty	Reference	Precio c/u(€)	Precio total(€)
26	1	J10	0.11	0.11
27	1	J11	0.11	0.11
28	1	J12	0.334	0.334
29	4	J13,J14,J16,J17	1.24	4.96
30	1	J15	8.49	8.49
31	1	J18	8.49	8.49
32	2	J19,J20	0.37	0.74
33	1	J21	0.231	0.231
34	1	J22	0.690	0.690
35	1	J23	0.613	0.613
36	1	J24	1.34	1.34
37	1	L1	2.79	2.79
38	1	L2	2.8	2.8
39	1	L3	0.09	0.09
40	1	Q1	0.121	0.121
41	1	Q2	0.219	0.219
42	1	Q3	0.3	0.3
43	1	R1	0,0057	0,0057
44	2	R2,R3	0,0147	0,0294
45	4	R4,R7,R8,R10	0,0059	0,0236
46	1	R5	0.098	0.098
47	1	R6	0.0132	0.0132
48	2	R9,R19	0.0143	0.0286
49	2	R11,R13	0.006	0.012
50	2	R12,R14	0.06	0.012
51	1	R15	0.06	0.06
52	1	R16	0.06	0.06
53	1	R17	0.06	0.06
54	1	R18	0.025	0.025
55	1	SW1	6.51	6.51
56	1	SW2	0.208	0.208
57	1	U1	1.4	1.4
58	1	U2	1.95	1.95
59	1	U3	0.7	0.7
60	1	U4	1.96	1.96
61	1	U5	1.82	1.82
62	1	U6	10.52	10.52
63	1	Y1	0.952	0.952
64	2	ISO1,ISO2	0.694	1.388
65	1	J21	1.37	1.37
66	2	R19,R20	0.0107	0.0214
67	2	R21,R22	0.0107	0.0214
<b>Total</b>				77.2046

## 10.2. Coste PCB

El coste viene dado en USD\$, que al cambio son 39.96€.

PCB Cost	USD\$44.90
Base Material	FR-4 TG130
No. of Layers	4 layers
PCB Dimensions	90mm * 75mm
PCB Quantity	5
No. of Different Designs	1
PCB Thickness	1.60mm
PCB Color	Green
Surface Finish	HASL
Minimum Solder Mask Dam	0.4mm†
Copper Weight	1oz.
Minimum Drill Hole Size	0.3mm
Trace Width / Spacing	6/6mil
Blind or Buried Vias	No
Plated Half-holes / Castellated Holes	No
Impedance Control	No

**Figura 30:** Precio fabricación 5 PCB de cuatro capas.

Por lo tanto, el coste de total de fabricación de una tirada de 5 PCB es el siguiente:

Componentes	77.2046€ c/u	386.023€ (5 PCB)
PCB		39.96€
	<b>Total</b>	<b>425,983</b>