

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y
SERVICIO DE TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TARJETA
ELECTRÓNICA PARA EL CONTROL DE MOTORES
DE CORRIENTE CONTINUA EN UN ROBOT
MÓVIL**

NOMBRE: Raquel Higón Galán

AÑO: 2017

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

Reunido el tribunal examinador en el día de la fecha, constituido por

Presidente: Dra Dña. María Teresa Arredondo Waldmeyer

Vocal: Dra Dña. Ana Pilar González Marcos

Secretario: Dña. María José Melcón de Giles

Suplente: Dr D. José Ramón Tapia Merino

para juzgar el Trabajo Fin de Grado titulado:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TARJETA
ELECTRÓNICA PARA EL CONTROL DE MOTORES DE
CORRIENTE CONTINUA EN UN ROBOT MÓVIL

del alumno Dña. Raquel Higón Galán
dirigido por D. Álvaro Gutiérrez Martín

Acuerdan otorgar la calificación de: _____

Y, para que conste, se extiende firmada por los componentes del tribunal, la presente diligencia

Madrid, a 26 de Enero de 2017

El Presidente

El Vocal

El Secretario

Fdo: _____ Fdo: _____ Fdo: _____

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y
SERVICIO DE TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TARJETA
ELECTRÓNICA PARA EL CONTROL DE MOTORES
DE CORRIENTE CONTINUA EN UN ROBOT
MÓVIL**

NOMBRE: Raquel Higón Galán

AÑO: 2017

Resumen

Un robot móvil se define como una máquina automática capaz de trasladarse en cualquier entorno. Esto significa que es capaz de navegar en un entorno no controlado sin la necesidad física o electromecánica de dispositivos guía.

La robótica móvil es un foco importante de investigación actual, comercial e industrial. Las aplicaciones de los robots móviles se encuentran en muchos campos, por ejemplo: en agricultura, seguridad, hospitales, domésticos, etc. Incluyendo en este último entorno los más cercanos a la vida cotidiana, ya sea en los robots de entretenimiento o los que realizan tareas del hogar tales como aspiradora o jardinería.

El propósito de este Trabajo Fin de Grado consiste en el diseño y desarrollo de una tarjeta electrónica para el control de motores de corriente continua para un robot móvil autónomo, el cual podrá sortear obstáculos en su trayectoria tras haberlos detectado con sensores de colisión.

Para lograr este objetivo, el robot estará compuesto por dos motores y cuatro switches. Estos últimos estarán situados en simetría abarcando las cuatro posiciones principales para la detección de un obstáculo, es decir, en la parte izquierda delantera, derecha delantera, izquierda posterior y derecha posterior. Contará con un microcontrolador de altas prestaciones para posibles incorporaciones de módulos adicionales en la ayuda de la navegación o en respuesta a una tarea específica. Los motores estarán dotados de 2 ruedas con tracción diferencial, las cuales se encargarán del correspondiente desplazamiento. En otras palabras, el robot podrá desplazarse hacia delante, marcha atrás, realizar giros sobre si mismo, o diferentes arcos de movimiento.

Además se planteará la implementación de un software que permita la realización de los movimientos especificados. Para su implementación será necesario tener en cuenta las especificaciones de tiempo real, haciendo uso del sistema operativo en tiempo real, FreeRTOS, y las limitaciones del microcontrolador empleado y los switches.

Palabras Claves: Robot móvil, controlador de motores de corriente continua, sensor de contacto, tarjeta electrónica, PCB.

Abstract

A mobile Robot is an automatic machine which could move in any environment. This means, that they are capable of navigating in an uncontrolled environment without the need for physical or electro-mechanical guidance devices.

Mobile robotics is an important point of current investigation, both commercial and industrial settings. The application of mobile robots is found in a lot of fields, such as: agriculture, security, hospitals, domestics, etc, including in the last group entertainment and household tasks robots, like vacuum cleaning or gardening.

The main purpose of this project is to design and implement an electronic prototype board to control DC motors of an autonomous mobile robot, which could avoid obstacles in its trajectory after they have been detected with its contact sensors.

To achieve the aim of this project, the robot is composed of two motors and four switches. The switches are placed symmetrically, covering the four main positions to locate an obstacle, in other words, left front, right front, left rear and right rear. It has a micro-controller of high performance to incorporate additional boards for aid to the navigation, or develop a specific task. The motors are equipped with 2 differential traction wheels, which make the appropriate motion of shift. In summary, the robot could move ahead, turn back, spin around itself, or with different arcs.

In addition, the development of a software is implement to realise specific movements. Its implementation must take into account the specifications of real time, by using an operating system in real time, FreeRTOS.

Keywords: Mobile Robot, D.C motor controller, contact sensor, electric board, PCB.

Agradecimientos

Es difícil incluir todos los nombres de las personas que estoy agradecida, por su apoyo y motivación. Por eso quiero dar las gracias a todos ellos, aunque no sean nombrados. Gracias a cada una de las personas que he tenido la suerte de conocer y me han enseñado algo nuevo de este mundo, así como a mi familia por darme la oportunidad de vivir y enseñarme.

Quiero agradecer la ayuda e inspiración de Borja en la escritura de esta memoria. A todo el laboratorio de Robolabo por sus consejos y ser el usuario destructor de mis prototipos mecánicos, Eduardo, Juana, María,... . A mis amigos, Eva, Manu, Dani, Wiza, Sergio, etc, por su admiración por las cosas insignificantes que he ido logrando en mi vida.

También quiero dar las gracias a RBZ Robot Design S.L. por la oportunidad de enseñarme el proceso de fabricación de una PCB y los conocimientos para el diseño hardware y al Profesor Álvaro Gutiérrez Martín por mostrarme el mundo de la robótica.

Aunque tal vez, mi mayor soporte han sido mis abuelos, ojalá pudiera ver vuestra cara una última vez para deciros estoy a punto de lograrlo, Abus, voy a ser ingeniera. Estos meses han sido difíciles sin vosotros, pero recordaré vuestras palabras toda mi vida. Gracias por creer en mí y enseñarme como disfrutar del mundo.

Índice general

Resumen	IV
Agradecimientos	VI
Índice General	VII
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas	XI
Lista de acrónimos	XII
1. Introducción y Objetivos	1
1.1. Introducción a los robots móviles	1
1.1.1. Características de los robots	1
1.1.2. El sistema robótico	1
1.1.2.1. El sistema sensorial	2
1.1.2.2. El sistema de accionamiento	3
1.1.2.3. Unidad de control	5
1.1.3. Robots móviles comerciales	6
1.1.4. Robots móviles para investigación	8
1.1.4.1. El Robot e-puck	10
1.1.4.2. Componentes hardware	11
1.1.4.3. Componentes software	12
1.2. Motivación del proyecto	13
1.3. Objetivos	14
1.4. Planificación del proyecto	14
2. Tarjeta electrónica	17
2.1. Requisitos	17
2.2. Restricciones	18
2.3. Componentes	19
2.3.1. Microcontrolador	19
2.3.2. Motores	19
2.3.3. Sensores de contacto	20
2.4. Esquemáticos	22
2.5. Printed Circuit Board - PCB	26

3. Prototipo mecánico	31
3.1. Ruedas	31
3.2. Sujeción de los motores	32
3.3. Chasis exterior	33
3.4. Prototipo Real	34
4. Experimentos y pruebas	35
4.1. Consideraciones previas	35
4.2. Alimentación de la tarjeta	35
4.3. Control del LED de usuario	36
4.4. Manejo de los sensores de contacto	37
4.5. Salida PWM	38
4.6. Programa de evitación de obstáculos	39
4.6.1. Descripción del programa	39
5. Conclusiones y líneas futuras	45
5.1. Conclusiones del trabajo	45
5.2. Líneas futuras	46
A. Esquemáticos	47
B. Ilustraciones PCB	53
C. Lista de Materiales	57
Bibliografía	59

Índice de figuras

1.1. Sensores Internos y Externos	3
1.2. Ejemplo de actuadores	5
1.3. Robot móviles de juguete	7
1.4. Kits educativos de robot móviles	8
1.5. Robot móviles para investigación	9
1.6. Robot e-puck.	10
1.7. Arquitectura del robot e-puck	11
2.1. Motor Pololu	21
2.2. Pulsador Panasonic empleado como sensor de contacto	21
2.3. Fuente de alimentación	23
2.4. Conector módulos adicionales	24
2.5. Driver del motor	25
2.6. Esquema de los LEDs	26
2.7. Situación de los componentes de la capa superior en la tarjeta electrónica	27
2.8. Situación de los componentes de la capa inferior en la tarjeta electrónica	29
2.9. Tarjeta electrónica fabricada	29
3.1. Diseño de la rueda	31
3.2. Prototipo de abrazadera del motor.	32
3.3. Modelos 3D de la sujeción de los motores	33
3.4. Modelos 3D del chasis	34
3.5. Modelos reales del robot	34
4.1. Capturas de las medidas de alimentación realizadas a la tarjeta electrónica	36
4.2. Código para la tarea de testeo del LED	37
4.3. Encendido del LED en la tarjeta electrónica	37
4.4. Ejemplo de código experimento de los sensores de contacto	38
4.5. Señal PWM de 20kHz generada	38
4.6. Ejemplo de código experimento de los motores	39
4.7. Esquema matemático de la trayectoria de un robot móvil	40
4.8. Desplazamiento relativo entre instantes de muestreo	41
4.9. Esquema del movimiento con obstáculo recto y marcha atrás	42
4.10. Esquema del movimiento con obstáculo oblicuo	43
4.11. Esquema del movimiento con obstáculo lateral	43
A.1. Hoja Main 1/5	48

A.2. Hoja Power 2/5	49
A.3. Hoja CPU 3/5	50
A.4. Hoja Modulo 4/5	51
A.5. Hoja Drivers Motors 5/5	52
B.1. Diseño final de la PCB con los planos de masa	53
B.2. Footprints y pistas de la capa superior	54
B.3. Footprints y pistas de la capa inferior	54
B.4. Footprints y pistas de ambas caras juntas	55
B.5. Diseño 3D de los componentes de la capa superior	56
B.6. Diseño 3D de los componentes de la capa inferior	56

Índice de tablas

1.1. Tipos de sensores (González, 2015)	3
1.2. Partes móviles básicas del actuador rotatorio	4
2.1. Comparativa entre los microcontroladores más usados	19
2.2. Características del STM32F103VBH6	20
2.3. Especificaciones Generales Pololu 100:1	20
2.4. Condiciones a satisfacer para que el motor realice sus funciones	24
C.1. Lista de Materiales	59

Lista de Acrónimos

CC: Corriente Continua.

CCD: Charge Coupled Device.

DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency.

DC: Direct Current.

EPFL: Escuela Politécnica Federal de Lausana.

GPIO: General Purpose Input/Output.

IHMC: Institute for Human & Machine Cognition.

iOS: i Operative System.

JTAG: Joint Test Action Group.

LiION: Litio.

LP: Low Power.

MIPS: Millions of Instructions Per Second.

MIT: Massachusetts Institute of Technology.

PCB: Printed Circuit Board.

PID: Proportional Integral Derivative.

PWM: Pulse Width Modulation.

SMD: Surface Mount Device.

UART: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.

USB: Universal Serial Bus.

USC: University of Southern California.

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

1.1. Introducción a los robots móviles

Un robot móvil se define como un sistema autónomo capaz de trasladarse en cualquier entorno dado. Esto significa que son sistemas capaces de navegar en un entorno no controlado sin la necesidad física o electromecánica de dispositivos de guía. Recogen la información del entorno a través de sus sensores y la envían al sistema de control para su procesamiento, con la finalidad de realizar una función específica.

1.1.1. Características de los robots

Antes de comenzar con el estudio de los robots móviles y sus características de diseño, se introducirá brevemente los aspectos que distinguen a un robot de otros automatismos (máquinas automáticas).

Algunas de las características en las que radica esta distinción son (Alonso et al., 2004; González, 2015):

- **Multifuncionalidad:** versatilidad para llevar a cabo distintas tareas, incluso aquellas no previstas en principio por los diseñadores, lo cual implica una considerable auto-adaptabilidad al entorno.
- **Programabilidad:** capacidad para modificar la tarea mediante el cambio del programa, que proporciona su adaptación rápida y económica a diferentes aplicaciones.
- **Autoplanificación:** capacidad de realizar una tarea sin intervención del operador, tomando las decisiones oportunas a partir de la información que recaban sus sensores.

1.1.2. El sistema robótico

Un robot es esencialmente un sistema organizado de forma tal que responde con una acción inteligente a los estímulos que es capaz de percibir. Se puede considerar la síntesis de varios subsistemas, entre los que destacan (Alonso et al., 2004; González, 2015) :

- el **sistema sensorial**, integrado por el conjunto de sensores que reciben la información del estado del propio robot y de su entorno.

- el **sistema de accionamiento**, formado por los elementos actuadores (motores, por ejemplo) que permiten llevar a cabo las acciones programadas.
- la **unidad de control**, construida por los elementos computacionales y el software que regulan el comportamiento global del robot.
- los **elementos estructurales**, otorgando rigidez y estabilidad al robot.
- los **elementos de transmisión y conversión del movimiento**, compuesto por los cambios en el eje o la dirección de rotación, ampliación o reducción de la velocidad, etc.
- los **elementos terminales**, depende de la finalidad a la que se destine al robot, por ejemplo pinzas, electrodos de soldadura, inyectores de pintura, etc.
- los **dispositivos auxiliares de entrada/salida**, estableciendo la comunicación del usuario con la unidad de control.
- los **sistemas de alimentación**, entre los cuales encontramos distintos tipos: eléctrico, neumático o hidráulico.

Profundizaremos más detalladamente en los sistemas: sensorial, de accionamiento y unidad de control.

1.1.2.1. El sistema sensorial

Un sensor es un transductor que convierte algún fenómeno físico en señales eléctricas que el micro-procesador del robot puede leer. Por lo general son limitados e inexactos. Clasificaremos los sensores en dos grandes grupos (Alonso et al., 2004; González, 2015) :

- **Sensores internos:** Proporcionan información sobre el estado interno del propio robot. Por un lado encontramos sensores cinemáticos, que proporcionan información de posición, velocidad y aceleración de los elementos que lo constituyen. Por otro lado están los sensores internos que monitorizan el correcto funcionamiento de los distintos módulos que forman el robot, como el estado de la batería, la temperatura, etc.
- **Sensores externos:** Proporcionan información sobre el entorno del robot. Esta información puede obtenerse con dispositivos muy variados, desde los más simples (microinterruptores) a los más complejos (cámaras). Sin ellos, cualquier suceso inesperado podría bloquear o dañar al robot. Asimismo, la imprecisión que afecta a las magnitudes que intervienen en cualquier tarea (por ejemplo, el posicionado de piezas) malogrará todo intento de ejecución fiable.

Sin embargo, esta no es la única clasificación posible, podríamos sepáralos también en (Turmero, 2015) (ver Figura 1.1):

- **Sensores pasivos:** Miden las señales del entorno.
- **Sensores activos:** Producen un estímulo y miden su interacción con el entorno.

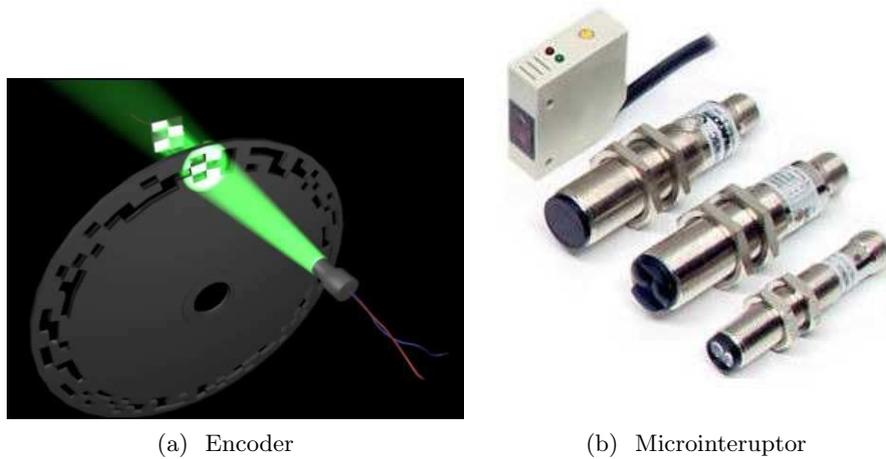


Figura 1.1: Sensores Internos y Externos

En la Tabla 1.1 se recogen algunos de los principales sensores utilizados en robótica:

Sensores internos	Posición	Eléctricos: potenciómetros, sincros y resolvers
		Ópticos: optointerruptores, codificadores absolutos e incrementales (encoders)
	Velocidad	Eléctricos: dinamos (tacométricas, tacogeneradoras, tacodinamo)
		Ópticos: con encoder
Aceleración	Eléctricos: acelerómetros	
Sensores externos	De posición	De contacto: microinterruptores
		Sin contacto: resistivos, de efecto Hall, de fibra óptica, de ultrasonidos ...
	De tacto	De fotodetectores, de presión neumática, de polímeros (piel artificial) ...
	De fuerza	Por corriente en el motor, por deflexión de los dedos
De visión	Cámaras de tubo, cámaras CCD	

Tabla 1.1: Tipos de sensores (González, 2015)

1.1.2.2. El sistema de accionamiento

El sistema de accionamiento incorpora los dispositivos que ejercen fuerzas y momentos sobre los elementos de un robot proporcionando un movimiento. Deben ser controlados con precisión y rapidez.

Los actuadores que se utilizan típicamente son de tres tipos, y es recomendable conocer la acción que se quiere realizar y la velocidad de funcionamiento para decidir

qué tipo de actuador a emplear (Vildósola, 2013)

- **Hidráulicos**, emplean la circulación de fluidos, generalmente un tipo de aceite. Son controlados mediante servoválvulas que regulan el flujo del fluido, el cual desplaza un cilindro o pistón. Son utilizados para aplicaciones donde se requiere un gran par.
- **Neumáticos**, su principio de funcionamiento es similar al de los hidráulicos, pero emplean aire en lugar de aceites. Son utilizados en aplicaciones que requieren un control de movimiento rápido, pero de precisión limitada.
- **Eléctricos**, son los más empleados actualmente en robots comerciales y experimentales. Consisten principalmente en motores de corriente continua y de motores paso a paso. Ambos transforman la energía eléctrica en movimiento rotacional. La diferencia se encuentra en que los motores de corriente continua son controlados por armaduras que se comportan como un sistema realimentado, mientras que los motores paso a paso realizan giros de paso definido.

Los actuadores anteriores, dependiendo de su diseño, constan de las siguientes partes móviles básicas recogidas en la Tabla 1.2:

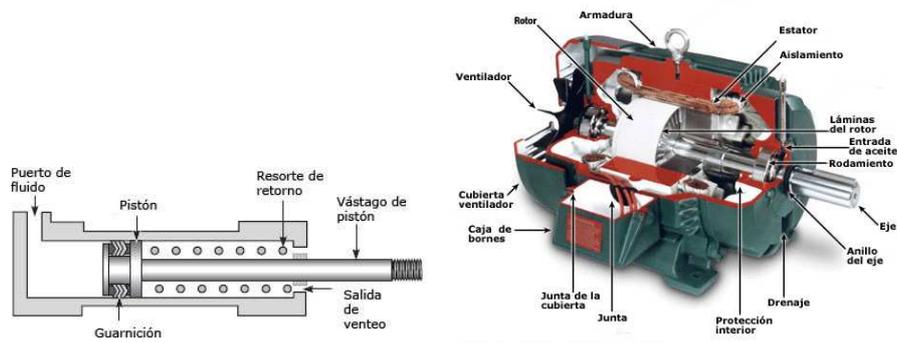
		Actuador		
		Neumático	Eléctrico	Hidráulico
Fuerza de movimiento	Generadora	Presión de aire	Energía eléctrica	Presión hidráulica
Elemento	Motriz	Émbolo, pistón o veleta	Motor eléctrico	Émbolo, pistón o veleta
Transmisión		Eje o cremallera	Reductor	Eje
Conservación mecánica		Yugo o piñón	No hay	Yugo o piñón

Tabla 1.2: Partes móviles básicas del actuador rotatorio

Cada uno de estos sistemas presenta características y estructuras (ver Figura 1.2) diferentes, y es necesario evaluarlas a la hora de seleccionar el tipo de actuador más conveniente. Principalmente se han de considerar las características de: potencia, controlabilidad, peso, volumen, precisión, velocidad, mantenimiento y coste.

Un resumen comparativo de los actuadores utilizados en robótica, analizando las ventajas y desventajas, muestra:

- Los actuadores neumáticos presentan ventaja en que son baratos, rápidos, sencillos y robustos. Sin embargo, presentan dificultad de control continuo, requieren una instalación especial (compresor, filtros) y son bastante ruidosos.
- Los actuadores hidráulicos son también rápidos, tienen una alta relación potencia-peso, presentan una estabilidad frente a cargas estáticas y cuentan con una alta capacidad de carga. Sin embargo son caros, contienen frecuentemente fugas, requieren de una instalación especial (filtros, eliminación de aire) y difícil mantenimiento.



(a) Partes de un actuador hidráulico

(b) Partes de motor eléctrico c.c



(c) Partes de un actuador neumático

Figura 1.2: Ejemplo de actuadores

- Los actuadores eléctricos son precisos, fiables, de fácil control, silenciosos y de sencilla instalación. Sin embargo, entregan una potencia limitada e insuficiente para cierto tipo de aplicaciones.

1.1.2.3. Unidad de control

Se trata del “cerebro” del robot, donde se procesa la información. Es la responsable de determinar los movimientos de cada parte del sistema para que el elemento terminal realice las acciones requeridas. En su memoria se encuentran los algoritmos de control.

Existen 3 tipos de procesamiento de control que pueden ser llevados a cabo (Alonso et al., 2004; González, 2015):

- **No servo-controlados:** Contienen un número fijo de posiciones con topes en cada parte móvil, normalmente son dos, y sólo se mueven hasta situarse en ellos.
- **Servo-controlados:** Contienen un sensor de posición, lineal o angular, en cada elemento móvil. La señal de los sensores se envía al sistema de control y éste genera la orden de movimiento adecuada. Pueden moverse a cualquier punto.
- **Servo-controlados punto a punto:** Únicamente se les indican las posiciones

inicial y final de la trayectoria. El sistema de control utiliza los algoritmos diseñados para calcular la trayectoria.

Hay varios grados de control que son función del tipo de parámetro que se programe, por lo cual tenemos los siguientes tipos de unidades de control:

- **Posición:** la unidad de control interviene solamente en el control de la posición del elemento terminal.
- **Cinemático:** la unidad de control interviene sobre la posición y la velocidad.
- **Dinámico:** la unidad de control, además de regular la velocidad y la posición, interviene en las propiedades dinámicas del robot (fuerzas) y de los elementos asociados a él.
- **Adaptativo:** incluye todas las regulaciones anteriores y, además, se ocupa de controlar la variación de las características del robot con el paso del tiempo.

Otra clasificación de control es entre control en lazo abierto y control en lazo cerrado.

- **El control en lazo abierto**, donde no existe realimentación. No se suele emplear en las aplicaciones en las que la exactitud es una cualidad imprescindible.
- **El control en lazo cerrado**, consiste en un sistema de realimentación. El control se lleva a cabo con la utilización de sensores en el elemento terminal. La información recibida del sensor se compara con el valor inicial deseado y se actúa en relación al error obtenido, de este modo se pretende que la variable real coincida con el valor que se había establecido inicialmente.

1.1.3. Robots móviles comerciales

La mayoría de los robots móviles comerciales los podemos encontrar en el ámbito del entretenimiento, tanto por hobby como juguetes para niños. En estos campos existen gran variedad de tipos. Por ejemplo encontramos:

- **Star Wars: BB-8 teledirigido mediante Smartphone (ver Figura 1.3a).** Este robot destaca por desplazarse rodando y mantener el equilibrio por sí mismo. El BB-8 es un juguete conectado a una app (para terminales iOS o Android). La batería interna se recarga por inducción situado en la base incluida para exhibirlo. No dispone de ningún tipo de sensores o de cualquier tipo de información sobre su entorno. Su precio se encuentra entre los 132€ y 149€.
- **Robot programable COJI (ver Figura 1.3b).** COJI es un robot programable, destinado a enseñar a los niños los principios de programación, como secuencias de comandos y condicionales, a través de emoticonos. Puede utilizarse para jugar conectándose o sin conectar a la app (para terminales iOS o Android). COJI puede realizar movimientos de inclinarse o temblar cuando se sujeta y eleva, mostrando sus “emociones” mediante los emojis que aparecen en su pantalla. Su precio es de 69,90€.

- **Robot Blu-Bot (ver Figura 1.3c).** Es un humanoide interactivo que puede ser programado desde los botones de su espalda o utilizando una app gratuita donde se pueden encadenar hasta 40 movimientos ininterrumpidos. Tiene la capacidad de detectar obstáculos y muestra sus “emociones” con las 20 expresiones faciales gracias a sus ojos LEDs. Blu-Bot mueve su cabeza hacia todos los lados, camina en cualquier dirección que le indiqués y contiene un micrófono para grabar y distorsionar tu propia voz. Su precio se encuentra entre los 70€ y 89€.
- **BQ Zowi Robot de Clan (ver Figura 1.3d).** Zowi es un robot educativo. Destaca por su montaje y programación sencilla. Además, BQ ofrece los planos del robot y otros elementos para modificar o construir con una impresora 3D. Cuenta con 4 motores, conexión Bluetooth, dispone de un pequeño display de 5 x 6 luces LEDs, con el que representa letras o símbolos. Su precio es de 99,90€.



(a) Star Wars: BB-8



(b) Robot programable COJI



(c) Robot Blu-Bot

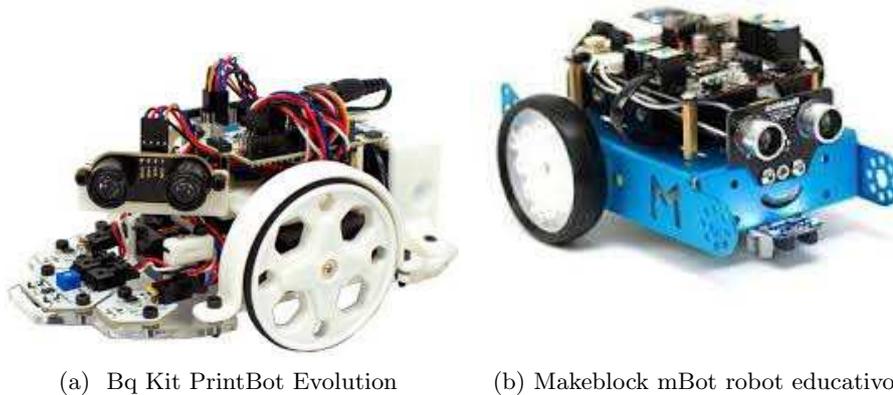


(d) bq Zowi Robot de Clan

Figura 1.3: Robot móviles de juguete

Por otro lado encontramos los kits educativos. En dichos kits encontramos la posibilidad de ampliar funciones o terminaciones. En este entorno podemos destacar los kits:

- **BQ Kit PrintBot Evolution (ver Figura 1.4a).** La principal característica de este kit es que el chasis de este robot se compone de piezas 3D impresas. Las



(a) Bq Kit PrintBot Evolution

(b) Makeblock mBot robot educativo

Figura 1.4: Kits educativos de robot móviles

piezas pueden ser compradas o impresas con una impresora 3D. En el kit está incluida una placa Zum BT-328 en la que se cargan los programas. Su precio es de 99,90€.

- **Makeblock mBot robot educativo (ver Figura 1.4b).** Está pensado para una sencilla programación basada en Arduino y Scratch. Existen dos versiones disponibles, Bluetooth o 2.4G. Con la segunda evitan las interferencias con otros mBots cuando se utilizan varios a la vez. Su precio es de 83,19€

1.1.4. Robots móviles para investigación

Los robots mencionados antes no presentan grandes funcionalidades para las universidades. Actualmente existen bastantes robots móviles para el campo de la investigación, como por ejemplo:

- **Cube Revolutions (ver Figura 1.5a):** Es un robot ápedo y modular. Se desplaza en una dimensión, línea recta mediante ondulaciones de su cuerpo, periódicas o semiondas, que se propagan desde su cola hasta la cabeza. También puede convertirse en una rueda que rota sobre sí misma. Es un robot de código abierto. No existe punto de venta, toda la documentación está disponible en <http://www.iearobotics.com/personal/juan/doctorado/cube-revolutions/>
- **Moway (ver Figura 1.5b):** Son robots desarrollados para la docencia e investigación principalmente en temas de micro robótica y robótica autónoma cooperativa. Cuenta con un cuerpo compacto para permitirle moverse con agilidad. Contiene un microcontrolador PIC16F876A de Microchip que trabaja a 4MHz. Los programas se desarrollan en el PC utilizando MowayGUI, una herramienta software basada en diagramas de flujo o utilizando los lenguajes de Programación C o Ensamblador. Existen diferentes tipos de kit básicos. Su precio es de 179€.



Figura 1.5: Robot móviles para investigación

- **LittleDog (ver Figura 1.5c):** Es un cuadrúpedo desarrollado por Boston Dynamics para la investigación sobre el aprendizaje de locomoción. Es utilizado para probar las relaciones fundamentales entre el aprendizaje motor, el control dinámico, la percepción del medio ambiente y la locomoción en el terreno accidentado. LittleDog tiene cuatro patas, cada una accionada por tres motores eléctricos. Las piernas tienen una amplia gama de movimiento. Se utiliza en el MIT, Stanford, Carnegie Mellon, USC, Univ. Pennsylvania e IHMC como parte de un programa financiado por DARPA sobre robótica avanzada.
- **Spykee (ver Figura 1.5d):** Es un robot denominado “espía” por su capacidad de visión artificial y conectividad WiFi para ser accedido desde cualquier parte de la red. Es capaz de monitorizar, enviar fotos y vídeo, reproducir audio y ser parado de diversas formas, sin cambiar su funcionalidad. Cuenta con un procesador ARM9 a 200MHz con conectividad 802.11b/g y USB2. Recientemente liberaron el código para permitir modificaciones en las funcionalidades por parte de los que posean acceso al robot, siendo posible, incluso, instalar un sistema Linux en él. Su precio es de \$350.
- **Bioloid (ver Figura 1.5e):** Es un robot avanzado con la concepción de ser armado con distintas articulaciones y eslabones unidos por servomotores. Utiliza un microcontrolador ATMEGA 2561. Su principal función es el movimiento y es posible montar hasta 29 robots dependiendo del kit adquirido. Su precio es de 1299€.
- **Khepera IV (ver Figura 1.5f):** Es un robot empleado en el campo educativo

con una gran cantidad de características: cámara de color, WiFi, Bluetooth, host USB, acelerómetro, giroscopio, micrófono, altavoz, 3 LED RGB encoders y precisión. Su precio es de 3720€.

1.1.4.1. El Robot e-puck

Nos centramos en el e-puck por ser el robot disponible en el Laboratorio de Robótica y Control de la ETSIT de la UPM.

En este entorno localizamos el robot e-puck, un ejemplo de robot móvil educativo empleado en gran cantidad de universidades. El e-puck es un robot desarrollado con herramientas de código abierto, tanto hardware como software, desarrollado en la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL).



Figura 1.6: Robot e-puck.

Uno de los principales ámbitos de uso del robot e-puck en el campo educativo es como herramienta en el procesado de señal, control automático, la programación de sistemas empujados y el campo de la robótica de enjambre, entre otros.

El robot e-puck destaca por sus características (Cyberbotics, 2015):

- **Hardware y software abierto:** Gran difusión de los conocimientos, es decir, los avances y desarrollos en el e-puck pueden ser transmitidos entre distintos centros y universidades que trabajen con ellos.
- **Fácil manejo:** El control del e-puck destaca por ser bastante intuitivo, que hace de él una herramienta de enseñanza más eficiente.
- **Flexible:** Abarca gran cantidad de funciones, permitiendo ser adaptable en diversos campos.
- **Pequeño tamaño:** No requiere de una gran superficie para poder trabajar, al tener un tamaño de 7cm de diámetro.
- **Robusto y sostenible:** El e-puck es resistente al uso masivo de los estudiantes y es simple de reparar.

- **Software de simulación:** el e-puck está integrado en la Webot simulation software. Permite ser programado, simulado y controlado remotamente.
- **Asequible:** Su precio ronda los 850€.

1.1.4.2. Componentes hardware

El mapa sensorial y actuador del robot e-puck se puede ver en la Figura 1.7:

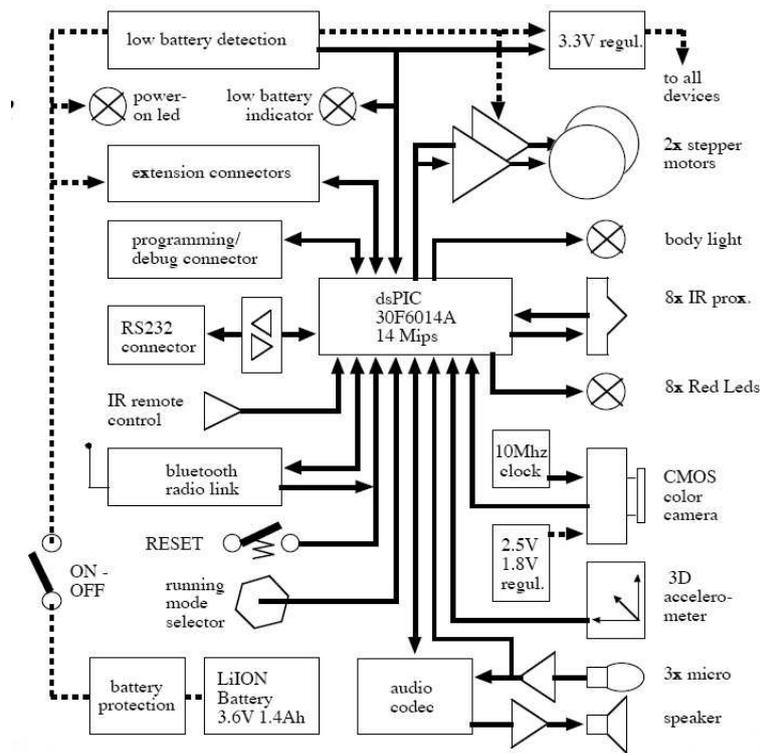


Figura 1.7: Arquitectura del robot e-puck

El robot e-puck dispone de un microprocesador, el dsPIC30F614A de Microchip de 16bits a 60 MHz. Cuenta con 144KB de Memoria de programa, 8KB de RAM y 4KB de EEPROM. Además observamos que la placa del robot contiene:

- 2 motores paso a paso, empleados para dotar de movimiento al e-puck, con una resolución de mil pasos por revolución.
- 8 Sensores de Infrarrojo, posicionados en el borde del robot, con ellos el e-puck puede detectar obstáculos.
- 8 LEDs rojos alrededor del anillo, los cuales ayudan en la comunicación tanto con el usuario como con otros robots, a través del uso de la cámara.
- 1 LED apuntado frontalmente, el cual genera un haz señalando la dirección de movimiento. Este haz es captado por la cámara, percibiendo distintas medidas mediante el tamaño de la proyección.

- 1 LED que ilumina el cuerpo del robot, permite obtener información visual del comportamiento interno del robot.
- 1 acelerómetro de 3 ejes, con el que se puede medir tanto la aceleración como la inclinación del e-puck pudiendo detectar colisiones y caídas.
- 3 micrófonos, mediante los que se puede captar el sonido ambiente y localizarlo por triangulación.
- 1 altavoz, instalado en la tarjeta de expansión e-jumper y conectado con un códec de audio. Considerado para utilizar los micrófonos anteriormente mencionados y con varios robots.
- 1 cámara CMOS, con una resolución de 640x480 píxeles.
- Comunicación bluetooth. Permite la comunicación entre el e-puck y un ordenador.
- 3 LEDs, para informar del estado del robot. Uno verde indica si el robot está encendido, uno naranja advierte si el robot está conectado mediante bluetooth y uno rojo que señala el estado de la batería.
- Comunicación RS232, para comunicar el e-puck y un ordenador a través de un puerto serie.
- 1 botón de reset, permite realizar un reset al hardware del robot.
- 1 conector para programación, realiza la programación del e-puck a través del ICD del microcontrolador.
- 1 receptor de infrarrojos, instalado en la tarjeta de expansión e-jumper, usado para recibir señales desde un mando a distancia.
- 1 conmutador de 16 posiciones, instalado en la tarjeta de expansión e-jumper. Se utiliza para seleccionar parámetros previamente programados en el robot.
- 1 conector de expansión, permite añadir nuevas funcionalidades.
- 1 batería, basada en Li-ION recargable (puede ser extraída y recargada externamente), tiene una capacidad de 5Wh y es suficiente para aguantar durante 2-3 horas de uso intensivo. Cuenta con una protección de la batería.

1.1.4.3. Componentes software

En la plataforma del e-puck encontramos disponible el siguiente software (Moncada and Bonani, 2010):

- Software empotrado para ser ejecutado en el e-puck, incluye las librerías de configuración del hardware, un cargador de arranque (bootloader) para cargar programas a través de bluetooth. Una aproximación consiste en usar ASEBA (Magnenat et al., 2010) , basada en máquinas virtuales en el e-puck.

- Las herramientas de desarrollo empleadas en el ordenador, tales como el compilador y otros programas que se comuniquen con el e-puck a través de bluetooth o del puerto serie.
- Las herramientas de Matlab, reúne todo el software necesario para trabajar en el e-puck desde Matlab a través de bluetooth o del puerto serie.
- Comunicaciones rápidas y locales usando el módulo infrarrojo. La librería liblrcom aporta un software creado para lograr comunicaciones de una tasa máxima de 30B/s y una distancia de hasta 25cm. Adicionalmente, la localización de un robot transmitiendo un mensaje puede ser estimada por el receptor.
- Drivers, para Player 2.0 y 2.1.
- Las librerías de Python, permitiendo el control remoto del robot, leer el valor de los sensores, control de los motores y ejecutar procesos pesados en el ordenador. Existen también una alternativa <http://abitworld.com/projects/epuck-robot-libraries-for-teleoperation/>.
- Las librerías, similares a Qt4- C++, habilitando el control remoto del e-puck.

Para más información conviene visitar la página web del proyecto (www.epuck.org). En ella están disponibles librerías, ficheros de fabricación, ejemplos y una amplia documentación sobre el robot y su funcionamiento.

1.2. Motivación del proyecto

Este Trabajo Fin de Grado está motivado por el desarrollo de un sistema reducido y adaptado para diferentes aplicaciones en el ámbito de la robótica, creando diferentes módulos con distintas funcionalidades a través de los múltiples sensores disponibles en el mercado. Se pretende permitir el montaje de distintos robots a partir de las mismas tarjetas electrónicas, ya que todas ellas compartirían el mismo tipo de conectores.

Actualmente, los robots móviles disponibles en el mercado están desarrollados con una estructura compacta que dificulta la incorporación de nuevas funcionalidades. A su vez, los kits educativos que disponen de packs de extensión destacan por su elevado precio y bajas prestaciones.

El Laboratorio de Robótica y Control (Robolabo, 2016) dispone de un número limitado de robots e-pucks, cuya modificación sensorial no es posible al encontrarse todos los elementos en la misma tarjeta.

La situación actual de las tarjetas de control es motivación suficiente para desarrollar una tarjeta de hardware libre, con un microprocesador de alta gama que no limite el control a implementar y que sirva de base para que los estudiantes puedan probar en un sistema real los conocimientos adquiridos en las asignaturas de robótica.

Las ventajas que esta tarjeta electrónica presentará son:

- Reducción del precio con respecto a los kits educativos.

- Orientada a la educación donde los estudiantes podrán cargar, depurar e implementar distintos controladores, e incluso diseñar nuevas tarjetas con sensores.
- Microcontrolador de alta gama, un ARM Cortex M3 de 32 bits a 72MHz.
- Permitirá funciones de depurado con los pines del JTAG.

Por último está el diseño de un software sencillo de evitación de obstáculos encontrados en su trayectoria basado en FreeRTOS, de tal forma que permita validar el diseño mecánico realizado para la placa.

1.3. Objetivos

El objetivo principal del Trabajo Fin de Grado es el diseño y fabricación de una tarjeta electrónica versátil para disponer de un sistema de control de motores donde probar diferentes algoritmos de control. En concreto, esta tarjeta permitirá controlar 2 motores. Cuenta con 4 switches que actuarán de sensores de proximidad. Además incorpora 2 sistemas de alimentación a través de un conector jack PJ-051A, o de un conector de 3 pines recto de paso 2mm. Por último, tendrá la opción de añadirle más módulos a través de 2 conectores verticales, permitiendo incorporar una mayor funcionalidad a la tarjeta.

Para cumplir dicho objetivo se ha dividido el trabajo en cuatro hitos intermedios:

1. Realizar un estudio de los componentes comerciales, ver qué tipos de microcontroladores y sensores pueden ser adecuados.
2. Diseñar los esquemáticos de la tarjeta electrónica.
3. Fabricación de la tarjeta y soldadura de los componentes.
4. Validación del correcto montaje y funcionamiento de la tarjeta.

1.4. Planificación del proyecto

Para lograr los objetivos detallados en la sección anterior se han llevado a cabo las siguientes tareas, desarrolladas en cada uno de los capítulos de este documento:

- En el Capítulo 1 se desarrolla una breve introducción a los robots, la motivación y objetivos del Trabajo de Fin de Grado.
- En el Capítulo 2 se detalla el estudio realizado de los componentes utilizados en la tarjeta electrónica, se describen las especificaciones de los esquemáticos y diseños del PCB de acuerdo con los requisitos y restricciones del Trabajo de Fin de Grado.
- El Capítulo 3 tratará sobre los elementos mecánicos implementados en la tarjeta electrónica.

- En el Capítulo 4 se describen los diversos experimentos que validan el funcionamiento de la tarjeta electrónica.
- En el Capítulo 5 se expondrán las conclusiones y las líneas futuras de este Trabajo de Fin de Grado.

Capítulo 2

Tarjeta electrónica

2.1. Requisitos

A la hora de fijar determinados requisitos de diseño es necesario plantearse e imaginar como serían los módulos de expansión para facilitar el diseño de dichas tarjetas. Podemos resaltar las siguientes características indispensables:

1. Alimentación mediante dos opciones posibles, a través de 2 conectores de 3 pines rectos de paso 2mm o de un conector jack PJ-051A. Ambos tipos de conectores tendrán que estar situados en una cara diferente, de este modo podrá alimentarse la tarjeta de manera más versátil en función de la finalidad que se desee dar.
2. Dos conectores que permitan la incorporación de nuevos módulos de sensores.
3. Comunicación por UART y USB con los módulos adicionales a añadir a la tarjeta. Para poder leer información de los nuevos sensores, conocer el estado del microcontrolador, etc.
4. Pines PWM. Dado que la señal de entrada a los motores debe ser un PWM debemos tener en cuenta en nuestra tarjeta pines de donde sacaremos los PWM del microcontrolador. Además estos pines han de tener al lado pines de alimentación, masa y las señales de salida del encoder.
5. Debe contar con cuatro sensores de contacto, los cuales agregarán la funcionalidad de detección de obstáculos.
6. Agujeros de montaje. La tarjeta electrónica deberá contar con agujeros de montaje para ensamblar el chasis del robot y poder ajustar correctamente nuevos módulos.

Requisitos del Laboratorio de Robótica y Control.

1. Versátil. Esta tarjeta será empleada por muchos estudiantes y se verá sometida a muchos controladores diferentes, lo que significa que deberá ser capaz de adaptarse con facilidad y rapidez a diversas funciones.
2. JTAG. Para que los estudiantes puedan programar el microcontrolador, la tarjeta no incorporará un programador, deberá sacar los pines JTAG desde el microcontrolador.

3. Pequeña. La tarjeta electrónica deberá ser del menor tamaño posible, cumpliendo con todos los requisitos y restricciones del proyecto.
4. 1 LED. Deberá contener un LED que indique que la tarjeta está alimentada.

2.2. Restricciones

Dada la naturaleza del proyecto, el diseño de la tarjeta estará sujeto a ciertas restricciones impuestas por tratarse de un controlador de motores:

- Placa de cuatro capas. Deberá contener componentes por las dos caras superficiales, lo que implica la necesidad de crear otras dos capas para la distribución de la potencia y el retorno de la señal.
- Componentes SMD. Estos componentes presentan varias ventajas principalmente respecto de los componentes de inserción. Primero es que ocupan mucho menos espacio, y como hemos dicho anteriormente, el tamaño es un requisito de diseño de la tarjeta. Otra ventaja es la resistencia que presentan frente a impactos por tener una relación de área de soldadura mayor, lo que se traduce en mayor resistencia mecánica frente a impactos y vibraciones.
- Altura de los componentes. En la cara superior, la altura máxima que los componentes pueden soportar está limitada a la altura de los 2 conectores de los módulos adicionales. Los componentes soldados de la tarjeta tampoco pueden sobresalir por los laterales del robot, para evitar impactos y roturas contra otros robots y obstáculos.
- Situación de los agujeros de montaje. Principalmente para poder emplear los agujeros de sujeción del chasis en los sensores de contacto, lo que requiere de una distancia de separación fija con los sensores de contacto, es decir a la hora del diseño del PCB hay que tratarlos como un elemento unido. Para poder agarrar los módulos adicionales han de añadirse algunos agujeros lo más cercanos posibles a los conectores de expansión.
- Consumo energético. Al tratarse de un robot alimentado con batería, se tratará de economizar el consumo para dotar de mayor autonomía al robot. Para el control de los motores y los sensores de contacto el consumo energético no es una limitación. Sin embargo a la hora de añadir nuevos sensores el consumo aumenta pudiendo ser insuficiente la alimentación, lo que implica el diseño de varias fuentes de alimentación, tanto para elevar como bajar la tensión de entrada.
- Pulsadores. Los sensores de contacto utilizados son simplemente pulsadores, lo que limita la información recibida por parte de ellos a dos estados, alto o bajo. Esto impide conocer saber la localización del objeto, será necesario cubrir todos los ángulos posibles del robot con pulsadores colocados estratégicamente.

	ATmega2560	dsPIC30F6014A	PIC16F876A	68HC11
Flash(kB)	256	144	8	No
Número de pines	100	64	28	52
MaxFreq(MHz)	16	64	20	12
Instructions	135	83	35	11
CPU	8bit AVR	16bit MCU and DSC	8bit MCU	8bit MCU
SPI	1	2	1	1
I2C	1	1	1	0
UART	4	2	1	1
ADC Channels	16	16	5	8
PWM Channels	12	8	2	1

Tabla 2.1: Comparativa entre los microcontroladores más usados

2.3. Componentes

En esta sección se describirán los principales elementos que componen la tarjeta. Todos los datos de las comparativas son extraídos de las hojas de características de los componentes.

2.3.1. Microcontrolador

Es el componente principal de todo el sistema, en su memoria se encuentra el código de los programas a ejecutar. El microcontrolador se encarga de leer los datos de los sensores, realizar las operaciones adecuadas según los algoritmos de control implementados y proporcionar esa información a los motores. Se encarga tanto de mover los motores como de detectar y sortear los obstáculos.

Dependiendo del tipo de algoritmo de control presentan una cierta complejidad por lo que requieren de un microcontrolador de gama media o alta. En la Tabla 2.1 se muestra una comparativa de los microcontroladores más utilizados en los robots comerciales.

Una vez analizados los principales microcontroladores comerciales, se detalla de forma justificada el microcontrolador elegido para el diseño de la tarjeta electrónica.

El microcontrolador seleccionado es un STM32F103VBH6 (STM, 2015) de ST, un ARM Cortex-M3, cuyas principales características pueden verse en la Tabla 2.2. Como podemos observar, se trata de un microcontrolador bastante potente, por lo que no tendrá problemas a la hora de leer los sensores, ejecutar los algoritmos de control y enviar la información a los motores.

2.3.2. Motores

Componen el principal actuador de la tarjeta de control, son los encargados del movimiento del robot gracias a las ruedas que se acoplan en sus extremos.

Existe varios tipos de motores como se vió en el Capítulo 1. Para el diseño de esta tarjeta se emplearán motores de corriente continua. En nuestra tarjeta electrónica se opta por este tipo de motores, debido a sus ventajas frente a los neumáticos e hidráulicos. El motor seleccionado para esta tarjeta es el Pololu 100:1 Micro Metal Gearmotor LP 6V (Pololu, 2015) como puede verse en la Figura 2.1. Este

	STM32F103VBH6
Flash (kB)	128
Número de pines	100
Número de GPIOs	80
MaxFreq(MHz)	72
DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1)	1.25
CPU	ARM Cortex M3
Número de timers	7
SPI	2
I2C	2
CAN	1
USB	2.0
UART	3
ADC Channels	16
PWM Channels	8
Consumo máximo(mA)	150
Precio (€/unidad)	4,52

Tabla 2.2: Características del STM32F103VBH6

Índice de recuperación	100.37:1
Revoluciones	120 rpm
Corriente	40 mA
Pico de corriente	360 mA
Par de fuerzas	12 oz in

Tabla 2.3: Especificaciones Generales Pololu 100:1

motor destaca por su pequeño tamaño y bajo precio, en la Tabla 2.3 se recogen las especificaciones generales del motor.

El motor tiene un consumo de 40mA y un pico de arranque de 360mA, el caso peor de arranque es que ambos motores sean encendidos a la vez, lo que significa que la corriente de arranque es de aproximadamente 720mA a una tensión de 6V.

2.3.3. Sensores de contacto

Los sensores de contacto se utilizan para obtener información sobre los objetos en el entorno del robot, tal como presencia, localización, fuerza ejercida. Destacan por establecer o interrumpir un contacto eléctrico por medio de una fuerza externa.

Se caracterizan porque pueden detectar cualquier objeto independientemente del material con el que esté realizado. No les afectan las interferencias procedentes del medio exterior. Su salida está constituida por uno o más contactos libres de potencial, aunque su funcionamiento es exclusivamente mecánico. A pesar de todo, presentan el inconveniente de que su salida puede producir rebotes.

Dentro de este tipo de sensores encontramos los interruptores o pulsadores. Un interruptor es un dispositivo simple con dos posiciones (encendido y apagado). El

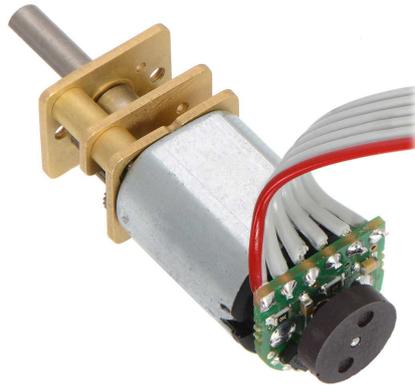


Figura 2.1: Motor Pololu

funcionamiento del interruptor se basa en abrir el circuito en un determinado punto, para evitar que los rebotes se propaguen, se emplean resistencias de pull-up , diodos y redes RC.

Como ya se especificó en los requisitos, esta tarjeta incorpora 4 sensores de contacto estratégicamente colocados, para ello se ha seleccionado en el montaje un pulsador de rango 5Vdc y 10mA con la huella de la Figura 2.2. El principal motivo es su sencillez de funcionamiento y bajo precio (0,4€).



Figura 2.2: Pulsador Panasonic empleado como sensor de contacto

En los esquemas de diseño en la Hoja Main A.1 del Apéndice A, se observan 2 pulsadores diferentes. La diferencia entre ambos pulsadores se encuentra en el rango de trabajo pudiendo cambiarse el tipo de pulsador sin necesidad de volver a fabricar la tarjeta electrónica, ya que ambos footprints están superpuestos. El rango del pulsador no montado es de 50Vdc y 100mA.

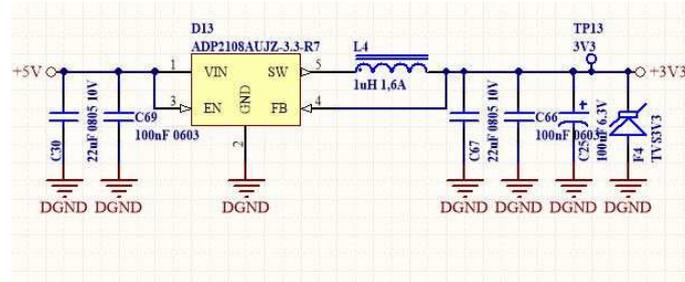
2.4. Esquemáticos

En esta sección se detallan las partes más importantes de los esquemáticos de la tarjeta electrónica. Los esquemáticos completos se encuentran en el Apéndice A, estos esquemas están divididos en 5 Hojas, la primera Hoja A.1 contiene un esquema global de la tarjeta, en la Hoja A.2 se detallan toda la información relevante de la alimentación, en la Hoja A.3 se describen las señales del microcontrolador, la Hoja A.4 contiene los 2 conectores utilizados para añadir más funcionalidades al robot y en la última Hoja A.5 se encuentra los elementos necesarios para el control de los motores.

En la Figura A.3 se encuentra el microcontrolador de la tarjeta con la nomenclatura de los paths usados. La huella del microcontrolador esta dividida en 6 bloques, en función de la finalidad de los pines. Detallando las señales más importantes:

- +3V3 (VBAT, VDD_1, VDD_2, VDD_3, VDD_4, VDD_5) y DGND (VSSA, VSS_1, VSS_2, VSS_3, VSS_4, VSS_5): Son las señales de alimentación del microcontrolador. En la tarjeta solo se procesan señales digitales, por lo que todas las alimentaciones analógicas deben estar conectadas a masa y las señales digitales a 3.3V. La alimentación a +3.3V se consigue a partir de la alimentación a 5V con una fuente conmutada.
- OSC_IN Y OSC_OUT: Son las señales de entrada y salida del reloj externo de 8 MHz.
- RST: Señal de reset del microcontrolador, activa a nivel bajo. El reset puede ser activado mediante un botón, cuando apretamos el boton se conecta a masa.
- TMS, TCK, TDO, TDI, TRST: Son las señales para programar el microcontrolador. Físicamente serán 2 tiras de paths junto con las señales de alimentación (3.3V) y de reset (RST).
- PE0, PE1, PE2, PE3: Son las señales dirigidas a los sensores de contacto reciben el nombre Bumper.Front.Right, Bumper.Front.Left, Bumper.Rear.Right, Bumper.Rear.Left respectivamente.
- Las señales correspondientes al motor 1 (TIM4_CH3, TIM4_CH4, AIN2, TIM8_CH3, TIM8_CH4) y al motor 2 (TIM4_CH1, TIM4_CH2, AIN14, TIM8_CH1, TIM4_CH2). Este grupo de señales son las correspondientes a la entrada y salida del Puente en H.
- USB_D_P, USB_D_N, STM32.UART1.TX, STM32.UART1.RX: Son las señales correspondientes a la comunicación con los módulos adicionales.
- PB2: Es la señal GPIOs de control del usuario.

En la Figura 2.3a se encuentra la fuente de alimentación que alimenta los componentes a 3.3V. Los 5V de entrada son proporcionados por el conector jack o por las baterías. Se han añadido condensadores de desacoplo tanto en las señales de 5V como de 3.3V. También se dispone de una fuente que eleva los 5V a la tensión



(a) Fuente de alimentación down de 5V a 3.3V

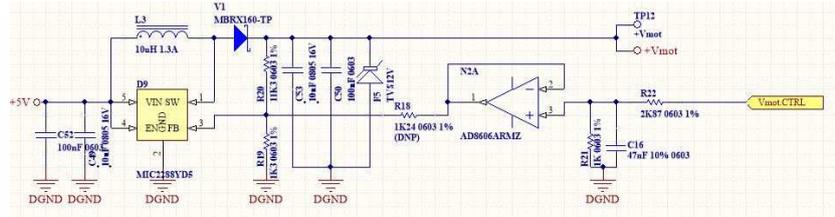
(b) Fuente de alimentación up de 5V a V_{MOT}

Figura 2.3: Fuente de alimentación

requerida por los motores (12V), contando con su etapa de desacoplo como se aprecia en la Figura 2.3b.

Las baterías cuentan con un circuito de carga, que las desconecta cuando se comprueba que están cargadas. Este circuito está duplicado por cada una de las baterías. La tensión que proporcionan es de 3.6V (3 celdas alcalinas) por lo que es necesario disponer de otro regulador que eleve la tensión de 3.6V a 5V, empleando a su vez su etapa de desacoplo.

A la hora de utilizar reguladores de tensión hay que tener en cuenta la máxima corriente que podrán proporcionar. En este caso concreto, el ADP2108AUJZ-3.3-R7 (ADP2108, 2016), regulador down, proporciona una corriente de pico de 600mA cuando no se supere la máxima potencia disipada (ver Ecuación 2.1). Por otra parte tenemos la Ecuación 2.2, donde θ_{JA} es la temperatura que aumenta el integrado por vatio disipado $170^{\circ}C/W$ y la temperatura máxima que soporta son 125° . Sustituyendo en la Ecuación 2.2 con una temperatura ambiente (T_A) de 25° obtenemos la potencia máxima disipada en la Ecuación 2.3.

$$P_D = (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I_{OUT} + V_{IN} \cdot I_{GND} \quad (2.1)$$

$$P_D = \frac{T_J(max) - T_A}{\theta_{JA}} \quad (2.2)$$

$$P_D = \frac{125^{\circ} - 25^{\circ}}{170^{\circ}C/W} = 588mW \quad (2.3)$$

Siendo V_{IN} 5V y V_{OUT} 3.3V e I_{GND} la corriente que va a masa dentro del propio regulador, la cual es despreciable por ser demasiado pequeña. Obtenemos la máxima corriente que puede proporcionar el regulador de tensión, sustituyendo en la Ecuación 2.1.

$$I_{OUT} = \frac{P_D}{V_{IN} - V_{OUT}} = \frac{0,588}{5 - 3,3} = 340mA \quad (2.4)$$

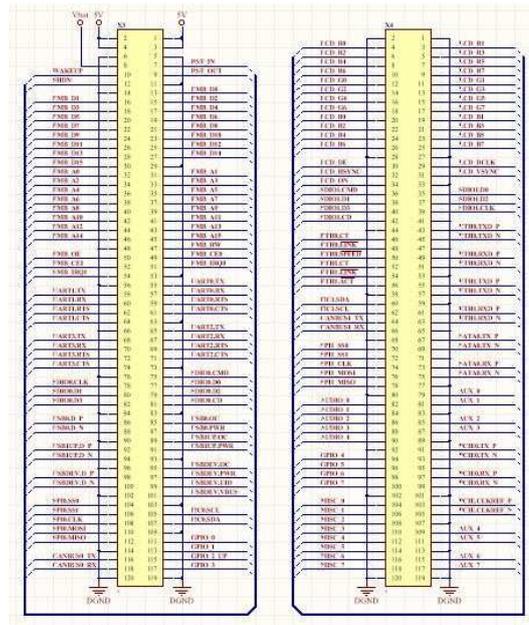


Figura 2.4: Conector módulos adicionales

Esta corriente es la que hay que tener en cuenta en el análisis de consumo a realizar en los nuevos módulos.

Para el resto de las fuentes se realizarían los mismos cálculos en el análisis de consumo, si fueran necesario. En nuestro caso, la alimentación es suficiente.

El pinout del conector seleccionado para la incorporación de módulos adicionales se encuentra en la Figura 2.4. El conector seleccionado es un conector Header de 120 pines de paso 0.8mm dual. El motivo de seleccionar este conector es debido a la disponibilidad de tarjetas con el mismo tipo de conector hembra en el Laboratorio de Robótica y Control que permite reutilizar dichas tarjetas.

Las señales más importantes son las de comunicación con el micro, UART y USB, descritas anteriormente.

La tarjeta está compuesta por dos Puentes en H, uno por cada motor con la finalidad de controlar la dirección de los mismos. En la Figura 2.5 se puede ver el circuito de control de los motores. El integrado del Puente en H está formado por transistores bipolares, los cuales pueden ser activados o no. Las posibles configuraciones de un puente en H son las descritas en la Tabla 2.4.

A	B	Resultado
1	0	Gira a la derecha
0	1	Gira a la izquierda
0	0	Parado
1	1	Parado y consumiendo

Tabla 2.4: Condiciones a satisfacer para que el motor realice sus funciones

Como se ve en la Tabla 2.4 hay solo tres movimientos requeridos y cuatro posibles

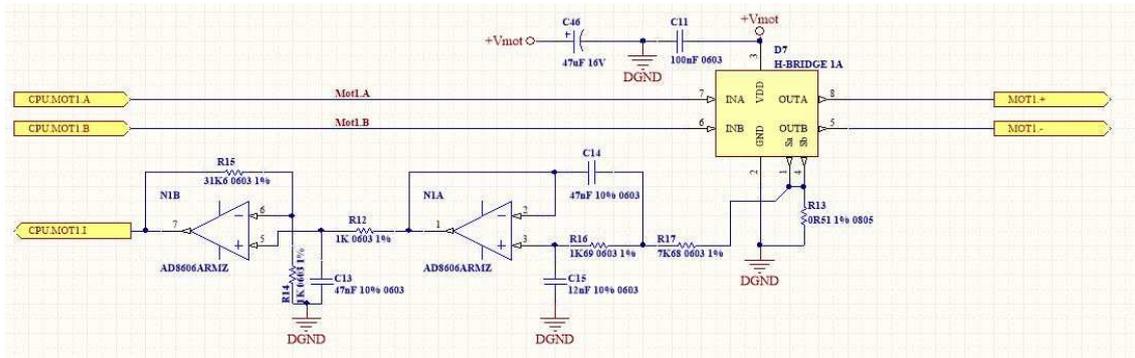


Figura 2.5: Driver del motor

condiciones para reproducir esos movimientos.

El motor seleccionado (ver Tabla 2.3), tiene un consumo de 40mA y un pico de arranque de 360mA a una tensión de 6V. Al tratarse de un motor de corriente continua, el Puente en H es el mejor sistema para controlarlo. Teniendo en cuenta las necesidades del motor, es necesario encontrar un integrado comercial adecuado. El encapsulado del Puente en H seleccionado es un 8-SOIC, el cual internamente esta preparado para trabajar con motores y está protegido. Esto quiere decir que el integrado ahorra espacio y permite liberarse de los posibles problemas como las sobretensiones generadas por los motores. En caso contrario, el diseño sería más complejo, ya que habría que prever los posibles problemas derivados de trabajar con los motores. La tensión a alimentar está entre 3,8V y 13,2V esta tensión entra en el rango de generación de la fuente de alimentación. Observando las características de nuestro motor, el integrado seleccionado ha de ser capaz de disipar la corriente requerida por el motor. Calculando la potencia disipada al aumentar la temperatura, obtenemos una potencia suficiente para controlar los motores, como puede verse en la Ecuación 2.5.

$$P_D = \frac{150^\circ - 25^\circ}{100^\circ C/W} = 1,25W \quad (2.5)$$

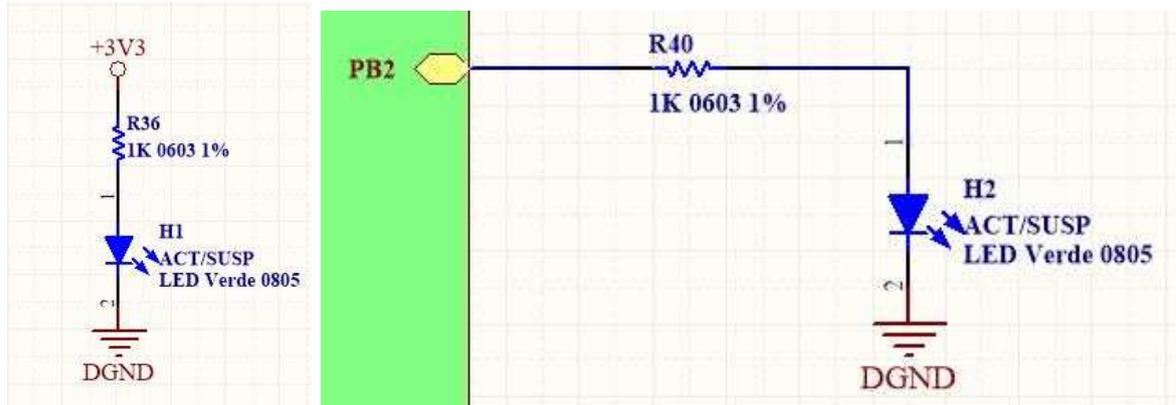
Para la comparación realizamos un promedio de la potencia disipada teniendo en cuenta el pico de arranque y la corriente en funcionamiento normal a una tensión de 6V y considerando que el pico de arranque dura unos 0.5s (un 20 % de funcionamiento). La potencia promedio disipada es capaz de hacer frente al arranque y al funcionamiento natural del Puente en H (ver Ecuación 2.6).

$$\begin{aligned} P_D &= (0,2 \cdot \text{arranque}) + (0,8 \cdot \text{funcionamiento}) = \\ &= (0,2 \cdot (360mA \cdot 6V)) + (0,8 \cdot (40mA \cdot 6V)) = 0,624W \end{aligned} \quad (2.6)$$

Las señales MOT1.+ y MOT1.- son las señales creadas para el control de los motores. El PWM generado en el microcontrolador se introduce por las señales CPU.MOT1.A y CPU.MOT1.B, dependiendo del sentido de giro deseado. Este circuito está duplicado para el otro motor, cambiando la notación por un 2.

Por último, en la Figura 2.6 se pueden observar los circuitos de los LEDs, tanto para la alimentación como el LED del usuario. El LED de alimentación está diseñado

para comprobar el funcionamiento de la alimentación, basado en la conexión de un LED al plano de 3.3V y su resistencia de protección (ver la Figura 2.6a). El LED de usuario es controlado por una señal del GPIO generada por el microcontrolador, permitiendo encender y apagar el LED según la señal del GPIO (ver la Figura 2.6b). Para ambos LEDs se ha empleado la misma referencia, reduciendo de este modo los costes de materiales, la misma consideración se ha empleado para sus resistencias.



(a) Circuito del LED de alimentación

(b) Circuito del LED de alimentación

Figura 2.6: Esquema de los LEDs

2.5. Printed Circuit Board - PCB

En el Apéndice B se encuentran varias ilustraciones del diseño de la PCB. En especial hay que destacar las Figuras B.5 y B.6 por mostrar el resultado en 3D del prototipo de la tarjeta. En el proceso de diseño de la tarjeta electrónica se han tenido en cuenta diversas consideraciones de diseño de acuerdo con el contexto y finalidad de la tarjeta electrónica que a continuación se detallan:

1. La forma de la tarjeta es una circunferencia de 85.6mm de diámetro. La principal causa de este diseño es que a la hora de realizar giros su forma permite que no varíe el espacio que ocupa el robot al girar, lo cual posibilita despreocuparse de posibles roces o impactos durante las maniobras de sorteo de obstáculos. Es decir, al pasar cerca de un obstáculo, la fricción dirige al robot hacia la trayectoria correcta desplazándolo para que pase. Si el diseño de la tarjeta tuviese bordes rectos, como un cuadrado o un rectángulo, los salientes de estos podrían dar lugar a posibles atascos en los obstáculos.
2. Como se observa en la Figura 2.7, se han situado los conectores de los módulos adicionales en paralelo a 23mm de separación entre ellos, formando un cuadrado. Simétricamente se han colocado los agujeros de sujeción del chasis de 3mm de diámetro y una corona de 6.3mm de diámetro en la que apoyar la tuerca. Se han colocado otros 3 agujeros de sujeción de menor tamaño (2.6mm de agujero y 5mm de corona) empleados para dar más fijación a los módulos adicionales

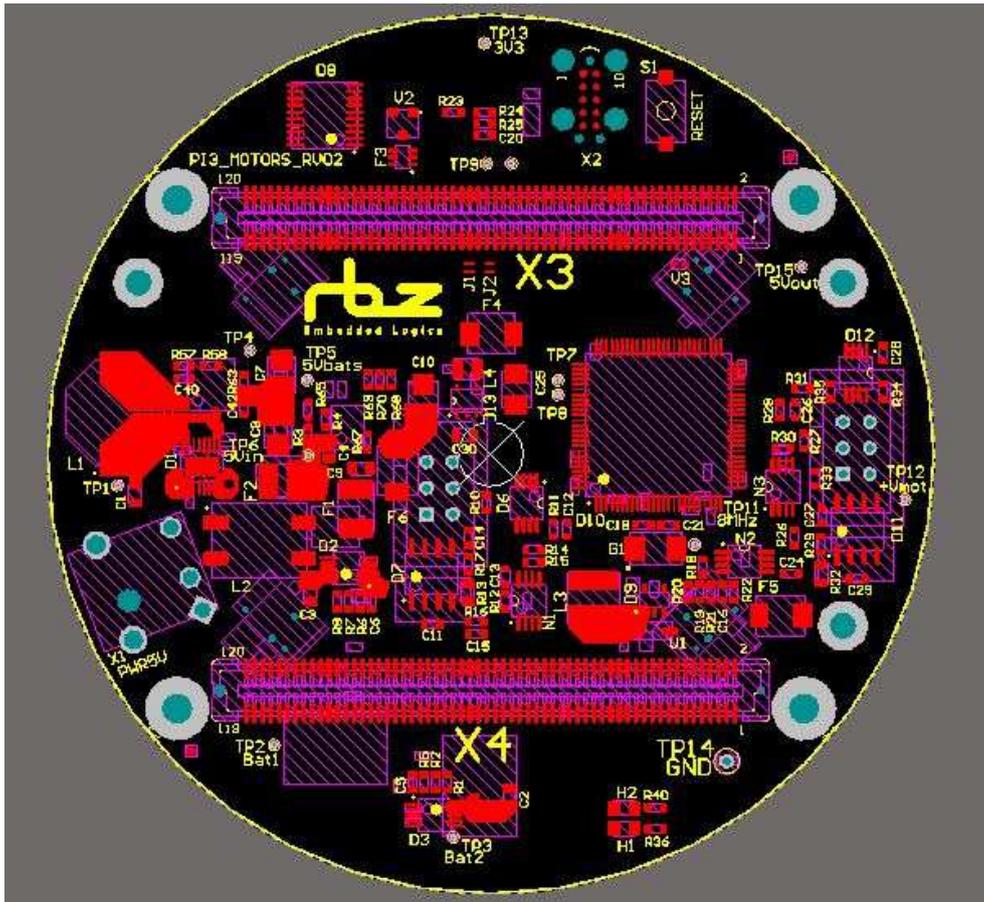


Figura 2.7: Situación de los componentes de la capa superior en la tarjeta electrónica

a la tarjeta, o para sujetar los motores como se detalla en el Capítulo 3. Estos conectores limitan el tamaño máximo de la tarjeta, y han de estar colocados en la cara superior de la tarjeta de manera fija. La justificación de esta posición es debido principalmente a la existencia en el Laboratorio de Robótica y Control de una tarjeta de periféricos, que podría emplearse para nuestro robot. De esta manera, quedan también fijados los agujeros los tornillos de agarre de la tarjeta de expansión. Por otro lado, tras saber la forma de la tarjeta, hay que buscar la posición que maximice la superficie de colocación de los componentes SMD, sin sobresalir los conectores por el borde del PCB.

3. El botón de reset esta situado en un lateral, lo que permite al usuario pulsar el botón cómodamente. Próximo a este se han colocado los paths del JTAG, de esta manera se aprovecha el espacio para pulsar mejor, cuando no esté conectado el programador, ver Figura 2.7.
4. El conector de alimentación está situado en un lateral de la circunferencia intentando no entrar en el cuadrado de 23mm formado por los conectores. Esto es debido a la gran altura del conector. La misma consideración se ha empleado en la bobina L1.
5. Los LEDs de usuario y de alimentación están situados en el extremo opuesto al botón de reset en perpendicular. Estos no tienen ningún componente alrededor

para mejorar su visibilidad.

6. En la cara inferior se pueden ver colocados los sensores de contacto en diagonal con los agujeros de sujeción del chasis y simétricos entre ellos. La separación entre los agujeros y el pulsador es de 4.3mm. En la Figura 2.8 se observa la posición de los agujeros de los switches.
7. Los conectores de los motores están situados con la misma orientación, de manera comercial esto garantiza una reducción de los costes de fabricación en serie. Esta consideración se ha intentado mantener en todos los componentes.
8. Los componentes de las baterías están colocados en un extremo de la placa para facilitar su acceso y con suficiente separación para poder introducir y extraer el conector hembra manualmente.
9. Se ha empleado, siempre que ha sido posible, la configuración Manhattan en el rutado de ambas caras, aprovechando de este modo el espacio de la placa. También se ha rutado evitando ángulos de 90° , es decir, utilizando ángulos de 45° .
10. Se ha diseñado una tarjeta de 4 niveles, los dos niveles exteriores se han empleado para el rutado de la tarjeta y la colocación de los componentes SMD. La segunda capa se ha diseñado completa para DGND, logrando que las señales de retorno recorran el menor camino y eviten volver atravesando el borde de la placa. La tercera capa se ha empleado para distribuir la potencia por toda la placa, el mayor área corresponde a la tensión de 3.3V debido a que es la tensión empleada por la mayor parte de los componentes, respecto a la tensión de 5V y V_{MOT} se ha intentado agrupar todos los componentes los más próximos posibles y mantenido que ambos planos estén juntos, reduciendo de esta manera los bucles que ha de recorrer la tensión de 3.3V.
11. Por último se han calculado el grosor de las líneas diferenciales, para tener controlada su impedancia en las líneas de transmisión. Este ancho depende del grosor con el que se va a fabricar la PCB y del fabricante. La impedancia a conseguir en el USB está entre 90Ω y 100Ω .

En el Apéndice C se detalla la lista completa de materiales para el proceso de fabricación.

En la Figura 2.9 puede verse el resultado de la tarjeta fabricada por ambas caras.

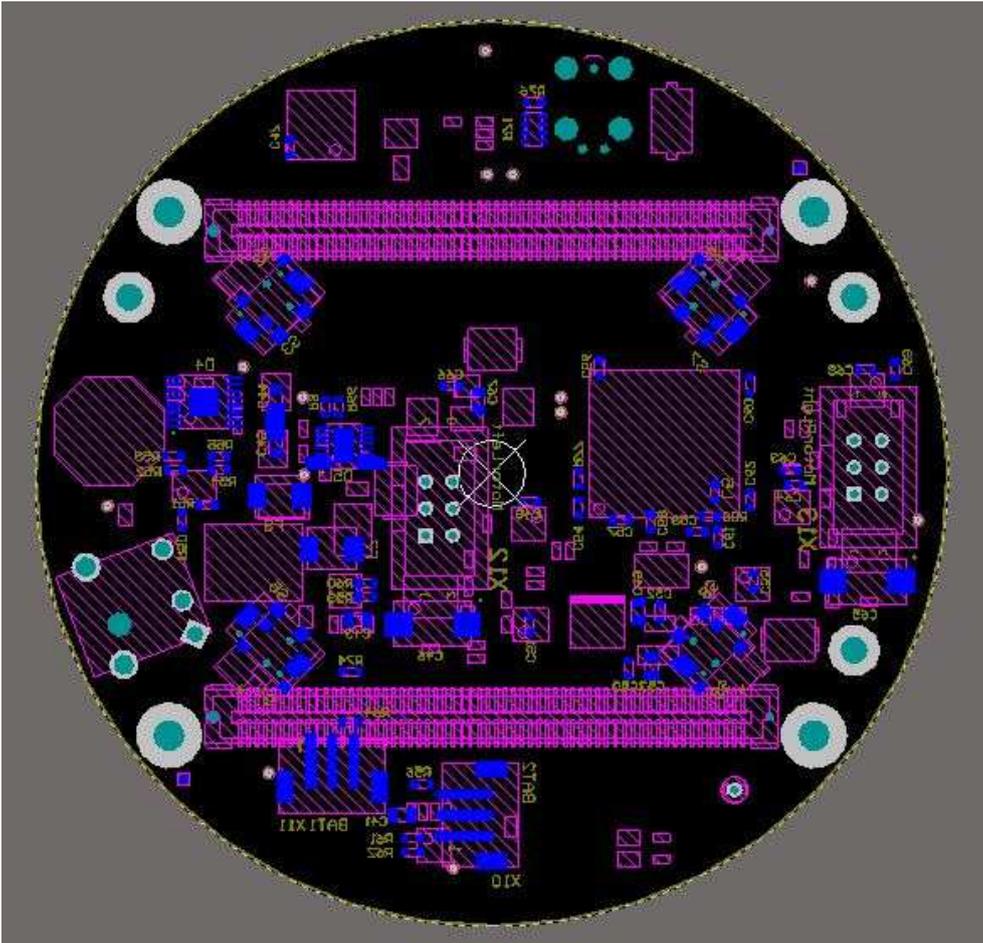
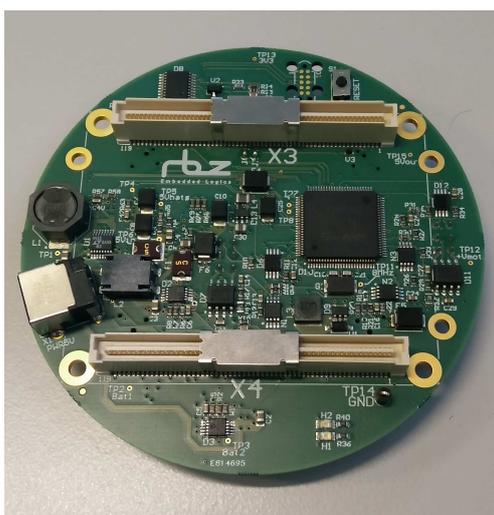


Figura 2.8: Situación de los componentes de la capa inferior en la tarjeta electrónica



(a) Cara superior de la tarjeta



(b) Cara inferior de la tarjeta

Figura 2.9: Tarjeta electrónica fabricada

Capítulo 3

Prototipo mecánico

En este Capítulo se realizará una descripción de los elementos mecánicos del chasis, así como las consideraciones y motivos de diseño tomadas.

3.1. Ruedas

Los motores disponibles en el Laboratorio de Robótica son el Pololu 100:1 Micro Metal Gearmotor LP 6V (Pololu, 2015). La mejor sujeción para las ruedas es aprovechar el eje del propio motor, de este modo el giro del eje es acompañado por el movimiento circular para proporcionar el desplazamiento del robot.

El eje del motor no es una circunferencia perfecta, sino que tiene una sección plana. Esta sección puede utilizarse para sujetar la rueda al motor a través de una tuerca y un tornillo M3. Para solucionar los problemas de resolución de las impresoras 3D, es decir, la imposibilidad de imprimir un círculo perfecto, es conveniente utilizar una goma circular que haga la función de neumático. Para ello es necesario dejar un leve reborde en el que encajar la goma, que permitirá disimular las imperfecciones y proporcionar un mayor agarre al robot.

El resultado de la rueda puede verse en la Figura 3.1:



(a) Diseño 3D



(b) Prototipo real

Figura 3.1: Diseño de la rueda

3.2. Sujeción de los motores

Típicamente una plataforma móvil de tracción diferencial cuenta con dos pares de ruedas: dos ruedas de tracción que tienen acoplados dos motores de corriente continua y dos ruedas de estabilización que mantienen el balance del vehículo.

Conociendo las dimensiones del motor por las especificaciones de las hojas de características, las dimensiones de la placa, la posición de los conectores de los motores y sin olvidar la dimensión de la rueda, se diseñan 2 tipos de piezas: una abrazadera del motor y una sujeción de los 2 motores a la placa.

La abrazadera, que se muestra en la Figura 3.2, tiene un diseño simple. La única peculiaridad necesaria es conocer las dimensiones del cuerpo. Con un sistema en forma de “u” invertida se agarra el motor con 2 tornillos y 2 tuercas de M2.5. En total se necesitan 2 abrazaderas, una en cada motor de la placa y por tanto son necesarios 4 tornillos y 4 tuercas. Las abrazaderas van situadas en el extremo de la sujeción.

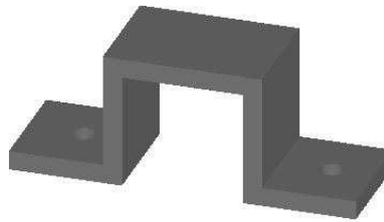


Figura 3.2: Prototipo de abrazadera del motor.

La pieza de sujeción de los motores es algo más elaborada (ver Figura 3.3). El primer criterio de diseño puede considerarse que su tamaño ha de ser inferior a la tarjeta electrónica, es decir ha de tener como máximo la medida de la PCB. La posición y tamaño de las ruedas de los motores hacen que en uno de sus lados presente 2 borde rectos. A esta magnitud de corte se le añaden unos milímetros más, evitando de este modo el contratiempo de que una rueda se desbalancee y pueda producir rozadura con el chasis. Con la forma exterior definida, el siguiente paso es situar los tornillos en el lugar correcto con respecto a la PCB. Los conectores de los motores poseen una altura a tener en cuenta. Para evitar usar torretas de gran altura se realizan otros 2 cortes en forma de rectángulo en su correspondiente ubicación, de tal modo que salve dicha altura. Esto modifica la forma externa de nuevo, ya que uno de los 2 conectores no se encuentra situado en el extremo debido al conector de la alimentación. Por último, es imprescindible tener en cuenta la posición de equilibrio del robot, ya que la colocación simétrica de las 2 ruedas no ejerce suficiente fuerza para mantener al robot en equilibrio, debido al peso de algunos componentes en la PCB. Para solventar este problema se colocan dos pistones en forma de cilindros y acabados en esfera de forma perpendicular a la posición de los motores.

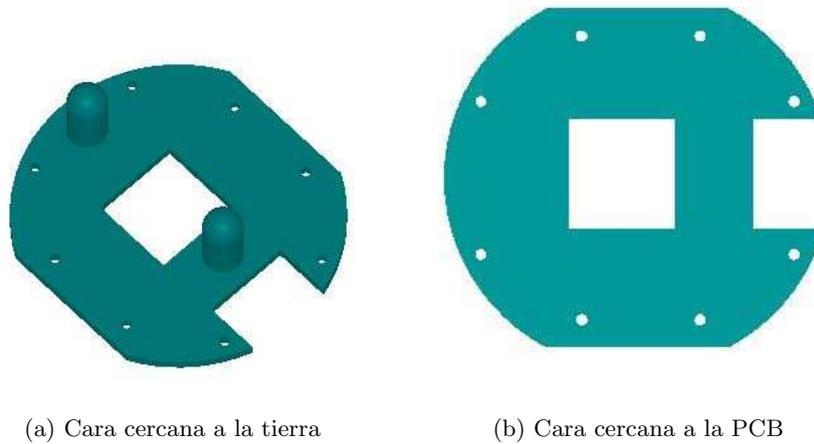


Figura 3.3: Modelos 3D de la sujeción de los motores

3.3. Chasis exterior

En esta parte de diseño es necesario saber las propiedades de la tarjeta electrónica. La principal finalidad de esta pieza es detectar los obstáculos encontrados en la trayectoria del robot. Estos obstáculos son detectados con los cuatro pulsadores (switches) colocados simétricamente en la tarjeta electrónica. Si el sensor detecta un obstáculo devuelve un 0, sino se mantiene a 1 mientras no detecte nada, lo que se traduce en lograr activar estos pulsadores cuando el robot detecte un objeto en su camino y que en caso contrario permanezcan desactivados. Para la realización de esta pieza se emplearán los 4 agujeros para tornillos de la placa, ubicados en diagonal y simétricos con respecto a los switches. Para evitar que los switches se activen con el movimiento, el tornillo a emplear debe ser menor que la dimensión del agujero en la placa, pero con una cabeza superior. De esta manera la tarjeta queda sujeta por el efecto de la gravedad al chasis y a su vez muestra suficiente holgura para no pulsar los switches hasta encontrar un obstáculo en su recorrido. En el momento que el robot encuentra un obstáculo, el chasis ejerce presión hasta pulsar los switches, detectando a su vez el posicionamiento del obstáculo, como se verá en el Capítulo 4.

Para crear una sola pieza a partir de los cuatro pistones de activación se genera un círculo de menor tamaño que la placa. De esta manera la tarjeta queda apoyada sobre la pieza. En el borde exterior, circular también, se diseña una dimensión mayor para añadir y evitar la rozadura de las ruedas.

Hay que realizar una última mención debido a la proximidad de uno de los switches con el conector de la alimentación. En este pistón, para evitar roces y deterioros del conector de la alimentación por fricción, se realiza un pequeño rebaje que evita llegar al path del componente, como puede verse en la Figura 3.4.

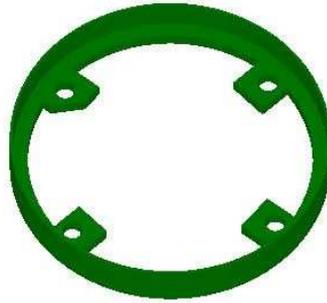
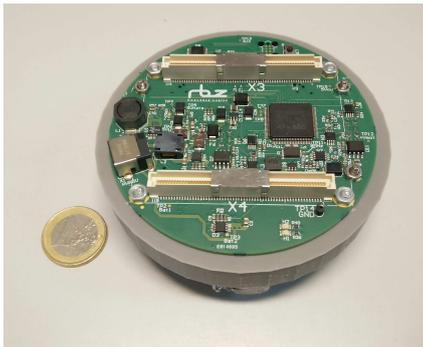


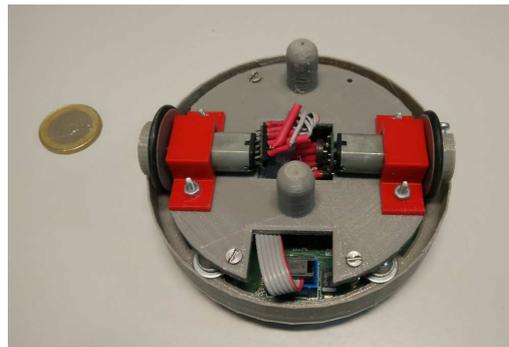
Figura 3.4: Modelos 3D del chasis

3.4. Prototipo Real

Una vez descritas las diferentes piezas, se unen para formar el robot final. En la Figura 3.5, se puede ver el montaje completo del robot por ambas caras, además se puede apreciar el tamaño, comparándolo con una moneda de 1€.



(a) Vista superior



(b) Vista inferior



(c) Unión intermedia

Figura 3.5: Modelos reales del robot

Capítulo 4

Experimentos y pruebas

Una vez fabricada la tarjeta se han realizado diferentes experimentos para comprobar el correcto funcionamiento de todos sus componentes.

4.1. Consideraciones previas

Es importante realizar una inspección visual de la tarjeta electrónica una vez montada y soldada, ya que pueden encontrarse errores de fabricación como la falta de algún componente crucial, o simplemente para comprobar que todos los componentes están correctamente soldados. Tras realizar dicha inspección en el prototipo recibido se detectó la falta de una resistencia SMD.

También se realizó la búsqueda de cortocircuitos y circuitos abiertos de todas las vías, paths y pistas de la tarjeta, detectando así problemas de fabricación del PCB. En nuestro caso, todas las pistas dieron las conexiones diseñadas.

Tras validar estas comprobaciones previas se procede a alimentar la tarjeta eléctricamente.

4.2. Alimentación de la tarjeta

El primer experimento tiene como finalidad comprobar todas las tensiones de la tarjeta electrónica, tanto la que se introduce a la tarjeta desde el exterior, como las generadas en el interior.

Para medir las tensiones necesitamos alimentar la tarjeta con el conector jack introduciendo una tensión de 5V, recordando que la tensión máxima posible a introducir es de 16V antes de que salte el fusible de protección, cuyo valor en los planos de diseño corresponde a los $5V_{ext}$. Esta tensión se transforma a 5V, 3.3V, y V_{MOT} . Esta última tensión es la alimentación a introducir en los motores, siendo de 12V como máximo. Los puntos de medida de dichas tensiones se realiza en los diodos zener de protección, ya que estos van desde la tensión a evaluar hasta DGND teniendo la corriente el menor camino de retorno. Los componentes a medir son F4, F5 y F6 con un valor de 3.3V, 12V y 5V. Las medidas se realizan con un polímetro digital. La primera vez que se encienda la tarjeta conviene mirar el valor de corriente

que demanda a la fuente de alimentación, con este valor podemos conocer si hay un cortocircuito indeseado. Los resultados pueden comprobarse en la Figura 4.1.

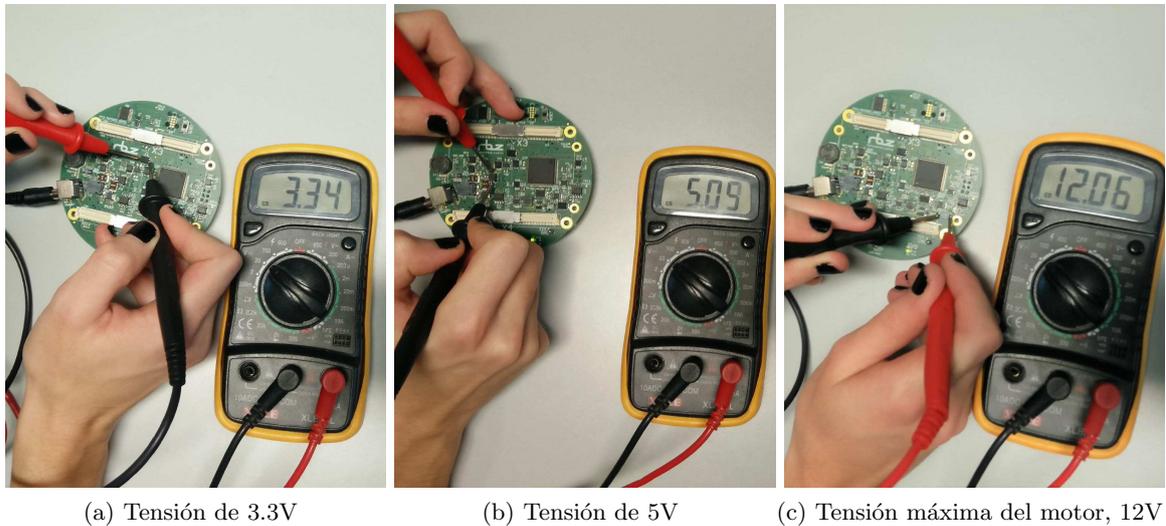


Figura 4.1: Capturas de las medidas de alimentación realizadas a la tarjeta electrónica

Es necesario realizar las mismas mediciones con el conector de 3 pines de las baterías, obteniéndose los mismos resultados, y dando por válido el modo de alimentación.

4.3. Control del LED de usuario

El segundo experimento tiene como finalidad, por una parte comprobar que el LED incluido en la tarjeta funciona correctamente, y por otra parte comprobar la comunicación entre la tarjeta y el ordenador a través del conector JTAG. Esto significaría que las librerías creadas, así como todo el hardware y software que gestiona la comunicación por la UART con el ordenador está bien diseñado.

El código empleado para este experimento consiste simplemente en encender y apagar el LED de la tarjeta, es decir, tras un tiempo deseado se desactiva/activa el LED con un GPIO. Se realizó la misma prueba con diferentes tiempos de parpadeo. El código implementado se puede observar en la Figura 4.2.

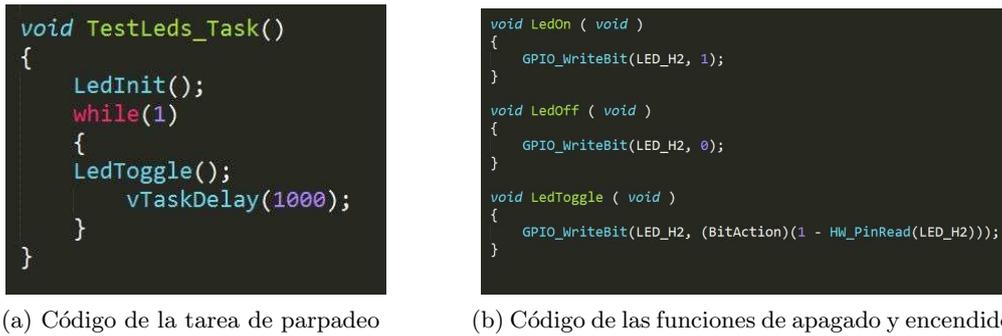


Figura 4.2: Código para la tarea de testeo del LED

Como se puede leer en el código, el tiempo de apagado es de un segundo (VTaskDelay(1000)). Se han creado 3 funciones para el manejo del LED. Por un lado encontramos las funciones LedOn y LedOff, que se encargan de encender y apagar el LED respectivamente. La tercera función es LedToggle, cambiando el estado en el cual se encuentra el LED. A lo largo de las pruebas se han empleado cada una de estas funciones, escogiendo la mejor opción en cada caso. El resultado del experimento se puede observar en la Figura 4.3.

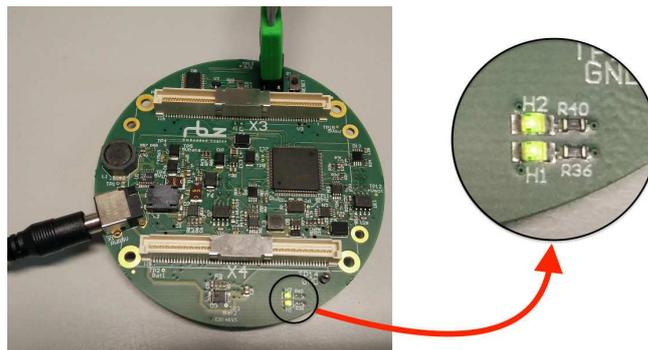


Figura 4.3: Encendido del LED en la tarjeta electrónica

4.4. Manejo de los sensores de contacto

En este experimento se va a utilizar el LED ya verificado en el apartado anterior. El objetivo de este experimento es comprobar el funcionamiento de los sensores de contacto, los cuales consisten en estar a nivel alto si no se presionan los pulsadores, o a nivel bajo en caso contrario. Los cuatro pulsadores reciben un nombre unívoco según criterio de diseño. Empiezan a nombrarse tomando como división horizontal el conector jack y mirando la tarjeta con dicho conector a la izquierda. Esta división otorga el nombre de frontal (front) a los pulsadores situados en la parte superior y traseros (rear) a los de la parte inferior. Una segunda división perpendicular a esta, identifica a los pulsadores entre izquierda (left) y derecha (right). Sabiendo esta división, los cuatro pulsadores reciben los siguientes nombres a la hora de programación BUMPER_FRONT_RIGHT, BUMPER_FRONT_LEFT,

BUMPER_REAR_LEFT y BUMPER_REAR_RIGHT.

Para probar su correcto funcionamiento se combina la pulsación de un pulsador con el parpadeo de un LED. Para probar que no haya interferencia entre los pulsadores se determina una secuencia de parpadeo por cada pulsador, es decir, se determina un número de parpadeos para cada pulsador.

En la Figura 4.4 puede leerse un ejemplo de secuencia del código del experimento.

```

if (!BumperRead(BUMPER_FRONT_RIGHT))
{
  LedOn();
  vTaskDelay(500);
  LedOff();
  vTaskDelay(2000);
}
else if (!BumperRead(BUMPER_FRONT_LEFT))
{
  LedOn();
  vTaskDelay(500);
  LedOff();
  vTaskDelay(500);
  LedOn();
  vTaskDelay(500);
  LedOff();
  vTaskDelay(2000);
}
}

else if (!BumperRead(BUMPER_REAR_LEFT))
{
  LedOn();
  vTaskDelay(500);
  LedOff();
  vTaskDelay(500);
  LedOn();
  vTaskDelay(500);
  LedOff();
  vTaskDelay(500);
  LedOn();
  vTaskDelay(500);
  LedOff();
  vTaskDelay(2000);
}
}

else if (!BumperRead(BUMPER_REAR_RIGHT))
{
  LedOn();
  vTaskDelay(500);
  LedOff();
  vTaskDelay(500);
  LedOn();
  vTaskDelay(500);
  LedOff();
  vTaskDelay(500);
  LedOn();
  vTaskDelay(500);
  LedOff();
  vTaskDelay(500);
  LedOn();
  vTaskDelay(500);
  LedOff();
  vTaskDelay(2000);
}
}

```

(a) Código de la secuencia de los pulsadores (b) Código de la secuencia del pulsador trasero izquierdo (c) Código de la secuencia del pulsador trasero derecho

Figura 4.4: Ejemplo de código experimento de los sensores de contacto

4.5. Salida PWM

Las señales PWM son las que controlan el puente en H, proporcionando la velocidad deseada con la que realizar el desplazamiento. Por lo tanto, este experimento tiene como finalidad comprobar que la tarjeta genera señales PWM correctamente. En concreto se desea generar un PWM de 20kHz.

En la Figura 4.5 se puede observar la señal PWM de 20kHz de frecuencia (50 μ s de periodo) y 30 % de duty cycle generada, demostrando así el correcto funcionamiento de la tarjeta electrónica que permite generar señales PWM de distinto ciclo de trabajo.

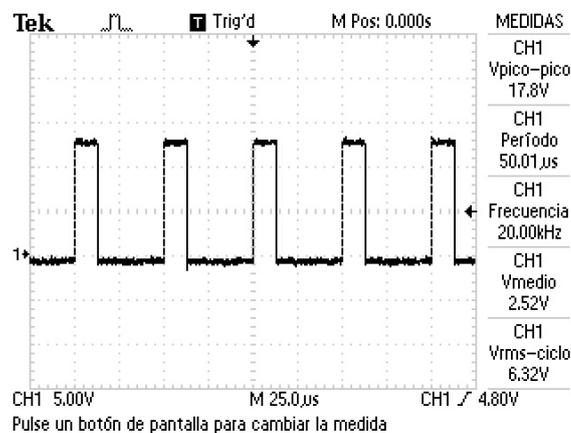


Figura 4.5: Señal PWM de 20kHz generada

El código implementado para el testeo de esta tarea puede verse en la Figura 4.6.

```
void TestMotor_Task()
{
    float voltage;
    MOTOR_Init(MOTOR1, 20000);
    MOTOR_Init(MOTOR2, 20000);
    LedInit();
    LedOn();
    vTaskDelay(500);
    LedOff();
    MOTOR_EnablePWM(MOTOR1);
    MOTOR_EnablePWM(MOTOR2);
    while(1)
    {
        voltage =3;
        MOTOR_SetVoltage ( MOTOR1, voltage );
        MOTOR_SetVoltage ( MOTOR2, voltage );

        //vTaskDelay(5000);
        /*NVIC_SystemReset();*/
        LedOn();
        vTaskDelay(1000);
        LedOff();
    }
}
```

Figura 4.6: Ejemplo de código experimento de los motores

4.6. Programa de evitación de obstáculos

Una vez realizados todos los experimentos detallados anteriormente, se procedió al diseño de un pequeño programa para validar el funcionamiento de todo el conjunto, con un programa de esquivación de obstáculos.

El proceso más básico para la navegación de un robot móvil se basa en el modelo cinemático del sistema de propulsión. Este sistema es el que permite al robot moverse dentro de un entorno. El sistema de ruedas de tracción diferencial es un sistema poco complejo y adecuado para la navegación en algunos entornos típicos humanos, como oficinas, almacenes, etc. A partir de las ecuaciones geométricas, se puede calcular la posición del robot. Este método de localización se conoce como estimación odométrica (Odometric Dead-Reckoning (Valencia et al., 2009)). El inconveniente de este método es que por pequeña que sea la constante de error en el sensor, el error de localización del robot crecerá sin límites porque éste va incrementando a lo largo del tiempo.

4.6.1. Descripción del programa

La principal finalidad del programa de esquivación de obstáculos es detectar los objetos en su trayectoria y modificar su movimiento para sortearlo sin intervención del usuario.

El robot puede detectar obstáculos de frente cuando se activen los dos pulsadores frontales (BUMPER_FRONT_LEFT y BUMPER_FRONT_RIGHT), marcha atrás (BUMPER_REAR_LEFT y BUMPER_REAR_RIGHT), por el lateral izquierdo (BUMPER_FRONT_LEFT y BUMPER_REAR_LEFT), por el lateral derecho (BUMPER_FRONT_RIGHT y BUMPER_REAR_RIGHT), de manera oblicua con un desplazamiento frontal (BUMPER_FRONT_RIGHT o BUMPER_FRONT_LEFT) o de manera oblicua con un desplazamiento marcha atrás en los laterales al menos

(BUMPER_REAR_RIGHT o BUMPER_REAR_LEFT). Es decir, en total hay nueve tipos de movimientos a programar, los 8 de esquivación y el movimiento natural de desplazamiento avanzando en línea recta.

Sabiendo los tipos de movimiento es necesario conocer cómo controlar la velocidad de los motores para que realicen el giro deseado. La teoría de movimiento desarrollada está basada en los Vehículos de Braitenberg (Braitenberg, 1984; Valencia et al., 2009).

La traslación y rotación se determina por el movimiento independiente de cada una de las ruedas de tracción. Es decir, para que el robot gire es necesario que un motor lleve más velocidad en una rueda que en la otra, dependiendo de la dirección de giro deseada para el robot.

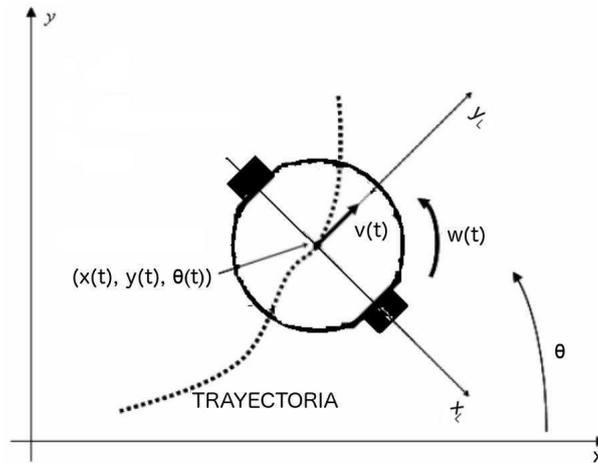


Figura 4.7: Esquema matemático de la trayectoria de un robot móvil

Simplificando las ecuaciones cinemáticas al punto medio del eje del robot, referidas a un sistema de referencia global se obtiene:

$$\dot{x} = v(t) \cdot \cos(\theta) \quad (4.1)$$

$$\dot{y} = v(t) \cdot \sin(\theta) \quad (4.2)$$

$$\dot{\theta}(t) = w(t) \quad (4.3)$$

La posición y orientación del robot móvil se obtienen integrando las velocidades en un periodo de tiempo Δt . Las ecuaciones quedarían de la siguiente forma:

$$x(t) = x(t_0) + \int_{\Delta t} v(t) \cdot \cos(\theta(t)) dt \quad (4.4)$$

$$y(t) = y(t_0) + \int_{\Delta t} v(t) \cdot \sin(\theta(t)) dt \quad (4.5)$$

$$\theta(t) = \theta(t_0) + \int_{\Delta t} w(t) dt \quad (4.6)$$

Si hacemos tender el periodo de observación Δt a 0, entonces las integrales anteriores pueden ser remplazadas por desplazamientos diferenciales Δx , Δy , $\Delta \theta$.

Manteniendo una frecuencia de muestreo constante y elevada sobre el estudio de la estimación de la posición (odometría) del robot, se puede aproximar la posición y orientación del mismo mediante las ecuaciones en diferencia.

$$x_k = x_{k-1} + \Delta x_k \quad (4.7)$$

$$y_k = y_{k-1} + \Delta y_k \quad (4.8)$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \Delta \theta_k \quad (4.9)$$

Otra manera de verlo es considerando que la velocidad angular en cada una de las ruedas se mantiene constante durante el periodo de muestreo. Por lo que encontraríamos un $\Delta \rho_k$ que es la distancia recorrida por el centro del robot en el intervalo (k-1,k) y $\Delta \theta_k$ es el cambio de orientación durante el mismo intervalo.

Todo lo descrito puede verse de manera gráfica en la Figura 4.8

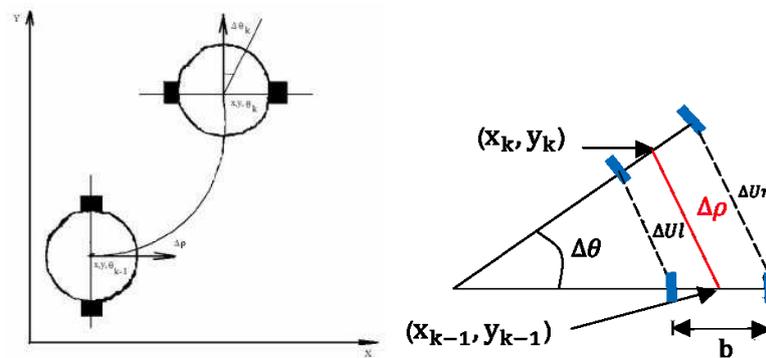


Figura 4.8: Desplazamiento relativo entre instantes de muestreo

Sabiendo las ecuaciones del movimiento, continuamos describiendo los 9 casos posibles de evasión de obstáculos.

El movimiento más sencillo consiste en desplazarse de manera lineal siguiendo un camino recto. Para ello, el robot ha de llevar la misma velocidad en ambas ruedas. En esta trayectoria podemos encontrar un obstáculo de frente. Este obstáculo es detectado por los sensores de contacto frontales y el movimiento a realizar es un leve giro hacia uno de los lados y luego continuar con su trayectoria. El giro se implementa aplicando una velocidad mayor a una rueda que a otra. En la Figura 4.9a puede observarse de manera gráfica lo descrito. En caso contrario, de que el obstáculo sea detectado mientras el robot retrocede, se activan los sensores traseros y el robot intenta sortear el obstáculo realizando un leve giro hacia uno de los lados y luego volviendo a avanzar de frente, como puede observarse en la Figura 4.9b. Igual que antes, hay que aplicar una velocidad mayor en una rueda respecto de la otra.

En caso que el robot detecte el obstáculo de manera oblicua a su izquierda, intenta realizar un giro en sentido contrario a la trayectoria de inicio. Si el robot se desplazaba de manera lineal avanzando, realizará un giro hacia la derecha retrocediendo, para posteriormente intentar retomar la trayectoria inicial, como puede verse representado en la Figura 4.10a. Y en caso de que el desplazamiento inicial fuera marcha atrás,

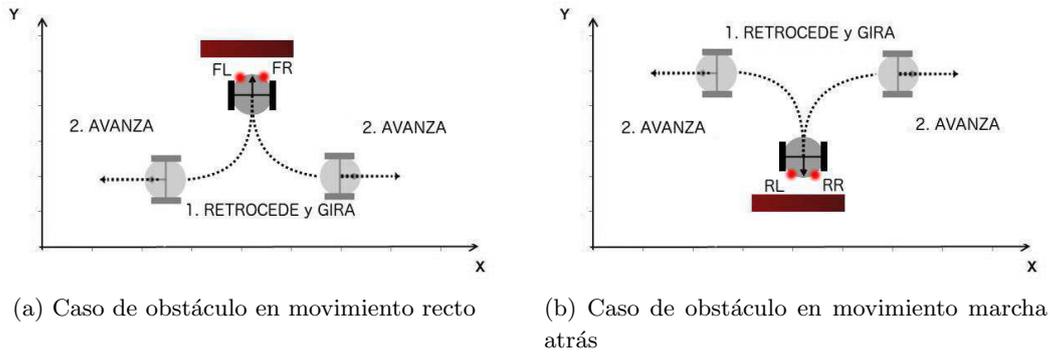


Figura 4.9: Esquema del movimiento con obstáculo recto y marcha atrás

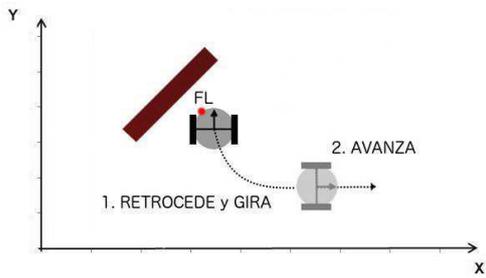
realiza el giro hacia la derecha, intentando emplear el mismo movimiento de nuevo, tal y como se muestra en la Figura 4.10c. En caso de que obstáculo se encuentre situado de manera oblicua a la derecha realizará los mismos movimientos pero en sentido opuesto, es decir, si el robot iba avanzando y detecta el obstáculo, primero intenta un giro a la izquierda mientras retrocede y luego reanuda su trayectoria original, como se puede analizar en la Figura 4.10b. Y en un movimiento de marcha atrás, realiza el giro hacia la izquierda y procede a reiniciar el movimiento de marcha atrás como se muestra en la Figura 4.10d.

Por último, el robot puede detectar los obstáculos de manera lateral tanto con los sensores frontales como posteriores de un mismo lado. En este caso, al detectar el obstáculo por el lateral izquierdo, el robot intenta realizar un giro hacia la derecha en el mismo sentido de la trayectoria, tal y como se muestra en la Figura 4.11a. Para el lateral derecho el movimiento es simétrico, es decir, realiza un giro hacia la izquierda para posteriormente intentar avanzar de nuevo, como se observa en la Figura 4.11b.

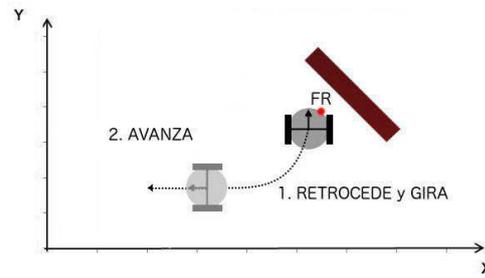
Todos los giros programados son realizados con una velocidad aleatoria en la que se varía la tensión a introducir en el motor de giro. La notación empleada en las figuras nombra a los sensores frontales con la letra F, los traseros con R, en el lado izquierdo con una L y el derecho con una R. El robot en color negro hace referencia a la posición de inicio del movimiento.

Cabe destacar que en el programa desarrollado, para poder iniciar el controlador hay que realizar cuatro pulsaciones en los sensores de contacto. Esta secuencia de activación es implementada para evitar problemas de activación del robot sin el consentimiento del usuario, evitando así, problemas de caídas de la mesa a la hora de conectar la alimentación por descuido.

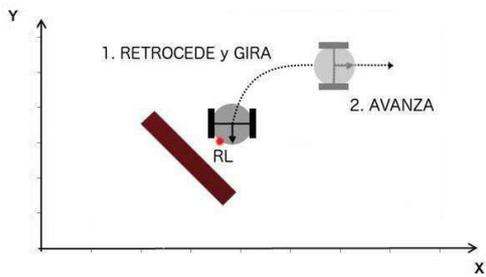
Los resultados obtenidos dependen del entorno en el que el robot puede moverse. El programa está pensado para la evitación de obstáculos en cualquier escenario. El programa se ha probado para esquivar obstáculos a modo de laberinto, tales como torres de CPU, patas de las mesas y sillas.



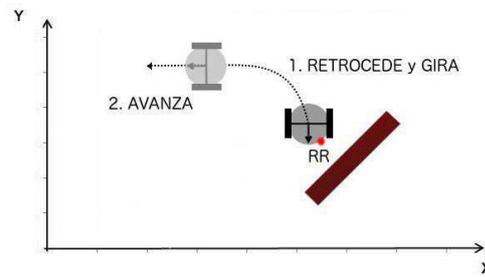
(a) Caso de obstáculo en movimiento oblicuo por la izquierda avanzando



(b) Caso de obstáculo en movimiento oblicuo por la derecha avanzando

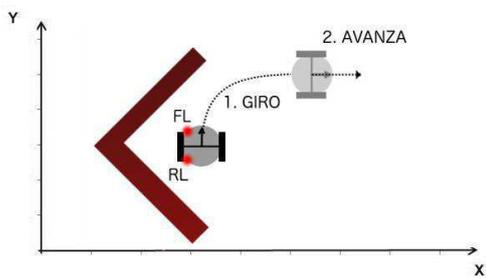


(c) Caso de obstáculo en movimiento oblicuo por la izquierda retrocediendo

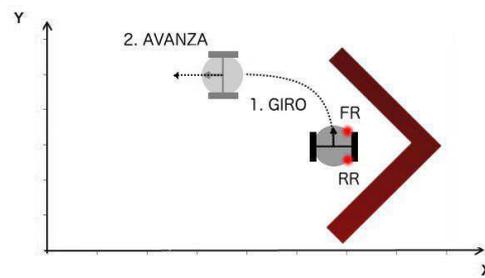


(d) Caso de obstáculo en movimiento oblicuo por la derecha retrocediendo

Figura 4.10: Esquema del movimiento con obstáculo oblicuo



(a) Caso de obstáculo por lateral izquierdo



(b) Caso de obstáculo por lateral derecho

Figura 4.11: Esquema del movimiento con obstáculo lateral

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

Una vez finalizado el diseño y fabricación de la tarjeta electrónica de control de motores para un robot móvil y realizado los experimentos anteriormente detallados, se ha llegado a unas conclusiones de las que se deducen ciertas líneas futuras.

5.1. Conclusiones del trabajo

En este Trabajo de Fin de Grado se ha diseñado, fabricado, programado y probado una tarjeta electrónica de control de motores para un robot móvil. Se ha procurado lograr una versatilidad en cuanto a las funciones que se puedan implementar y que sea potente como para realizar una gran multitud de tareas simultáneas sin problema. Junto al diseño, se proporciona un programa sencillo de esquivación de obstáculos.

A la vista de lo desarrollado a lo largo de esta memoria, se puede concluir que :

- Se ha explorado el ámbito que rodea el mundo de los robots móviles, tanto los elementos que lo integran como los componentes esenciales que lo incorporan, así como la interacción y funcionamiento de todos ellos.
- Se ha conseguido diseñar una tarjeta electrónica que cumpla todos los requisitos planteados para poder ser utilizada como controlador de los motores en un robot móvil, albergando la funcionalidad básica de detección de obstáculos con los sensores de contacto.
- Se han logrado integrar dos formas diferentes de alimentación, otorgándole más variabilidad de uso al robot móvil en función de los criterios a usar.
- La comunicación entre la tarjeta y un ordenador a la hora de la programación y la depuración del microcontrolador ha sido comprobada.
- Se ha alcanzado la integración de dos conectores esenciales para la incorporación de nuevas tarjetas electrónicas con diversa funcionalidad, como pueden ser nuevos sensores o actuadores.
- Gracias a los prototipos mecánicos implementados se ha conseguido una robustez estructural y funcional, logrando la protección de los sensores y componentes de la tarjeta.

- Tras realizar diversas pruebas de arranque a los motores, se detectó un pico de arranque de 800mA. Este pico impide el levantamiento de la tarjeta electrónica con un array de baterías de pilas tipo A. Este problema se plantea en las líneas futuras de trabajo.
- Se ha conseguido programar un software para que el robot realice la esquivación de obstáculos tras haberlos detectados por contacto.

En resumen, se ha validado el uso de esta tarjeta como controlador de motores para un robot móvil.

5.2. Líneas futuras

Analizando apropiadamente todas las observaciones y resultados realizados a lo largo del Trabajo de Fin de Grado han ido apareciendo diversas mejoras de la tarjeta que se detallan a continuación.

- La primera sería la sustitución de los motores por otros de las mismas dimensiones pero con menor pico de arranque o la búsqueda de mejores arrays de baterías.
- Convendría añadir LEDs RGB con los cuales poder avisar al usuario del estado de las baterías, es decir en que estado se encuentra cargadas, a medias, agotadas, lo que evitaría posibles peligros a la tarjeta. Además se podrían utilizar para avisar al usuario de la generación incorrecta de alguna señal que sobrepase el límite de funcionamiento.
- La incorporación de un micro USB, el cual podría usarse tanto para la carga de las baterías como para el depurado y la programación.
- Respecto al programa de evitación de obstáculos, convendría añadir un controlador PID para ambos motores, lo que permitiría que ambas ruedas se movieran con una velocidad idéntica y proporcionase un movimiento rectilíneo al robot.
- La parte mecánica podría modificarse para crear un sistema de poleas y engranajes que permitan otro tipo de movimiento en lugar de emplear las ruedas. Con esta medida se podrían crear robot con patas.
- Con relación al sistema completo del robot, se podrían diseñar y fabricar nuevas tarjetas electrónicas que incorporen nuevos sensores, como por ejemplo: sensores infrarrojos para detectar obstáculos a distancia, acelerómetros con el que detectar colisiones o caídas, micrófonos para captar el sonido y poder seguirlo, cámara para grabar desde la perspectiva del robot e interactuar con el entorno, añadir comunicación bluetooth para comunicarse con otros robot móviles, con un ordenador o usuario, etc.

Apéndice A

Esquemáticos

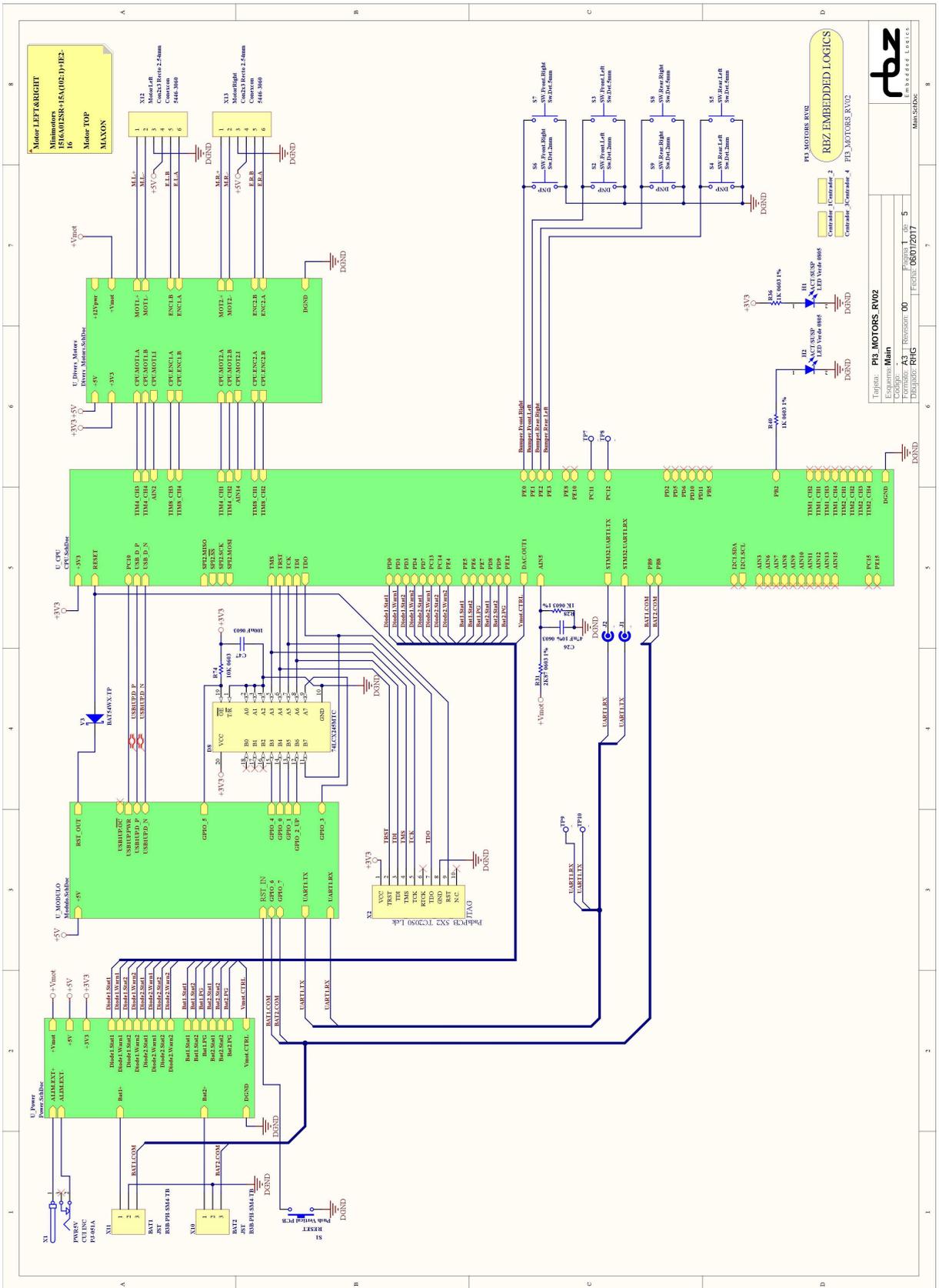


Figura A.1: Hoja Main 1/5

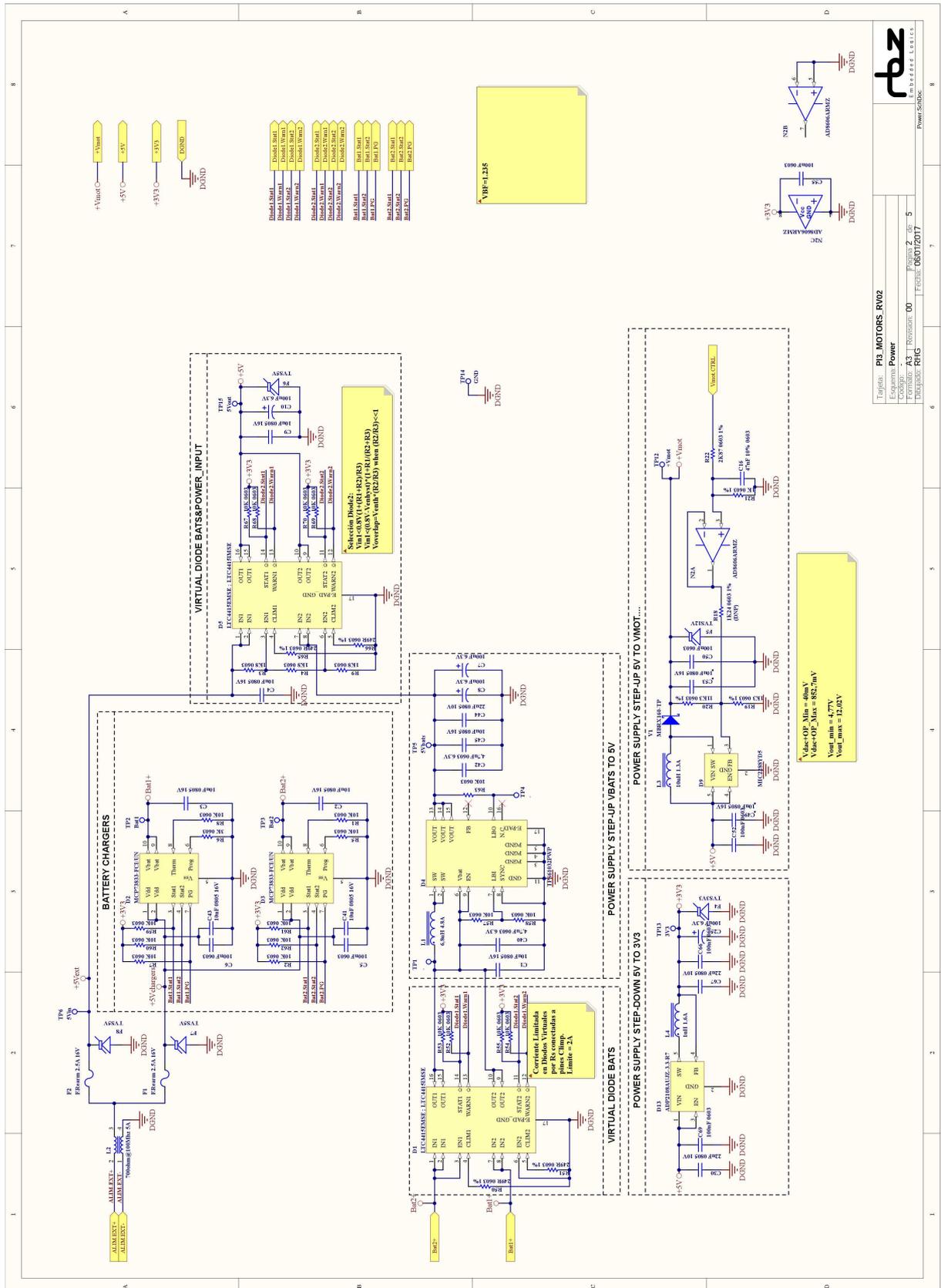
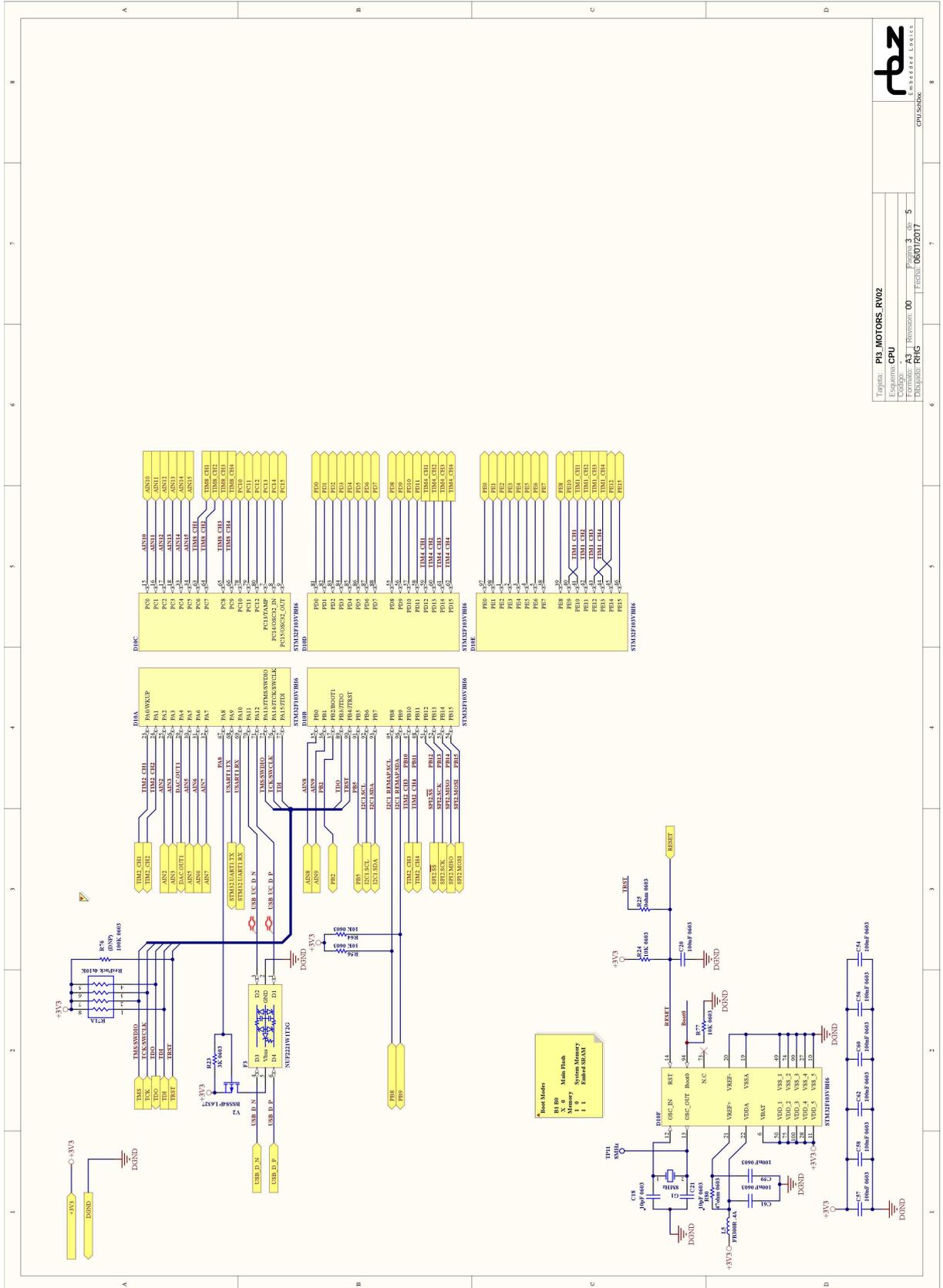


Figura A.2: Hoja Power 2/5



Projeto: PH2_MOTORS_RV02
Esquema: CPU
Codigo: A3 | Revisión: 00 | Pagina: 3 de 5
DISEÑO: RHG | REVISIÓN: 00 | FECHA: 08/07/2017
CPU3/5/06

Figura A.3: Hoja CPU 3/5

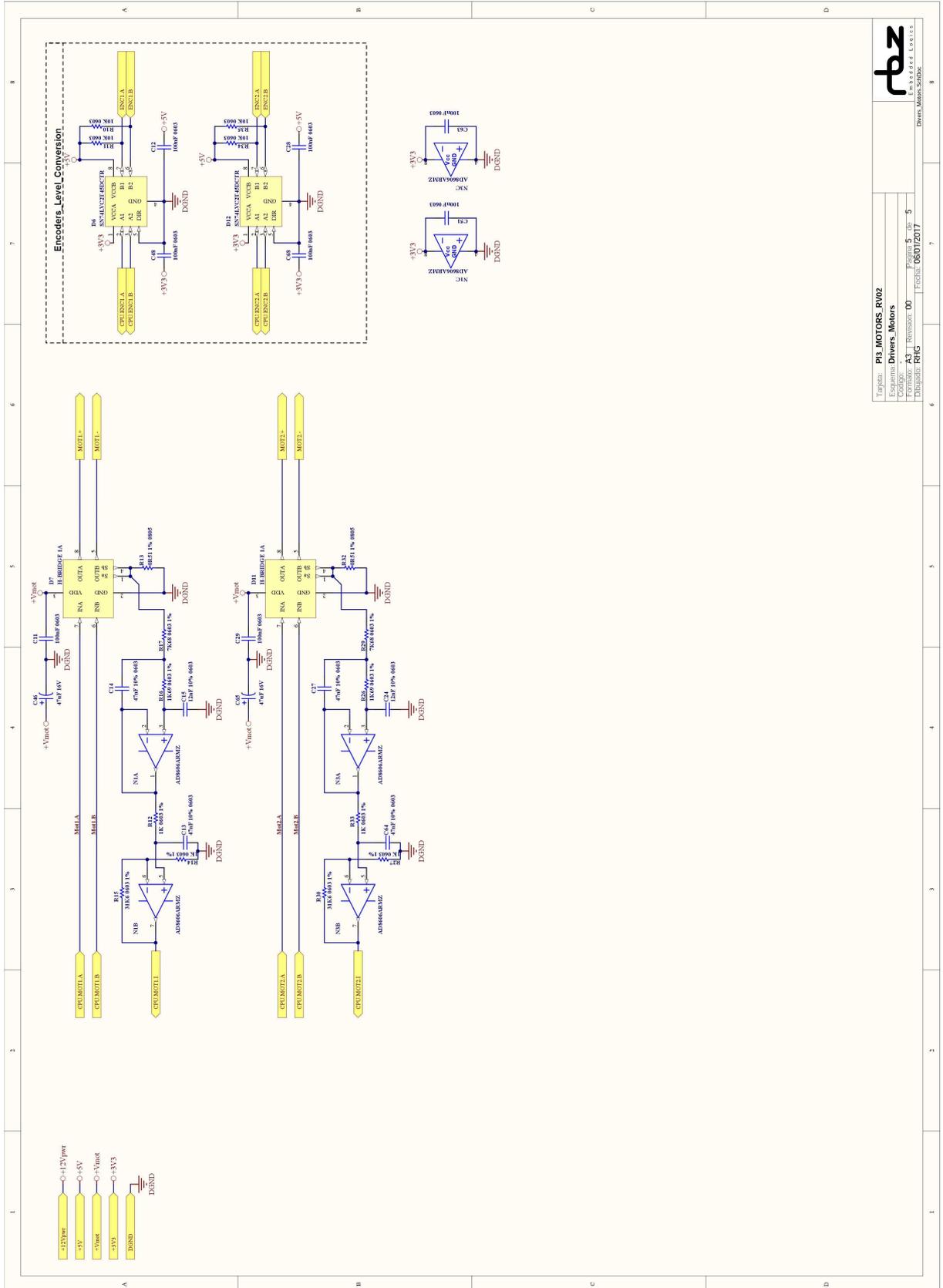


Figura A.5: Hoja Drivers Motors 5/5

Apéndice B

Ilustraciones PCB

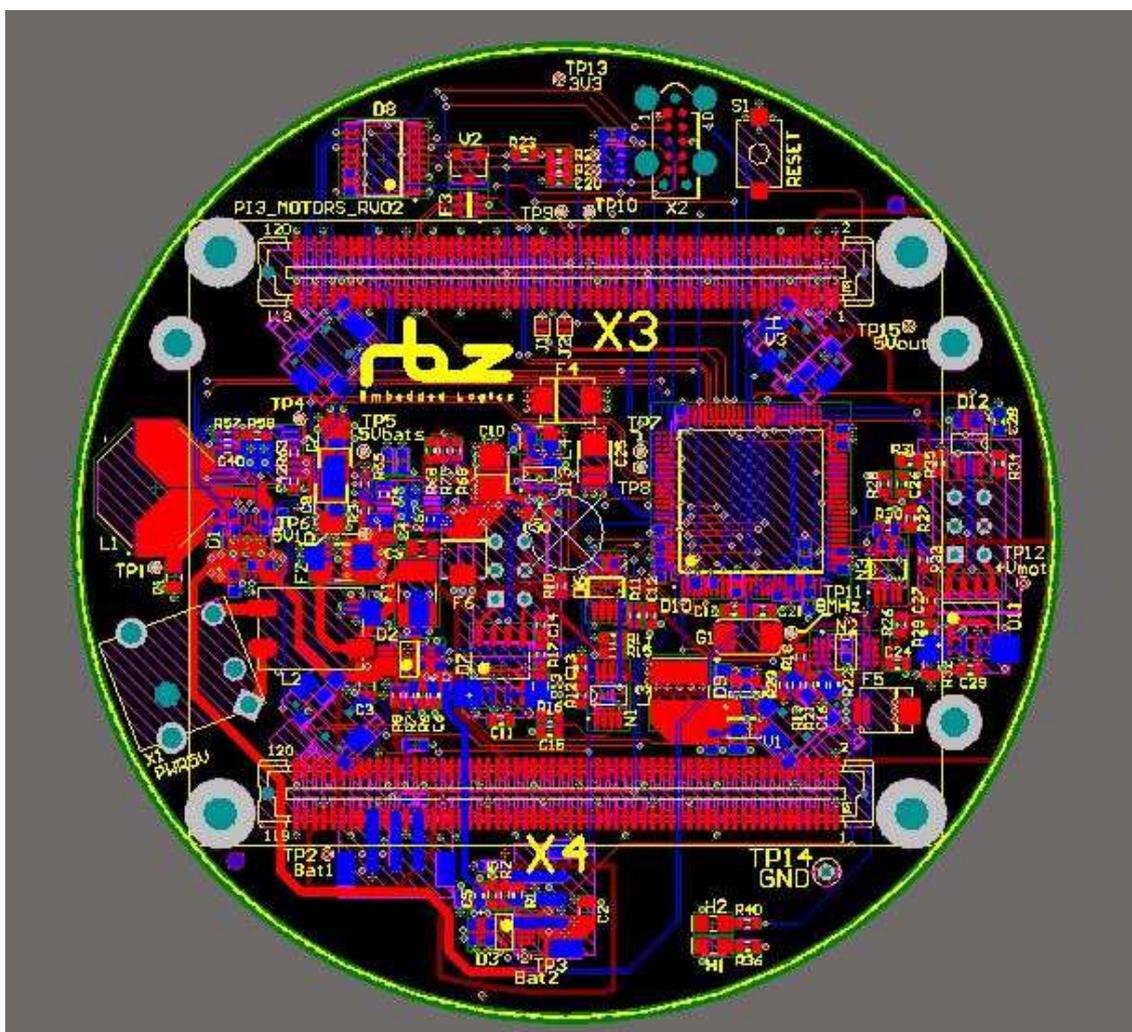


Figura B.1: Diseño final de la PCB con los planos de masa

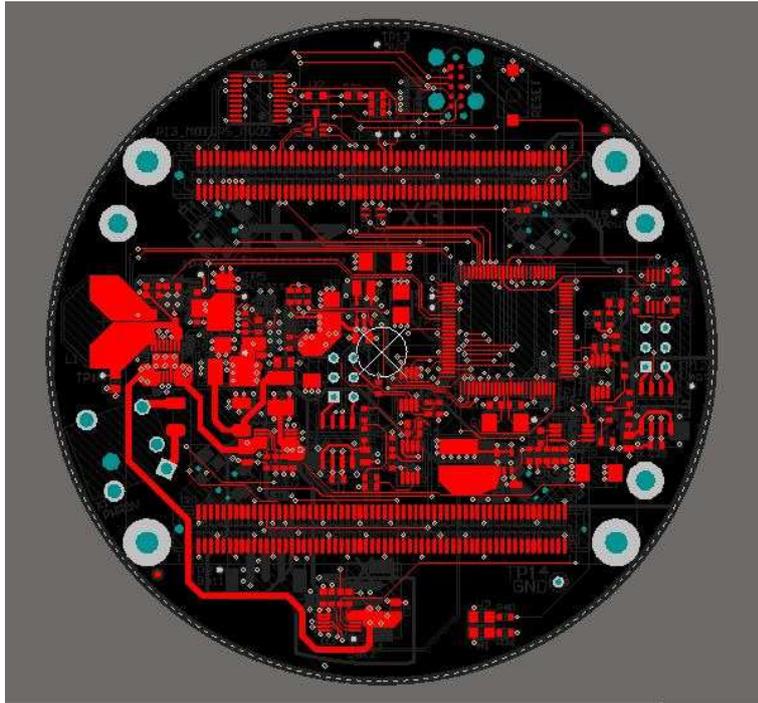


Figura B.2: Footprints y pistas de la capa superior

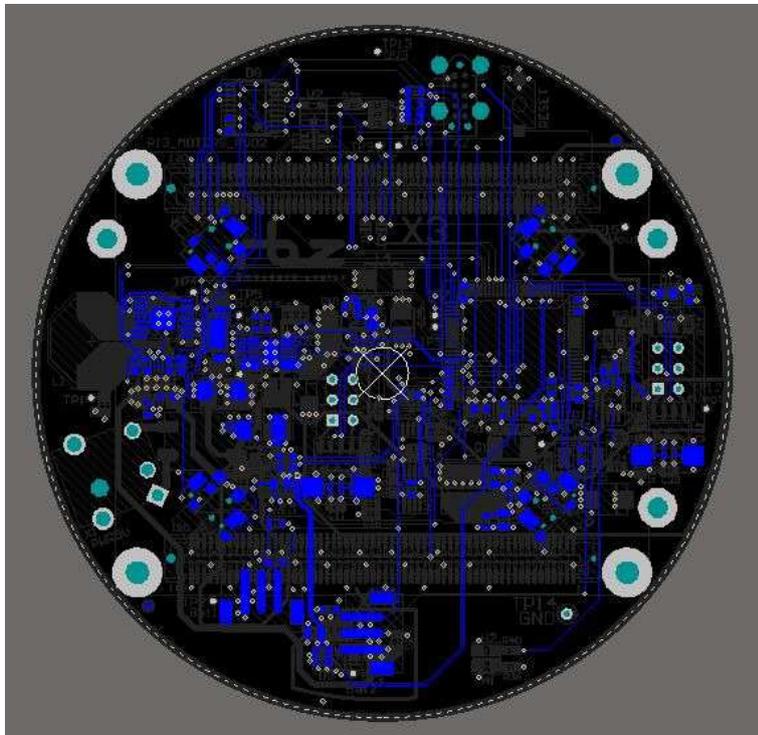


Figura B.3: Footprints y pistas de la capa inferior

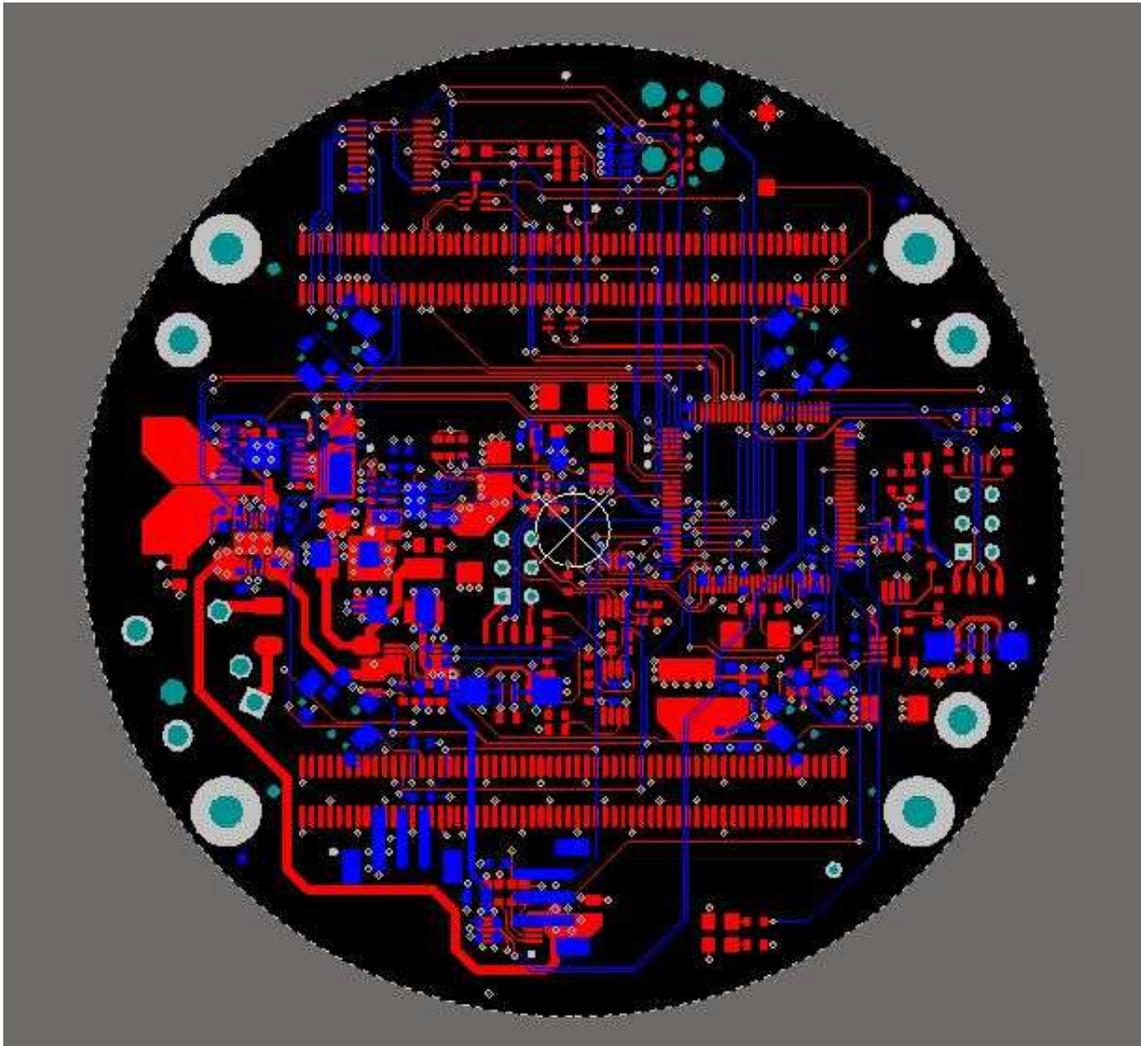


Figura B.4: Footprints y pistas de ambas caras juntas

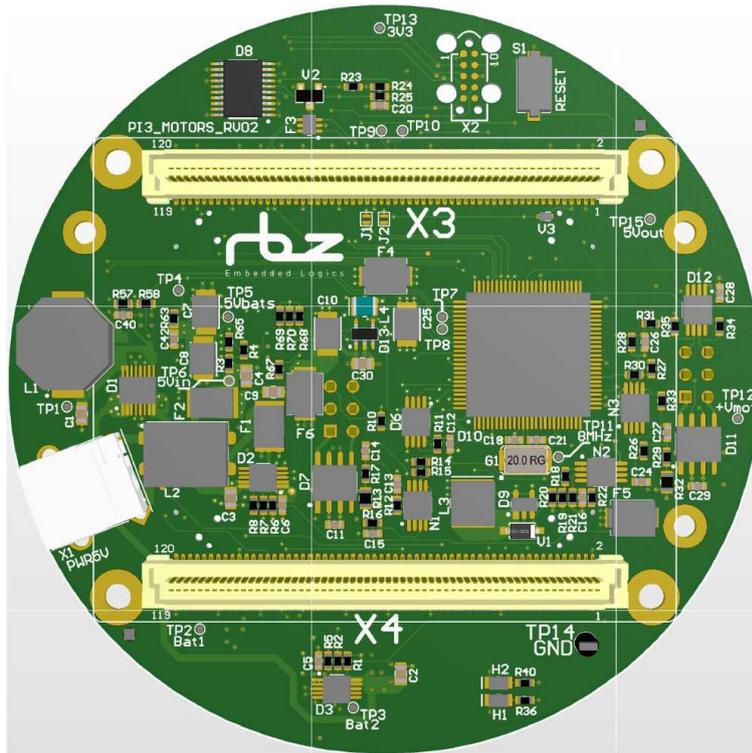


Figura B.5: Diseño 3D de los componentes de la capa superior

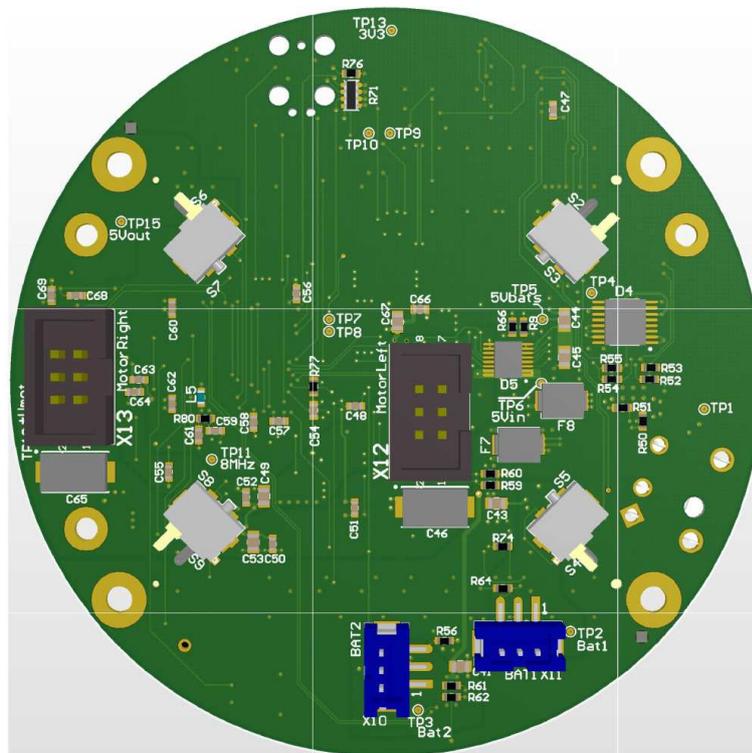


Figura B.6: Diseño 3D de los componentes de la capa inferior

Apéndice C

Lista de Materiales

Designator	Quantity	Montaje	Precio	Referencia	Value
C1, C2, C3, C4, C9, C41, C43, C45, C49, C53	10	-	0,499€	GRM21BR61C106KE15	10uF 0805 16V
C5, C6, C11, C12, C20, C28, C29, C47, C48, C50, C51, C52, C54, C55, C56, C57, C58, C59, C60, C61, C62, C63, C66, C68, C69	25	-	0,031€	GRM188R71H104KA93D	100nF 0603
C7, C8, C10, C25	4	-	0,7€	TPSB107K006R0400	100uF 6.3V
C13, C14, C16, C26, C27, C64	6	-	0,026€	CC0603KRX7R9BB473	47nF 10 % 0603
C15, C24	2	-	0,1€	GRM188R71H123KA01D	12nF 10 % 0603
C18, C21	2	-	0,03€	C0603C100J5GACTU	10pF 0603
C30, C44, C67	3	-	0,407€	LMK212BJ226MG-T	22uF 0805 10V
C40, C42	2	-	0,123€	GRM188R60J475KE19D	4,7uF 0603 6.3V
C46, C65	2	-	0,30€	293D476X0016D2TE3	47uF 16V
D1, D5	2	-	5,85€	LTC4415EMSE ;	4A PWR SW
D2, D3	2	-	0,83€	LTC4415IMSE MCP73833-FCI/UN	
D4	1	-	4,26€	TPS61032PWP	DC/DC Boost 5V out
D6, D12	2	-	0,67€	SN74LVC2T45DCTR	2Bit Transcvr

Continúa en la página siguiente.

Designator	Quantity	Montaje	Precio	Referencia	Value
D7, D11	2	-	3.78€	SI9986DY-T1-E3	H-BRIDGE 1A
D8	1	-	0.33€	74LCX245MTC	-
D9	1	-	1,03€	MIC2288YD5	Boost DC/DC
D10	1	-	13,12€	STM32F103VET6	ARM Cortex M3
D13	1	-	1,57€	ADP2108AUJZ-3.3-R7	DC/DC 3.3V 600mA
F1, F2	2		0,67€	MF-MSMF250/16-2	F.Rearm 2.5A 16V
F3	1	-	0,68€	NUF2221W1T2G	ESD&FILTRO USB
F4	1	-	0,58€	SMBJ3V3-E3/52	TVS3V3
F5	1	-	0,29€	SMBJ12A	TVS12V
F6, F7, F8	3	-	0.29€	SMBJ5.0A	TVS5V
G1	1	-	1,27€	NX5032GA 8MHZ AT-W	8MHz
H1, H2	2	-	0,10€	APT2012SGC	LED Verde 0805
J1, J2	2	-	0€	-	Jumper Solda- dura Config
L1	1	-	0,71€	SRU1048-6R8Y	6,8uH 4.8A
L2	1	-	1,27€	ACM9070-701-2PL-TL	700ohm @100Mhz 5A
L3	1	-	0,48€	SRR4018-100Y	10uH 1.3A
L4	1	-	0,35€	LQM2HPN1R0MG0L	1uH 1,6A
L5	1	-	0,058€	LI0603D301R-10	FB300R .4A
N1, N2, N3	3	-	2,06€	AD8606ARMZ	OPAMP DUAL R- R I/O LN 8-MSOP
R1, R2, R5, R7, R8, R10, R11, R24, R34, R35, R52, R53, R54, R55, R56, R57, R58, R59, R60, R61, R62, R63, R64, R67, R68, R69, R70, R74, R77	29	-	0.03€	CRCW060310K0JNEA	10K 0603
R3, R4, R9	3	-	0,059€	CRCW06031K80JNEA	1K8 0603
R6, R23	2	-	0,02€	ERJ-3GEYJ302V	3K 0603

Continúa en la página siguiente.

Designator	Quantity	Montaje	Precio	Referencia	Value
R12, R14, R21, R27, R28, R33, R36, R40	8	-	0,03€	CRCW06031K00FKEA	1K 0603 1 %
R13, R32	2	-	0,31€	RL1220S-R51-F	0R51 1 % 0805
R15, R30	2	-	0,071€	CRCW060331K6FKEA	31K6 0603 1 %
R16, R26	2	-	0,071€	CRCW06031K69FKEA	1K69 0603 1 %
R17, R29	2	-	0,071€	CRCW06037K68FKEA	7K68 0603 1 %
R18	1	(DNP)	0,04€	RMCF0603FT1K24	1K24 0603 1 %
R19	1	-	0,051€	ERJ-3EKF1301V	1K3 0603 1 %
R20	1	-	0,012€	RC0603FR-0711K3L	11K3 0603 1 %
R22, R31	2	-	0,064€	CRCW06032K87FKEA	2K87 0603 1 %
R25	1	-	0.03€	CRCW06030000Z0EA	0ohm 0603
R50, R51, R65, R66	4	-	0,055€	RC0603FR-07249RL	249R 0603 1 %
R71	1	-	0,009€	YC164-JR-0710KL	ResPack 4x10K
R76	1	(DNP)	0.03€	CRCW0603100KJNEA	100K 0603
R80	1	-	0.054€	CRCW060347R0JNEA	47ohm 0603
S1	1	-	0,37€	KSR231GLFS	Push Vertical PCB
S2, S4, S6, S9	4	(DNP)	1,16€	900BGQ	Sw.Det.2mm
S3, S5, S7, S8	4	-	0,47€	ESE-11MH2T	Sw.Det.5mm
TP14	1	-	0,30€	5001	Test Point Anilla
V1	1	-	0,37€	MBRX160-TP	Schottky 1A 60V
V2	1	-	0.17€	BSS84P L6327	-
V3	1	-	0,08€	BAT54WX-TP	Diodo Schotthy 0.2A 30V SOD-523
X1	1	-	0,93€	PJ-051A	Power Yack Acod 2.1mm
X3, X4	2	-	4,51€	61083-124402LF	Con120p Mezz Type p.0.8mm
X10, X11	2	-	0,565€	B3B-PH-SM4-TB	Conector 3pin recto paso 2mm
X12, X13	2	-	0,66€	5446-3060	Con2x3 Recto 2.54mm

Tabla C.1: Lista de Materiales

Bibliografía

- ADP2108 (2016). Compact, 600 ma, 3 mhz, step-down dc-to-dc converter. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADP2108.pdf>. 8/1/2017.
- Alonso, J. A., Blanco, S., Blanco, S., Escribano, R., González, V. R., Pascual, S., and Rodríguez, A. (2004). *Tecnologías de la información y de la Comunicación*. Ra-Ma, España.
- Braitenberg, V. (1984). *Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology*. The MIT Press, Cambridge, MA.
- Cyberbotics (2015). e-puck. <https://www.cyberbotics.com/e-puck.pdf>. 29/12/2016.
- González, V. R. (2015). Control y robótica. tema: Fundamentos de robótica. http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/index.htm. Curso provincial. CFIE Valladolid II. Asesoría de Tecnología y FP. 28/12/2016.
- Magenat, S., Retornaz, P., Vaussard, F., and Mondada, F. (2010). Aseba: An event-based architecture for distributed control of mobile robots. <http://robots.epfl.ch/aseba.php>. 29/12/2016.
- Mondada, F. and Bonani, M. (2010). e-puck. http://www.e-puck.org/index.php?option=com_content&view=article&id=18&Itemid=24. 29/12/2016.
- Pololu (2015). 100:1 micro metal gearmotor lp 6v. <https://www.pololu.com/product/992>. 9/1/2017.
- Robolabo (2016). Laboratorio de control. <http://robolabo.etsit.upm.es/>. 14/1/2017.
- STM (2015). Stm32f103xc, stm32f103xd, stm32f103xe. <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/59/f6/fa/84/20/4e/4c/59/CD00191185.pdf/files/CD00191185.pdf/jcr:content/translations/en.CD00191185.pdf>. 9/1/2017.
- Turnero, P. (2015). Sensores. <http://www.monografias.com/trabajos106/robotica-industrial-sensores/robotica-industrial-sensores.shtml>. 26/12/2016.
- Valencia, J. A., Montoya, A., and Hernando, L. (2009). Modelo cinemático de un robot móvil. *Scientia et Technica, ISSN 0122-1701*, 1(41):191–196.

Vildósola, E. (2013). Actuadores. <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/actuadores.pdf>. 27/12/2016.