



Departamento de
Informática e Ingeniería
de Sistemas
Universidad Zaragoza



Trabajo Fin de Grado

Diseño y Desarrollo de un Robot educativo modular

Autora: Diana Blas Bretín

Director: Luis Antonio Martín Nuez

Ponente: Ana Cristina Murillo Arnal

Ingeniería Electrónica y Automática

Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza

Fecha: Diciembre 2018



(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Diana Blas Bretín,

con nº de DNI 77132144B en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado

Diseño y Desarrollo de un robot educativo modular, (Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, a 21 de noviembre de 2018

Fdo: Diana Blas Bretín

Resumen

La robótica educativa ha tenido mucho auge en los últimos años por los beneficios que presenta su uso como herramienta didáctica. Los estudios demuestran que promueve el interés por las materias técnicas en los niños, es por esto que cada vez encontramos más plataformas disponibles con este fin.

Este proyecto, desarrollado dentro de la empresa Innovart, propone una nueva plataforma robótica educativa diseñada desde cero, e incluye desde el planteamiento de los requisitos del proyecto, hasta el diseño, desarrollo y la evaluación del mismo. La motivación que impulsa su elaboración es conseguir una plataforma robótica educativa que sea más versátil, en cuanto a funcionalidades, y más asequible que las existentes en el mercado.

El robot diseñado consiste en una placa principal (*chasis*) basada en *Arduino*, y diversos módulos conectables: 1) Botonera con Luz, compuesto por cinco pulsadores con leds integrados, un potenciómetro y un zumbador; 2) *Siguelíneas*, compuesto por cinco sensores de infrarrojos y uno de color; 3) Detección de obstáculos, compuesto por un sensor de ultrasonidos y dos *LDR*; 4) Pantalla y Gestos, compuesto por una pantalla *OLED* y un sensor de gestos; 5) Comunicaciones I, compuesto por un módulo de *Bluetooth* y otro de *Wifi*; 6) Comunicaciones II, compuesto por un módulo de *RFID*; 7) Panel Táctil, compuesto por un sensor táctil. Cada uno de los módulos tiene un aporte didáctico diferente por los componentes que lo forman y los protocolos de comunicación que utiliza.

Este documento describe en detalle todas las tareas llevadas a cabo para su desarrollo. En primer lugar, el estudio de mercado y de las diferentes alternativas posibles para la plataforma. Después, se han definido los objetivos principales a cubrir y se han realizado pruebas con los componentes deseados a modo de prototipo. A continuación, se han diseñado y mandado a fabricar las distintas placas que forman el robot. Por último, se han soldado los componentes, probado las placas y corregido los posibles errores provenientes del diseño de las mismas. Además, se han programado una serie de pequeños programas de prueba o ejemplo para que el usuario vea como utilizar algunos de los componentes principales fácilmente.

El proyecto se ha llevado a cabo de forma satisfactoria, y se han conseguido solucionar los problemas que han ido surgiendo en el desarrollo del mismo. La plataforma construida cumple todos los objetivos propuestos, consiguiendo un prototipo funcional que la empresa quiere utilizar en sus actividades formativas para niños.

Índice general

Índice	II
1. Introducción	1
1.1. Motivación y Contexto	1
1.2. Trabajo Relacionado	2
1.3. Objetivos y Tareas	4
1.4. Resumen del contenido	5
2. Estudio de alternativas	7
2.1. Plataformas educativas existentes	7
2.2. Definición de objetivos para la nueva plataforma	8
2.3. Prototipado inicial	8
2.3.1. Opciones del diseño en general	9
2.3.2. Opciones de sensores y componentes	9
3. Diseño del prototipo propuesto	11
3.1. Chasis del Robot	11
3.2. Módulos Conectables o <i>Shields</i>	12
3.3. Construcción en madera	16
4. Diseño electrónico y Evaluación de las placas	18
4.1. Búsqueda de documentación y diseño de componentes	18
4.2. Diseño electrónico: esquemático y <i>PCB</i>	19
4.3. Soldadura y evaluación de las placas	22
5. Prototipo final	24
5.1. Montaje del prototipo	24
5.2. Manual de uso	26
5.3. Programas de ejemplo para el prototipo	27
6. Conclusión	31
6.1. Problemas encontrados	31
6.2. Conclusiones técnicas	33
6.3. Conclusiones personales	33
6.4. Trabajo Futuro	33
Anexos	34
A. Estudio de mercado	35

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	III
B. Presupuesto	38
C. Uso de pines del microcontrolador	39
D. Diseño electrónico de las placas	41
Bibliografía	49

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación y Contexto

La idea de este proyecto surge en Innovart¹, empresa donde realicé mis prácticas. Su trabajo está muy ligado a la tecnología en general pero más concretamente a la electrónica y la robótica con fines educativos y artísticos. Tras darse cuenta de que la oferta de robots existentes en el mercado no cubría las necesidades que tenían de la manera más idónea, siguiendo su principio de acercar la tecnología a los niños, se empieza a desarrollar la idea de construir un nuevo robot programable educativo y se propone el arranque de este proyecto.

Como requisito previo general, se estableció que el uso de este robot fuera tanto el de herramienta multiusos para el aprendizaje de diversas áreas (de las que cabe destacar la electrónica y la informática), como un medio para desarrollar la creatividad, visión espacial, trabajo en equipo y para comprender conceptos abstractos y complejos de las ramas de la mecánica, las matemáticas o la física.

Actualmente existen muchos robots educativos que podríamos dividir en dos grupos:

- Por un lado, los diseñados para llevar a cabo tareas muy concretas. Sus funciones están limitadas, impidiendo así fomentar al creatividad en los niños. Algunos ejemplos son: los robots *siguelineas* como el *Cyclops*², de programación secuencial de movimientos como el *Bee-Bot*³, Fig. 1.1(a), interactivos-expresivos como *Zowi*⁴, Fig. 1.1(d), dirigibles por control remoto...
- Por otro lado, encontramos aquellos en los que puedes intercambiar sensores y actuadores aislados, pero no módulos conectables con diseños/opciones más complejas. Entendemos **módulo conectable** por una placa con un conjunto de sensores conectados a ella, que permitirían modificar totalmente la funcionalidad.

¹www.innovart.cc

²www.github.com/Resaj/cyclops-project

³www.bee-bot.us

⁴zowi.bq.com/es/

Por ejemplo: *LEGO Mindstorms*⁵, Fig. 1.1(e), o *MOSS*⁶, Fig. 1.1(f). Otro problema de estos es que su precio suele ser elevado y se incrementa con el número de sensores que deseemos.

Los objetivos más detallados y tareas realizadas se encuentran descritos en la sección 1.3, pero de manera general, dados los problemas más comunes detectados en las plataformas existentes, la motivación de este proyecto es conseguir mejorar en tres aspectos:

- Versatilidad: la modularidad ofrece la posibilidad de aprender a utilizar más componentes y protocolos en un contexto amigable en el que los niños pueden ver usos reales y prácticos de cada uno de los sensores y actuadores.
- Facilidad de uso: tanto para los niños que lo utilicen como para los maestros. Se propondrán programas de muestra algunas de las placas, suficientes para un uso básico del robot, y algún programa de integración más avanzado. Esto se ve reforzado al tratarse de una plataforma de código abierto donde es público el trabajo de toda la comunidad.
- Bajo precio: se quiere desarrollar una plataforma con componentes del menor precio posible que cumplan los objetivos de este proyecto.

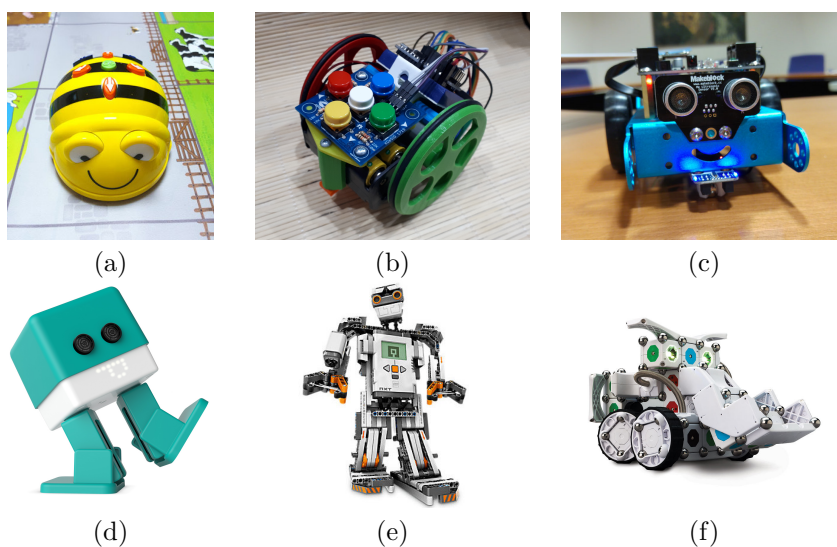


Figura 1.1: Distintos ejemplos de plataformas educativas de robótica. (a) Bee-Bot. (b) Escornabot. (c) mBot. (d) Zowi. (e) *LEGO Mindstorms*. (f) Robot MOSS.

1.2. Trabajo Relacionado

En cuanto al trabajo relacionado, podemos dividirlo en tres bloques de referencia: estudios sobre la robótica educacional y sus beneficios, otros proyectos

⁵www.lego.com/es-es/mindstorms

⁶www.modrobotics.com/moss/

de construcción de robots educativos y documentos técnicos de referencia de las herramientas utilizadas en este proyecto.

Estudios de robótica educacional. Existen numerosos escritos sobre los beneficios de la integración de las tecnologías, y más concretamente la robótica, a la hora de promover el interés de las materias más técnicas en los niños. Entre ellos encontramos publicaciones internacionales, como el libro *STEM integration in K-12 education*[1], o estudios a nivel nacional, como *La robótica educativa, una herramienta para la enseñanza-aprendizaje de las ciencias y las tecnologías*[2] o *Uso de la robótica educativa como herramienta en los procesos de enseñanza*[3]. En ellos se remarca el proceso doblemente activo de aprendizaje, en el sentido de vista intelectual y desde el punto de vista sensorial[4], al abordar las asignaturas técnicas desde un punto de vista más práctico.

El auge de la robótica en los últimos años ha sido muy destacable, es por ello que encontramos tantas plataformas disponibles hoy en día, como respuesta a la gran demanda de padres, niños y educadores. A continuación resumimos las más populares en el sector educativo.

Plataformas robóticas educativas. Encontramos numerosos proyectos, con características similares al nuestro, cada vez más integrados en las aulas. Por un lado están los robots comerciales, como los anteriormente nombrados *LEGO Mindstorms* o *Bee-Bot*. Por otro lado, y con mayor relevancia para nosotros, encontramos los dispositivos que han surgido en la comunidad *maker*[5]. Se trata, en muchos casos, de robots de bajo coste, con materiales fácilmente adquiribles y con mucho contenido *open source* hecho y explicado por individuos tanto cualificados como *amateur*, lo que favorece la comprensión por los usuarios menos cualificados. Entre ellos cabría destacar el proyecto *Escornabot*⁷, ver Fig. 1.1(b), y el robot *Garabullo*⁸ (inspirado en el anterior). Estas dos plataformas son *hardware/software* abierto y tienen una filosofía clara: impulsar la robótica para hacerla llegar a todos los niños apoyándose en la comunidad.

Como se ha comentado en la introducción, estas plataformas tienen limitaciones que intentamos paliar con la plataforma propuesta en este trabajo.

Documentación base para el desarrollo. Uno de los principales entornos de prototipado hoy en día, y que es el principal utilizado en este proyecto, es el entorno de desarrollo *Arduino*⁹. Encontramos numerosa documentación, tanto *online*[6], como en publicaciones más formales, como el libro *ARDUINO a fondo*[7], describiendo los principales elementos del entorno, sus opciones, componentes e instrucciones y ejemplos de programación y uso.

Para la parte específica de diseño electrónico se ha utilizado el entorno *Eagle*¹⁰. En la propia web aparecen las instrucciones para montar los circuitos de manera esquemática y diseñar las *PCB* (*Printed Circuit Board*) que van a ser fabricadas.

La referencia principal para el diseño de las distintas etapas electrónicas ha sido el libro *Principios de electrónica*[8]. Se ha consultado esencialmente lo

⁷www.escornabot.com/web/

⁸www.github.com/garabullo/garabullo2018

⁹www.arduino.cc

¹⁰www.autodesk.com/products/eagle/overview

referente a la regulación y conversión de tensión y corriente para las etapas de alimentación.

1.3. Objetivos y Tareas

El **objetivo general** de este proyecto es diseñar y desarrollar un robot modular orientado a la educación de disciplinas técnicas para niños de entre 6 y 14 años. Los problemas principales que presentan otros proyectos similares, como se ha explicado antes, son sobre todo el precio de los robots con más funciones y la falta de versatilidad de los robots más económicos. Aquí se quiere integrar en una sola plataforma las funcionalidades de muchos de los robots existentes, pero a un precio más asequible. Se quiere conseguir: 1) Facilitar que los niños sean conscientes de toda la parte *hardware* que hay detrás del robot. La plataforma no constará de una carcasa, permitiendo así que toda la parte eléctrica y electrónica sea visible. 2) Acercar a los usuarios a la programación de manera que puedan ver la parte de *software* directamente reflejada en la realidad a través de las acciones del robot. 3) Ayudar en la formación en otras áreas del conocimiento a través de los distintos juegos y aplicaciones predeterminadas.

Los principales **problemas que se afrontan** están relacionados con el desarrollo tanto *hardware* como *software* de dicha plataforma. A nivel de *hardware* hay que lograr la compatibilidad entre todos los módulos y encontrar los componentes adecuados. A nivel de *software*, hay que desarrollar los programas y librerías necesarios para que los usuarios puedan programar el robot en un lenguaje de alto nivel.

Para alcanzar estos objetivos, las distintas tareas que se han llevado a cabo han sido:

1. Estudio estado del arte: se analizaron numerosos robots con finalidad educativa para determinar las funciones más y menos deseadas. Para estudiar las cualidades con más y menos éxito se investigó en las principales páginas de *crowdfunding*.
2. Definición de objetivos/requisitos para conseguir dar al proyecto propuesto un valor añadido con respecto al resto de robots existentes: se fijó un listado inicial de prestaciones deseadas para el robot y a partir de ahí se definieron los módulos principales con los que contaría.
3. Estudio y evaluación de los sensores y actuadores que irán incluidos en los módulos y chasis del robot: se hizo una selección inicial de varios modelos de bajo coste de cada uno de los sensores atendiendo, principalmente, a detalles técnicos y se procedió a realizar pruebas experimentales para verificar su funcionamiento ya que en algunos de ellos la documentación era escasa o incluso inexistente.
4. Prototipado, diseño electrónico y pruebas de las placas (tanto para el chasis como para los módulos). Organizado en varias subtarefas:
 - Prototipado: se distribuyeron los componentes de mayor tamaño en las distintas placas para definir la forma de cada una y se procedió a fabricar un prototipo en madera para probar su manejabilidad.

- Diseño electrónico (con el programa *Eagle*).
 - Pruebas básicas placas: se comprobó el funcionamiento de cada parte del circuito y se anotaron los errores encontrados para corregir en versiones futuras.
5. *Software* y aplicaciones: implementación de algún programa de ejemplo con las funciones básicas de los módulos. Se partió de los códigos utilizados en los prototipos iniciales hechos con *Arduino UNO* y se combinaron en programas más completos para mostrar algunas de las aplicaciones del robot.
 6. Manual de usuario y documentación de la memoria. Documentación de todo el proceso del proyecto y unas pequeñas instrucciones de cómo usar el robot.

La Figura 1.2 muestra la duración aproximada de cada tarea realizada. Las principales herramientas que se han utilizado durante la realización de todas estas tareas para la creación de la plataforma robótica han sido: los entornos de desarrollo *Arduino* y *Eagle* para todo el diseño y programación de las placas en general y otros programas y entornos para tareas más específicas como *GIMP*, *Inkscape* o *Tinkercad*.

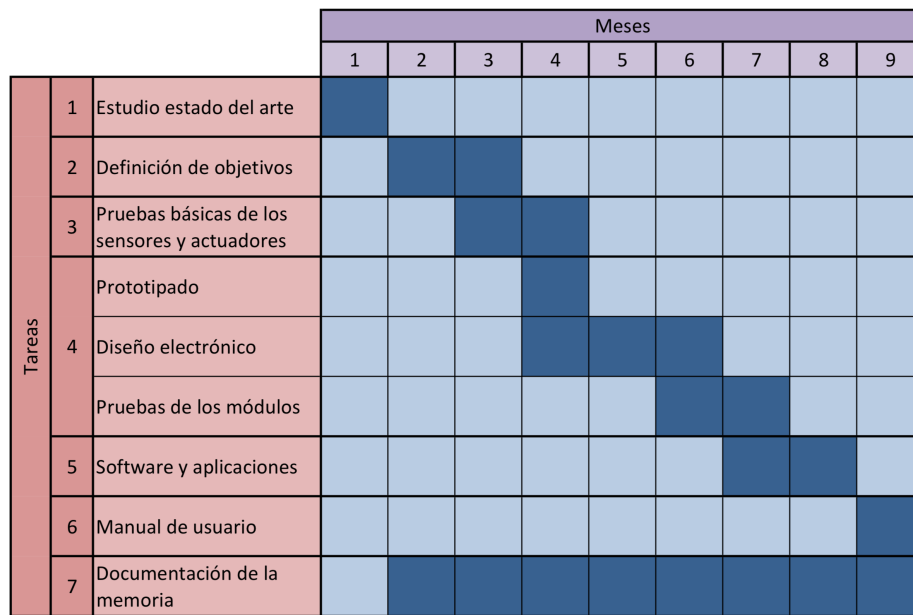


Figura 1.2: Cronograma de las tareas realizadas a lo largo del desarrollo del proyecto, entre marzo y noviembre de 2018.

1.4. Resumen del contenido

A continuación, se resume brevemente el contenido de cada capítulo y de cada anexo de este documento.

En el capítulo 2 (Estudio de alternativas), se definen los diferentes objetivos a cumplir en el proyecto a partir del estudio de mercado realizado. Se describe el prototipo inicial de carácter teórico con los posibles componentes electrónicos y módulos que integrarán la plataforma. A continuación, se explican las elecciones de los distintos modelos o tipos de sensores, actuadores y otros componentes tomadas en función de lo que más se adaptaba a los objetivos.

En el capítulo 3 (Diseño del prototipo propuesto), se expone la lista final de módulos con los que contará el robot y se explican más exhaustivamente las características, la utilidad y problemas encontrados en el desarrollo de cada uno de ellos, además de concretar los elementos de la placa base del robot.

En el capítulo 4 (Diseño electrónico y Evaluación de las placas), se presentan los pasos seguidos para el diseño de cada una de las placas. Además, se explican las etapas electrónicas de mayor complejidad y el procedimiento seguido en la fase de soldadura y evaluación del funcionamiento de las placas.

En el capítulo 5 (Prototipo final), se dan las instrucciones básicas para utilizar el robot y se explican los ejemplos que se han creado para la evaluación del prototipo.

En el capítulo 6 (Conclusiones), se muestran los principales problemas enfrentados en las distintas fases. También se presentan una serie de conclusiones sobre los conocimientos adquiridos a nivel técnico y personal durante el desarrollo del trabajo. Por último, se describen las posibles vías de ampliación del proyecto.

En el Anexo A (Estudio de alternativas en el mercado), se resumen las plataformas con características similares a la nuestra existentes en la actualidad. Para cada una de ellas se especifican sus funcionalidades principales y su precio.

En el Anexo B (Presupuesto de la plataforma desarrollada), se indica el precio de cada uno de los componentes que forman el robot, el coste de fabricación de las placas y el precio total de la plataforma.

En el Anexo C (Uso de pines del microcontrolador), aparece una tabla con la distribución de los pines del microcontrolador para el chasis y los módulos de la plataforma.

En el Anexo D (Diseño electrónico de las placas), se muestran los esquemáticos y *PCB* del chasis y de los distintos módulos.

Capítulo 2

Estudio de alternativas

Este capítulo recopila los resultados del estudio realizado sobre las alternativas consideradas. En primer lugar, analizando las plataformas robóticas existentes, y a continuación, comparando los distintos modelos de sensores y otros componentes en base a sus características técnicas, estéticas y precio.

2.1. Plataformas educativas existentes

El estudio sobre las plataformas existentes se llevó a cabo por tres vías:

- Investigación general en Internet acerca de las plataformas educativas más populares. Algunas fuentes a destacar son el blog *Robotsparaninos*¹ o las tiendas online *rctecnic*², *ro-botica*³ o *juguetrónica*⁴
- Búsqueda más exhaustiva en páginas web de *crowdfunding* (e.g., *Kickstarter*⁵ e *indiegogo*⁶) de proyectos con características interesantes desde un punto de vista pedagógico.
- Se consultó la opinión de distintos profesionales del ámbito educativo (profesores de primaria y secundaria y profesionales con experiencia en impartir talleres para niños) sobre los robots más utilizados hoy en día en las aulas.

La segunda vía explorada fue en la que se encontró información más interesante, ya que son proyectos muy documentados que, además, muestran sus metas económicas y si se han llegado a conseguir o no. Esta información fue clave en la definición de objetivos.

Los resultados de esta investigación se presentan más en detalle en el AnexoA, donde se encuentran desglosadas las características técnicas y aplicaciones de cada una de las plataformas estudiadas.

Las principales conclusiones del estudio realizado fueron:

¹www.robotsparaninos.com/robots-educativos/

²www.rctecnic.com/298-robotica

³www.ro-botica.com/tienda/Educacion

⁴www.juguetronica.com/blog/robotica/

⁵www.kickstarter.com/?lang=es

⁶www.indiegogo.com

- Por lo general, se observa una falta de modularidad/flexibilidad en casi todos los robots en cuanto a los componentes hardware (sí que hay flexibilidad en cuanto a la forma, por ejemplo, los basados en *LEGO*, pero no en el intercambio de componentes electrónicos, como mucho dejan alternar entre unos pocos sensores).
- Aplicaciones/funciones más populares: juegos de luces, reproducción de sonidos, movimiento del robot, detección de obstáculos y *siguelíneas*.
- La práctica mayoría están dotados de Conectividad (*Bluetooth*, *Wifi*...).
- Falta de expresividad. La mayoría de las plataformas, salvo las de precio muy alto, no incluyen ninguna opción para que el robot comunique su estado o interactúe con el usuario.
- Precio: los robots con mayores prestaciones superan los 200-300 €.

A partir de estas conclusiones sacadas del análisis del mercado actual, se concretaron los objetivos a cumplir por la nueva plataforma a nivel técnico descritos a continuación.

2.2. Definición de objetivos para la nueva plataforma

Los objetivos principales que se quieren alcanzar con la plataforma propuesta en este proyecto son:

- Para dar modularidad al diseño se crearán al menos 5 *shields*, conectables simultáneamente.
- Se incluirán las funciones y aplicaciones más populares extraídas en el estudio del estado del arte.
- Se dotará a la plataforma de conectividad para que pueda ser manejada desde dispositivos móviles o tablets.
- Incluirá una pantalla y un altavoz con los que poder expresar emociones y comunicarse con el usuario.
- El precio del robot junto con 7 módulos no superará los 150. € En el Anexo B se encuentra el presupuesto de la versión final diseñada.
- Todo el software será de código abierto, facilitando así la programación completa con el entorno gratuito de *Arduino* de cada una de las placas.

2.3. Prototipado inicial

Esta sección resume las distintas alternativas consideradas para el prototipo inicial y las principales decisiones de diseño tomadas.

2.3.1. Opciones del diseño en general

Los principales aspectos de diseño para los cuales se han evaluado distintas alternativas son:

Placas de circuito impreso. El robot va a estar formado por una serie de *PCB* agrupadas en dos bloques: 1) **placa base**, a la que denominamos *chasis*, que incluirá algunos componentes esenciales como el microcontrolador y los motores. 2) una serie de **módulos conectables** en distintos lugares del *chasis* que incluirán los diversos sensores y actuadores.

Diseño y composición de los módulos conectables. Se discutieron dos aspectos generales en cuanto a estos módulos:

- Número de módulos y componentes incluidos en cada uno. Es necesario un compromiso entre cantidad de módulos/funcionalidades y facilidad de diseño/uso. Se propuso crear unos 6 módulos con una media de 3 sensores por módulo.
- Forma de conexión de los módulos. Se plantea la opción de conectar los módulos de manera que queden apilados. Esto presenta la ventaja del ahorro de espacio pero solo permite el acceso al módulo superior. Se deshecha esta opción y se opta por colocar de 2 a 4 conectores repartidos por el robot.

Geometría/Forma y locomoción del robot. Sobre el robot en sí, se quiere hacer lo más pequeño que los componentes permitan, y se han analizado los pros y contras de las geometrías posibles. Como se trata de un dispositivo móvil que será controlado por niños, se decidió hacer una forma sin esquinas con posibilidad de engancharse al moverse. La solución final será cercana a un óvalo.

En cuanto a la locomoción, se eligió la tracción diferencial (es decir, la dirección viene dada por la diferencia de velocidades entre las dos ruedas asociadas a los dos motores) por comodidad en el manejo y en las maniobras (permite la rotación sobre sí mismo). La configuración que más interesaba se trataba de dos ruedas independientes desplazadas ligeramente del centro y un punto de apoyo en el extremo contrario para mantener el equilibrio. También se consideró interesante que las ruedas pudieran ir incrustadas en el chasis sin sobresalir de manera que estas tampoco quedaran atascadas con los obstáculos.

2.3.2. Opciones de sensores y componentes

Microcontroladores. El microcontrolador, definido por la empresa, fue inicialmente un *ATmega328P* de la familia *Atmel AVR*. Ese mismo, es el que integran las placas de *Arduino UNO* con las cuales se ha trabajado más a fondo en Innovart. Los detalles que más interesaban de esta placa eran: su reducido precio, facilidad de adquisición, el número de pines (14 entradas/salidas de propósito general) y los distintos protocolos de comunicación con los que contaba (*I2C*, *UART* y *SPI*)⁷. El principal problema encontrado fue el número de pines ya que no eran suficientes. Por este motivo, se optó finalmente por un

⁷aprendiendoarduino.wordpress.com/2014/11/18/tema-6-comunicaciones-con-arduino-4/

modelo superior, el *ATmega2560*, con características técnicas muy similares (54 I/O pin, *I2C*, 4 *UART* y *SPI*) asumiendo una pequeña subida de coste.

Sensores y actuadores. Para los distintos sensores y actuadores se llevó a cabo una selección inicial en base a su precio, facilidad de adquisición y sus características técnicas. Las características más restrictivas en todo momento fueron: el número de señales necesarias para manejar cada sensor y el protocolo utilizado. De entre los buses con los que se contaba, el más interesante era el de *I2C* (bus maestro-esclavo) ya que no nos limitaba el número de periféricos a manejar. Por este motivo, se dio prioridad a todos los componentes que pudieran ser controlados por comunicación *I2C* y a los que necesitaran un menor número de pines en general. Los componentes de los cuales se encontraron y estudiaron más alternativas son:

- Los motores: se valoró la manejabilidad y el control de posición que aportaban los motores *DC*, servomotores y motores paso a paso. Se eligió un motor *DC* con caja reductora y encoder magnético integrado por ser compacto y fácil de usar.
- La pantalla: se consideraron distintos tipos de *displays* y se eligió finalmente la pantalla *OLED I2C* por su precio, muy bajo consumo y protocolo de comunicación.
- Medidor de distancia: se valoraron sensores de ultrasonidos y *TOF* (*time of flight*). Se seleccionaron los primeros, a pesar de su menor precisión, por tener un precio mucho menor.
- Se probaron cuatro modelos de sensores infrarrojos y se eligió finalmente el *CNY70* por su diseño estético ya que el resto de características no diferían en gran medida de unos a otros.
- Reproducción de audio: se seleccionó el *DFplayer mini* por su reducido tamaño, bajo coste y facilidad de uso frente a otros módulos más complejos.

Para todas las pruebas con estos se utilizó la placa *Arduino UNO* ya que utiliza un microcontrolador de la misma familia que el deseado para el robot y por la comodidad de uso que ofrece.

Otros componentes Para alimentar a la plataforma, se utilizará una batería de Litio recargable de 3.7V disponible en la empresa.

Por último, se analizan las alternativas que se consideraron para sujetar los motores al chasis. Se decidió diseñar una pieza para imprimir en 3D que sirviera a tal fin. Se plantearon varios diseños en los que se colocaban los motores por la parte superior de la placa y otros en los que se colocaban en la parte inferior. La elección final del diseño se dejó abierta hasta saber dónde interesaba más ponerlos en función del espacio disponible en cada una de las caras y del tamaño de la rueda deseado.

En el siguiente capítulo, se describe en detalle el diseño e implementación de la solución propuesta, tanto para el chasis como para los módulos, una vez realizadas ya las pertinentes pruebas de componentes viendo de esta manera qué combinaciones entre ellos podían resultar más atractivas.

Capítulo 3

Diseño del prototipo propuesto

La plataforma tiene dos componentes principales: el chasis del robot, con los zócalos para los módulos conectables, y dichos módulos o *shields*. La configuración final del prototipo propuesto (incluyendo el chasis y un módulo de cada tipo), detallada a continuación, supone un coste de unos 100. € este presupuesto se detalla en el Anexo B.

3.1. Chasis del Robot

Chasis La placa principal, o chasis, del robot estará gobernada por el microcontrolador *ATmega2560*¹. Este se encargará de gestionar la totalidad de los componentes del chasis y de los módulos.

Contará también con las distintas etapas de alimentación, circuito de carga de batería y la propia batería. Se incluirá, además, todo lo referente a los motores: el controlador (puente H) encargado de gestionar la velocidad y sentido de giro de ambos motores y el correspondiente conector para enchufarlos.

Los efectos de luz se crearán con una serie de *leds RGB*, denominados *Neo-Pixel*, dispuestos por todo el contorno de la placa. Para el sonido, se incorporará un pequeño altavoz y un módulo reproductor de audio.

Se añadirá también una *IMU* con 9 grados de libertad compuesta por un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro (cada uno de ellos aporta 3gdl).

Además, se ha decidido que sean 3 los módulos que puedan estar conectados simultáneamente. Se diseñarán, por lo tanto, tres conectores para este propósito; a los que nos referiremos como Zócalos.

Zócalos Estarán repartidos por el chasis del robot de la siguiente manera: habrá dos zócalos idénticos en la parte superior del dispositivo (uno delante y otro detrás) y otro en la parte inferior, con conexiones distintas. La conexión se realizará mediante parejas de pines macho-hembra. En la Figura 3.1 se muestra la distribución de pines para los zócalos superiores e inferior, para las caras *top* y *bottom* de la *PCB* respectivamente.

¹www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega2560

TOP							
Número de pin	Pin del microcontrolador	Código Arduino	Uso	Número de pin	Pin del microcontrolador	Código Arduino	Uso
1	ADC6	A6	LDR derecha	12	PA0	D22	Led pulsador 1
2	ADC5	A5	LDR izquierda	13	PA1	D23	Led pulsador 2
3	ADC1	A1	Pulsadores	14	PA2	D24	Led pulsador 3
4	ADC0	A0	Potenciómetro	15	PA3	D25	Led pulsador 4
5	PE5	D3	Interrupción RFID	16	PA4	D26	Led pulsador 5
6	RXD2	D17	Bluetooth	17	PA5	D27	Zumbador
7	TXD2	D16	Bluetooth	18	PA6	D28	Ultrasonidos
8	SCL	D21	SCL	19	TXD3	D14	Wifi
9	SDA	D20	SDA	20	RXD3	D15	Wifi
10	3V3	-	3V3	21	ADC7	A7	Detector de módulo
11	5V	-	5V	22	GND	-	GND

BOTTOM							
Número de pin	Pin del microcontrolador	Código Arduino	Uso	Número de pin	Pin del microcontrolador	Código Arduino	Uso
1	ADC4	A4	Infrarrojos 1	12	PH5	D8	Led sensor color
2	ADC3	A3	Infrarrojos 2	13	PH6	D9	Pin libre
3	ADC2	A2	Infrarrojos 3	14	PB4	D10	Pin libre
4	ADC10	A10	Infrarrojos 4	15	PB5	D11	Pin libre
5	PE5	D3	Interrupción RFID	16	PB6	D12	Pin libre
6	RXD2	D17	Bluetooth	17	PB7	D13	Pin libre
7	TXD2	D16	Bluetooth	18	ADC11	A11	Infrarrojos 5
8	SCL	D21	SCL	19	TXD3	D14	Wifi
9	SDA	D20	SDA	20	RXD3	D15	Wifi
10	3V3	-	3V3	21	ADC7	A7	Detector de módulo
11	5V	-	5V	22	GND	-	GND

	Pines exclusivos de top/bottom
	Pines comunes a los 3 zócalos

Figura 3.1: Distribución de los pines del micro en los 3 zócalos de conexión de los módulos. Hay 2 zócalos del tipo *TOP* y uno del tipo *BOTTOM*. Para cada módulo se indica el nombre del pin del microcontrolador, el código que se usa para accederlo con las librerías desde *Arduino* y el uso de dicho pin.

3.2. Módulos Conectables o *Shields*

Se ha dado un nombre a cada uno de los módulos que hace referencia a la aplicación o característica principal aunque estos pueden llevar a cabo funciones muy variadas. Los módulos propuestos son: 1) Botonera con Luz, 2) *Siguelíneas*, 3) Detección de obstáculos, 4) Pantalla y Gestos, 5) Comunicaciones I, 6) Comunicaciones II y 7) Panel Táctil.

Todos los módulos, que se describen en detalle a continuación, se pueden clasificar, atendiendo a los zócalos en los que se pueden conectar, en uno de estos tres grupos:

- Módulos exclusivos cara *top*.
- Módulos exclusivos cara *bottom*.
- Módulos aptos para *top* y *bottom*.

Módulo Botonera con Luz Exclusivo para insertar en uno de los dos zócalos de la cara superior. Se cogió la idea principal de la botonera del robot *Escornabot* (ver Fig. 3.2(a)). Sobre esta, se realizaron una serie de modificaciones. Se incluyeron un zumbador y un potenciómetro y se sustituyeron los pulsadores por unos con led incrustados (ver Fig. 3.2(b)).

Los **pines** que necesita este módulo son:

- 1 pin analógico para leer el potenciómetro.

- 1 pin analógico para leer los cinco pulsadores.
- 5 pines digitales para activar cada uno de los leds.
- 1 pin digital para el zumbador.

La **aplicación principal** de este módulo es trabajar la capacidad de planificación programando el recorrido del robot de manera secuencial con los pulsadores.

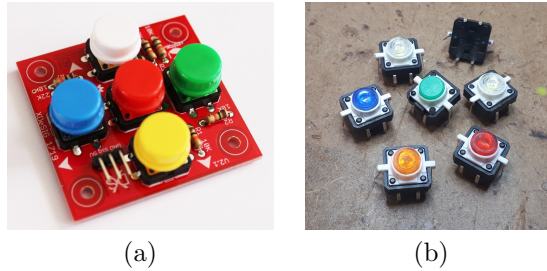


Figura 3.2: (a) Botonera robot. *Escornabot*. (b) Pulsadores con led integrado.

Módulo Siguelíneas Uso exclusivo en la cara inferior. Consta de cinco sensores de infrarrojos dispuestos en línea como los del proyecto *Cyclops* (ver Fig. 3.3(a)) y un sensor de color. En la Fig. 3.3(b) se ilustra el funcionamiento básico de este último.

Los **pines** que necesita este módulo son:

- 5 pines analógicos para leer cada uno de los sensores de infrarrojos.
- Los pines *SDA* y *SCL* para la comunicación por *I2C* del sensor color.

La **principal función** es la de seguir líneas, detectar los distintos colores del suelo y reaccionar de una manera u otra en función de estos.

Los **problemas** que hay que tener en cuenta con estos sensores es que la radiación exterior puede afectar en la medida de los *IR* y que es necesario iluminar la zona de la que se quiere conocer el color para que el sensor funcione correctamente. El primero queda directamente solucionado por el propio diseño, los infrarrojos se encuentran protegidos al ir por la parte de abajo muy cercanos al suelo. El segundo se soluciona colocando un pequeño led junto al sensor.

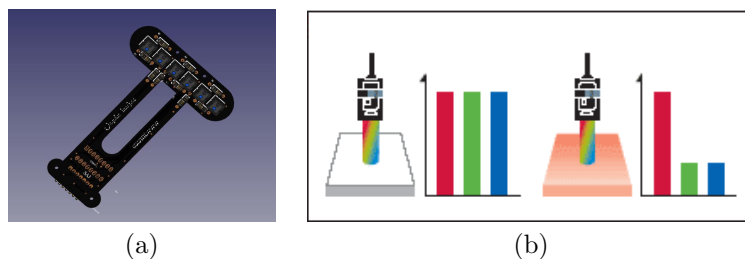


Figura 3.3: (a) Sensores *IR Cyclops project*. (b) Explicación gráfica del funcionamiento del sensor de color.

Módulo Detección de obstáculos Válido para zócalos superiores. Está formado por un módulo de ultrasonidos y dos *LDR* (*light-dependent resistor*).

Los **pin**s que necesita este módulo son:

- 2 pines analógicos para medir la variación de luz en cada una de las *LDR*.
- 1 pin digital para enviar y leer los ultrasonidos.

Es uno de los más sencillos a nivel técnico pero su **principal función** aporta una aplicación muy interesante que es la de detectar obstáculos y conocer la distancia a ellos. La función que aportan las *LDR* es la de localización del origen de un foco de luz permitiendo desarrollar aplicaciones tipo "girasol".

El **principal problema** lo encontramos a la hora conseguir una incidencia diferente de la luz sobre cada una de las *LDR*. Esto se soluciona colocándolas lo más lejos posible una de otra y con orientaciones diferentes.

Módulo Pantalla y Gestos Para usar en la cara *top*. Está compuesto por una pantalla *OLED* monocromática de 0.96" (ver Fig. 3.4(a)) y un sensor de gestos que diferencia el movimiento en un plano paralelo a él hacia la izquierda, derecha, delante y atrás como se ilustra en la Figura 3.4.(b)).

Los **pin**s que necesita este módulo son:

- *SDA* y *SCL* para la pantalla.
- *SDA* y *SCL* para la el sensor de gestos.

El **principal objetivo** de la pantalla es que el robot pueda expresar y comunicar información en tiempo de ejecución. Con el sensor de gestos se consigue una interacción fácil e intuitiva con la plataforma.

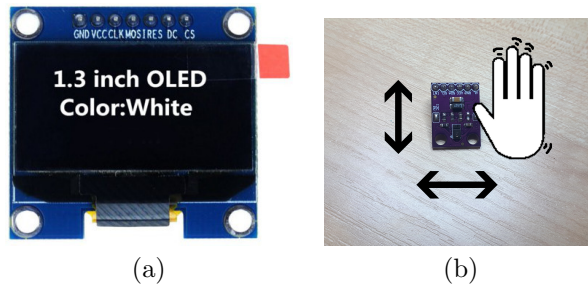


Figura 3.4: (a) Pantalla *OLED* 0.96" (b) Módulo comercial con sensor de gestos *APDS-9960*.

Módulo Comunicaciones I Es una de las *shield* que pueden ser conectadas en cualquiera de los zócalos del robot. Consta de un módulo de comunicación por *Bluetooth* (ver Fig. 3.5(a)) y uno de *Wifi* (ver Fig. 3.5(b)).

Los **pin**s que necesita este módulo son:

- 2 pines de comunicación *UART* (uno de transmisión y uno de recepción de datos) para el *Bluetooth*.
- 2 pines de comunicación *UART* para el *Wifi*.

Este módulo proporciona la capacidad de comunicarse con el robot desde otro dispositivo que disponga de una de esas dos opciones de conectividad. Una **aplicación interesante** podría ser controlar el movimiento del robot desde un teléfono móvil.

El **principal problema** que presenta es el gran consumo que requiere la comunicación por *Wifi*.

Módulo Comunicaciones II Como el anterior, se puede utilizar en todos los zócalos. Está formado tan sólo por un lector *RFID* (ver Fig. 3.5(c)).

Los **pines** que necesita este módulo son:

- *SDA* y *SCL* para controlar el lector.
- 1 pin de interrupción.

Las **posibilidades** son muy amplias ya que se pueden dar tanto instrucciones pasando tarjetas por encima como reaccionar a otras que estén en el suelo.

Los **problemas** podrían aparecer si el robot pasa a demasiada velocidad por las tarjetas de datos.

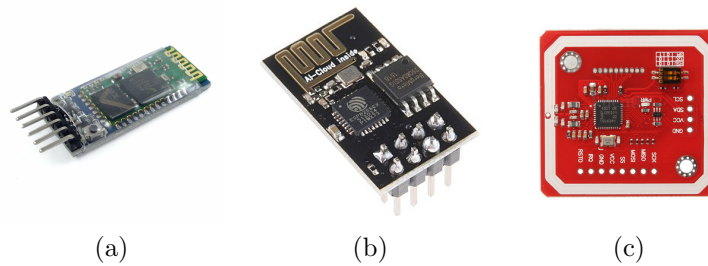


Figura 3.5: (a) Módulo *Bluetooth HC-05*. (b) Módulo *Wifi ESP8266* de *Espressif Systems*. (c) Módulo *RFID PN532* de *NXP*.

Módulo Panel Táctil Apto para los zócalos superiores. Este módulo consta de una zona táctil y un chip que permite controlar hasta 12 sensores capacitivos.

Los **pines** que necesita este módulo son:

- *SDA* y *SCL* para controlar el chip.

La **aplicación principal** puede ser trazar recorridos sobre la superficie sensitiva para que luego el robot reproduzca.

Los **principales problemas** aparecen en la precisión de la zona táctil al contar con sólo 12 sensores en el chip. La idea inicial que se planteó sería algo como lo mostrado en la Figura 3.6.a. La mejora que se plantea consiste en repartir esos 12 sensores a modo de matriz (5x7) creando 35 puntos sensibles al tacto (ver Fig. 3.6(b)).

En el Anexo C, se muestra la disposición de los pines de todos los componentes de los módulos y chasis que se ha hecho para el microcontrolador elegido.

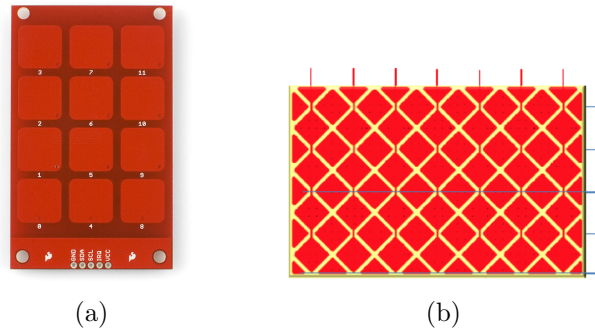


Figura 3.6: (a) Módulo táctil capacitivo 4x3. (b) Matriz táctil capacitiva 5x7.

3.3. Construcción en madera

Una vez diseñada la distribución de módulos y su contenido se hizo una primera construcción del prototipo en madera para analizar la geometría y ergonomía de la plataforma.

Para estimar las dimensiones necesarias, se hizo una ubicación inicial de los componentes de mayor tamaño. A continuación, se procedió a diseñar el contorno de la placa base con el software de diseño *AutoCAD* para después imprimirlo como plantilla, fijarlo a una tabla de madera y darle la forma deseada (ver Fig. 3.7(e)).

Sobre este prototipo se probaron las sujeciones para los motores y ruedas (ver Fig. 3.7(f)). Estos, fueron diseñados previamente e impresos en 3D (ver Figs. 3.7(a), 3.7(b), 3.7(c) y 3.7(d)).

Como punto de apoyo adicional se utilizó, en la parte trasera de la placa, un tornillo con una tuerca en forma de cúpula (ver Fig. 3.8).

De este trabajo se concluyó que la plataforma era estable y válida para cumplir los requisitos planteados.

El mayor **problema** detectado es que al ejercer presión en la parte delantera del robot la plataforma se inclina hacia delante. Al afectar tan solo al uso de uno de los módulos (Módulo 1: botonera con luz), se decide mantener el diseño para esta primera versión.

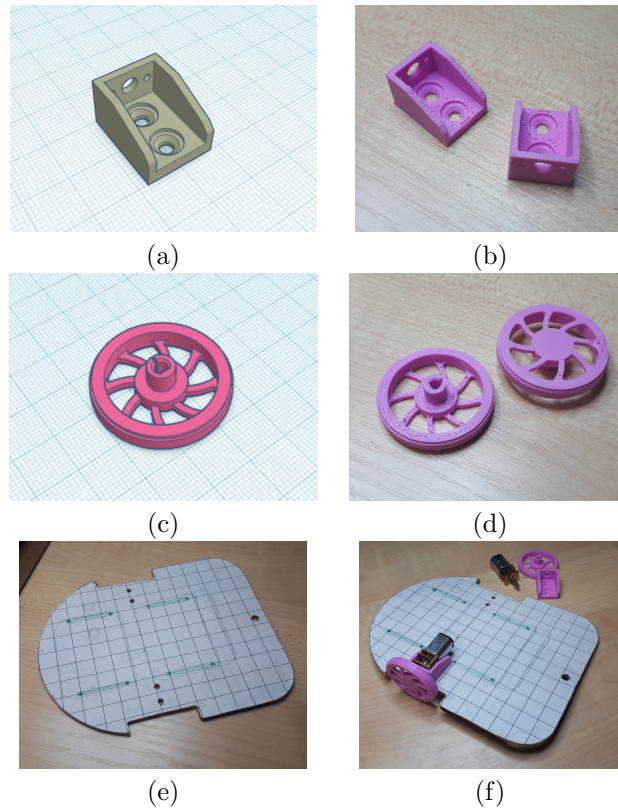


Figura 3.7: (a) Diseño 3D de los soportes de los motores. (b) Soportes del prototipo impresos. (c) Diseño 3D de las ruedas del robot impresas. (d) Ruedas del prototipo. (e) Prototipo en madera. (f) Prototipo en madera con soportes y ruedas.

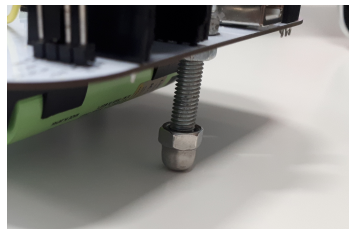


Figura 3.8: Tornillo de apoyo en la parte trasera del chasis.

Capítulo 4

Diseño electrónico y Evaluación de las placas

En este capítulo, se detalla el procedimiento seguido después de haber sido tomadas las decisiones finales de la composición de las distintas placas.

Esta tarea fue la que más carga, temporal y teórica, tuvo en el desarrollo del proyecto. Comprende la búsqueda de toda la documentación de los componentes, el diseño electrónico, el proceso de soldadura y la comprobación del correcto funcionamiento de los circuitos y sensores.

4.1. Búsqueda de documentación y diseño de componentes

Se procedió a la búsqueda de las especificaciones técnicas publicadas por los fabricantes de cada uno de los sensores, actuadores y demás elementos electrónicos y se consultaron diseños de otros proyectos en los que se utilizaban algunos de los chips elegidos para las placas del robot.

Para la creación de los diseños en *Eagle*, lo primero fue localizar las librerías que contienen los diseños correspondientes a los componentes a utilizar. La mayoría de ellos están disponibles en las librerías que incluye el propio entorno *Eagle* por defecto o en las que proporciona la tienda *online Sparkfun*¹. Para los que no aparecían en estas, fue necesario realizar el diseño completo (encapsulado y patillaje) a partir de las medidas del componente. Unos ejemplos de los elementos creados manualmente son los zócalos de conexión de los módulos (ver Figs. 4.1(a) y 4.1(b)) y el soporte de los motores (ver Figs. 4.1(c) y 4.1(d)).

También hubo que diseñar desde cero y añadir a las librerías el *driver* de los motores, el sensor de infrarrojos, el módulo de *RFID*, la zona táctil que va a detectar el sensor capacitivo y todos los contornos de los módulos del robot. La sección siguiente detalla este proceso.

La **principal dificultad** en esta fase fue idear y realizar el diseño de la matriz táctil capacitiva, ya que no existe documentación al respecto ni hay forma de probarla sin fabricar la *PCB* real (ver Fig. 4.1(f)).

¹www.github.com/sparkfun/SparkFun-Eagle-Libraries

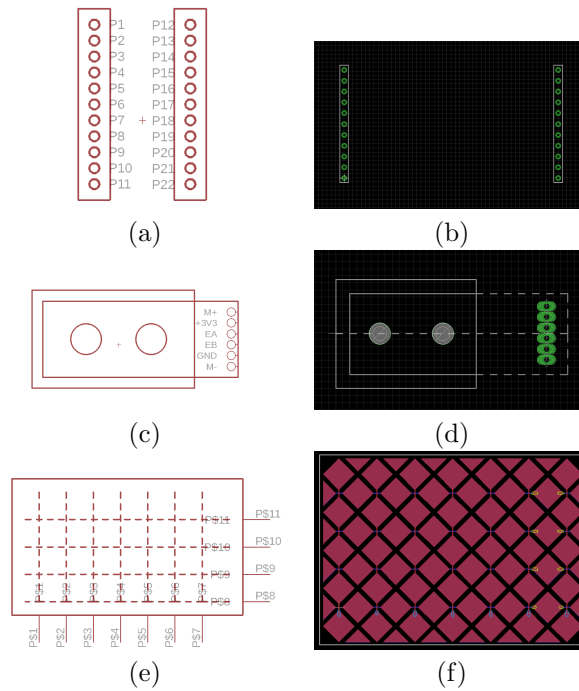


Figura 4.1: Esquemáticos (izquierda) y *PCBs* (derecha) de distintos componentes: (a) y (b) Zócalo, (c) y (d) Conector motor, (e) y (f) Panel táctil.

4.2. Diseño electrónico: esquemático y *PCB*

Las dos partes que forman el diseño electrónico de una placa son el esquemático y la *PCB*. En la página de *Sparkfun*² se ofrece una guía con los pasos para desarrollar cada una de las dos partes.

Diseño esquemático. El conjunto de diseños completo aparece en el Anexo D.

Dentro de todas las tareas relacionadas, los puntos de mayor complejidad fueron en el diseño de las distintas etapas que componen la alimentación de la placa base y la etapa de lectura de los pulsadores del módulo 1, que se pueden ver en la Fig. 4.2:

- *Step-up* (ver Fig. 4.2.(b)): esta etapa eleva la tensión de la batería (3.7-4.2V) hasta 5V y proporciona 2A de corriente. La habilitación (Fig. 4.2(a)) depende de si el robot está conectado o no por *USB*. En caso de que sí lo esté, se desactiva la etapa.
- *Switch USB* (ver Fig. 4.2(c)): siempre que el robot esté conectado por *USB*, la alimentación será proporcionada por este último y no por la batería.
- Regulador de 3.3V (ver Fig. 4.2(d)): en esta etapa se ha utilizado una "huella doble". Esta permite probar dos chips de encapsulados diferentes para un mismo propósito cortocircuitando R18 o R19.

CAPÍTULO 4. DISEÑO ELECTRÓNICO Y EVALUACIÓN DE LAS PLACAS²⁰

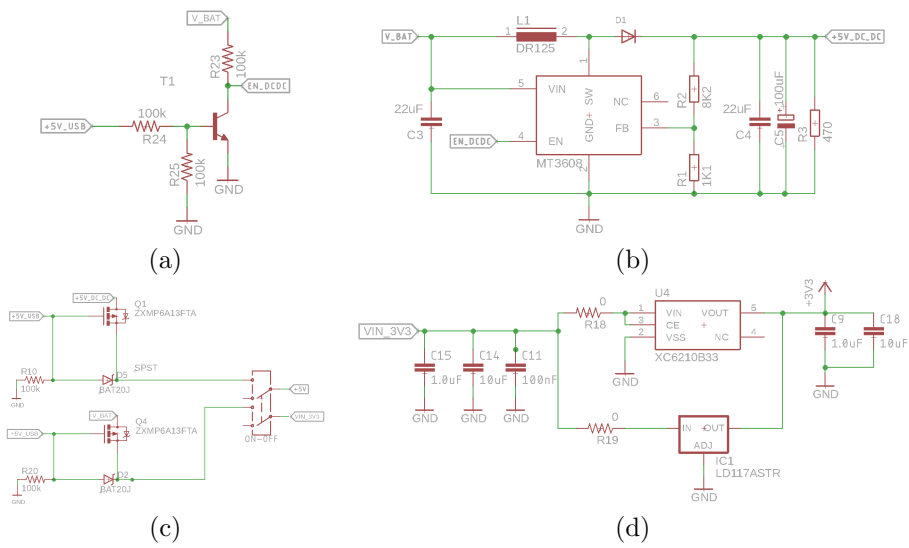


Figura 4.2: Etapas de alimentación: (a) Etapa de habilitación del *Step-up*. (b) *Step-up* de 3.7V a 5V. (c) Interruptor de la plataforma. (d) Regulador de 3.3V.

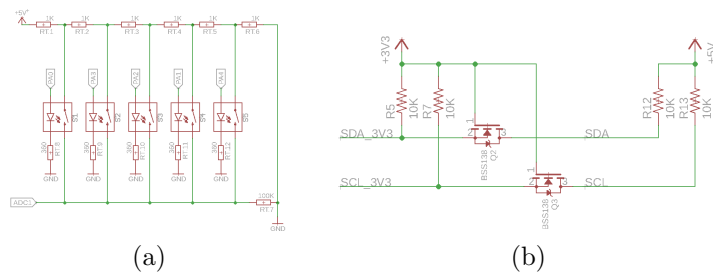


Figura 4.3: (a) Esquemático lectura de pulsadores con un pin. (b) Conversor de nivel de señal de 5V a 3.3V.

- Lectura de los cinco pulsadores del módulo 1 (ver Fig. 4.3(a)): se lleva a cabo con un sólo pin analógico. Se trata de un divisor resistivo que modifica la tensión leída en función del pulsador que esté activado. De esta manera conseguimos un ahorro de 4 pines respecto a la lectura ordinaria de cada pulsador con un pin.
- Conversor de señal de un nivel lógico a otro (ver Fig. 4.3(b)): se ha utilizado esta etapa en los módulos que trabajaban con unos niveles lógicos inferiores (3.3V) a los de nuestro microcontrolador (5V). Estos son el sensor de color, el de gestos, el táctil y la *IMU* del chasis.

La **mayor dificultad** de esta etapa se encuentra en la correcta reproducción en el entorno *Eagle* de los circuitos diseñados previamente, ya que una mínima modificación del circuito por error puede ser crítica.

²⁰www.sparkfun.com/EAGLE

diseño de la PCB. Durante este diseño se distribuyeron los componentes intentando que toda la electrónica posible se encontrara en la cara inferior de la placa por razones estéticas.

El **proceso más costoso** fue el de *ruteo* del chasis ya que eran muchas las señales a utilizar. No fue posible cablear todo con la electrónica en la cara *bottom* por lo que algunos componentes se pasaron a la cara *top*. El diseño completo de la PCB se observa en la Fig. 4.4.

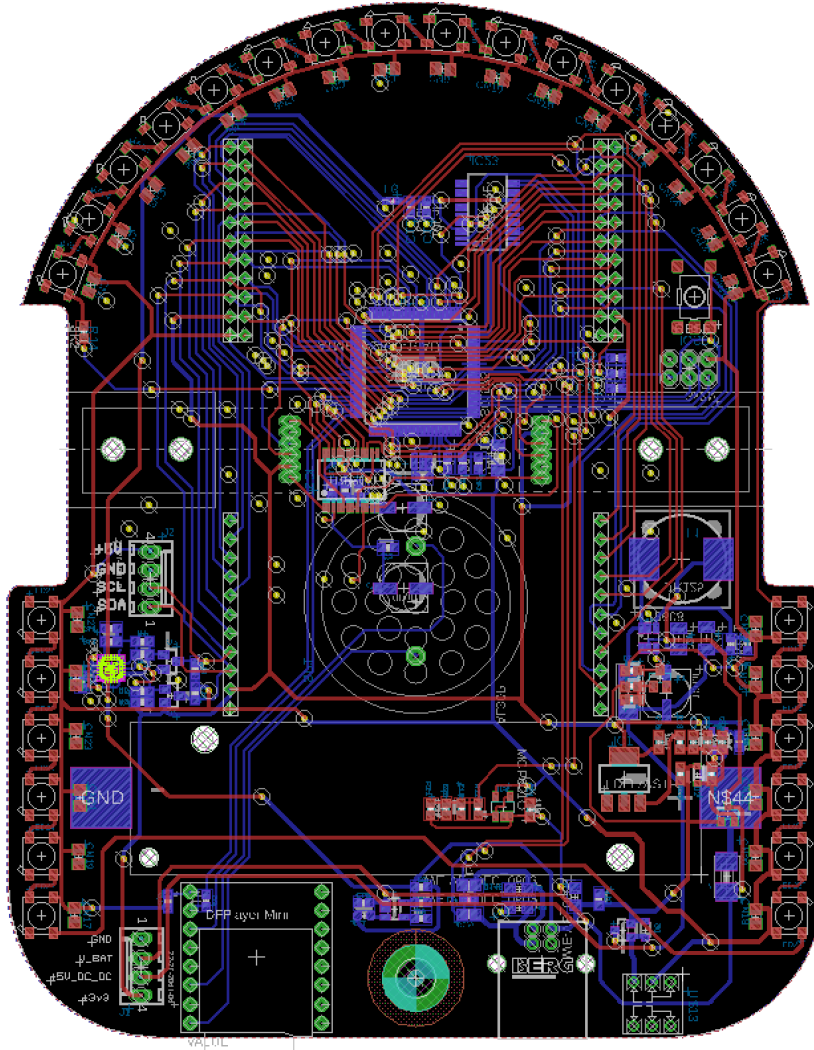


Figura 4.4: PCB de la placa base.

Otra de las **dificultades** que se encontraron estuvo en el *ruteo* del módulo 7 (Panel Táctil) ya que no había espacio suficiente para unir todas las señales. Esto se solucionó prescindiendo de uno de los 12 sensores capacitivos, pasando a ser una matriz de 4x7 y no 5x7 como se había definido previamente.

Después se añadió la **serigrafía** necesaria para que la posterior evaluación de

las placas fuera lo más cómoda posible. También se crearon unos pequeños logos para los módulos como detalle estético (ver Fig. 4.5). Para su diseño y posterior vectorización se utilizaron los programas *GIMP* e *Inkscape*, respectivamente.



Figura 4.5: Logos módulos: (a) Botonera con luz. (b) *Siguelíneas*. (c) Detección de obstáculos. (d) Pantalla y Gestos. (e) Comunicaciones I y II.

Se utilizaron las *DRC* (Design Rule Check) de *Seeed Studio*³ para asegurar que los diseños cumplen con los requerimientos y limitaciones tecnológicas del fabricante de circuitos impresos.

4.3. Soldadura y evaluación de las placas

Se soldaron los componentes electrónicos etapa por etapa comprobado el correcto funcionamiento de cada una de ellas y de cada sensor y actuador. En el chasis, se comenzó por la parte de la alimentación ya que era una parte imprescindible para el funcionamiento del resto. Se siguió con los chips de comunicación serie, el microcontrolador y el driver de los motores.

Para evaluar el funcionamiento de las distintas etapas se utilizó la fuente de alimentación para simular la batería y el *USB*, el osciloscopio para medir las tensiones en distintos puntos y el amperímetro para la comprobar los consumos eléctricos.

Una vez soldado el microcontrolador, se procedió a cargar el gestor de arranque (*Bootloader*) que permite programarlo a través del puerto serie sin necesidad de usar un programador externo. Después se comprobó el funcionamiento del mismo enviando distintas señales a los pines del micro y midiéndolas con el osciloscopio.

Simultáneamente, se fueron anotando los errores y posibles mejoras de diseño para versiones futuras y corrigiendo lo que fuera posible.

Los **principales problemas** afrontados en esta fase estuvieron relacionados con la soldadura de los chips de menor tamaño y el microcontrolador. En la Fig. 4.6 se puede apreciar el pequeño tamaño de los chips y la poca distancia entre sus pines.

³www.seeedstudio.com/document/rar/SeeedStudio_2layer_DRU_no_angle_20140221.rar

Capítulo 5

Prototipo final

En este capítulo se detallan las instrucciones de montaje y uso del prototipo. También se explican algunos programas implementados para la comprobación de las funcionalidades principales.

5.1. Montaje del prototipo

En la Figura 5.1 se ilustran los distintos componentes del chasis necesarios para poner en marcha el robot.

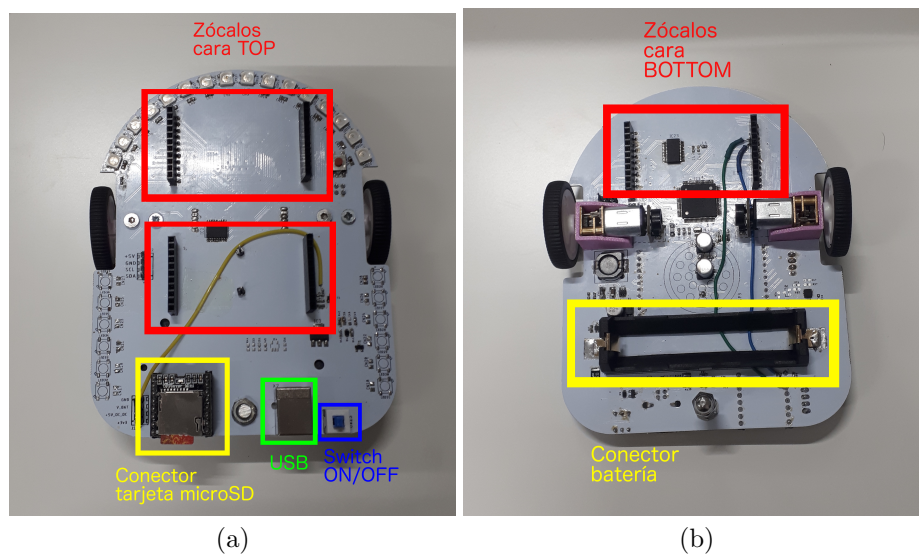


Figura 5.1: (a) Componentes cara *TOP* del chasis. (b) Componentes cara *BOTTOM* del chasis.

La batería recargable se inserta en el conector (respetando la polaridad marcada en ambos). La tarjeta *microSD* es necesaria si se desea reproducir sonidos. El puerto *USB* permite cargar la batería (ver Fig. 5.2(a)) y programar el microcontrolador desde un ordenador (ver Fig. 5.2(b)). El led rojo que se muestra en la Figura indica si la batería está o no totalmente cargada.

Los módulos se conectan en los zócalos como aparece en la Figura 5.2(c), sólo funcionan en una posición. En la Figura 5.3 se muestran varias combinaciones posibles de módulos para las caras *TOP* y *BOTTOM*.

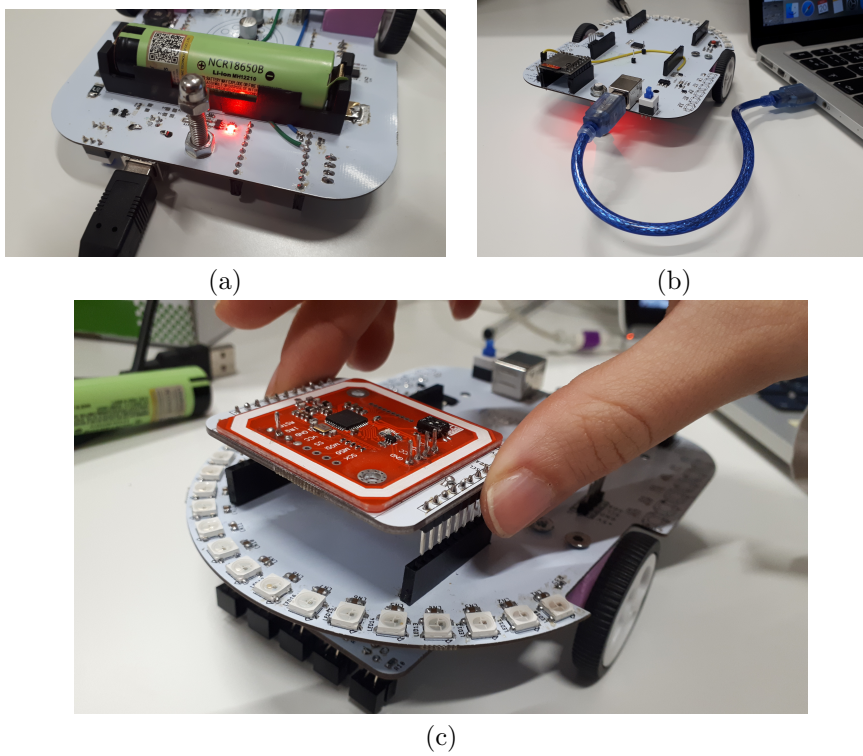


Figura 5.2: (a) Batería en carga. (b) Cable *USB* de programación y carga de batería. (c) Colocación de los módulos.

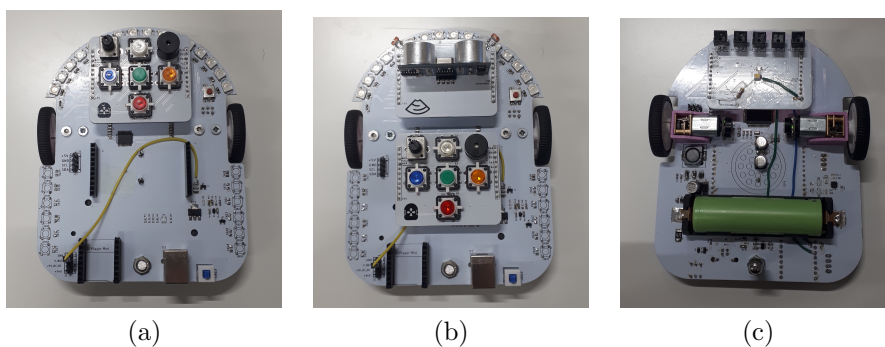


Figura 5.3: (a) Cara *TOP* del robot con 1 módulo conectado. (b) Cara *TOP* del robot con 2 módulos conectados. (c) Cara *BOTTOM* del robot con un módulo conectado.

En la Figura 5.4 se muestra una posible configuración de la plataforma con tres módulos conectados (Detección de obstáculos y Botonera con Luz en la

cara *TOP*; *Siguelíneas* en la cara *BOTTOM*). Todos los módulos aparecen en al Figura 5.5.

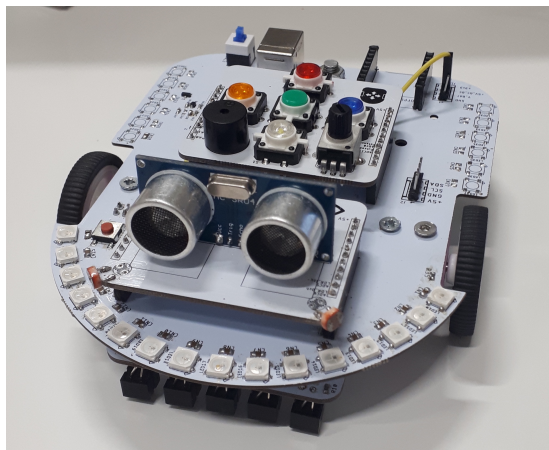


Figura 5.4: Chasis con tres módulos.

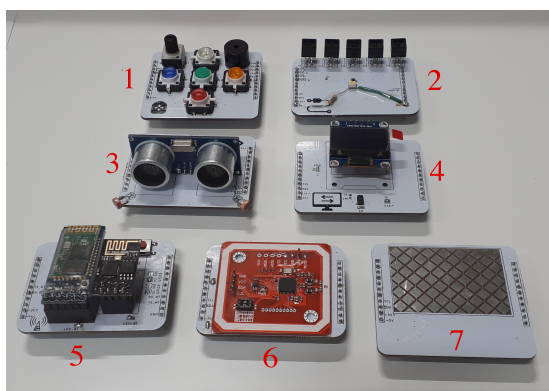


Figura 5.5: Módulos del robot. 1: Botonera con Luz. 2: *Siguelíneas*. 3: Detección de obstáculos. 4: Pantalla y Gestos. 5: Comunicaciones I. 6: Comunicaciones II. 7: Panel Táctil.

5.2. Manual de uso

Se han resumido unas pequeñas instrucciones de arranque dirigidas al educador que vaya a trabajar con esta plataforma (las instrucciones para niños requieren de un diseño pedagógico mucho más elaborado, que no entra dentro del alcance de este trabajo):

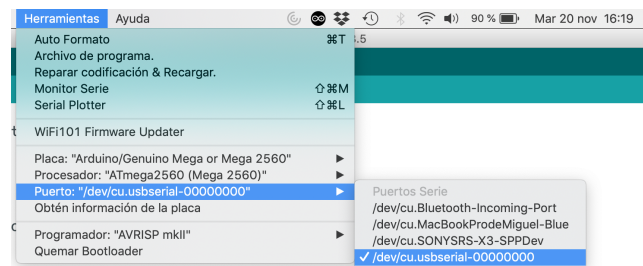
- Los pasos para la instalar el entorno y conectar el robot al ordenador son los mismos que los de una placa *Arduino* convencional, explicados en la web de *Arduino*¹.

¹www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoUno#toc2

- Además, para el uso de la plataforma propuesta, será necesario instalar el *driver* o controlador del chip de comunicación serie utilizado (*FT232R*), disponible en multitud de páginas web (e. g. [usb-drivers](#)²). Las opciones que hay que seleccionar en el entorno de *Arduino*, una vez instalado el *driver*, para la conexión con el robot se muestran en la Figura 5.6.



(a)



(b)

Figura 5.6: Selección de placa (a) y puerto (b) en el entorno de *Arduino*.

- Una vez hecho esto, será posible la carga de programas, como los de prueba facilitados a continuación, en el microcontrolador siguiendo el proceso estándar de *Arduino*.

5.3. Programas de ejemplo para el prototipo

Se han implementado varios programas para que el usuario vea cómo se prueban las funcionalidades principales del robot. Estas son: movimiento de los motores, lectura de pulsadores, sensores de infrarrojos y de color, medida de distancia, visualización de imágenes en la pantalla y detección de gestos.

Por un lado, se presentan algunos de los programas utilizados en la prueba de sensores (programas de ejemplo del 1 al 5) y, por otro lado, una demo más completa que integra el uso de los motores con el sensor de ultrasonidos y las luces del chasis (programa de ejemplo 6). Todos los programas se encuentran disponibles *online*³.

² www.usb-drivers.org/ft232r-usb-uart-driver.html

³ www.github.com/ankiroe/TUMER

Ej. 1. Prueba de motores. Se ha utilizado un programa que realiza una secuencia de movimientos durante un tiempo y con una velocidad introducidos como variables (hacia delante, hacia atrás, girar hacia uno y hacia el otro lado).

Ej. 2. Prueba de módulo Botonera con Luz. Se ha creado un programa que enciende los leds de los pulsadores, lee las señales del potenciómetro y de los pulsadores y lo muestra por el terminal serie de *Arduino* (ver Fig. 5.7).

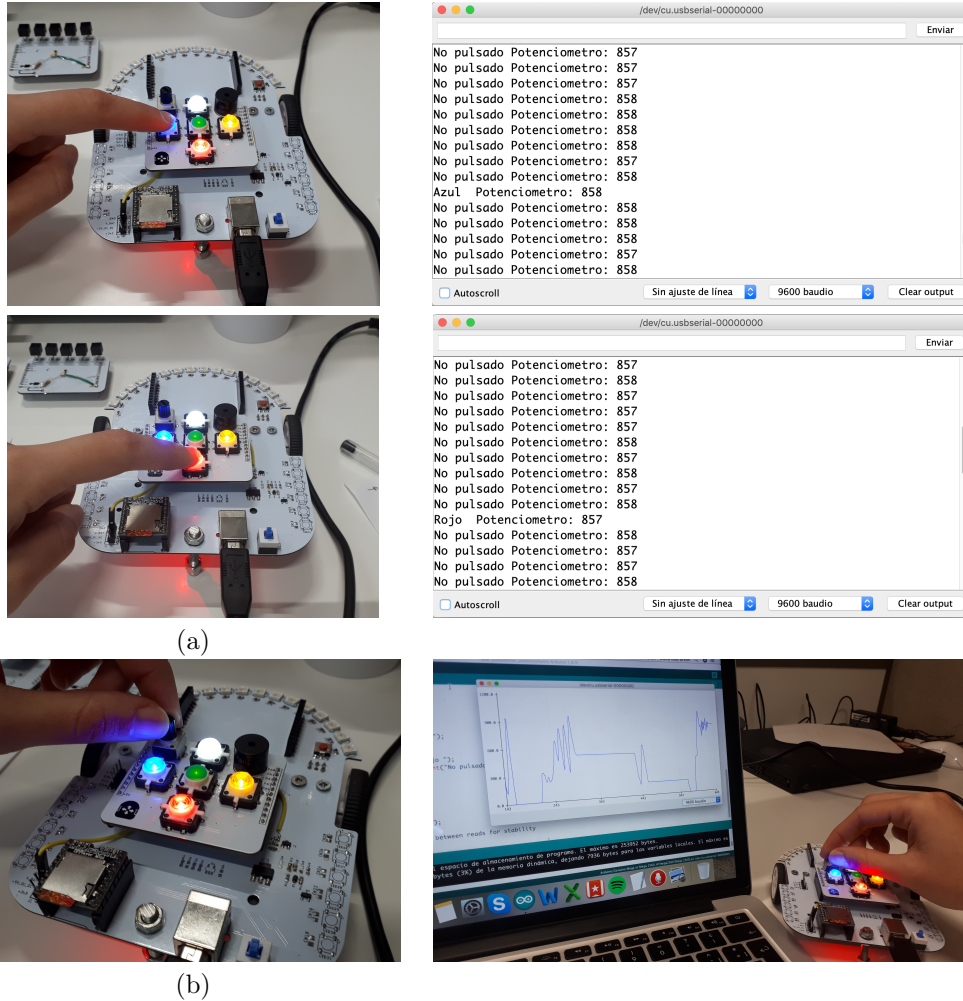


Figura 5.7: Ejemplo 2: (a) prueba de pulsadores y (b) prueba de potenciómetro Aparece "No pulsado" por el terminal serie hasta que se activa alguno de los pulsadores. Girando el potenciómetro varía su valor entre 0 y 1024.

Ej. 3. Prueba sensores de infrarrojos. Para probar los detectores de infrarrojos del módulo *Siguelíneas* se ha realizado un programa que lee cada una de las cinco señales analógicas de los infrarrojos y las muestra por pantalla como en el caso anterior. Se han observado los cambios del valor leído por cada sensor

en función de si el robot estaba sobre una superficie blanca o sobre una línea negra (ver Fig. 5.8).

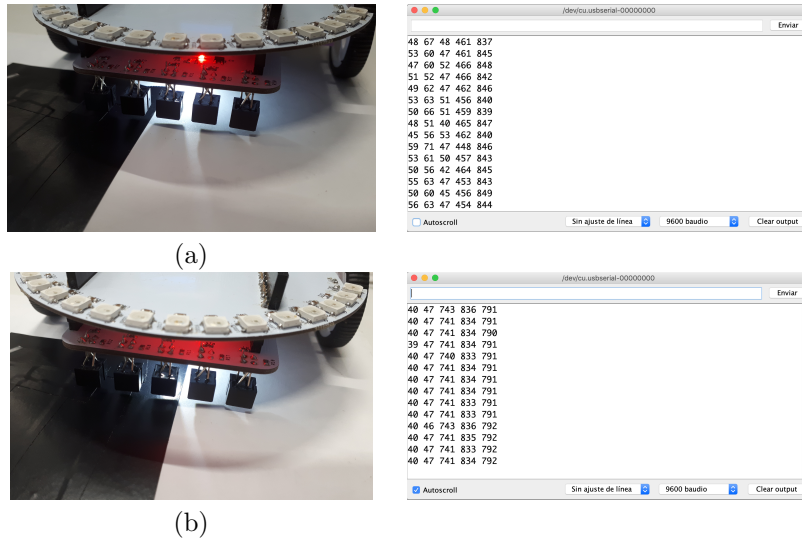


Figura 5.8: Ejemplo 3: lectura con (a) 2 o (b) 3 infrarrojos sobre la línea negra. La medida que devuelve es 50 aproximadamente sobre superficie blanca y unos 700 sobre negro.

Ej. 4. Prueba de sensor de color. Para probar el sensor de color del módulo *Siguelíneas* se ha utilizado un programa que transforma los valores *RGB* medidos en el nombre del color y lo muestra por pantalla (ver Fig. 5.9).

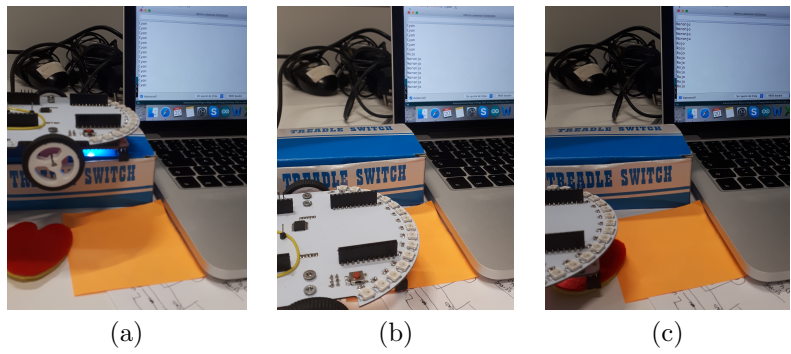


Figura 5.9: Ejemplo 4: lectura del sensor de color sobre (a) azul, (b) naranja y (c) rojo.

Ej. 5. Prueba de pantalla *OLED*. Se ha utilizado un programa de ejemplo proporcionado por el fabricante en el que se muestran diferentes imágenes predeterminadas (ver Fig. 5.10).

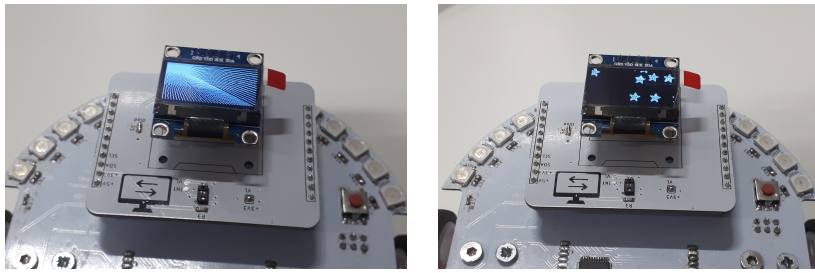


Figura 5.10: Ejemplo 5: reproducción de distintos patrones.

Ej. 6. Demostración de funcionalidades integradas. Se han combinado distintos programas para probar al mismo tiempo el movimiento de los motores en función de los obstáculos detectados, mientras se realiza un juego de luces con los *Neopixel* integrados en el chasis.

Capítulo 6

Conclusión

Para concluir, este capítulo resume los problemas más notorios enfrentados en las distintas fases y expone las conclusiones a nivel técnico y personal que se han extraído en la realización del proyecto. Por último, incluye las vías de trabajo futuro que ofrece la plataforma.

6.1. Problemas encontrados

Planteamiento y prototipado inicial. Se dedicaron varias semanas a la búsqueda de una solución que permitiera utilizar el microcontrolador propuesto inicialmente por la empresa (*ATmega328P*). Una de las soluciones a las que se llegó fue el uso de una serie de expansores de comunicación *I2C* que permiten controlar pines de propósito general con el bus de *I2C*. De esta manera, se resolvía el problema de la falta de señales para controlar todos los sensores y actuadores deseados. Al final esta opción fue descartada porque impedía la programación de la placa de una manera más intuitiva y sencilla, pero esta investigación hizo que se alargara un poco el tiempo planeado.

Proceso de adquisición de los componentes. El proyecto se paralizó varias semanas, hasta que se recibieron los componentes (en este caso piezas estándar, que simplemente tardaron el tiempo del envío desde China) y otra vez, se paralizó de nuevo varias semanas, cuando se hizo el pedido de las placas del chasis y los módulos. Este tiempo de espera es un poco mayor, ya que implica la aceptación del pedido, la fabricación de las *PCB* y el envío desde China.

A raíz de estos retrasos, no se han llegado a desarrollar ejemplos detallados de uso de algunos módulos secundarios.

Evaluación de las placas. Como cabía esperar, se cometieron ciertos errores en el diseño de las placas que fueron descubiertos en la fase de evaluación tras soldar los componentes y realizar las primeras pruebas con las placas reales. Para todos ellos se encontró una solución provisional que permitiera seguir evaluando esta versión de la plataforma, pero también han conllevado un pequeño incremento en los tiempos de evaluación. Los más relevantes son:

- Los pines del microcontrolador elegidos para la transmisión de datos del

reproductor de audio no eran válidos. Como solución, se cablearon a mano con dos de los pines libres del zócalo de *BOTTOM* (ver Fig. 6.1(a)).

- Se produjo un error en el diseño en *Eagle* del componente *CNY70* (sensor de infrarrojos), y tres de las patas quedaron en mal lugar. Como solución, ha sido necesario torcerlas para entre-cruzarlas y que funcionara (ver Fig. 6.1(b)).
- Se colocó el led que ilumina la superficie a medir por el sensor de color en la cara opuesta a este. Como solución, se añadió otro led en la cara correcta con cables a *VCC* y *GND* (ver Fig. 6.1(c)).
- Se ubicaron dos condensadores en el mismo lugar que debía ir el altavoz. Como solución, se conectó el altavoz con dos cables por la cara opuesta del chasis (ver Fig. 6.1(d)).
- El elevado consumo de los *Neopixel* no se tuvo en cuenta en el diseño de las etapas de alimentación al tratarse de un añadido estético de última hora. Como solución, se han desoldado la mitad de ellos ya que si no el microcontrolador no es capaz de arrancar por el consumo inicial que demandan los *Neopixel*.
- Se ha observado que la batería no es capaz de mantener la alimentación al tratarse de un modelo de muy baja gama. Como solución, las pruebas se han realizado alimentando la plataforma mediante el conector *USB*.

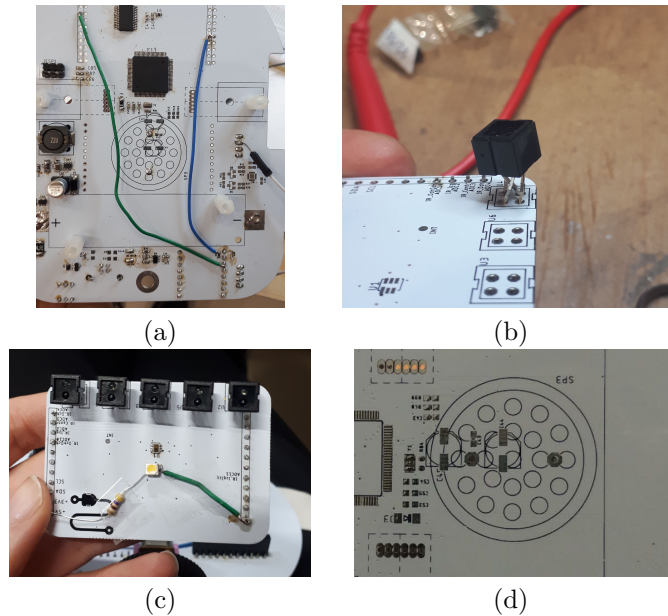


Figura 6.1: Soluciones a los principales problemas técnicos/prácticos encontrados al probar las placas fabricadas. (a) Cableado reproductor de audio. (b) Sensor de infrarrojos. (c) Sensor de color y led añadido. (d) Huella de los condensadores sobre la huella del altavoz.

6.2. Conclusiones técnicas

Como conclusión principal, cabe destacar que se han cumplido todos los objetivos que se plantearon. Por un lado, cubriendo sobradamente los objetivos planteados, se ha creado una plataforma versátil que incluye un gran número de componentes que utilizan diferentes protocolos de comunicación y están visibles sin necesidad de retirar una carcasa. Su uso es tan sencillo como el de un *Arduino* convencional y existe una amplia documentación de la mayoría de los sensores, elegidos en parte por su popularidad. Se ha conseguido que su precio sea inferior al de la mayoría de las plataformas con funcionalidades similares (ver AnexoB para los precios).

Por otro lado, cumpliendo el objetivo pero no con un alcance tan amplio como los anteriores, la plataforma desarrollada tiene las características técnicas necesarias para poder utilizarse en la formación en otras áreas del conocimiento. En este sentido se han desarrollado pequeños programas de ejemplo generales y una breve guía pensando en el educador.

6.3. Conclusiones personales

Como conclusión personal, me gustaría decir que la experiencia que he adquirido con este proyecto y más concretamente, dentro de la empresa que se ha lleva a cabo ha sido enriquecedora tanto a nivel profesional como personal.

Además de ampliar y afianzar los conocimientos adquiridos a lo largo de toda mi carrera universitaria, he podido ver aplicaciones de campo reales. También me ha servido como acercamiento progresivo al mundo laboral al haber trabajado en un proyecto de empresa real con todos los beneficios e inconvenientes que eso conlleva.

La lección más importante que he sacado de este proyecto es que los diseños no suelen salir bien a la primera y que siempre puede haber imprevistos que te obliguen a modificar detalles de un producto. Por eso es crucial realizar todas las pruebas que estén en tu mano antes de avanzar un paso más en el desarrollo de tu proyecto y tener siempre una mente despierta y abierta al cambio. Facilitando así la localización y resolución de errores de la manera más rápida y óptima.

6.4. Trabajo Futuro

Se plantean tres vías de posible mejora o ampliación del proyecto:

Cambios en el diseño y desarrollo de nuevas placas. Hay un gran número de pines disponibles para utilizar con nuevos módulos y conseguir así hacer la plataforma aun más versátil. Además, se puede investigar una nueva forma de conexión y reparto de pines para que cada uno no esté asociado tan sólo a un componente o función fijos.

Desarrollo del *software*. Es la vía que más posibilidades de mejora ofrece. En primer lugar se propone la prueba más exhaustiva de los módulos secundarios (Comunicaciones I y II y Panel Táctil). Además, se pueden crear aplicaciones más específicas que acerquen más a la plataforma al cumplimiento del objetivo

de servir como herramienta en la enseñanza de diversas áreas del conocimiento a través de aplicaciones propuestas.

Comunidad colaborativa. Se propone también como ampliación del proyecto, crear e impulsar una comunidad colaborativa en la web donde compartir ejemplos, material didáctico y juegos desarrollados por los usuarios para que cualquier persona pueda hacer uso de ellos aumentando así el potencial de la plataforma.

Apéndice A

Estudio de alternativas en el mercado

En este apéndice aparecen las distintas plataformas que se han investigado para la definición de objetivos. La Figura A.1 muestra los datos básicos de plataformas en desarrollo encontradas en diferentes páginas de *crowdfunding*, así como las comerciales existentes en el mercado. En la Figura A.2 se observan las funcionalidades principales de cada plataforma.

NOMBRE	LINK	PRECIO (€)	FINANCIACIÓN (€) (recaudado/esperado)	FECHA DE INICIO DEL
Plataformas realizadas o en desarrollo financiadas por crowdfunding				
kubo	https://www.indiegogo.com/projects/kubo-the-educational-robot-for-kids-aged-3-and-up-education#/	260	188% (75.400/40.100)	2017
Thymio	https://www.thymio.org/en/thymiospecifications	120		
Kibo	http://kinderlabrobotics.com/kibo/	187	(78.500)	2014
Robby	https://www.kickstarter.com/projects/whoismrobotics/robby-a-french-evolutive-robot-enhancing-curious	170-400	106% (21.188/20.000)	03-2018
MOSS	https://www.modrobotics.com/moss/	100-400	(361.300)	2013
Kamigami	https://www.kickstarter.com/projects/2141368214/kamigami-worlds-first-diy-lightning-fast-origami-r?ref	50-140	(60.700)	2015
Kamibot	http://www.kamibot.com/default.php	200	(55.200)	2016
PHIRO	https://www.kickstarter.com/projects/2074714954/phi-ro-a-smart-robot-for-kids-learn-to-code-in-5-wa?re	150-200	(81.400)	2015
Scratch Duiuno	https://www.kickstarter.com/projects/scratchduino/scratchduino?ref=category&ref=discovery&term=rob	300	5% (5.000/105.000)	2014
Riley	https://www.indiegogo.com/projects/riley-a-smarter-robot-drone-security#/	150	333% (176.000/53.000)	2016
Zummi	https://www.indiegogo.com/projects/easy-to-learn-robot-zummi#/	100	1% (110/20.000)	2014
Plataformas comerciales				
BQ Printbot Evolution	https://www.bq.com/es/printbot-evolution	100	N/A	
Zowi	https://www.bq.com/es/zowi	100	N/A	
Bee-Bot	https://www.tts-international.com/bee-bot-rechargeable-floor-robot/1001794.html	75	N/A	
DOC	http://www.dementoni.com/es/55176-doc-el-robot/	30	N/A	
Code&Go Robot Mouse	https://www.learningresources.com/product/learning-essentials--8482--stem-robot-mouse-coding-acti	55	N/A	
Escornabot	https://escornabot.com/web/es	20-40 (DIY)	N/A	
Lego Mindstorms	https://www.lego.com/es-es/mindstorms	350	N/A	
Lego Boost	https://www.lego.com/es-es/boost/products/creative-toolbox-17101	150	N/A	
ASTROBOT UBTECH	https://www.rctecnic.com/robotica/5774-robot-astrobot-ubtech-kit-de-robotica-programable	220	N/A	
mOwayduino	http://ro-botica.com/Producto/robot-mOwayduino-basado-en-ARDUINO/	180	N/A	
Dash and dot	https://www.makewonder.com/dash	150	N/A	
Cue (dash 2.0)	https://uk.makewonder.com/cue-the-cleverbot/	192	N/A	
Mbot	https://makeblock.es/productos/robot-educativo-mbot/	90	N/A	
Sphero+	https://www.sphero.com/education	106	N/A	
Mio	http://www.dementoni.com/es/55202-mio-el-robot-20/	30	N/A	
COJI	https://www.juguetronica.com/robot-programable-coji	70	N/A	
Marbo Pingüino	https://www.juguetronica.com/marbo-pinguino-robotico	70	N/A	
Compluino 03	https://complubot.com/inicio/proyectos/compluino-03/compluino-03-guia-de-montaje/	120-140	N/A	
Tokylabs	https://tokylabs.com/product/tokymaker/	77	N/A	
Cyclops	https://github.com/Resaj/cyclops-project		N/A	
Ozobot	https://www.juguetronica.com/robot-ozobot-bit-blanco	70	N/A	

Figura A.1: Resumen del estudio recopilado de las diferentes plataformas existentes en el mercado. Los datos de financiación en verde quieren decir que se consiguió el objetivo de dinero propuesto, en rojo que no se consiguió y gris que no se han encontrado los datos o no aplica.

NOMBRE	PROGRAMABLE	MODULOS INTERCAMBIABLES	SIGUELINEAS	BOTONERA	AGARRAR OBJETOS	ESQUIVAR OBSTÁCULOS	REACCION A SONIDOS/MICROFONO	COLABORACION CON OTROS ROBOTS	CONTROL REMOTO	"CARA"-PANTALLA	SENSOR DE LUZ	LUCES	CONECTIVIDAD
Plataformas crowdfunding													
kubo	con tarjetas								IR				WiFi
Thymio	bloques y texto												
Kibo	Bloques físicos												BT, WiFi
Robby	bloques y texto								IR				BT
MOSS	app												
Kamigami													
Kamibot						US							BT
PIIRO	con tarjetas												BT, NFC
Scratch Duiino	Bloques	CON IMANES											BT
Riley													WiFi
Zummi	bloques					US			IR	LCD			BT
Plataformas comerciales													
BQ Printbot Evolution	Bloques					US							BT
Zowi	Bloques					US				Matriz de leds			
Bee-Bot													
DOC													
Code&Go Robot Mouse													
Escornobot													
Lego Mindstorms													
Lego Boost	Bloques					IR		Balíza IR					BT, WiFi
ASTROBOT UBTECH						IR							BT
mOwayduino		módulo iot, cámara				IR							WiFi
Dash and dot						IR							BT
Cue (dash 2.0)						US			IR	Matriz de leds			BT
Mbot													BT
Sphero+													BT
Mio													
COII													
Marbo Pingüino	Con emojis									LCD			BT
Compluino 03						US, IR							BT
Tokylabs													
Cyclops													
Ozobot													BT

Figura A.2: Detalles recopilados de parámetros de interés en las diferentes plataformas comerciales existentes en el mercado. En verde si cuentan con la funcionalidad, rojo si no la tienen y blanco si no se detalla.

Apéndice B

Presupuesto de la plataforma desarrollada

En la Figura B.1, se muestra el presupuesto total aproximado de la plataforma (este puede variar en función de los gastos de envío). Para cada componente se indica el modelo, las unidades necesarias y el precio.

Placa	Etapa electrónica	Componente	Unidades	Precio Unidad	Total
Chasis	Conector USB	USB-B	1	0,25 €	0,25 €
Chasis	FTDI	FT232RL	1	1,63 €	1,63 €
Chasis	Microcontrolador	ATMEGA2560-16AU	1	5,25 €	5,25 €
Chasis	Batería	Litio 3.7V	1	1,50 €	1,50 €
Chasis	Batería	Soporte LiPo SMT18650	1	1,38 €	1,38 €
Chasis	Carga batería	MCP73831	1	0,18 €	0,18 €
Chasis	Regulador 3.3V	LD1117	1	0,36 €	0,36 €
Chasis	Step up 3.7V-5V	MT3608	1	0,19 €	0,19 €
Chasis	Neopixel	WS2812B	28	0,10 €	2,74 €
Chasis	Sonido	DF player	1	4,00 €	4,00 €
Chasis	Sonido	Altavoz (AL30P)	1	1,54 €	1,54 €
Chasis	Motores	Motores N20 6V	2	4,00 €	8,00 €
Chasis	Motores	driver TB6612FNG	1	1,99 €	1,99 €
Chasis	Motores	Ruedas	2	0,49 €	0,98 €
Chasis	IMU	MPU-9250	1	3,05 €	3,05 €
Botonera	Pulsadores	Pulsador con led	5	0,385	1,925
Siguelineas	IR	Sensor IR - CNY70	5	0,217	1,085
Siguelineas	Sensor color	TCS34725	1	2,276	2,276
Detección	Ultrasonidos	HCSR04	1	1,28	1,28
Pantalla	Pantalla OLED	OLED monocromática 1.3"	1	3,39	3,39
Pantalla	Sensor gestos	APDS9960	1	1,29	1,29
Comunicaciones I	Bluetooth	HC05	1	3,16	3,16
Comunicaciones I	WIFI	ESP8266 ESP-01	1	2,27	2,27
Comunicaciones II	RFID	PN532	1	4,78	4,78
Táctil	Sensor táctil	MPR121	1	0,95	0,95
General	Electrónica básica	Componentes activos y pasivos	1	2	2
PCB chasis	-	-	7	5,00 €	35,00 €
PCB módulos	-	-	1	10,00 €	10,00 €
				TOTAL	102,44 €

Figura B.1: Presupuesto de la plataforma. Los componentes de cada placa aparecen de un color. El apartado general incluye componentes presentes en todas las placas. *PCB* chasis y módulos constituye el precio de fabricación y envío de las placas en sí.

Apéndice C

Uso de pines del microcontrolador

En este apéndice se muestran los pines del microcontrolador atribuidos a cada uno de los componentes del chasis (Figura C.1) y de los módulos (Figura C.2).

Arduino MEGA		CHASIS						
		Motores	Encoders	IMU	Neopixel	Detector shield	Lectura nivel batería	DFPlayer
A7	PF7					TOP FRONT		
A8	PK0					TOP BACK		
A9	PK1					BOTTON		
A15	PK7						Leer batería	
D4	PWM PG5	PWM IZQ						
D5	PWM PE3	PWM DCH						
D10	PWM PB4							DFPlayer
D11	PWM PB5							DFPlayer
D20	SDA PD1			IMU				
D21	SCL PD0			IMU				
D29	PA7		EA-izq					
D30	PC7		EB-izq					
D31	PC6		EA-Dch					
D32	PC5		EB-Dch					
D33	PC4				Neopixel			
D34	PC3	IN IZQ 1						
D35	PC2	IN IZQ 2						
D36	PC1	IN DCH 1						
D37	PC0	IN DCH 2						

Figura C.1: Distribución de pines del microcontrolador para los componentes del chasis. Se indican los nombres de los pines, el código *Arduino* de los mismos y el uso que se les ha dado. En verde los pines analógicos y en azul los digitales.

Arduino MEGA				SHIELDS						
				UP	DOWN	UP	UP	UP/DOWN	UP/DOWN	UP/DOWN
				Botonera	Siguelneas	Pantalla	Distancia	Comunicaciones I	Comunicaciones II	
A0		PF0		Potenciómetro						
A1		PF1		Pulsadores						
A2		PF2			IR1					
A3		PF3			IR2					
A4		PF4			IR3					
A5		PF5					LDR1			
A7		PF7					LDR2			
A8		PK0								
A9		PK1								
A10		PK2			IR4					
A11		PK3			IR5					
D2	PWM	PE4	INT4		INT. color					
D3	PWM	PE5	INT5						IRQ	
D14	TX3	PJ1						WF		
D15	RX3	PJ0						WF		
D16	TX2	PH1						BT		
D17	RX2	PH0						BT		
D20	SDA	PD1	INT1		S. Color	OLED +			RFID	
D21	SCL	PD0	INT0		S. Color	S. Gestos			RFID	
D22		PA0		Led1						
D23		PA1		Led2						
D24		PA2		Led3						
D25		PA3		Led4						
D26		PA4		Led5						
D27		PA5		Buzzer						
D28		PA6					Ultrasound			

Figura C.2: Distribución de pines del microcontrolador para los componentes de los módulos. Se indican los nombres de los pines, el código *Arduino* de los mismos y el uso que se les ha dado. En verde los pines analógicos y en azul los digitales.

Apéndice D

Diseño electrónico de las placas

En este apéndice se muestran los diseños esquemáticos y *PCB* de todas las placas que forman el robot. Para los esquemáticos, se han utilizado símbolos estándar para la electrónica general; en los distintos chips y sensores se ha indicado el nombre o modelo para que sean fácilmente reconocibles. En las *PCB* se pueden ver las huellas reales de los componentes, el *ruteo* de los mismos y la serigrafía.

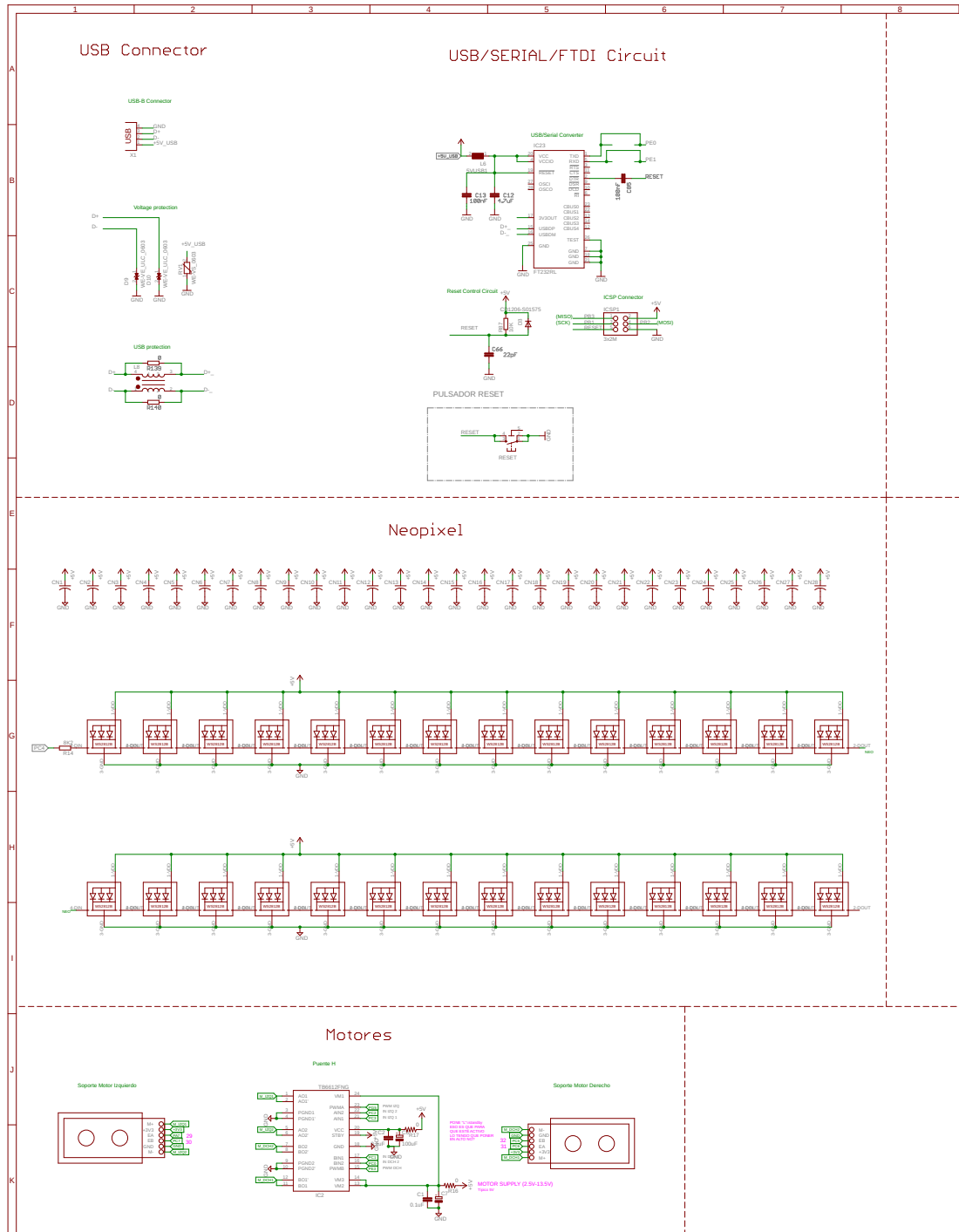


Figura D.1: Esquemático Chasis (parte 1/2).

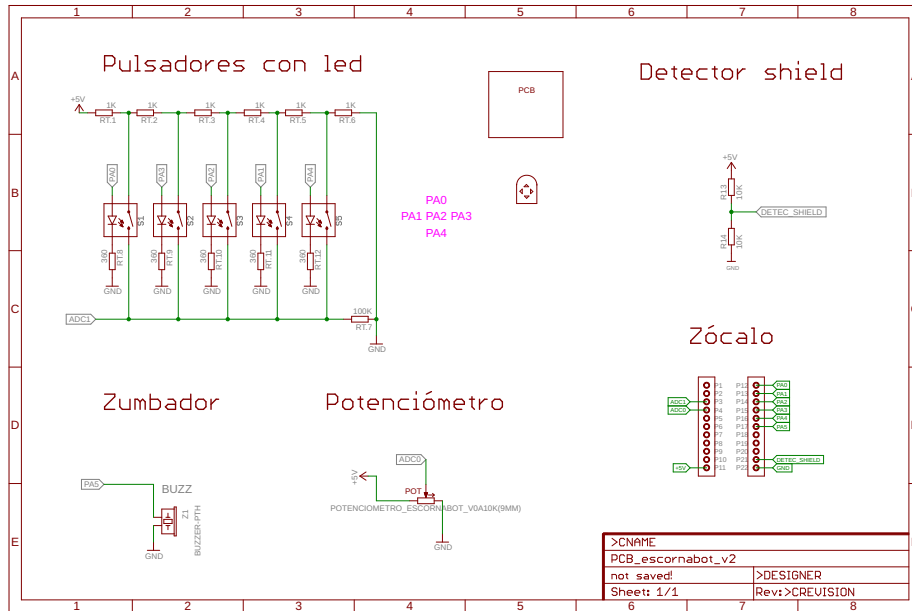


Figura D.3: Esquemático módulo Botonera con Luz.

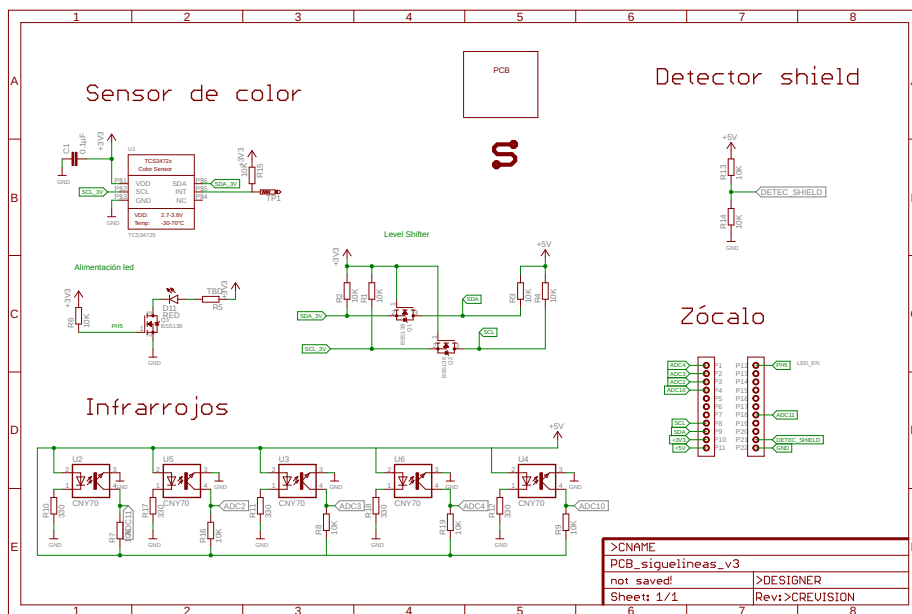


Figura D.4: Esquemático módulo Siguelíneas.

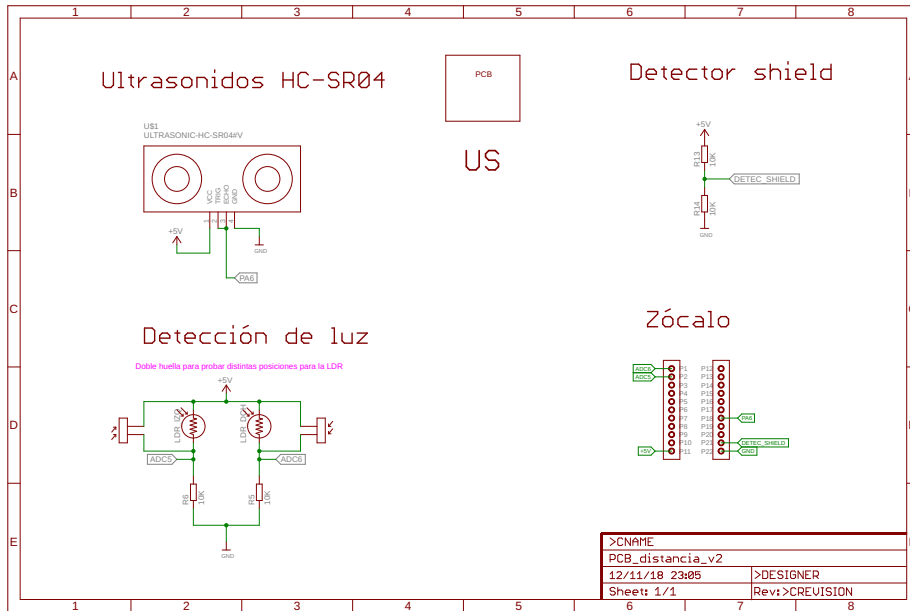


Figura D.5: Esquemático módulo Detección de obstáculos.

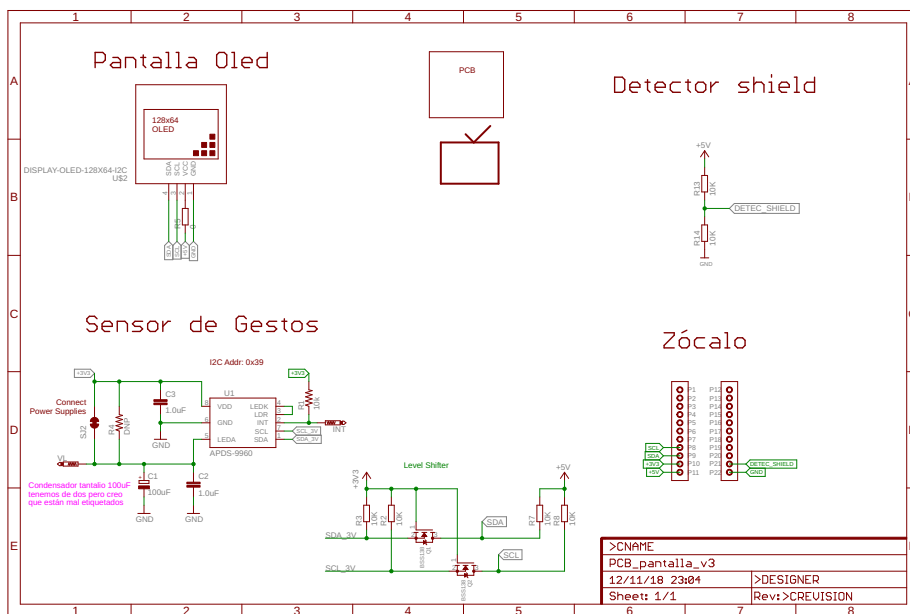


Figura D.6: Esquemático Pantalla y Gestos

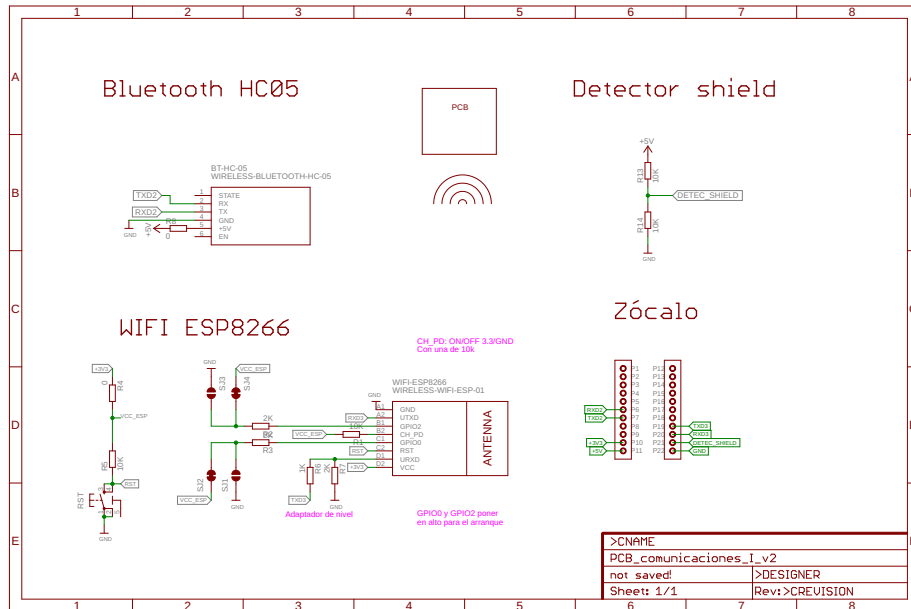


Figura D.7: Esquemático Comunicaciones I

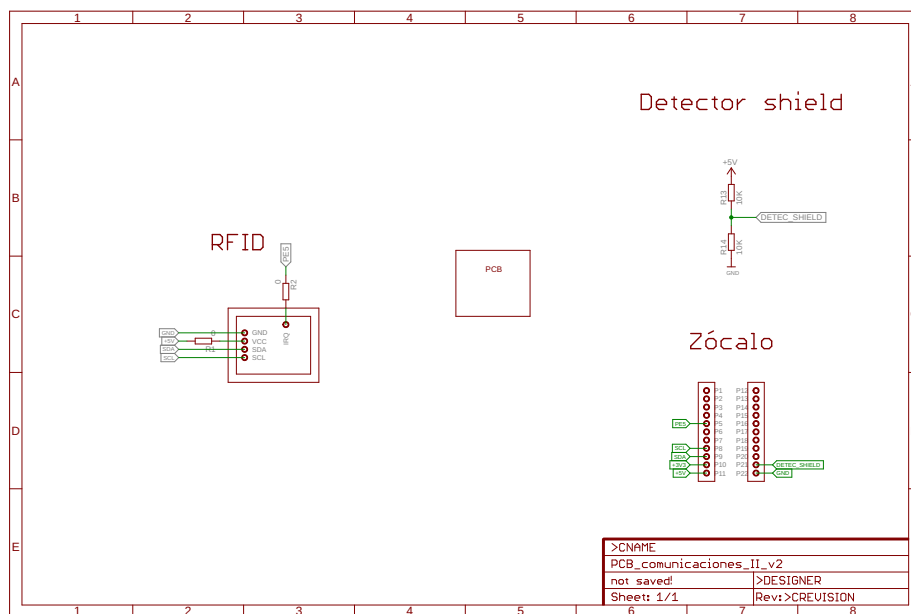


Figura D.8: Esquemático Comunicaciones II

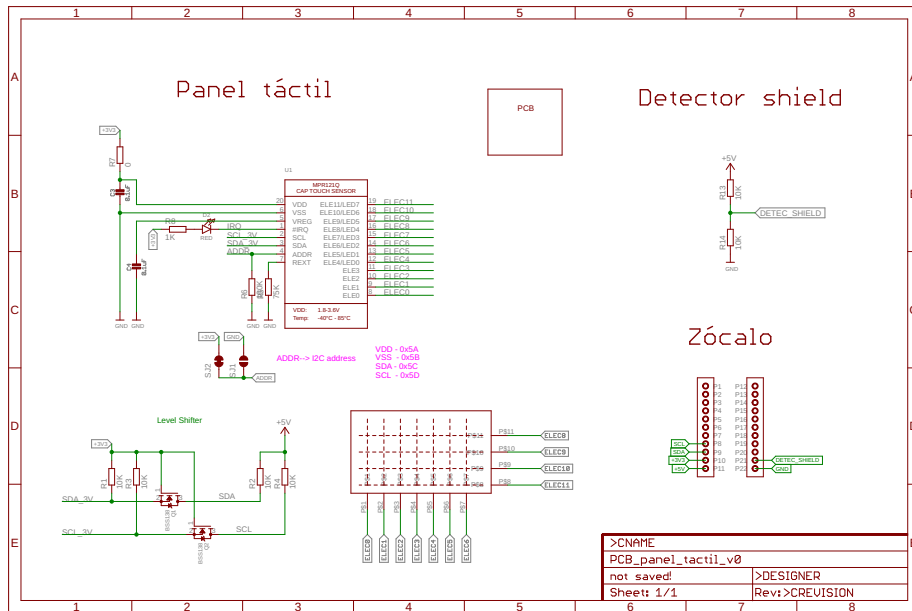


Figura D.9: Esquemático Panel Táctil

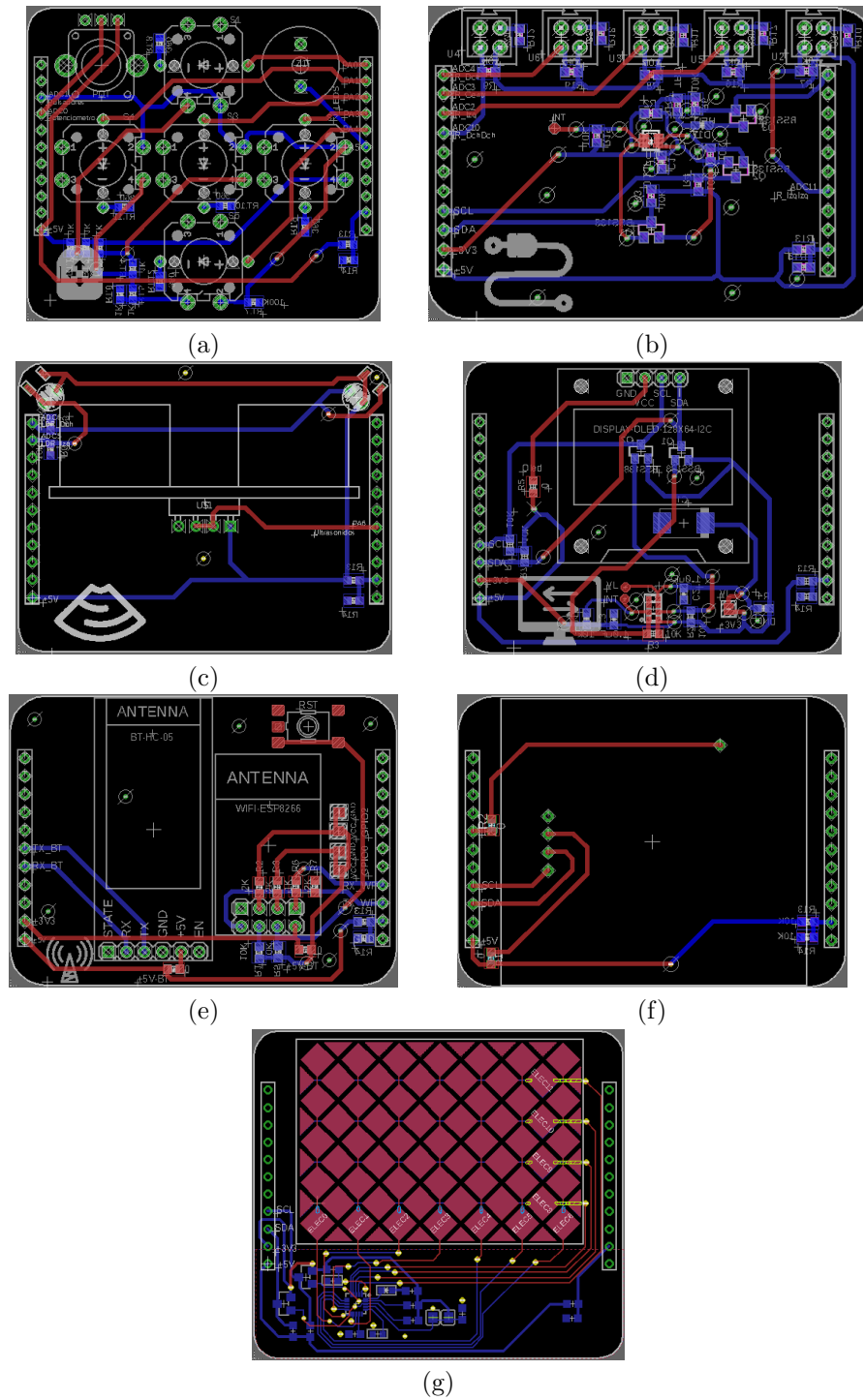


Figura D.10: PCB de los módulos: (a) Botonera con Luz. (b) Siguelíneas. (c) Detección de obstáculos. (d) Pantalla y Gestos. (e) Comunicaciones I. (f) Comunicaciones. (g) Panel Táctil.

Bibliografía

- [1] Margaret Honey, Greg Pearson, and Heidi Schweingruber. *STEM integration in K-12 education: Status, prospects, and an agenda for research*. National Academies Press Washington, DC, 2014.
- [2] Iveth Moreno, Lilia Muñoz, José Serracín, Jacqueline Quintero, Kathia Patiño, and Juan Quiel. La robótica educativa, una herramienta para la enseñanza-aprendizaje de las ciencias y las tecnologías. 2012.
- [3] María Luisa Pinto Salamanca, Nelson Barrera Lombana, and Wilson Javier Pérez Holguín. Uso de la robótica educativa como herramienta en los procesos de enseñanza. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: 12+ D*, 10(1):15-23, 2010.
- [4] Enrique Ruiz-Velasco Sánchez. La robótica pedagógica. In *Educación, universidad y sociedad: el vínculo crítico*, pages 117–148. Universitat de Barcelona, 2004.
- [5] Morales Martínez and Gabriela Dutrénit Bielous. El movimiento maker y los procesos de generación, transferencia y uso del conocimiento. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 5(15), 2017.
- [6] Luis Llamas. *Blog: Ingeniería, informática y diseño*. Acceso Noviembre, 2018.
- [7] Jeremy Blum. *Arduino a fondo*. Anaya Multimedia, 2014.
- [8] Albert Paul Malvino, Alba Castro, José Luis, Carlos López Cortón, et al. *Principios de electrónica*. 2000.