

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica



Diseño de una Base de Recarga para la Plataforma Robótica Móvil Robobo

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica
con el grado académico de Licenciatura**

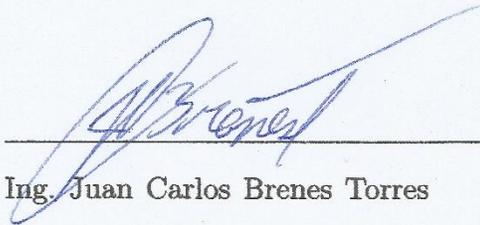
Mónica Vizcaíno Delgado

Cartago, Marzo de 2019

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería en Mecatrónica
Proyecto de Graduación
Tribunal Evaluador
Acta de Evaluación

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



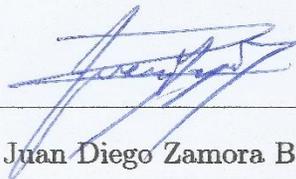
Ing. Juan Carlos Brenes Torres

Profesor Lector



Ing. Carlos Adrián Salazar García

Profesor Lector



Ing. Juan Diego Zamora Bolaños

Profesor Asesor

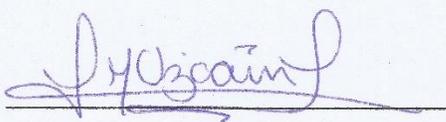
Los Miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 21 de Marzo de 2019.

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Mónica Vizcaíno Delgado

Cédula: 1-1587-0480

Cartago, 21 de Marzo de 2019.

Resumen

Robobo consiste en una plataforma robótica móvil, desarrollada por la compañía MINT de la Universidade da Coruña, como una herramienta para el aprendizaje y el aprovechamiento de las capacidades de la robótica autónoma y colaborativa en escuelas y centros de investigación. Sin embargo, su funcionamiento carece de un proceso de recarga autónomo, automatizado, homogéneo y simultáneo, por lo que en este trabajo se desarrolla y valida un primer prototipo electromecánico de una estación de recarga, que permite un ciclo de carga autónomo y simultáneo de hasta cuatro plataformas robóticas móviles Robobo.

Palabras clave: Plataforma robótica móvil, robótica autónoma, robótica colectiva, baterías de litio, sistema fiducial visual, disparador de Schmitt.

Abstract

Robobo is of a mobile robotic platform, developed by Universidade da Coruña's MINT company, as a tool for learning and benefit from the different advantages of autonomous and collaborative robotics at schools and investigation centers. However, its performance lacks on an autonomous, automated, homogeneous and simultaneous recharging process, for which a first electromechanical prototype of a recharging station is developed and validated in this document, as an approach of an autonomous and simultaneous charging cycle of up to four Robobo platforms.

Keywords: Robotic mobile platform, autonomous robotics, collective robotics, lithium batteries, visual fiducial system Schmitt trigger.

A mi querida familia

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
1. Introducción.....	1
1.1. Entorno del proyecto	1
1.2. Definición del problema.....	2
1.2.1. Generalidades.....	2
1.2.2. Síntesis del problema	3
1.3. Diagrama causa y efecto	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos Específicos.....	5
1.5. Estructura del documento.....	6
2. Marco Teórico	7
2.1. Introducción	7
2.2. Visión Artificial.....	7
2.3. Certificación de Conformidad Europea.....	11
2.3.1. Seguridad en los Juguetes	11
2.3.2. Seguridad en Media Tensión	12
2.4. Carga de baterías de polímeros de litio	12
2.4.1. Cargador lineal monolítico con regulación térmica LTC 1733	14
2.5. Sistemas de conversión de Corriente Alterna a Corriente Directa (CA/CD) y Reducción de Tensión	20
2.5.1. Fuente de alimentación lineal básica	20
2.5.2. Fuentes Conmutadas	21

2.6.	Transferencia inalámbrica de potencia.....	22
2.7.	Modelado por Deposición Fundida o FDM	25
2.8.	Conceptos básicos de estadística.....	27
3.	Estado de la cuestión	30
3.1.	Robótica	30
3.1.1.	Robots con estaciones de recarga	32
3.2.	Sistemas Fiduciales Visuales	37
3.2.1.	ARToolkit	39
3.2.2.	ARTag.....	40
3.2.3.	April Tags	40
4.	Metodología.....	46
4.1.	Enfoque de la solución	46
4.1.1.	Proceso productivo.....	46
4.1.2.	Criterios de selección.....	48
4.2.	Requerimientos de diseño	49
5.	Desarrollo de base de recarga para el Robobo	51
5.1.	Solución del Sistema Eléctrico.....	51
5.1.1.	Funcionamiento de la lógica de indicación de estado de carga	59
5.2.	Solución del Sistema de Reconocimiento	65
5.3.	Solución del Diseño de la Estructura	68
5.4.	Presupuesto de materiales	76
6.	Validación del prototipo de la base de recarga para el Robobo	78
6.1.	Pruebas de la lógica de funcionamiento del circuito en Protoboard	78
6.2.	Pruebas de la lógica de funcionamiento del circuito en PCB	81
6.3.	Pruebas del sistema de acople y la estructura	85

7. Conclusiones.....	93
7.1. Conclusiones	93
7.2. Recomendaciones.....	94
Bibliografía	96
Apéndices.....	105
Apéndice A.1.....	105
Apéndice A.2.....	107
Apéndice A.3.....	110
Anexos	117
Anexo B.1.....	117
Anexo B.2.....	119
Anexo B.3.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Robot educativo Robobo. [1]	1
Figura 2. Carga de la batería del Robobo. [2].....	3
Figura 3. Paquete educativo del Robobo. [3].....	3
Figura 4. Diagrama causa y efecto sobre el problema planteado.	4
Figura 5. Trayectoria seguida por la luz al atravesar una lente biconvexa de grosor despreciable y formar una imagen. [4]	8
Figura 6. Relación del ángulo con respecto al nadir (Θ) y las oclusiones en una imagen, con $\Theta_1 > \Theta_2$	9
Figura 7. Imagen con los mismos 256 niveles de intensidad y con diferentes resoluciones espaciales. [4].....	10
Figura 8. Imagen en niveles de gris y su correspondiente histograma. [4].....	10
Figura 9. Batería LiPo del Robobo	13
Figura 10. Tensión y corriente vs Capacidad para un ciclo de carga de una batería de Litio.	14
Figura 11. Configuración de pines del LTC 1733. [17].....	15
Figura 12. Corriente de carga (I_{BAT}) vs tensión de la batería (V_{BAT}). [17].....	17
Figura 13. Corriente de carga (I_{BAT}) vs temperatura con regulación térmica habilitada. [17]	18
Figura 14. Aplicación típica del LTC 1733. [17].....	18
Figura 15. Ciclo de carga del LTC1733.....	19
Figura 16. Circuito de una fuente de alimentación lineal básica. [18]	20
Figura 17. Circuito básico de un SMPS. [18].....	21
Figura 18. Diagrama de bloques del circuito de un sistema de transmisión de potencia inalámbrico	23
Figura 19. Diagrama de bloques que ejemplifica un sistema de transferencia de potencia inalámbrica por acoplamiento de resonancia magnética MCR-WPT para la carga de un robot. [24]	24
Figura 20. Sistema MCR-WPT de dos bobinas (a), y su circuito equivalente (b).....	24
Figura 21. Impresora 3D Mendel Max XL v5 de MakerGal utilizada para la fabricación del prototipo de la base de recarga.....	26
Figura 22. Variaciones en la orientación del filamento en una impresión 3D. (a: 0°, b: 45°, c: 90°, d: +45°/-45°). [25]	27

Figura 23. Robot Aéreo Autónomo (UAV). [38]	31
Figura 24. Robot humanoide ASIMO de Honda. [38].....	32
Figura 25. Aibo ERS-7M2 con estación de energía y marcadores. [42]	33
Figura 26. Wheelphone y estación de carga con contactos al aire. [50].....	34
Figura 27. Robot Cozmo y su cargador. [51] [52].....	34
Figura 28. Elisa-3 cargando. [46]	34
Figura 29. CHiP y estación de carga SmartBed. [47].....	34
Figura 30. Aibo ERS-1000 y accesorios. [43]	35
Figura 31. a) Roomba 980 b) Estación de recarga compatible con las series de Roomba 500,600,800 and 900. [48] [55]	35
Figura 32. Comparación de etiquetas visuales fiduciales. [62]	39
Figura 33. Ejemplo de imágenes de entrada al sistema de AprilTag.....	41
Figura 34. Tasa de falsos positivos empírica vs complejidad de las etiquetas. [57].....	43
Figura 35. Ejemplo de imagen sintética con etiqueta a 10 m de la cámara y con su vector normal a 30.3° de la cámara. [57]	43
Figura 36. Evaluación de la exactitud de orientación con respecto al ángulo entre la normal de la etiqueta y la cámara (Φ). [57]	44
Figura 37. Ejemplo de Código QR. [66].....	45
Figura 38. Enfoque de la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto	46
Figura 39. Importancia relativa de los criterios de selección propuestos	48
Figura 40. Corriente de carga (I_{BAT}) vs tensión de la batería (V_{BAT}). [17].....	51
Figura 41. Receptor USB del Robobo y su conector. [67]	53
Figura 42. Adaptador Receptor de celular para carga inalámbrica.....	53
Figura 43. Sistema de carga por contacto con adaptador para el Robobo	54
Figura 44. Convertidor Regulado RAC10-05SK/277 de RECOM.....	56
Figura 45. Condiciones eléctricas generales de la base de recarga y las cuatro subestaciones	56
Figura 46. Conector IEC60 320-C14 [75]	59
Figura 47. Circuito final para una subestación de recarga.....	59
Figura 48. Sistema de carga con adaptador para el Robobo con tres contactos	60
Figura 49. Lógica para encender los LED en color verde o azul.....	61
Figura 50. Consumo máximo de Rs cuando el Robobo está conectado	61

Figura 51. Consumo máximo de R_s cuando $I_{CHG} = 1.5 \text{ A}$	62
Figura 52. Comparador no inversor con histéresis. [78].....	63
Figura 53. Diagrama de bloques de los circuitos impresos que componen la solución eléctrica para una subestación de recarga.....	65
Figura 54. Proceso de aproximación a la base de recarga mediante reconocimiento de AprilTags	67
Figura 55. Boceto de cargadores o estacionamientos en línea.....	69
Figura 56. Boceto de subestaciones con rampas dispuestas alrededor de un cilindro.....	69
Figura 57. Propuesta de diseño a partir de un hexágono con etiquetas de reconocimiento.....	70
Figura 58. Detalle del deslizador del Robobo.....	70
Figura 59. Propuesta de diseño cilíndrico y cubo con etiquetas de reconocimiento	71
Figura 60. Propuesta de diseño para incorporar conector IEC60 320-C14	71
Figura 61. Propuesta de diseño a partir de base cuadrada	72
Figura 62. Propuesta de diseño cilíndrico y cubo con etiquetas de reconocimiento	72
Figura 63. Detalles de la base final del prototipo	73
Figura 64. Detalles de la rampa final del prototipo	73
Figura 65. Detalles de la tapa final del prototipo.....	74
Figura 66. Filamento SMARTFIL PLA natural de (1.75 ± 0.03) mm para impresoras 3D. [80].	75
Figura 67. Circuito para verificar la lógica de funcionamiento del comparador no inversor sin histéresis.....	78
Figura 68. Flanco positivo a la salida del comparador no inversor	80
Figura 69. Flanco negativo a la salida del comparador no inversor	80
Figura 70. Diseño del PCB para una subestación de carga.....	82
Figura 71. PCB principal y de los LED RGB para una subestación de carga	83
Figura 72. Subestación con resistencia para simular estado de carga en curso (a) y estado de tiempo de carga concluido (b).....	84
Figura 73. Acople del Robobo con contactos cilíndricos	86
Figura 74. Acople del Robobo con contactos de muelle tipo hoja	86
Figura 75. Subestación en estado disponible (a) y cargando (b)	86
Figura 76. Acople manual del Robobo a la subestación de carga	87
Figura 77. Acople a la base de recarga con el movimiento del Robobo programado en Scratch. 87	87

Figura 78. Contactos para baterías utilizados como contactos al aire en el adaptador del Robobo (a) y en la base de recarga (b). [88] [87].....	88
Figura 79. Subestación en estado de tiempo de carga concluido.....	89
Figura 80. Estación de recarga para cuatro Robobos.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistemas de robots con estaciones de recarga.....	33
Tabla 2. Comparación de robots que poseen estación de recarga.....	36
Tabla 3. Distancia Hamming entre un par de códigos. [61]	38
Tabla 4. Estados de la subestación de carga	52
Tabla 5. Características principales de bobinas para carga inalámbrica.....	54
Tabla 6. Características principales de los convertidores AC/DC regulados	55
Tabla 7. Características de fusibles de actuación lenta de Schruter	58
Tabla 8. Valores principales considerados para implementar la lógica de funcionamiento de cada subestación de recarga	62
Tabla 9. Valores teóricos de las tensiones del comparador no inversor con histéresis	64
Tabla 10. Presupuesto de materiales para el circuito de la estación de carga del Robobo	76
Tabla 11. Presupuesto de materiales para el circuito eléctrico en cantidades de 1000 unidades por componente.....	77
Tabla 12. Valores teóricos utilizados para las pruebas en protoboard del comparador no inversor sin realimentación	79
Tabla 13. Mediciones para comprobación de funcionamiento de LED rojo	81
Tabla 14. Mediciones para simular estado de carga con consumo de 100 a 1000 mA	84
Tabla 15. Mediciones para simular estado de tiempo de carga concluido con consumo de 0.005 a 2 mA.....	85
Tabla 16. Pruebas de acoples manuales entre el Robobo y la subestación de recarga	87
Tabla 17. Pruebas de acoples entre el Robobo y la subestación de recarga programados con Scratch	88
Tabla 18. Verificación del funcionamiento del estado de “tiempo de carga concluido”	88
Tabla 19. Mediciones de la longitud de rampa a rampa de la estructura.....	90
Tabla 20. Resultados de la verificación y validación del prototipo de la base de recarga.....	90

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Entorno del proyecto

El Grupo Integrado de Ingeniería (GII) de la Universidade da Coruña (UDC) es un grupo interdisciplinario de investigación aplicada en ingeniería, orientado a la transferencia de conocimiento y a la generación de nuevos productos en el entorno industrial. El GII se centra en dos ejes estratégicos, los cuales son: la generación de conocimiento científico y la transferencia de tecnología a la industria. La investigación científica del GII se estructura a través de las siguientes líneas de investigación: Ingeniería Naval, Dinámica de Fluidos, Inteligencia Computacional, Robótica, Sistemas de Medida y Organización Industrial.

Robobo es un robot educativo que fue desarrollado por la compañía MINT de la Universidade da Coruña y consiste en una base móvil como la de la Figura 1, a la que se acopla un teléfono inteligente para realizar proyectos de robótica autónoma tanto en aulas, como a nivel particular y de investigación. El uso del teléfono inteligente en el Robobo permite que adquiera un largo ciclo de vida al ser tecnología en constante actualización. Se han desarrollado una serie de aplicaciones que permiten programar a Robobo fácilmente desde cualquier ordenador mediante conexión wifi, empleando diferentes lenguajes de programación.



Figura 1. Robot educativo Robobo. [1]

1.2. Definición del problema

1.2.1. Generalidades

La programación del Robobo se puede dar en tres niveles distintos: el primero utiliza bloques de Scratch, y está orientado a programadores principiantes; el segundo se basa en JAVA Android, un nivel intermedio para estudiantes con experiencia en robótica para la programación basada en texto; y el tercero corresponde a ROS (Robot Operating System), que está enfocado a usuarios avanzados, como estudiantes de informática, ingeniería o robótica, o bien grupos de investigación en el área de la robótica autónoma y robótica colectiva que quieran usar esta plataforma por las características tecnológicas que proporciona, comparado con otras opciones del mercado como pueden ser el Thymio II o los LEGO Mindstorms, a un bajo coste, de aproximadamente €299 por unidad. Debido a sus capacidades, no solo se da el uso individual del Robobo en hogares, sino también en instituciones educativas y de investigación, desde escuelas de primaria hasta universidades. En cualquier nivel, se tiene acceso a todos los sensores y actuadores tanto de la plataforma robótica como del teléfono inteligente, y a todas las funcionalidades proporcionadas por el sistema operativo de Android [1].

Por lo tanto, durante el uso cotidiano del Robobo es común que se requiera poner a trabajar varias unidades de manera simultánea, ya sea en el aula o en tareas de investigación. Actualmente, cuando existe la necesidad de recargar las unidades en uso, se debe de hacer de manera individual y manual con un cargador USB estándar, como se indica en la Figura 2. Incluso, a nivel comercial se dispone del paquete de cuatro unidades de la Figura 3, por el enfoque que posee al uso en centros educativos. Este paquete incluye un cable USB tipo A Macho a micro USB tipo B Macho por cada base; sin el cargador de pared. Esto requiere emplear un elevado número de cargadores de pared, los cuales pueden variar sus capacidades de uno a otro, y con ello variar los tiempos de carga del robot; además, representa un inconveniente si el número de Robobos es mayor a las tomas de corriente disponibles en la sala, o si se conecta el cable de manera incorrecta, ya que podría provocar daños serios a la base.

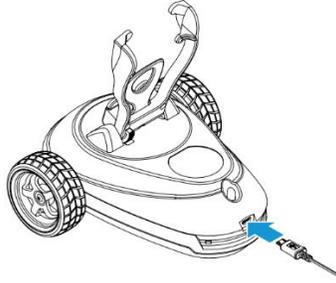


Figura 2. Carga de la batería del Robobo. [2]



Figura 3. Paquete educativo del Robobo. [3]

Robobo fue creado como una herramienta para el aprendizaje y el aprovechamiento de las capacidades de la robótica autónoma y colaborativa; sin embargo, su recarga carece de autonomía al ser aún un proceso manual. De acuerdo con el tipo de tareas para el que sea programado, o bien para aumentar las capacidades del Robobo y ejemplificar mejor las capacidades que posee esta área de la robótica, resultó conveniente habilitar un proceso de recarga autónomo, para que se pueda programar de acuerdo con las prioridades y características de las tareas a realizar; por ejemplo, para permitir al usuario controlar el o los robots recargándose, el nivel de batería al que se acoplará o desacoplará el robot, entre otros.

Sin embargo, para automatizar este proceso sin alterar las características actuales de la plataforma, se debieron considerar factores mecánicos, dinámicos y eléctricos importantes para obtener un proceso de recarga automatizado óptimo. Por lo tanto, este proyecto se llevó a cabo con los materiales y herramientas a disposición en el laboratorio de investigación para el diseño, manufacturación y validación de un prototipo de referencia para obtener un producto comercial.

1.2.2. Síntesis del problema

Ausencia de un proceso de recarga autónomo, automatizado, homogéneo y simultáneo de las bases móviles del Robobo.

1.3. Diagrama causa y efecto

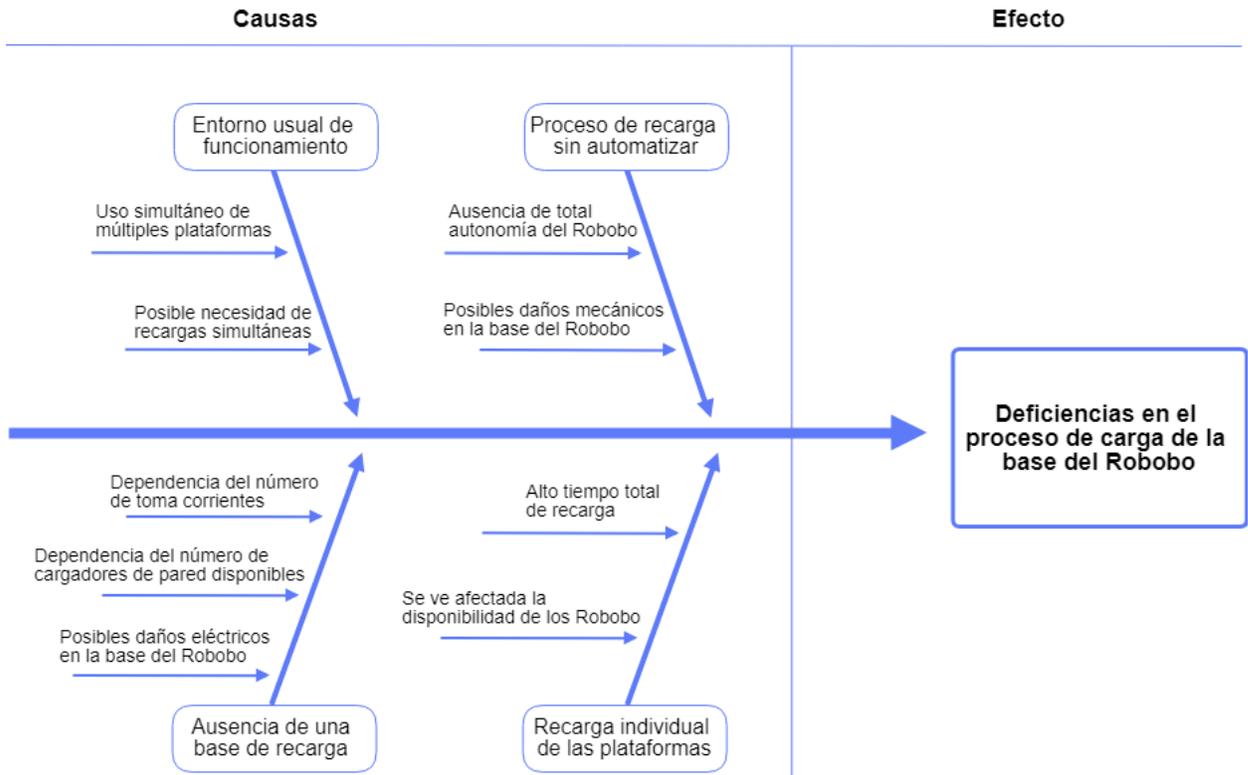


Figura 4. Diagrama causa y efecto sobre el problema planteado.

Elaborado mediante Diagramly

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar una base de recarga que permita la recarga autónoma y simultánea de cuatro plataformas robóticas móviles Robobo.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar los requerimientos necesarios para la recarga autónoma e independiente de una plataforma robótica móvil.
- Diseñar un prototipo electromecánico que permita el acople y la carga simultánea de cuatro plataformas robóticas, que cumpla con la normativa eléctrica correspondiente.
- Idear un plan de validación y verificación de la solución planteada.

1.5. Estructura del documento

En los Capítulos siguientes se pretende que el documento permita al lector identificar el procedimiento utilizado para llegar a una solución que solventa el problema de la sección 1.2.2. A partir de esta premisa, se inicia con el Capítulo 2, o Marco Teórico, y el Capítulo 3 sobre el Estado de la cuestión, que facilitan al lector la información necesaria para comprender el desarrollo y elección de la solución propuesta.

Se continúa, en el Capítulo 4, con una descripción de la metodología planteada para obtener una solución óptima y los requerimientos que esta implica. El Capítulo 5 desarrolla la solución propuesta a partir de la metodología; y es en el Capítulo 6 donde se presentan los resultados obtenidos de la validación del prototipo y su análisis respectivo. Finalmente, en el Capítulo 7 se incluyen las conclusiones, y recomendaciones de acuerdo a los objetivos planteados.

Capítulo 2

2. Marco Teórico

2.1. Introducción

El marco teórico que se desarrolla a continuación permite al lector conocer los conceptos básicos necesarios para entender el desarrollo de la solución. Se inicia con la descripción de un sistema de visión artificial y algunos conceptos básicos sobre imágenes digitales. Posteriormente se expone un resumen de la normativa de Conformidad Europea y sus áreas relacionadas al proyecto. Así mismo, se describen las características generales de sistemas que permiten la conversión y reducción de tensión, y tecnologías de transferencia de potencia, lo que permite tener un mejor panorama de cómo se resolvió el problema principal y porqué se seleccionaron las diferentes técnicas y elementos.

Se incluye una sección sobre la técnica de impresión 3D por medio del Modelado por Deposición Fundida o FDM, técnica que se utilizó para la manufactura del prototipo. Finalmente, se definen los conceptos básicos de estadística que se emplearon a lo largo del proceso de validación.

2.2. Visión Artificial

También se le conoce como visión computarizada visión industrial o visión de máquina. De acuerdo con [4], la visión artificial tiene como finalidad la extracción de información del mundo físico a partir de imágenes, para lo cual utiliza un computador. Una imagen bidimensional es una función que a cada par de coordenadas (x, y) asocia un valor relativo a alguna propiedad del punto que representa (por ejemplo, su brillo o su matiz). Una vez digitalizada una imagen bidimensional se le conoce como imagen digital, y queda constituida por un conjunto de elementos llamados *píxeles*. Cada píxel ofrece cierta información sobre una región elemental de la imagen.

Por lo tanto, un sistema de Visión Artificial corresponde a un sistema que requiere de un sensor óptico para captar una imagen y actuar sobre la representación de una realidad que le proporciona información como por ejemplo de brillo, colores o formas. El sensor óptico se suele basar en modelos o principios como el de *cámara oscura* o *lente fina*, en el que una lente de grosor

despreciable y perfectamente biconvexa permite recoger la luz de una escena y proyectarla de manera nítida sobre una superficie llamada plano de formación de la imagen, como el de la Figura 5. Así, una figura formada por un conjunto de puntos P que equidistan de la lente se corresponden a una figura semejante, pero invertida, en el plano de formación de la imagen [4].

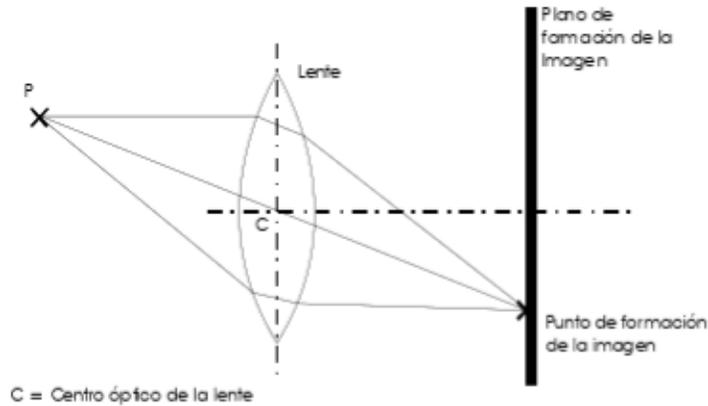


Figura 5. Trayectoria seguida por la luz al atravesar una lente biconvexa de grosor despreciable y formar una imagen. [4]

En un sistema de Visión Artificial se pueden definir en cuatro fases o etapas principales [4]:

- Primero, la *captura* o adquisición de las imágenes digitales mediante algún tipo de sensor.
- Luego, el tratamiento digital de las imágenes para facilitar las etapas posteriores. Consiste en un *procesamiento previo* donde, mediante filtros y transformaciones geométricas, se eliminan partes indeseables de la imagen o se realzan partes de interés, de manera que las etapas posteriores sean posibles o se simplifiquen.
- Tercero, se aíslan los elementos que interesan de la escena para comprenderla, lo que se conoce como *segmentación*. La segmentación es proceso de descomposición de una imagen de entrada en segmentos o regiones, que comprenden píxeles relativamente homogéneos. Estos píxeles comparten una mayor homogeneidad espectral interna entre ellos que la homogeneidad externa con píxeles en otras regiones; es decir, usualmente comparten valores o rangos de valores de intensidad o color [5].
- Por último, se llega a la etapa de *reconocimiento* o *clasificación*. Se distinguen los objetos segmentados, gracias al análisis de ciertas características que se establecen previamente para diferenciarlos.

Estas cuatro fases no siempre se siguen de manera secuencial, en ocasiones deben realimentarse hacia atrás. Es normal volver a la etapa de segmentación si falla la etapa de reconocimiento, o a la de preproceso, o incluso a la de captura, cuando falla alguna de las siguientes [4] .

La calidad de la imagen es muy importante para su aprovechamiento dentro de un sistema de Visión Artificial. Es común caracterizar a una imagen por su brillo o contraste, y ambas son las variables fundamentales y más usadas cuando se habla de mejorar la calidad de una imagen [4]. El brillo es la cantidad de luz o energía que posee, y a la diferencia de intensidad de iluminación se le denomina contraste. Se dice que una imagen tiene gran contraste si las diferencias de intensidad que contiene son pronunciadas. Por otro lado, se caracteriza también la saturación de una imagen, que corresponde a la proporción entre la longitud de onda dominante en una imagen y el resto de las longitudes de onda del espectro de colores [4], lo que define la intensidad o grado de pureza de cada color.

Las imágenes pueden presentar oclusiones, palabra que proviene del latín *occulus*, que significa “cerrado” [6]. En una imagen se utiliza para definir cuán expuesto se encuentra cada punto a la iluminación. Por lo tanto, cuanto mayor es la oclusión, mayor es la oscuridad. La probabilidad de oclusión aumenta cuanto mayor es el ángulo con respecto al nadir (Θ), como se muestra en la Figura 6, donde las sombras presentes en la imagen son mayores en el caso de Θ_1 , para un $\Theta_1 > \Theta_2$. Las sombras u oclusiones pueden ocasionar que los puntos de un objeto en la imagen no correspondan con la realidad o queden ocultos [7] [8].

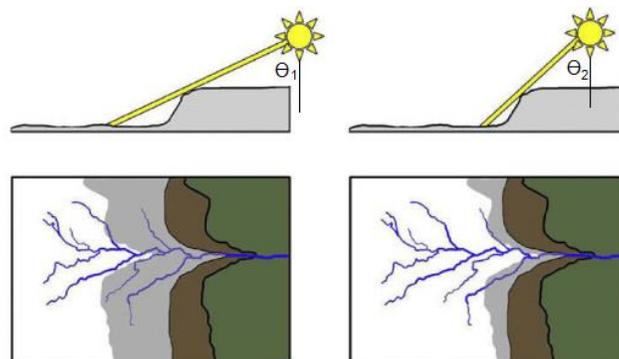


Figura 6. Relación del ángulo con respecto al nadir (Θ) y las oclusiones en una imagen, con $\Theta_1 > \Theta_2$.

[7]

Otra característica de las imágenes es su resolución espacial, que se define como el número de muestras por unidad de espacio sobre el objeto original, o bien, la distancia entre dos píxeles adyacentes [4]. La unidad de medida más habitual suelen ser los píxeles por pulgada (o DPIs) medidos sobre el objeto original. En la Figura 7 se pueden apreciar los efectos de reducir la resolución espacial en una imagen.



Figura 7. Imagen con los mismos 256 niveles de intensidad y con diferentes resoluciones espaciales. [4]

Es posible representar una imagen, con pérdidas de información, a través de histogramas. Los histogramas corresponden a un tipo de diagrama de barras como el de la Figura 8, en el que sobre el eje de las abscisas se representan los diferentes valores que pueden tomar los píxeles de una imagen y en el eje de las ordenadas el número de píxeles que se encuentran en una imagen para ese valor de cuantización [4]. Si una imagen sólo tiene información sobre el brillo se habla de una imagen en niveles de gris, y se suelen utilizar hasta 256 niveles para representar los tonos intermedios desde el negro (0) hasta el blanco (255). Para las imágenes en color se utilizan 256 niveles para representar cada uno de los tres colores primarios rojo, verde y azul o RGB, por sus siglas en inglés.

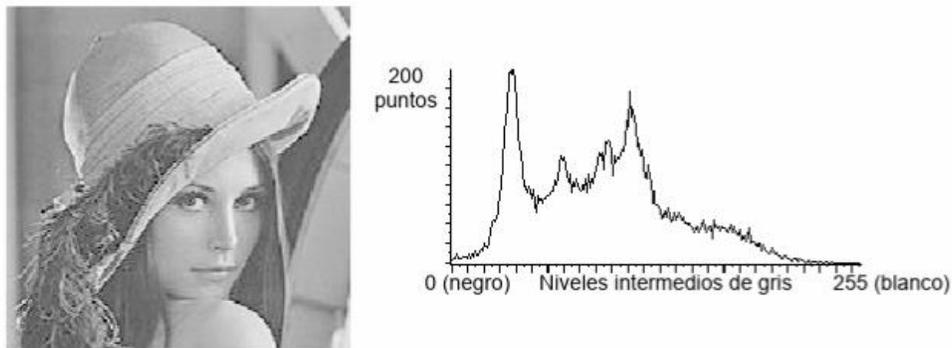


Figura 8. Imagen en niveles de gris y su correspondiente histograma. [4]

El análisis del histograma de una imagen permite conocer detalles sobre su calidad y el proceso de captura que se utilizó para obtenerla. Las imágenes de calidad suelen tener un rango dinámico amplio y no saturado [4]. En las tareas de reconocimiento es importante que las imágenes tengan un alto nivel de contraste, sin llegar a estar saturadas, para poder percibir los detalles a segmentar con mayor facilidad.

Se pueden aplicar filtros que modifican el histograma de una imagen para aumentar el contraste, disminuir la saturación o realzar los bordes presentes. El filtrado puede resultar útil para destacar elementos de la imagen que se necesitan en las etapas de reconocimiento, sin embargo, se debe tomar en cuenta que un filtrado digital nunca aumenta la información de una imagen, y en el mejor de los casos no altera la información presente en la misma, o bien la disminuye [4].

Resulta importante entender estos conceptos debido a que el Robobo ofrece la capacidad de implementar un sistema de Visión Artificial al utilizar como sensores ópticos las cámaras de alta resolución que poseen los teléfonos inteligentes. Por lo tanto, es posible extraer información del mundo físico para identificar y localizar una base de recarga a partir de imágenes digitales.

2.3. Certificación de Conformidad Europea

El mercado de Conformidad Europea, CE, es la manera de identificar si un producto ha sido evaluado y cumple con los requisitos esenciales de seguridad, sanidad y protección de medio ambiente exigidos por la Unión Europea (UE) [9]. Muchos productos requieren llevar el mercado CE para poder venderse en el Espacio Económico Europeo (EEE), el cual está conformado por la UE, Islandia, Liechtenstein y Noruega. El mercado es necesario aun cuando el bien se fabrique fuera del EEE.

Los requisitos para obtener el mercado CE dependen de directivas establecidas por la UE que varían de acuerdo con el tipo de producto o sector. Entre los grupos de productos se encuentran: juguetes, equipos eléctricos, maquinaria, instrumentos de medición, dispositivos médicos, equipos de protección personal, entre otros) [9]. Los pasos generales para obtener la certificación CE están resumidos en el Anexo B.1.

2.3.1. Seguridad en los Juguetes

En [10] se menciona en la lista de productos que no se consideran juguetes todos aquellos “Productos destinados a utilizarse con fines pedagógicos, como equipo científico, en colegios y

otros contextos educativos bajo la vigilancia de instructores adultos.” En el caso del Robobo, este puede ser adquirido para uso personal por parte de los niños en sus hogares por lo que no entra del todo en esta clasificación; sin embargo, la base de recarga fue concebida para ser utilizada en las aulas de centros educativos, para realizar la recarga de cuatro robots a la vez; número de plataformas de Robobo que se comercializa en el paquete educativo.

Además, en el Anexo II del mismo documento, que trata los requisitos particulares de seguridad, se especifica que “Los juguetes no funcionarán con corriente eléctrica cuyo voltaje nominal sea superior a 24 voltios de corriente continua o el voltaje de corriente alterna equivalente y la tensión de sus partes accesibles no superará los 24 voltios de corriente continua o el voltaje de corriente alterna equivalente”, así como que “el transformador eléctrico no será parte integrante del mismo”. Por lo tanto, nuevamente la plataforma de recarga que trata este proyecto no se consideró un juguete. debido a que incluye la transformación desde 85 a 305 V de corriente alterna, a 5 V de corriente directa, como se verá en la sección 5.1 sobre la solución del sistema eléctrico.

2.3.2. Seguridad en Media Tensión

El Parlamento Europeo y el Consejo establecen en [11] las legislaciones en materia de comercialización de material eléctrico destinado a utilizarse con una tensión nominal comprendida entre los límites de tensión 50 y 1000 V en corriente alterna y entre 75 y 1500 V en corriente continua. Se deberán cumplir y validar los principales objetivos de seguridad referentes al material eléctrico que se encuentre dentro de los rangos mencionados para autorizar la comercialización de un producto con el marcado CE.

Los objetivos propuestos por la UE se dividen en tres categorías a ser: condiciones generales, protección contra los peligros derivados del propio material eléctrico, y protección contra los peligros causados por efecto de influencias externas sobre el material eléctrico. Estos se resumen en el Anexo B.1 y se consideran importantes debido a las tensiones ya mencionadas de 85 a 305 V con que se diseñó la base de recarga propuesta.

2.4. Carga de baterías de polímeros de litio

El litio es el metal más liviano conocido y proporciona la mayor densidad de energía de todos los metales conocidos [12]. Puede resultar altamente inflamable y corrosivo, por lo que las celdas de batería no usan directamente litio sino compuestos del mismo por motivos de seguridad.

Existen dos grandes tipos de baterías basadas en litio: las de iones de litio o Li-ion y las de polímeros de litio o LiPo.

Ya que el litio es muy reactivo y puede hacer explosión, el ciclo de las baterías debe de ser monitoreado. Su tensión nominal suele ir de 3.6 a 3.7 V; así como descargarlas a menos de 3 V puede dañarlas, y recargarlas a más de 4.2 V puede hacer que la celda se infle, caliente o prenda fuego [13]. Estos valores dependen de la composición química, como en el caso de la batería de la Figura 9 que corresponde a la que se utilizó en el Robobo, su tensión nominal es de 3.7 V. Por lo tanto, un circuito de protección debe limitar el pico de tensión de cada celda durante la carga, especialmente si van a ser conectadas en serie o paralelo para formar un paquete de baterías; el control de tensión debe de mantenerse independiente para cada celda. Es importante contar con electrónica y/o fusibles que eviten la inversión de la polaridad [13].



**Figura 9. Batería LiPo del Robobo
(3.7 V, 5000 mAh)**

Las LiPo, utilizan óxido metálico de litio en el electrodo positivo y un material de carbono en el electrodo negativo, al igual que las Li-ion. Sin embargo, poseen una película ultrafina de plástico seco como electrolito en medio de los electrodos, que permite que solo los iones migren del electrodo negativo al positivo; en lugar del electrolito tradicional líquido o en gel [14]. Esto ofrece ventajas en términos de potencia, tamaño y diseño, ya que permiten ser empacadas de diversas maneras.

En comparación con las baterías de Li-ion, las baterías LiPo son menos peligrosas porque el polímero no es inflamable. Gracias a esto sus celdas resultan más resistentes a una sobrecarga y la posibilidad de fugas de electrolitos es menor. Ofrecen una densidad de energía mucho mayor,

pero a un costo económico más alto [12]. No obstante, las baterías LiPo no pueden proporcionar ráfagas de corriente para cargas pesadas, ya que el electrodo seco de estas baterías tiene una resistencia muy alta.

Debido a los cuidados que hay que tener durante la recarga de las baterías de litio, se suelen utilizar cargadores especiales que garantizan que el proceso cuente con distintas etapas. La carga se realiza a una corriente constante, hasta que se alcanza aproximadamente el 80% de la capacidad, como se observa en la Figura 10. Luego, las celdas se cargan a una tensión constante, mientras que la corriente empieza a disminuir hasta alcanzar un valor límite y constante hasta que se apaga el cargador, esto evita que se sobrepase el valor de tensión de aproximadamente 4.2 V de cuando la batería está completamente cargada [15].

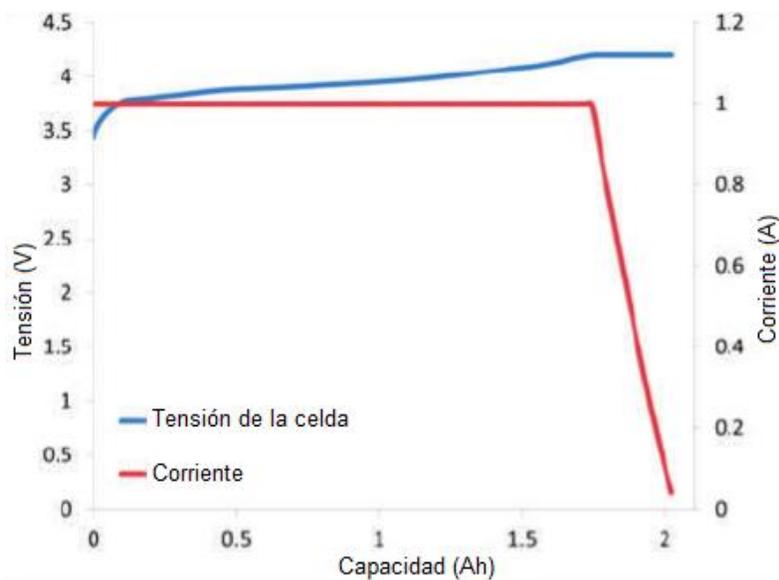


Figura 10. Tensión y corriente vs Capacidad para un ciclo de carga de una batería de Litio.

(Carga experimental realizada con un modo de corriente constante de 1.0 A y de tensión constante de 4.2 V, para una capacidad nominal de aproximadamente 2.1 Ah). [16]

2.4.1. Cargador lineal monolítico con regulación térmica LTC 1733

El LTC1733 es un cargador lineal independiente que posee el modo de carga de corriente constante y tensión constante, y corresponde al cargador utilizado en el PCB del Robobo El LTC1733 posee un transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor, o MOSFET (por sus siglas en inglés: Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor) de potencia, M1, integrado en el propio chip (ver diagrama de bloques simplificado en el Anexo B.2). Gracias a la implementación interna de M1 no es necesario el uso de resistencias externas para medir la

corriente de carga a la batería, ni diodos de bloqueo en caso de inversión de la polaridad [17], que usualmente se requieren para evitar el daño de las baterías de litio. La configuración de pines de su circuito integrado se muestra en la Figura 11.

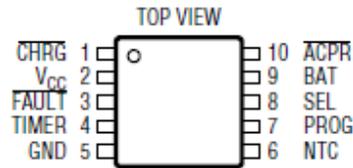


Figura 11. Configuración de pines del LTC 1733. [17]

A continuación, se detallan las funciones de los pines que se tomaron en cuenta para el diseño del circuito eléctrico de la base de recarga [17]:

- el pin BAT es el encargado de suministrar la corriente de salida a la batería, para lo cual utiliza con un divisor resistivo de precisión interno (ver Anexo B.2) que establece la potencia final del pin. Este divisor se desconecta cada vez que el cargador entra en los modos de suspensión o apagado que se describen más adelante en esta sección.
- VCC corresponde al pin de alimentación del cargador. Una vez que detecta una tensión inferior a un *umbral de bloqueo por baja tensión* (UVLO, del inglés Undervoltage Lockout), V_{UV} , o bien, cuando la tensión está por debajo de la tensión de V_{BAT} , lleva el integrado al modo de suspensión o apagado.
- PROG, que, al conectar una resistencia externa, R_{PROG} , entre este pin y tierra, permite configurar la corriente de carga de la batería. Con este valor y el de V_{PROG} es posible obtener la corriente de carga en todo momento a partir de la ecuación (1). Siempre y cuando el cargador no se encuentre en modo de temperatura constante o tensión constante, que se describen más adelante, V_{PROG} tomará el valor que se indica en la ecuación de 1.5 V(2).

$$I_{CHG} = (V_{PROG}/R_{PROG}) \cdot 1000 \quad (1)$$

$$I_{CHG} = (1.5 V/R_{PROG}) \cdot 1000 \quad (2)$$

- El pin TIMER permite controlar el tiempo de carga. Si se desea deshabilitar la función interna de temporización, se conecta este pin a tierra; de lo contrario se

conecta un capacitor en medio, cuyo valor afecta el tiempo total de carga de acuerdo con la ecuación (3).

$$Tiempo (horas) = (C_{TIMER} \cdot 3)/(0.1\mu F) \quad (3)$$

- NTC, o Coeficiente de Temperatura Negativo, es la entrada a un circuito de monitoreo de temperatura mediante un termistor NTC. Permite medir la temperatura del paquete de baterías, así como suspender la carga y congelar el temporizador interno cuando esta se encuentra fuera de rango (alrededor de 50°C en caliente, o 0°C en frío). Gracias a este sistema es posible programar el cargador para manejar corrientes de hasta 1.6 A sin riesgo de dañar el paquete de baterías. Esta función se puede deshabilitar siempre y cuando el pin se conecte directamente a tierra.
- SEL permite seleccionar la tensión de salida a la batería entre 4.1 V si se conecta a tierra, o 4.2 V si se conecta a V_{CC}. La selección de este valor depende de la composición química de la batería que se requiere recargar.
- CHR_G es un pin de salida que, junto con el pin FAULT, indica el estado del ciclo de carga. Por sí solo, posee tres estados: bajo, cuando inicia el ciclo de carga; con una corriente de 25 μA durante el estado C/10 (cuando la batería se acerca a su capacidad de almacenamiento final); y alto, cuando concluye el tiempo de carga configurado a partir del pin TIMER. Si se desea, mediante el uso de dos resistencias de diferente valor configuradas como elevadoras de tensión o *pull-up*, un microprocesador sería capaz de detectar los tres estados de este pin.

Se tienen entonces los diferentes modos de operación del cargador, que se describen a continuación [17]:

- Modo apagado o *shutdown*: El consumo de corriente de I_{CC} asume un valor de 0.9 mA. Se puede ingresar a este modo al forzar la tensión del pin PROG a un valor superior a 2.15 V, con lo que se reinicia el temporizador y se apaga el regulador interno lineal.
- Modo de reposo, suspensión o *sleep mode*: el LTC1733 entra automáticamente en este modo de baja corriente si se le elimina el suministro de alimentación o el

cargador de pared. En este modo, la corriente de drenaje de la batería del pin BAT cae a menos de $5 \mu\text{A}$, que permite reducir el consumo de corriente en la batería y con ello aumentar el tiempo en espera o *standby*.

- Modo de espera o *hold mode*: el integrado entra en este modo cuando el termistor conectado al pin NTC le indica una temperatura del paquete de baterías fuera de rango. En este momento se detiene el temporizador y el ciclo de carga hasta el regreso a una temperatura válida.
- Modo de carga lenta (*trickle charge* o condición de batería baja): Permite llevar la batería a un valor seguro de carga, en este caso mayor a 2.48 V. Fuerza el pin PROG a una tensión de 0.15 V.
- Modo de corriente constante: Un lazo de retroalimentación con un amplificador, denominado como CA en el diagrama de bloques del Anexo B.2, se encarga de establecer el pin PROG con una tensión de 1.5 V. En la Figura 12 se puede apreciar como el integrado entra a este modo una vez que la batería alcanza una tensión mayor a 2.48 V, para una configuración de I_{BAT} o I_{CHG} de 1 A.

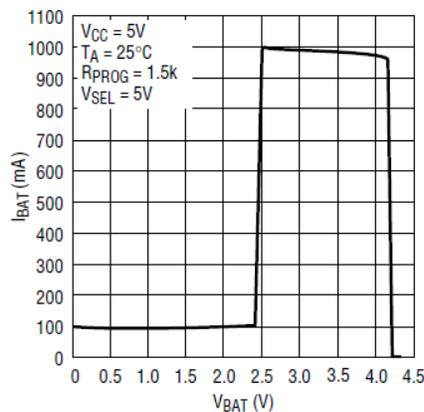


Figura 12. Corriente de carga (I_{BAT}) vs tensión de la batería (V_{BAT}). [17]

- Modo de temperatura constante: Un lazo de retroalimentación con un amplificador, denominado como TA en el diagrama de bloques del Anexo B.2, se encarga de disminuir la corriente entregada a la batería (I_{BAT}) como se puede observar en la Figura 13, cuando por la disipación de potencia la temperatura del integrado se acerca a 105°C . TA se encarga de limitar la temperatura a aproximadamente 105°C .

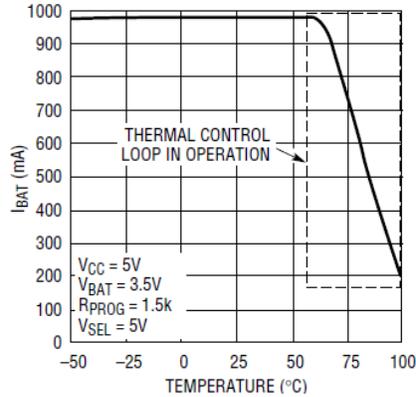


Figura 13. Corriente de carga (I_{BAT}) vs temperatura con regulación térmica habilitada. [17]

- Modo de tensión constante: Un divisor resistivo de precisión interno (R_1 y R_2 , del Anexo B.2) permite mantener la tensión de la batería en el pin BAT a 4.1 o 4.2 V, según corresponda. Además, un lazo de retroalimentación con amplificador (V_A , del Anexo B.2) se utiliza como comparador para conocer cuándo la batería se encuentra en un modo seguro de carga.
- Bloqueo por baja tensión o UVLO: Un circuito de monitoreo mantiene el cargador en modo apagado hasta que V_{CC} supere el umbral de bloqueo por baja tensión, definido como V_{UV} . Esto protege el integrado de la inversión de la corriente.

El circuito básico del cargador corresponde al de la Figura 14 [17]; en el cual, por ejemplo, se encuentra deshabilitado el control térmico con el pin 6 conectado a tierra. Además, se hace uso del sistema de temporización del ciclo de carga al incorporar un capacitor de $0.1 \mu F$ conectado al pin TIMER. Fue imprescindible comprender el funcionamiento del LTC 1733 y la configuración implementada en el Robobo para definir una solución adecuada a la base de recarga que trata este documento.

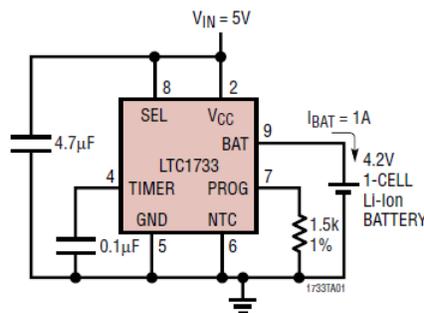


Figura 14. Aplicación típica del LTC 1733. [17]

La Figura 15 resume el flujo del ciclo de carga. Este inicia cuando la tensión en el pin V_{CC} aumenta por encima del nivel $UVLO$ y R_{PROG} está conectada del pin $PROG$ a tierra. En caso de que la tensión de la batería en el pin BAT esté por debajo de 2.48 V, el LTC1733 iniciará su ciclo de trabajo en modo de carga lenta hasta llevar la tensión de la celda a un valor seguro de carga superior. Una vez que la tensión en el pin BAT alcanza el nivel esperado, se inicia el modo de carga con corriente constante, la cual toma el valor establecido en la ecuación (1), siempre y cuando la temperatura del integrado no se acerque a 105°C y se entre en el modo de temperatura constante.

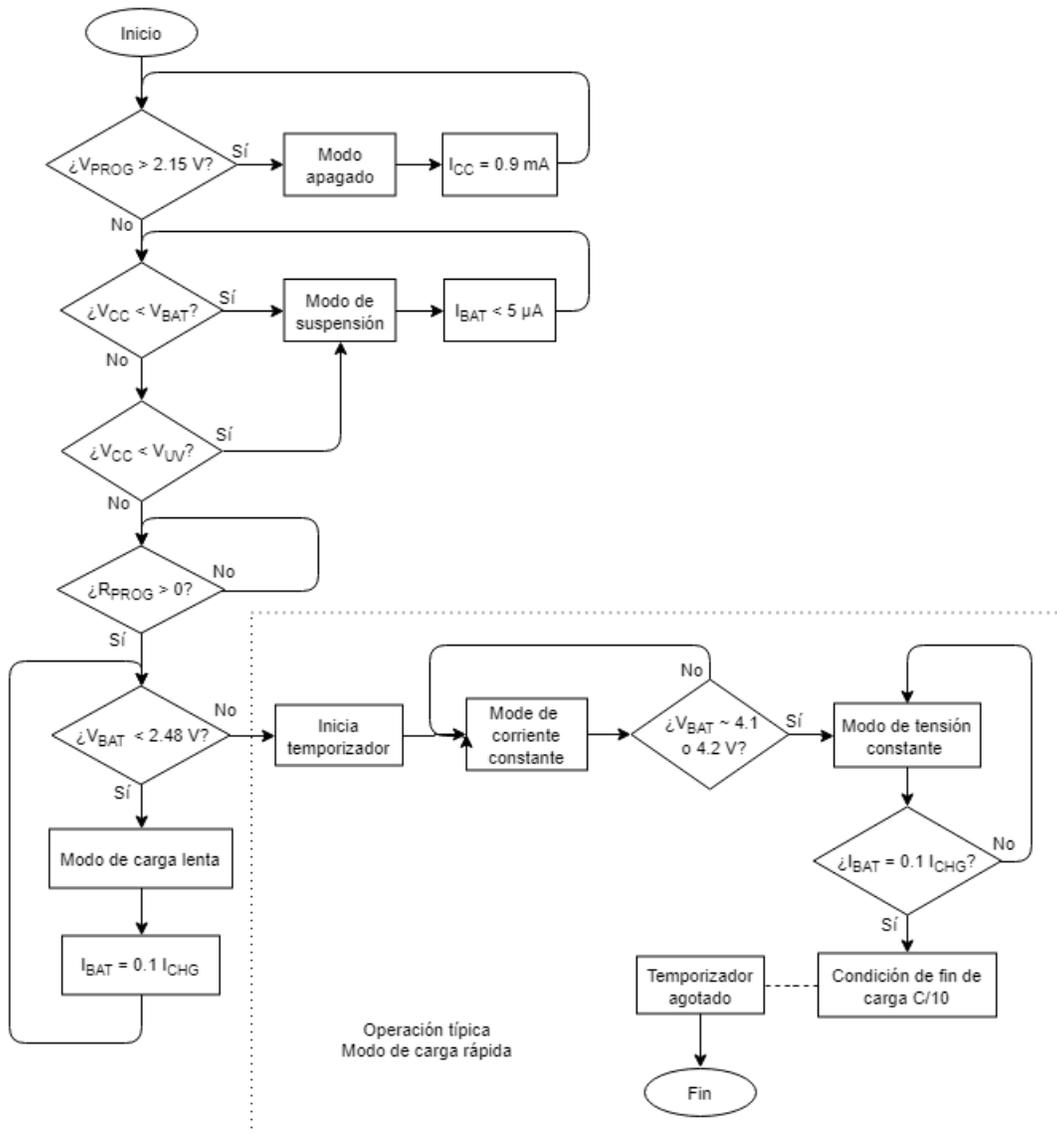


Figura 15. Ciclo de carga del LTC1733.

Elaborado mediante Diagramly

Finalmente, una vez que la batería se acerca a su tensión final de 4.1 o 4.2 V, la corriente de carga empieza a disminuir para que el LTC1733 cambie al modo de tensión constante. Una vez que la corriente I_{BAT} cae al 10% de la corriente de carga (I_{CHG}) un comparador interno cierra el MOSFET en el pin CHRG (ver Anexo B.2) y conecta una fuente pequeña de corriente a tierra (de 25 μ A), para iniciar la condición de aproximación a fin de carga, conocida como C/10. Si se tiene el capacitor conectado al pin TIMER, el ciclo de carga terminará hasta que concluya el tiempo establecido en la ecuación (3).

2.5. Sistemas de conversión de Corriente Alterna a Corriente Directa (CA/CD) y Reducción de Tensión

2.5.1. Fuente de alimentación lineal básica

Las fuentes de alimentación lineales también se conocen como Reguladores Lineales o LR (por sus siglas en inglés: Linear Regulators). La Figura 16 permite apreciar un ejemplo de una fuente de este tipo y sus partes. De acuerdo con [18], este tipo de fuentes utilizan un transformador de aislamiento que a la vez que reduce la tensión, aumenta la frecuencia que va al rectificador. El segmento de rectificación usualmente consiste en diodos de silicio de alta resistencia a la sobre tensión. Posteriormente, se busca obtener una tensión constante de corriente directa (CD) de la salida del segmento de rectificación; inicialmente un capacitor puede mantener la tensión, con cierto factor de rizado cuando la onda rectificada empieza a bajar.

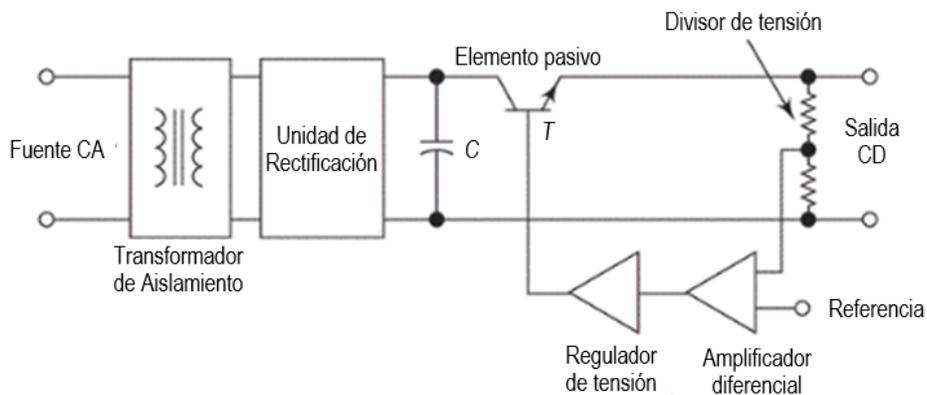


Figura 16. Circuito de una fuente de alimentación lineal básica. [18]

Finalmente, se regula la tensión de salida de acuerdo con los requerimientos, sin embargo, si la diferencia de tensión CD de entrada y de salida es muy grande, la potencia disipada por el elemento regulador puede llegar a ser apreciablemente grande [18]. Por lo tanto, los sistemas de

rectificación y reducción de tensión mediante fuentes de alimentación lineal se caracterizan por la baja eficiencia global, típicamente menores al 50% [19].

2.5.2. Fuentes Conmutadas

También conocidas como SMPS (por sus siglas en inglés: Switch-Mode Power Supplies). Reemplazan el elemento de paso en serie de la fuente de alimentación lineal con un elemento de conmutación con pérdidas bajas. De acuerdo con [18], se suelen utilizar transistores de potencia bipolares o MOSFET, que al ser operados en modo de conmutación disipan energía solo durante el encendido y el apagado.

La Figura 17 muestra el diagrama de un SMPS reductor típico, en la cual se puede observar que, al igual que la fuente de alimentación lineal básica de la sección 2.5, se compara una señal de la red divisora de tensión con una referencia, la diferencia obtenida se amplifica y, en este caso, alimenta un modulador de ancho de pulso controlado por tensión. Las frecuencias de conmutación de estos sistemas generalmente se mantienen en un rango de 3 a 50 kHz [18].

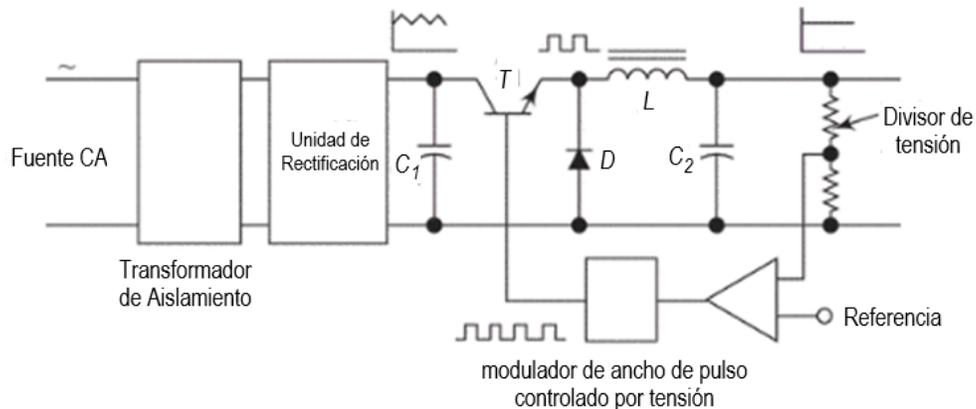


Figura 17. Circuito básico de un SMPS. [18]

La eficiencia de un SMPS bien diseñado puede alcanzar el 90% [18], por lo que la disipación de calor será considerablemente menor comparado a las fuentes de alimentación lineales. La eficiencia del diseño depende de factores como la rapidez de recuperación del diodo D , es decir, si es capaz de apagarse en menos de un microsegundo. La función de D es mantener la corriente a través del inductor L y limitar la tensión inducida por los altos valores de di/dt a medida que se apaga el transistor de conmutación T .

Debido a su mayor eficiencia utiliza disipadores de calor o ventiladores de refrigeración más pequeños. De acuerdo con [18], es posible emplear un condensador del filtro de entrada más pequeño porque la ondulación o rizado de entrada es menor, en comparación con una fuente de alimentación lineal.

Estos dispositivos son bastante inmunes a los armónicos y, al ser dispositivos más pequeños, se suelen usar en fuentes de alimentación de computadoras de escritorio o celulares. Sin embargo, generan armónicos triples, y si hay suficientes de estos dispositivos conectados juntos, pueden generar una sobrecarga [20]. Además, están expuestos a ruido autoinducido e interferencia de radiofrecuencia (RFI), que se pueden reducir con un diseño adecuado y filtros de entrada. Por efecto de la conmutación, estas fuentes presentan ruido que se traduce en un rizado de la tensión a la salida, típicamente en el rango de las decenas de milivoltios. Si un circuito no responde bien al rizado, se puede añadir un filtro paso bajo a la salida [21].

2.6. Transferencia inalámbrica de potencia

Las tecnologías para transferencia de potencia inalámbrica o WPT (por sus siglas en inglés: Wireless Power Transfer) se pueden dividir en tres categorías:

- por acoplamiento inductivo
- por radiación de microondas
- por acoplamiento de resonancia magnética o MRT (por sus siglas en inglés: Magnetic Resonance Coupling)

En [22] se describe el funcionamiento de un sistema de transferencia de potencia inalámbrica por acoplamiento de resonancia magnética, o MRC-WTP, como el de la Figura 18. El sistema de transmisión de energía inalámbrica está formado por dos cuerpos magnéticos separados entre sí: U_S que se encarga de la transmisión de energía, y U_R que la recibe. En este caso en particular, la distancia de separación U_S y U_R debe estar entre el 3 al 30% del grosor máximo de la bobina receptora, L_r .

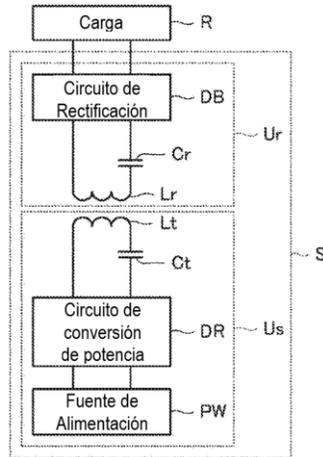


Figura 18. Diagrama de bloques del circuito de un sistema de transmisión de potencia inalámbrico
 (Ct y Cr: Capacitores, Lt: Inductor de transmisión de potencia, S: Sistema de transmisión de energía inalámbrica, Ur: Dispositivo receptor de energía inalámbrica, Us: Dispositivo de transmisión de energía inalámbrica). [22]

El principio de funcionamiento típico corresponde al siguiente [23]:

- La bobina inductiva transmisora L_t es de menor área que la bobina receptora L_r . La corriente en L_t crea un campo magnético controlado.
- El campo magnético de L_r genera una corriente en la bobina receptora.
- La corriente de alta frecuencia de L_r se convierte en corriente continua mediante un circuito de rectificación.

Inicialmente, los diseños de WPT se basaron en transformadores de frecuencia de potencia; sin embargo, eran incapaces de transmitir altas potencias con los núcleos separados en el lado primario y secundario a bajas frecuencias. Por lo tanto, las investigaciones se han enfocado en sistemas de WPT inductivos de alta frecuencia desde 1990 [24].

De acuerdo con [24], los sistemas MRC-WPT tienen un importante papel en las investigaciones actuales de recarga de robots autónomos como el del ejemplo de la Figura 19. Los esfuerzos están orientados a evitar la necesidad de una pequeña distancia para lograr la transmisión de energía y reducir la necesidad de la alta precisión de posicionamiento; que de lo contrario implica garantizar un adecuado sistema de acople. En la Figura 20.b se muestra un ejemplo del circuito que permite modelar un MRC-WPT.

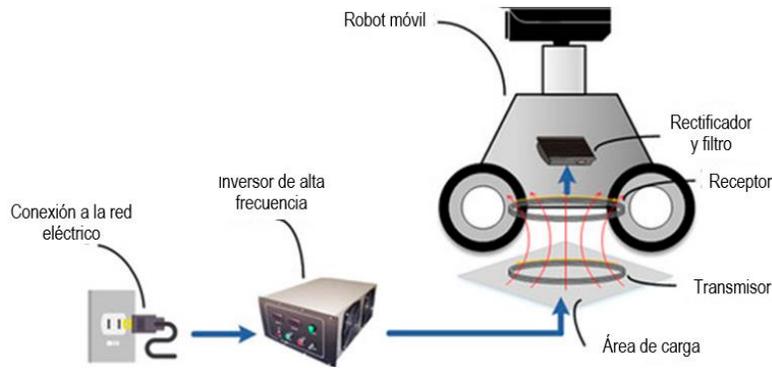


Figura 19. Diagrama de bloques que ejemplifica un sistema de transferencia de potencia inalámbrica por acoplamiento de resonancia magnética MCR-WPT para la carga de un robot. [24]

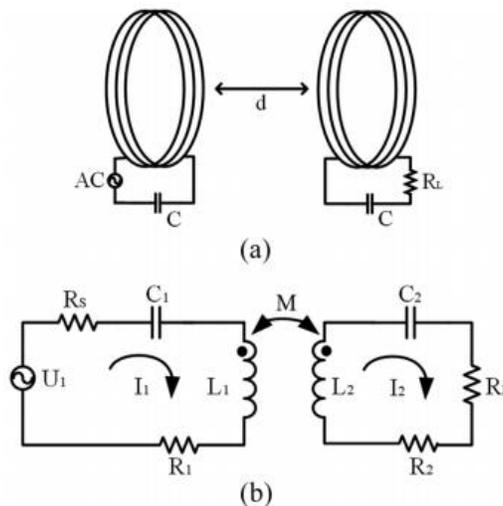


Figura 20. Sistema MCR-WPT de dos bobinas (a), y su circuito equivalente (b) (L_1 : inductancia de la bobina emisora, R_1 : resistencia de la bobina emisora; L_2 : inductancia de la bobina receptora; R_2 : resistencia de la bobina receptora; R_L : resistencia de la carga). [24]

El parámetro utilizado para caracterizar el grado de acoplamiento de dos bobinas es el coeficiente de acoplamiento, generalmente representado por k , de la ecuación (4); determinado por la autoinducción L_1 y L_2 de las bobinas primaria y secundaria, respectivamente, y la inductancia mutua entre ellas, M [24]. M suele ser variable en cada recarga, debido a las limitaciones que pueda tener un sistema en cuanto a la exactitud de posicionamiento. Esto se refleja en una k variable, lo que causa variaciones en la impedancia reflejada del lado secundario al primario y afecta así la estabilidad operacional del primario.

$$k_{12} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (4)$$

Por otro lado, el factor de calidad de la bobina transmisora, Q_1 , y receptora, Q_2 , se expresan como en la ecuación (5). Por lo general, la resistencia de la bobina receptora, R_2 , es mucho menor que la de la carga, R_L . La eficiencia del sistema, η , puede simplificarse como se indica en la ecuación (6). Entre mayor sea el término $k_{12}^2 Q_1 Q_2$, mayor será la eficiencia del sistema, y alcanzará su valor máximo cuando el sistema se encuentre en estado de resonancia y $w = 1/(L_1 C_1)^{1/2} = 1/(L_2 C_2)^{1/2}$ [24].

$$Q_1 = \frac{wL_1}{R_1 + R_S}, Q_2 = \frac{wL_2}{R_L + R_S} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{k_{12}^2 Q_1 Q_2}{1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2} \quad (6)$$

2.7. Modelado por Deposición Fundida o FDM

La impresión 3D es un proceso de manufactura que se basa en la fabricación de prototipos y piezas funcionales a pequeña escala. De acuerdo con [25], uno de los métodos más utilizados para la impresión 3D es el Modelado por Deposición Fundida o FDM (por sus siglas en inglés: Fused Deposition Modeling), técnica que se ha utilizado en el GII para la fabricación de gran parte de sus prototipos. El FDM ofrece una tecnología de manufactura por adición de capas que produce piezas y partes con geometrías complejas mediante la extrusión y deposición de un material fundido, normalmente ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) o PLA (Ácido Poliláctico); de los cuales el segundo es un polímero constituido por moléculas de ácido láctico que es biodegradable, de uso común en el GII.

El material de impresión se encuentra inicialmente en forma de filamento. Se obliga a pasar el filamento por la boquilla de una impresora como la de la Figura 21, que se encuentra a altas temperaturas, en donde se funde para luego ser depositado en una plataforma. El material genera la forma de la pieza por medio de movimientos rectilíneos en un plano. Cada pasada corresponde a una línea de material depositado, que se vincula a otra adyacente gracias a la energía térmica del material semifundido [25].

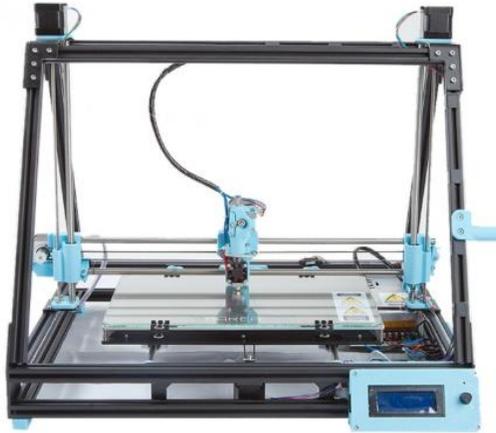


Figura 21. Impresora 3D Mendel Max XL v5 de MakerGal utilizada para la fabricación del prototipo de la base de recarga

(Volumen de impresión 380x230x220 mm, Resolución máxima en Z = 100 micras, Fusor E3D). [26]

Debido al proceso de fabricación a través de la adición de capas de material, se obtiene una estructura compuesta por láminas con una estructura anisotrópica [27], es decir, cuyas propiedades mecánicas no son las mismas en las diferentes direcciones. Además, debido a que implica la fusión y solidificación de un material, se generan esfuerzos en el material debido al cambio de temperatura y a la contracción que ocurre durante el proceso.

La unión de cada filamento se logra por medio de la adhesión de material fundido. Esta adhesión es gradual y depende de la temperatura y del tiempo que se le otorgue al proceso. Al entrar en contacto el filamento fundido con otro semifundido, se forma un cuello en la interfaz, que crece a medida que pasa el tiempo. Si la temperatura se mantiene elevada por un período más prolongado de lo normal, el cuello crece hasta alcanzar casi el diámetro del filamento [28] [29].

Por otra parte, en los procesos de FDM se pueden variar parámetros de impresión como por ejemplo el espesor de capa, la dirección de la deposición, el número de capas superficiales y la distancia entre extrusor y plataforma; los cuales tienen un mayor o menor efecto sobre la rugosidad o calidad superficial de la estructura [25]. En ocasiones se elevan los costos de fabricación al someter las piezas a un postprocesado para mejorar su calidad superficial o retirar el material sobrante adherido a la superficie de la pieza.

En [25], se demostró que el acabado superficial mejora notablemente con alturas de capas más pequeñas y a mayor temperatura, debido a que el material fluye de mejor manera, lo que

permite una mayor adhesión entre las capas. Las variaciones en la orientación del filamento, como las de la Figura 22, también puede afectar las propiedades de la pieza manufacturada por FDM. La resistencia máxima a la tracción en las pruebas realizadas en [25] se presentó en las probetas orientadas en 0° , con una resistencia máxima de 25,72 (MPa). Esto se debe a que la carga aplicada se encuentra en la misma dirección del filamento. La probeta menos resistente fue la de la orientación de 90° .

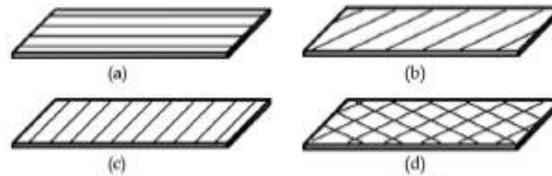


Figura 22. Variaciones en la orientación del filamento en una impresión 3D. (a: 0° , b: 45° , c: 90° , d: $+45^\circ/-45^\circ$).

[25]

La resistencia de la adhesión entre las capas es menor que la resistencia del tipo de filamento utilizado [30] [31], por lo que no se espera que las piezas finales posean las mismas propiedades mecánicas que las que posee el ABS o el PLA. Por lo tanto, a pesar de las ventajas que ofrece el FDM con respecto a otros procesos de fabricación, la impresión 3D no está libre de dificultades, y una de las principales problemáticas se presenta en la elección de los parámetros de impresión para obtener las propiedades mecánicas deseadas. En muchas ocasiones la elección se realiza en función de la experiencia de los operadores [25].

2.8. Conceptos básicos de estadística

La estadística es una disciplina dedicada al desarrollo y aplicación de la teoría y las técnicas apropiadas para la recolección, clasificación, presentación, análisis e interpretación de datos obtenidos por observación o experimentación, para obtener conclusiones basadas en ellos [32]. La estadística se ha convertido en una herramienta esencial de la investigación en casi todos los campos de la actividad humana. A continuación, se presentan algunos de los conceptos estadísticos que se utilizaron de [32] para realizar la toma de datos en la etapa de validación del prototipo que trata este documento.

Todo estudio o investigación tiene como referencia un conjunto de elementos (personas, animales, objetos, mediciones, etc.). A la colección completa de todos los elementos a estudiar se

le denomina población. La población puede ser finita (tiene un número limitado de elementos) o infinita (tiene un número infinito de elementos). En estadística, por facilidad, se suele tomar una muestra de la población para analizarla y luego se generalizan los resultados al resto de la población.

Un concepto importante para caracterizar y representar un conjunto de datos obtenidos de las muestras o poblaciones es la media aritmética, que es una medida de posición, también llamada promedio. Si la característica aritmética es x , y n es la cantidad de mediciones o muestras tomadas, el promedio de las mediciones sería la de la ecuación (7). Una de las formas de medir la variabilidad (o dispersión) de los datos es mediante la desviación estándar (o típica) del conjunto de mediciones, con la fórmula de la ecuación (8). La desviación estándar brinda información sobre cuánto se alejan las observaciones (o mediciones) del promedio del conjunto.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (7)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (8)$$

Por otro lado, la incertidumbre es un parámetro asociado al resultado de una medición. Existen diversas fuentes de incertidumbre en una medición, algunas de ellas pueden ser sistemáticas (presentes en todas las mediciones). Otras fuentes pueden tener un carácter aleatorio, por ejemplo: la toma de muestras no representativas, el efecto de las condiciones ambientales, la resolución finita del instrumento de medida o las variaciones aleatorias en condiciones aparentemente idénticas, entre otras.

Para una función $z = f(x,y)$ que es evaluada a partir de un conjunto de medidas directas, cada medida posee su respectiva incertidumbre, $\pm\Delta x u_x$ y $\pm\Delta y u_y$; siendo u_x y u_y la unidad patrón utilizada para medir cada variable. Cuando las magnitudes x y y son independientes, la incertidumbre estándar combinada de z se obtiene mediante la ecuación (9) conocida como la ley de la propagación de la incertidumbre [32]. Finalmente, el porcentaje de error se utiliza para evaluar qué tan lejos está un valor experimental o aproximado de uno real, y se calcula como en la ecuación (10).

$$\Delta z^2 = \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 \Big|_{x_0 y_0} \Delta x^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2 \Big|_{x_0 y_0} \Delta y^2 \quad (9)$$

$$\%Error = \frac{Valor_{Real} - Valor_{Aproximado}}{Valor_{Real}} \times 100\% \quad (10)$$

Capítulo 3

3. Estado de la cuestión

Este capítulo introduce al lector en el tema de la robótica autónoma y colectiva y sus características. Además, se desarrolla una comparativa de los robots en el mercado que poseen su propia base de recarga, con el objetivo de comprender mejor la realidad en la que se desarrolló el proyecto. Finalmente, se resumen los resultados de investigaciones realizadas sobre sistemas diseñados para identificar y ubicar etiquetas o marcadores mediante sistemas de visión, lo que se conoce como sistemas fiduciales visuales.

3.1. Robótica

Hoy en día es posible encontrar diversas definiciones de la palabra robot. De acuerdo con la Real Academia Española [33], su significado viene de la palabra checa *robot*, que se refiere a “trabajo o prestación personal”. En la enciclopedia británica [34] se amplía el término de robot a una máquina operada automáticamente que sustituye el esfuerzo de los humanos, aunque no tiene por qué poseer apariencia humana o desarrollar sus actividades a la manera de los humanos. Por lo tanto, por extensión, la robótica es la disciplina de la ingeniería encargada del diseño, construcción, programación y funcionamiento de los robots.

En [35] se utiliza el término de robot inteligente para referirse a una máquina capaz de extraer información de su entorno y utilizar el conocimiento obtenido para moverse de manera segura y significativa. Actualmente, la robótica se está abriendo camino a una nueva generación de robots con fines más allá de la ejecución de tareas repetitivas y más hacia los robots inteligentes. Cada vez se busca más dotar a los robots de capacidades cognitivas, como la percepción, la selección de acciones, el aprendizaje y el razonamiento, a través de métodos neuro-evolutivos como en el caso de [36].

Estos nuevos paradigmas tienen como objetivo la obtención de robots que satisfacen las tareas para las que fueron programados, a través de una mayor autonomía en la adquisición, organización y utilización del conocimiento y de sus habilidades. Algunas líneas de investigación actuales corresponden, por ejemplo, a las que tienen lugar en [37] sobre el uso de algoritmos

evolutivos para el desarrollo de los controladores de los robots; la robótica cognitiva; y los sistemas de robótica colaborativa o sistemas multi-robot. En todas ellas, se aplican técnicas de inteligencia artificial para diseñar los controladores que doten a los robots del mayor grado de autonomía posible.

Algunos de los tipos de robots considerados por el Grupo de Robótica (GtRob) del Comité Español de Automática, e importantes para el desarrollo de este proyecto, son [38]:

- los robots autónomos, que poseen la instrumentación necesaria para proporcionarles autonomía [38], es decir, que no requieran la supervisión humana. Entre estos están por ejemplo los vehículos aéreos autónomos o UAV (por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicles) como el de la Figura 23, o vehículos submarinos autónomos o AUV (Autonomous Underwater Vehicle).



Figura 23. Robot Aéreo Autónomo (UAV). [38]

- los robots de servicio, que de acuerdo con la Federación Internacional de Robótica (IFR) operan de manera parcial o totalmente autónoma, para desarrollar servicios útiles para el bienestar de los humanos y equipos, excluyendo las aplicaciones de manufactura. Se caracterizan por la falta de estructuración de su entorno y sus tareas a realizar, lo que obliga a los robots de servicio a contar con un grado de inteligencia que se traduce en el empleo de sensores y software adecuado para la toma rápida de decisiones [38].
- los robots de educación, que son un tipo de robots de servicio diseñados para aportar elementos de ayuda que contribuyen a mejorar esta actividad [39]. Sirven como instrumento para provocar aprendizajes en los estudiantes adoptando como

metodología la experimentación, que le permite a los estudiantes aprenden a concebir, manipular, controlar, operar y trabajar con robots pedagógicos [40].

- los robots de entretenimiento u ocio; son un tipo de robots de servicio que contribuye, de alguna manera, en actividades de ocio de las personas. Pueden ser robots juguetes y mascotas que suelen incorporar capacidades avanzadas de interacción con el usuario, para lo cual deben incorporar modos de comportamiento evolutivo que les permitan tomar decisiones, en base a la respuesta que observa en el humano [38]. Este tipo de robots también abarca los utilizados en parques de atracciones o parques temáticos.
- los robots humanoide, inspirados en las capacidades humanas y su aspecto, como el robot ASIMO de la Figura 24 [38].



Figura 24. Robot humanoide ASIMO de Honda. [38]

- los robots personales, son un tipo de robot de servicio usualmente destinados para uso doméstico. Sirven a los humanos como ayudantes o colaboradores en sus quehaceres o actividades diarias [38].
- los sistemas multi robots o de robótica colectiva, que consiste en grupos de robots trabajando de manera conjunta para lograr objetivos comunes. Este tipo de sistemas se utilizan para resolver tareas que un solo individuo es incapaz de realizar, o bien, en tareas que se obtiene ganancia, en términos de tiempo por ejemplo, si son ejecutadas por más de un individuo [41].

3.1.1. Robots con estaciones de recarga

El Robobo consiste en un tipo de robot autónomo diseñado para tareas de docencia e investigación. Se caracteriza por su precio reducido y sus tres niveles de programación; además, es común que se desempeñe en sistemas multi robot. Como se ha mencionado anteriormente,

Robobo carece de un proceso de recarga autónomo. Se han identificado al menos seis robots en el mercado que utilizan estaciones de carga, entre los que se encuentran robots para actividades de entretenimiento o juguetes, con fines educativos o de investigación o como robots domésticos para sistemas de limpieza autónoma. Los productos se enlistan a continuación:

- Aibo ERS [42] [43]
- Wheelphone [44]
- Cozmo [45]
- Elisa-3 [46]
- CHiP [47]
- Roomba 980 [48]

En la Tabla 1 se pueden observar las imágenes de los robots mencionados y su respectiva estación de recarga. Además, resume el proceso de carga de los robots, en el cual todos utilizan un sistema de carga por contactos al aire; lo que varía es el método de identificación y aproximación a la base. Cabe destacar que únicamente Wheelphone consiste, al igual que Robobo, en un robot constituido por una plataforma móvil y un teléfono inteligente.

Tabla 1. Sistemas de robots con estaciones de recarga

Nombre comercial del robot	Sistema de recarga	Imagen
Aibo ERS-7M2	Introducido al mercado en el 2004. Utiliza dos etiquetas de referencia, una vertical y otra horizontal. Tiene un límite para los pies del Aibo, que le permiten colocarse correctamente en la estación de carga de la Figura 25 [42].	 <p data-bbox="800 1524 1386 1598">Figura 25. Aibo ERS-7M2 con estación de energía y marcadores. [42]</p>

Nombre comercial del robot	Sistema de recarga	Imagen
Wheelphone	Cuenta con la unidad de carga de la Figura 26 a la que Wheelphone se acopla mediante dos contactos de carga o de acoplamiento dorados que tiene al frente del dispositivo [49].	 <p data-bbox="769 667 1419 741">Figura 26. Wheelphone y estación de carga con contactos al aire. [50]</p>
Cozmo	Una cámara de 30 cuadros por segundo o fps (por sus siglas en inglés: frames per second) le permite identificar la etiqueta de la base de recarga de la Figura 27, cuando se utiliza el robot en el modo de exploración. Cozmo no puede aproximarse al cargador de forma autónoma [51].	 <p data-bbox="818 1037 1369 1068">Figura 27. Robot Cozmo y su cargador. [51] [52]</p>
ELISA-3	El robot puede ser pilotado por el usuario a la estación de carga. Un led indica que el robot se está cargando o se puede verificar en un byte que se envía de forma inalámbrica a una estación de radio conectada a la computadora por USB [46].	 <p data-bbox="906 1360 1281 1392">Figura 28. Elisa-3 cargando. [46]</p>
CHiP	CHiP se dirige automáticamente a su estación de carga, SmartBed de la Figura 29, cuando su nivel de carga está bajo, o cuando el usuario se lo indica mediante un botón en una pulsera. CHiP debe estar a un máximo de tres metros de distancia de la SmartBed [53].	 <p data-bbox="800 1778 1390 1810">Figura 29. CHiP y estación de carga SmartBed. [47]</p>

Nombre comercial del robot	Sistema de recarga	Imagen
Aibo ERS-1000	<p>Cuando la batería de Aibo se está agotando, Aibo camina alrededor en busca de la estación de carga; por lo tanto, la estación debe de estar en algún lugar visible para Aibo. Si hay un objeto similar al soporte de carga de la Figura 30, en color y forma, Aibo puede confundirlo con la estación de carga [54].</p>	 <p>Figura 30. Aibo ERS-1000 y accesorios. [43]</p>
Roomba 980	<p>Crea un mapa con referencias para realizar su recorrido y saber por dónde ha pasado y a dónde tiene que ir. Utiliza el sistema de navegación visual inteligente iAdapt 2.0 de iRobot, que le permite adaptarse al entorno en el que se encuentra y ubicar una estación de recarga como la de la Figura 31 [48].</p>	 <p>a) b)</p> <p>Figura 31. a) Roomba 980 b) Estación de recarga compatible con las series de Roomba 500,600,800 and 900. [48] [55]</p>

La Tabla 2 permite hacer una comparativa entre los precios de los robots antes mencionados, y sus bases de recarga. El precio del Robobo en el mercado es de €299 [3], y al igual que Wheelphone o ELISA-3, se caracteriza por ser un robot diseñado para la educación, investigación o entretenimiento. La versatilidad de aplicaciones de estos robots se debe principalmente a los distintos niveles de programación que ofrece al usuario, capacidad que no suele formar parte de los robots que son diseñados únicamente para entretenimiento, o para limpieza; como es el caso de Roomba de iRobot.

Tabla 2. Comparación de robots que poseen estación de recarga

Detalle del producto	Nombre comercial del robot					
	Wheelphone	Cozmo	ELISA-3	CHiP	Aibo ERS-1000	Roomba 980
Precio (€)	172	158	285	176	2548.43	999.99
Precio Cargador (€)	35.21		48.42			57.16
Recarga Autónoma	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Finalidad	Educación, Entretenimietno	Entretenimiento	Educación, Investigación Entretenimiento	Entretenimiento	Entretenimiento	Limpieza
Empresa	GCtronic	Anki	GCtronic	WowWee	Sony	iRobot
País	Suiza	Estados Unidos	Suiza	Canadá	Estados Unidos	Estados Unidos
Año	2013	2015	2015	2016	2018	2018

El precio del Robobo es mayor que el de ELISA-3, o incluso que el de Wheelphone con su base de recarga incluida en €220; lo que se atribuye a las capacidades que ofrece cada plataforma robótica. Wheelphone se puede programar con Android SDK o iOS SDK y permite telepresencia con Skype, seguimiento de líneas, evación de obstáculos y evita caídas, sin embargo, tiene una calidad de diseño menor que la del Robobo. En cuanto a ELISA-3, es un minirobot de apenas 5 cm de radio y 3 cm de altura compatible con Arduino, de hardware y software abiertos, programable en C++, que permite proyectos multirobot.

Algunos de los robots de la Tabla 2 ya incluyen la estación de recarga en el precio indicado. Para poder realizar la comparación de los precios de las bases de recarga solamente, se encontró en ebay la estación de carga de Cozmo en aproximadamente €68 nueva [52], y de €24 usada para el caso de CHiP [56]. En cuanto al Aibo ERS-1000 y Roomba 980, sus precios son mucho más elevados que el del Robobo debido al tipo de aplicación en el que se utilizan, de entretenimiento y de limpieza, respectivamente. La base de recarga de Roomba de €57 es para versiones anteriores, y no la versión del 2018, lo cual aumentaría su costo. Se concluyó que el precio más bajo en el mercado para las bases de recarga estudiadas es de €35.21 (Wheelphone, producto nuevo), y el precio más elevado es de hasta €57.16 (Roomba).

3.2. Sistemas Fiduciales Visuales

La palabra fiducial describe a una base o punto fijo de comparación que se utiliza como referencia; también son conocidos como marcadores, etiquetas, o “tags”, en inglés. Por lo tanto, los sistemas fiduciales visuales corresponden a sistemas artificiales diseñados para identificar los marcadores automáticamente mediante sistemas de visión. Cada etiqueta tiene una pequeña carga de información útil (alrededor de 12 bits) [57], y son diseñados para ser detectados y localizados automáticamente, aun cuando la imagen procesada por el sistema tenga una resolución espacial baja, la etiqueta esté iluminada de manera desigual, girada de forma irregular o escondida en la esquina de una imagen desordenada.

Algunos de los conceptos más importantes para comprender el funcionamiento de los sistemas fiduciales son los siguientes:

- **Robustez:** se refiere a que el sistema tiene un rendimiento insensible a perturbaciones externas y variaciones de los parámetros [58], es decir, un rendimiento esperado y constante incluso bajo la influencia de factores de ruido [59].
- **Gradiente de la imagen:** Operador derivativo que permite detectar la tasa de cambio en los niveles de gris en una imagen. La tasa de cambio aumenta cerca de un borde y es pequeño en áreas constantes [60]. Para una imagen de dos dimensiones, $A(x,y)$, se deben de considerar los cambios tanto en x como en y ; por lo que se calcula como se muestra en la ecuación (11).

$$\nabla A(x, y) = \left(\frac{\partial A}{\partial x}, \frac{\partial A}{\partial y} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \left(\frac{A(x + 1, y) - A(x - 1, y)}{\partial x} \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial A}{\partial y} = \left(\frac{A(x, y + 1) - A(x, y - 1)}{\partial y} \right) \quad (13)$$

- **Distancia Hamming:** Número de bits que dos números binarios difieren uno del otro [61]. Un conjunto de números binarios se conoce como Código Hamming siempre que cada código esté al menos a una distancia Hamming de tres de

cualquier otro código del conjunto. Como se muestra en la Tabla 3 para los códigos 00000, 00111 y 11001, se puede calcular a partir de la cantidad de 1's en el resultado de ejecutar la operación XOR a nivel de bits.

Tabla 3. Distancia Hamming entre un par de códigos. [61]

Código 1	Código 2	Código 1 \oplus Código 2	Distancia Hamming
00000	00111	00111	3
00000	11001	11001	3
00111	11001	11110	4

- **Lexicódigo:** permite generar palabras de código válidas y su nombre se debe a la forma que utiliza para generarlas. Los candidatos se consideran en orden lexicográfico, es decir, del más pequeño al más grande. Los lexicódigos están parametrizados por dos cantidades: n , el número de bits en cada palabra de código; y d , la distancia de Hamming mínima entre dos palabras de código. Se añaden nuevas palabras a la lista de códigos válidos cuando estas poseen al menos una distancia d con respecto a cada palabra que ha sido añadida previamente [57].

Un sistema fiducial visual proporciona información sobre la posición relativa y la orientación de la etiqueta con respecto a la cámara, y permiten detectar múltiples etiquetas en una sola imagen [57]. Sin embargo, el reto con estos sistemas es diseñar fiduciales robustos, tanto desde la perspectiva de detección de marcadores, es decir, qué píxeles de la imagen corresponden a una etiqueta, como desde la codificación de datos con tolerancia a errores (cuál etiqueta es); a la vez que se minimiza el tamaño requerido del marcador.

Se han desarrollado sistemas con etiquetas monocromáticas como ARToolkit, ARTag, o AprilTag, en ese orden cronológico; algunos ejemplos de las etiquetas que usan estos sistemas se muestran en la Figura 32. Además de ARTagPlus y Studierstube Tracker, que de acuerdo con las investigaciones realizadas en [57], pese a que los dos últimos son trabajos posteriores a ARTag, sus sistemas de codificación poseen tasas de desempeño inferiores. Otros sistemas visuales han incorporado cámaras aéreas para rastrear robots equipados con LED parpadeantes o materiales

reflectantes en general; o codificación 2D que incluye más colores, para aumentar la cantidad de información que puede ser codificada.

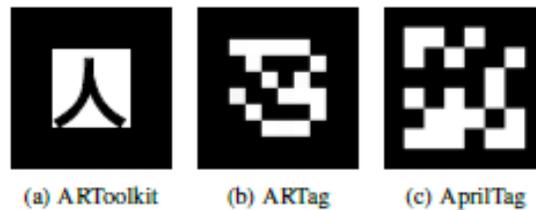


Figura 32. Comparación de etiquetas visuales fiduciales. [62]

Sin embargo, los sistemas planares de dos dimensiones mantienen dos grandes ventajas: las etiquetas pueden obtenerse a partir de una impresora estándar, que representa una solución de bajo costo; y algunos de estos pueden proporcionar una estimación de la posición con seis grados de libertad (6DOF, por sus siglas en inglés) o en un espacio tridimensional, sin la necesidad de múltiples LED. Por lo tanto, a continuación, se describen algunos de los sistemas fiduciales visuales que existen en la actualidad y sus aplicaciones, entre los que están los marcadores de ARToolkit, ARTag y AprilTag.

3.2.1. ARToolkit

Fue uno de los primeros sistemas de seguimiento de etiquetas, desarrollado principalmente para su uso en aplicaciones de realidad aumentada o realidad artificial [63]. Sus etiquetas contienen una carga útil de forma cuadrada rodeada por un borde negro, al igual que los sistemas posteriores a él. Sin embargo, lo que lo diferencia es que su carga útil no está codificada directamente en binario, sino que contiene símbolos como el carácter 'A' que se observó en la Figura 32.

Su funcionamiento consiste en tomar una muestra a una alta resolución, decodificar la etiqueta y correlacionarla con una base de datos de etiquetas conocidas; la etiqueta con la mayor correlación es reportada al sistema. El método de comparación con la base de datos implica una operación de correlación lenta y separada, por lo que una de las desventajas de este enfoque es su alto costo computacional; además de la dificultad de generar etiquetas que sean aproximadamente ortogonales entre sí.

Por otro lado, el esquema de detección que utiliza se basa en una simple binarización de la imagen de entrada basada en un umbral especificado por el usuario, lo cual resulta ser un esquema

rápido, pero poco robusto a los cambios en iluminación, incluso si se trata de oclusiones modestas en el borde de la etiqueta.

3.2.2. ARTag

ARTag funciona con etiquetas de 36 bits y esquemas mejorados de detección y codificación con respecto a ARToolkit. Su sistema de detección se basa en el gradiente de la imagen para detectar las etiquetas [64], con el objetivo de evitar errores de detección bajo cambios de iluminación. Los detalles sobre su algoritmo de detección no son públicos, pero es capaz de detectar etiquetas cuyo borde está parcialmente ocluido.

Al igual que ARToolkit, nace como un sistema desarrollado principalmente para su uso en aplicaciones de realidad aumentada. Sin embargo, su esquema de codificación fue el primero en permitir que bits erróneos del código de entrada sean detectados y reparados [64]. Esto inicialmente se refleja en el aumento de la tasa de reconocimiento de falsos positivos; que al aceptar códigos similares al de alguno del conjunto de marcadores conocidos reduce la tasa de falsos negativos. Gracias a otros filtros del sistema, la tasa de falsos positivos se mantiene baja a la salida (de aproximadamente 0.0039%).

3.2.3. April Tags

Los AprilTag son un sistema de marcadores artificiales desarrollados en la Universidad de Michigan. Su buen desempeño se respalda en el trabajo conjunto de su sistema de detección y de codificación. El sistema de detección es el encargado de estimar la posición de las etiquetas en la imagen, es decir, de intentar encontrar regiones de cuatro lados que tengan el interior más oscuro que el exterior; y está diseñado para tener una tasa de falsos negativos muy baja, lo que implica una tasa de falsos positivos muy alta [57]. El sistema de codificación es el encargado de reducir la cantidad de falsos positivos a niveles más útiles de trabajo.

En la Figura 33. se muestran dos ejemplos muy distintos entre sí de imágenes de entrada válidas en un sistema fiducial visual con etiquetas AprilTag, que presentan etiquetas que no son rígidamente planas (a) y con diferentes condiciones de iluminación y oclusiones (b). A pesar de las condiciones presentadas las etiquetas son detectadas por el sistema, como se puede observar claramente en el caso de (b) con los dos marcadores encerrados por líneas de colores.

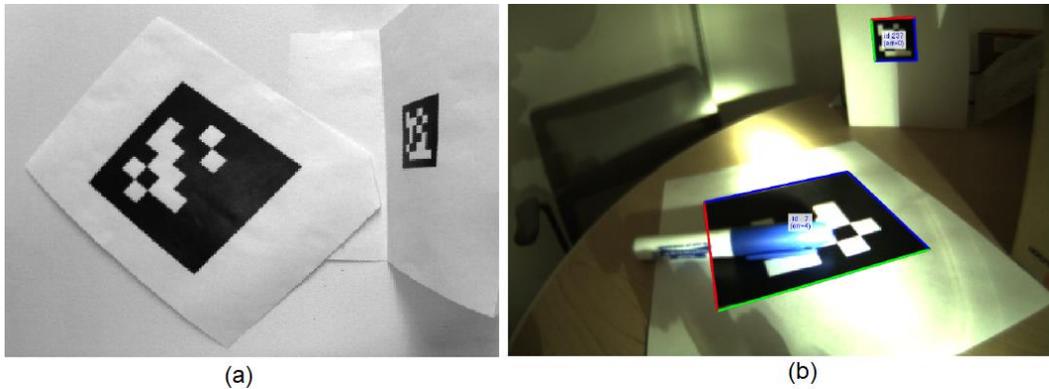


Figura 33. Ejemplo de imágenes de entrada al sistema de AprilTag

(a: Imagen simple con dos etiquetas que no son rígidamente planas. b: Detección de etiquetas planas con variaciones en la luz y oclusiones). [57]

De acuerdo con [57], el proceso que ejecuta el sistema de detección de las etiquetas corresponde al siguiente:

- Detectar segmentos de línea: Para lograr esto, el sistema calcula la dirección y magnitud del gradiente en cada píxel y agrupa los píxeles con direcciones $D(n)$ y magnitudes $M(n)$ de gradiente similares. Este tipo de agrupamiento es sensible al ruido, por lo que se utiliza un filtro pasa bajas en la imagen.
- Detectar cuadrantes: Una vez que se han obtenido los segmentos de línea de la imagen, la siguiente tarea es encontrar secuencias de segmentos de línea que formen figuras de 4 lados, es decir, un cuadrante. Se utiliza un sistema recursivo con 4 niveles de búsqueda, cada nivel de búsqueda añade un eje del cuadrante. Se puede ajustar un umbral para manejar brechas significativas alrededor de los bordes, entre mayor sea este umbral, mayor serán las brechas aceptadas; esto permite modificar la robustez de las oclusiones y los errores de segmentación. Una vez que se detectan secuencias de cuatro líneas, se crea un candidato de cuadrante.
- Homografía y estimación extrínseca: El sistema de homografía permite proyectar las coordenadas relativas de la etiqueta al sistema de coordenadas de la imagen 2D capturada; para ello utiliza un algoritmo de *transformación lineal directa* (DLT, por sus siglas en inglés). En este proceso se utilizan los datos de distancia focal de la cámara y el tamaño físico del tag, que deben ser previamente ingresados en el sistema por el usuario, para obtener la posición y orientación de la etiqueta. Finalmente el sistema utilizan umbrales

que varían espacialmente para obtener un sistema más robusto en cuanto a iluminación, la cual puede variar inclusive dentro de una misma etiqueta (como se vio en la Figura 33).

Una vez que se obtienen los cuadrantes y sus coordenadas, le corresponde al sistema de codificación determinar, mediante un sistema de lexicódigo modificado, si son válidos o no; es decir, si corresponden con alguna de las etiquetas del sistema o no. La diferencia del lexicódigo utilizado en AprilTag con respecto a uno clásico, radica en la necesidad de considerar la distancia Hamming de la etiqueta en cuatro configuraciones distintas (rotado 0°, 90°, 180° y 270°) antes de descartar al candidato.

Las modificaciones mencionadas en el lexicódigo le permiten al sistema de codificación cumplir los objetivos principales de su diseño, que se muestran a continuación [57]::

- Maximizar el número de códigos distinguibles
- Maximizar el número de errores de bit que puedan ser detectados o corregidos
- Minimizar la tasa de confusión de falsos positivos
- Minimizar el tamaño del tag al minimizar el número total de bits por etiqueta

De los objetivos anteriores, solamente el primero no es determinante para el desarrollo de este proyecto. Por ejemplo, el sistema AprilTag con una codificación de 36 bits y complejidad (distancia de Hamming) mínima de 10 (de ahora en adelante referido como 36h10), ofrece 2221 etiquetas distintas, muchas más de las que se podría requerir en un aula o centro de investigación para identificar una o más bases de recarga.

En [57] el autor muestra cómo se obtuvieron los datos de la Figura 34 a partir de un conjunto de imágenes estándar de LabelMe [65], que contiene 180 829 imágenes en una amplia variedad de entornos interiores y exteriores. Ninguna de estas imágenes contiene alguna de las etiquetas de los sistemas fiduciales mencionados (ARToolkit, ARTag o AprilTag), por lo que permiten medir empíricamente la tasa de falsos positivos de los sistemas de codificación de cada uno. El sistema AprilTag 36h10 se desempeña mejor que el esquema de codificación de ARToolkitPlus BCH (ARTP-BCH o Bose, Chaudhuri, Hocquenghem) y ARTag.

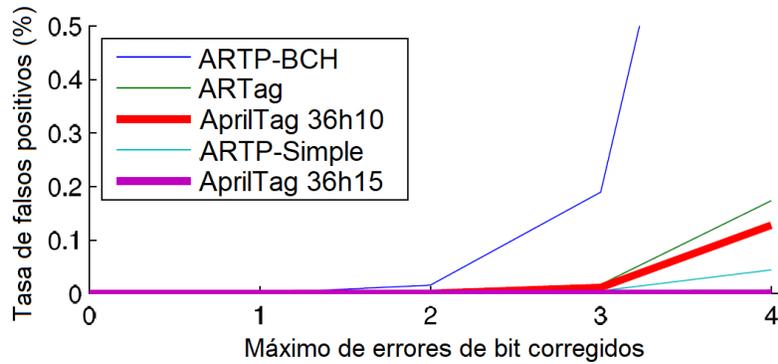


Figura 34. Tasa de falsos positivos empírica vs complejidad de las etiquetas. [57]

Una de las razones por las que ARToolkitPlus-Simple (ARTP-Simple) tiene una tasa ligeramente menor que AprilTag 36h10, es debido a que posee tan solo una cuarta parte de la cantidad de etiquetas o códigos del número que posee el modelo de 36h10. De la misma manera sucede con el modelo AprilTag 36h15 (codificación de 36 bits con una distancia de Hamming mínima de 15) con solo 27 palabras de código diferentes; para 2221 códigos que posee el 36h10.

El factor que más influye en la exactitud de localización de estos sistemas es el tamaño de la etiqueta, el cual se ve afectado tanto por la distancia con respecto a la cámara, como por la orientación de la etiqueta. Por lo tanto, en [57] el autor experimenta con estos parámetros en imágenes sintéticas como la de la Figura 35, para obtener los datos de la Figura 36, que permiten evaluar el rendimiento de los sistemas de detección de AprilTag y ARToolkit no solo en términos de la exactitud de ubicación sino también en términos de la tasa de detección.

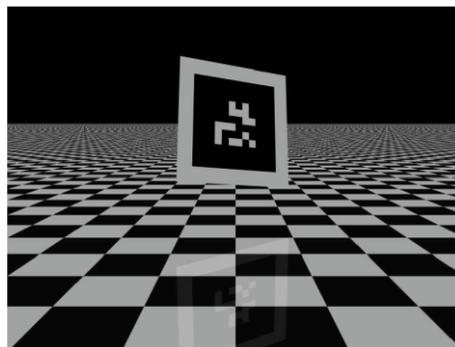


Figura 35. Ejemplo de imagen sintética con etiqueta a 10 m de la cámara y con su vector normal a 30.3° de la cámara. [57]

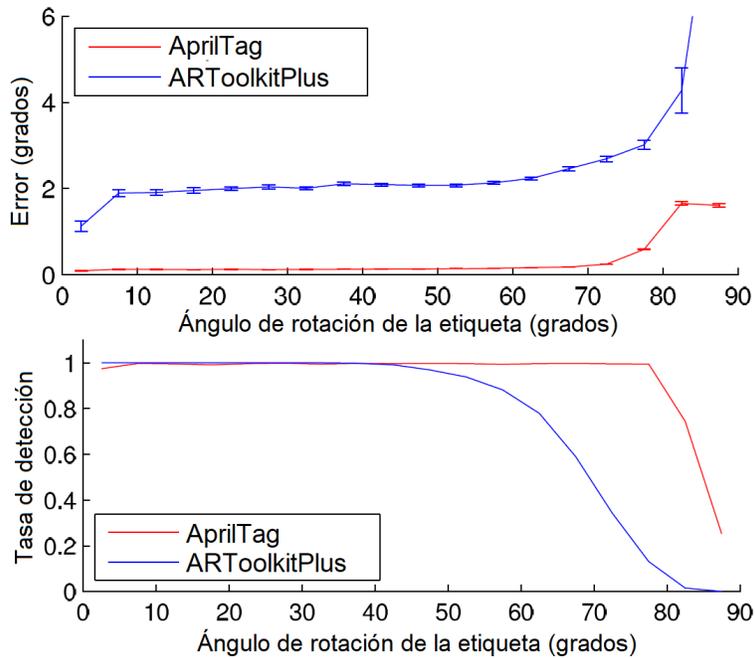


Figura 36. Evaluación de la exactitud de orientación con respecto al ángulo entre la normal de la etiqueta y la cámara (Φ). [57]

Para las imágenes sintéticas utilizadas en [57], cuando el ángulo entre el vector normal de la etiqueta y el vector a la cámara (Φ) es 0° , la cámara está mirando directamente a la etiqueta, mientras que a 90° deja de ser visible. Para ambos sistemas de la Figura 36, el rendimiento en la ubicación y en la tasa de éxito empeora a medida que la etiqueta se aleja de la cámara. Sin embargo, se puede observar que el sistema de AprilTag tiene errores de localización más bajos (menores a 2°) y es capaz de detectar objetivos de manera más confiable a partir de los 50° de rotación.

Los sistemas fiduciales visuales son opciones viables para que un Robobo pueda aproximarse por sí solo a una base de recarga debido a que permiten reconocer etiquetas de identificación propias de cada sistema y aproximar su ubicación. En esta sección se mencionaron algunas de las ventajas o mejoras que presenta un sistema con respecto a otro; además de los datos obtenidos de [57] en cuanto a la tasa de falsos positivos y la exactitud de ubicación, de entre los cuales el sistema AprilTag presenta el mejor desempeño, con la única excepción de que se le compare con sistemas con mucho menor cantidad de etiquetas.

No se tomó en cuenta un sistema con códigos QR o de respuesta rápida (por sus siglas en inglés: Quick Response) debido a que no fueron diseñados para su uso en sistemas fiduciales, sino que son códigos de barras bidimensionales [66] como el de la Figura 37, que se utilizan

principalmente para obtener contenido promocional o de autenticación de manera casi instantánea. En su uso requieren alinear la cámara con la etiqueta a una alta resolución, para obtener cientos de bytes como los que representarían a una dirección web. Una etiqueta QR puede comprender 268 píxeles, sin incluir los encabezados [57].



Figura 37. Ejemplo de Código QR. [66]

Capítulo 4

4. Metodología

4.1. Enfoque de la solución

4.1.1. Proceso productivo

A continuación, se detalla el plan de trabajo que se implementó para obtener la solución de una base de recarga para cuatro plataformas robóticas móviles Robobo. El enfoque de la metodología implementada se puede representar de manera general en la Figura 38.



Figura 38. Enfoque de la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto

- Estudio de la plataforma robótica móvil y del entorno del laboratorio: En esta etapa se familiarizó con el diseño actual del Robobo y su funcionamiento. Se definieron las características del robot que intervienen en el proceso de recarga y que limitan el diseño de la solución. Por otro lado, se exploraron los equipos, herramientas y materiales disponibles, además de otros proyectos relacionados al Robobo que se han desarrollado en el grupo de investigación.

- Definición de los requerimientos del diseño: Se definió la normativa que rige el diseño eléctrico del prototipo para que se pueda comercializar en el mercado con marcado de Conformidad Europea, CE. Se involucró al cliente para definir otros aspectos como lo son las dimensiones generales de la base de recarga, el grado de libertad que se tiene en cuanto a realizar o no cambios en el diseño actual del Robobo, valoraciones estéticas por ser un producto comercial, entre otros.
- Valoración de posibles soluciones para el sistema electromecánico y de reconocimiento: Se investigó sobre posibles opciones para el prototipo de recarga de las plataformas robóticas móviles. Se valoraron ventajas y desventajas de cada opción y se eligió, junto al cliente, el tipo de solución que se deseaba desarrollar y validar.
- Diseño e implementación de la base de recarga: De acuerdo con los requerimientos definidos en la etapa anterior, se diseñó un circuito de potencia y una estructura para el acople simultáneo de hasta cuatro Robobos. La base de recarga está orientada a su uso futuro en un proceso de recarga autónomo, por lo que consideró la implementación en el diseño de un método de identificación por parte de los robots.

A lo largo de esta etapa, se realizaron simulaciones en el software Proteus para detectar y evitar errores en el diseño electrónico final. Además, se utilizó el software de Solidworks para el diseño de la estructura. Se adquirieron las piezas y el ensamblaje del Robobo en este mismo software, lo que permitió visualizar previamente la interacción entre el robot y la base de recarga que se estaba diseñando. Se implementaron mejoras en los diseños iniciales, se elaboró el presupuesto de los componentes y materiales necesarios, y se mantuvo una comunicación constante con el cliente sobre los resultados que se obtuvieron a lo largo de esta etapa.

- Verificación y validación de la propuesta: Se realizaron mediciones en protoboard, se manufacturó el circuito impreso, y se imprimió la estructura en 3d por medio de la técnica de FDM para una subestación de recarga. Se diseñó y ejecutó el plan de validación y verificación del sistema de acople y carga, y se analizaron los datos obtenidos.
- Rediseño y mejoras. Finalmente, se consideraron mejoras en el diseño para obtener una solución mejor que la anterior. Se consideraron aspectos como precio, funcionalidad y estética que implica la implementación de nuevas soluciones.

4.1.2. Criterios de selección

Se definieron los criterios de selección para cumplir con las necesidades del laboratorio de investigación y de los usuarios finales. En primer lugar, se reconoció que la propuesta debe ofrecer una solución viable, es decir, económicamente competitiva con respecto a productos similares en el mercado. Segundo, garantizar la funcionalidad del sistema, de manera que permita la recarga simultánea de cuatro plataformas robóticas móviles y a la vez esté orientado a que en el futuro estas sean capaces de auto-recargarse. Finalmente, en tercer lugar, se requiere diseñar un sistema que sea estético por el carácter comercial del producto. Estos criterios y su importancia relativa están plasmados en el diagrama de Pareto de la Figura 39.

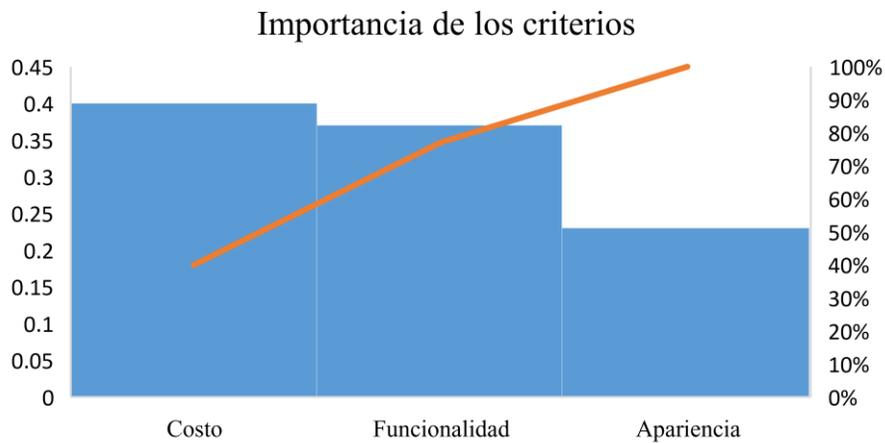


Figura 39. Importancia relativa de los criterios de selección propuestos

Elaborado mediante Microsoft Excel

4.2. Requerimientos de diseño

En este apartado se definen las características mínimas que debió cumplir la propuesta de solución que trata este documento, y que solventa el problema planteado en el Capítulo 1. Los requerimientos se pueden agrupar en tres áreas: generales, mecánicos o eléctricos; y son los siguientes:

Generales

- El precio de fabricación del prototipo está en el rango de los €50-70.
- El prototipo cumple con la normativa de Conformidad Europea (CE) que le corresponde.
- El diseño de la base de recarga no implica modificaciones de las características de la plataforma robótica móvil Robobo.
- Los robots pueden aproximarse y acoplarse al dispositivo siempre y cuando ambos se encuentren sobre una superficie con pocas irregularidades.
- Cuando una plataforma robótica se encuentra acoplada a la base de recarga, la base indica, de manera visual al usuario, si el Robobo está cargando o si concluyó su ciclo de carga.
- Siempre y cuando no exista un obstáculo entre el Robobo y la estación de recarga (como una pared, por ejemplo), el sistema de detección tiene un rango de cobertura de 360°.

Mecánicos

- Las dimensiones máximas de la estructura ensamblada son: 350 mm de alto, 450 mm de largo y 450 mm de ancho.
- La estructura está diseñada de tal forma que el usuario puede armar y desarmar el prototipo para el acceso y mantenimiento del circuito eléctrico.

Eléctricos

- La base de recarga se alimenta del sistema eléctrico de 110 a 240 V.
- El prototipo es capaz de recargar de manera homogénea y simultánea a cuatro Robobos.
- El sistema es capaz de suministrar una corriente homogénea a cada Robobo con un valor entre 1 a 1.5 A durante el proceso de carga, con 5 V.

- El diseño e implementación del circuito electrónico debe tener en cuenta la posibilidad de una futura comercialización de cargadores individuales, por lo que puede subdividirse en cuatro partes o subestaciones independientes.
- La solución planteada debe contar con protecciones del sistema eléctrico en caso de cortocircuito.
- El circuito eléctrico incluye LED rojos para indicar cuando una subestación de carga se encuentre encendida pero desocupada.

Capítulo 5

5. Desarrollo de base de recarga para el Robobo

5.1. Solución del Sistema Eléctrico

En este apartado se presenta el análisis que se llevó a cabo para obtener una solución eléctrica de acuerdo con los requerimientos de la sección 4.2. Para la elección de la solución final se tomó en cuenta la disponibilidad de los componentes en el laboratorio de investigación, o bien, por parte de los distribuidores asociados al GII (en este caso Mouser Electronics y RS Components); además de otros factores como precio, eficiencia y las dimensiones de cada posible solución.

El cargador LTC1733 del Robobo fue configurado, mediante el pin PROG, para una corriente de carga, I_{CHG} , de 1 A en el modo de corriente constante de la Figura 40. Este valor se puede modificar hasta un máximo de 1.5 A [17]. Cerca del fin del ciclo de carga, el LTC1733 entra en el modo C/10 (descrito en la sección 2.4.1), en el cual I_{CHG} se reduce hasta un 10% de la corriente programada, es decir, una corriente de 10 mA hasta que concluye el tiempo de carga. Con estos datos se definió el estado de “Carga en curso” para cada subestación, de la Tabla 4.

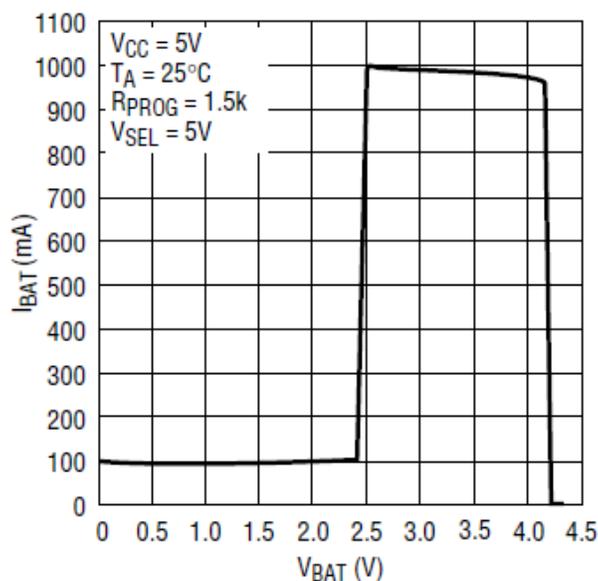


Figura 40. Corriente de carga (I_{BAT}) vs tensión de la batería (V_{BAT}). [17]

Tabla 4. Estados de la subestación de carga

Estado de la Subestación de Carga	Color de LED encendido	Modo de operación del LTC1733	I_{Robobo} (mA)
Carga en curso	Verde	Modo corriente constante	1000
		C/10	100
Tiempo de carga concluido	Azul	Modo Apagado	2
		Modo Suspensión	0.005
Disponible	Rojo	No aplica	No aplica

Una vez que concluye el tiempo de carga del Robobo, que está configurado a partir del pin TIMER del LTC1733 como se indica en la ecuación (5) de la sección 2.4.1, el cargador ingresa al Modo de Apagado o Suspensión, para un consumo máximo de 2 mA de acuerdo con la hoja de datos del fabricante [17]. Se utilizó este dato para definir el siguiente estado de cada subestación de carga de la Tabla 4, de “Tiempo de carga concluido”.

Finalmente, se definió un tercer y último para representar cuando la subestación no tiene ningún Robobo conectado y está “Disponible” para iniciar un nuevo ciclo de carga. A cada estado se le asoció un color de LED, como se indica en la Tabla 4, que permite a los usuarios y operadores reconocerles fácilmente. Además, el Robobo ofrece la capacidad programación para identificar colores de las imágenes que obtiene a partir de las cámaras del teléfono inteligente, por lo que puede reconocer los estados ya mencionados y actuar conforme a ellos.

Una vez que se definieron los estados de las subestaciones de recarga y sus características, se procedió a elegir el método principal para transferir potencia desde la base de recarga hasta el Robobo, entre los cuales se analizaron los siguientes:

- Carga por conexión USB (por sus siglas en inglés: Universal Serial Bus) o Bus Universal en Serie.
- Carga por transferencia inalámbrica de potencia (sección 2.6)
- Carga por contacto

Como se indica en las especificaciones del Robobo del Anexo B.3, utiliza un puerto receptor micro USB hembra tipo B como el de la Figura 41 para la carga de la batería. Este sistema cuenta con cinco pines para transferencia de datos, de los cuales el Robobo solamente utiliza el de

alimentación y el de tierra, que corresponden al número uno y cinco, respectivamente. Sin embargo, se descartó la opción de diseñar una base de recarga que contenga el conector micro USB que le corresponde al Robobo, debido a que implica, por sí sola, una precisión de posicionamiento muy alta.

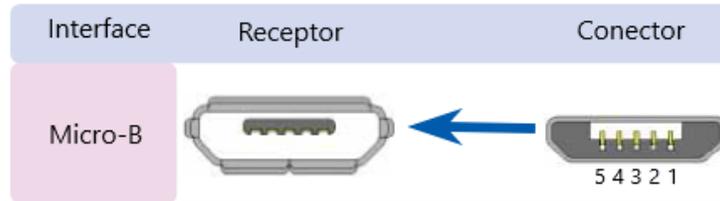


Figura 41. Receptor USB del Robobo y su conector. [67]

En cuanto a la transferencia inalámbrica de potencia, se consideró incorporar una solución a partir del adaptador inalámbrico para celular de la Figura 42. Un sistema de este tipo se podría incluir dentro de la carcasa de la plataforma robótica sin grandes modificaciones del diseño del Robobo; o bien, el adaptador podría adherirse a la tapa inferior de este, como en el caso del celular. El adaptador receptor cuenta con marcado CE y posee un circuito de rectificación incorporado.



Figura 42. Adaptador Receptor de celular para carga inalámbrica (5 VDC,1000 mAh, 83.5x47.6 mm, ~ €11.5). [68]

El adaptador inalámbrico tiene un precio de aproximadamente €11.5, para un total de €46 en el caso de cuatro Robobos. Suministra un máximo de 1 Ah, y de acuerdo con las especificaciones del Anexo B.3, la batería LiPo del Robobo es de 5 Ah. Por lo tanto, con el uso del adaptador se demoraría hasta cinco horas en cargar la batería al máximo, y se desperdicia la capacidad del cargador LTC1733 del Robobo que permite modificar el valor de la corriente de carga a un máximo de 1.5 A.

En la Tabla 5 se resumen los datos de dos bobinas receptoras que permiten una corriente nominal mayor a 1.5 A. Para la carga inalámbrica, cada subestación requiere de al menos dos bobinas, una receptora en el Robobo y una bobina emisora de mayor capacidad en la base de recarga. Con la referencia de la bobina 760308102212 que funciona tanto como emisora y como receptora, el precio se duplica a €14.26 por subestación, o €57.04 por base de recarga, sin tomar en cuenta el circuito de rectificación y reducción de tensión necesarios.

Tabla 5. Características principales de bobinas para carga inalámbrica

Identificador de Fabricante	Inductancia (μH)	Resistencia DC (mΩ)	Corriente Nominal (A)	Factor Q	Tamaño (mm)	Precio por unidad (€)
760308102212	5.4	190 + 26%	2	18	29x29	7.13
AWCCA50N50H35-C01-B	24	72 ± 20%	5.4	160	50x50	6.69

Precio consultado el 15 de diciembre de 2018 de octopart.com

Para la carga por contacto se analizó la opción de implementar una fuente conmutada SMPS en el circuito de potencia (descrita en la sección 2.5.2), que suministre la corriente necesaria para cargar la batería del Robobo. Esta solución ofrece la conversión CA/CD y la reducción de tensión desde la base de recarga; que en el caso del sistema inalámbrico se da en el Robobo a partir de la bobina receptora. El uso de una SMPS implica incorporar en la solución un adaptador como en la Figura 43 para la conexión del puerto USB del robot con los contactos de la subestación.

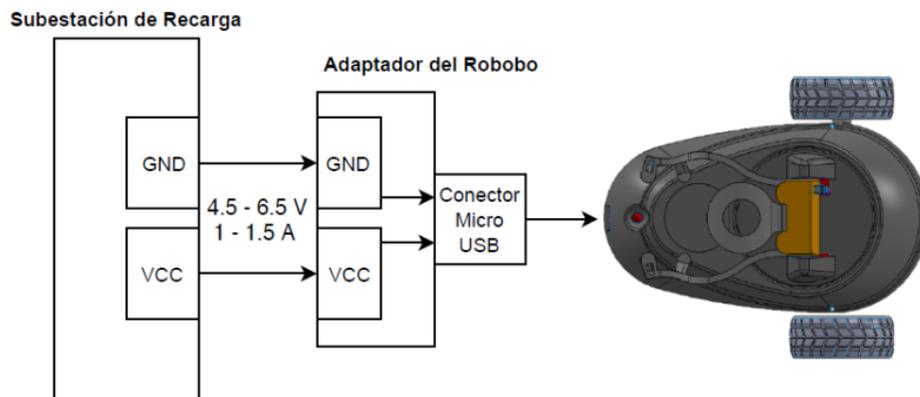


Figura 43. Sistema de carga por contacto con adaptador para el Robobo

Elaborado mediante Diagramly y Solidworks

Para comparar el principio de funcionamiento del adaptador inalámbrico antes mencionado de la Figura 42 contra la carga por contacto con una fuente de conmutación SMPS, se analizaron las opciones disponibles en el mercado a través de los datos de las Tabla 6, sobre las SMPS, junto

con los datos que ya se tenían de la Tabla 5, sobre bobinas para carga inalámbrica. Todas las fuentes de la Tabla 6 poseen marcado CE y una corriente de salida de hasta 2 A con 5 V, para satisfacer el consumo máximo de corriente al que se puede configurar el LTC1733 del Robobo, de 1.5 A, con un margen de 400 mA para considerar posibles pérdidas y consumo de otros componentes.

**Tabla 6. Características principales de los convertidores AC/DC regulados
(Voltaje de Salida: 5 V, Corriente de Salida: 2 A, Marcado CE)**

Identificador de Fabricante	Voltaje de Entrada (VAC)	Eficiencia (%)	Dimensiones máximas lxaxh (mm)	Precio por unidad (€)	Detalle
RAC10-05SK/277	85-305	82	52.5x27.4x23	9.42	Protección de corto circuito, sobrecarga o sobretensiones sin necesidad de componentes externos
VOF-10B-S5	85-264	79	45.72x23.30x20.48	12.01	Protección de corto circuito, sobrecarga o sobretensiones sin necesidad de componentes externos
PSK-10B-S5	85-264	79	50.80X25.40X20.55	14.47	Protección de corto circuito, sobrecarga o sobretensiones sin necesidad de componentes externos
RAC10-05/SC/277	80-305	75	52.5x27.4x23.5	22.45	Protección continua de corto circuito.
RAC10-05SB	90-264	72	52.40x26.80x23.00	38.51	Protección de corto circuito. No recomendable para diseños nuevos.
ECE10US05	85-264	80	38.1x25.4x15.2	No disponible	Protección de corto circuito, sobrecarga o sobretensiones sin necesidad de componentes externos

Precio consultado el 15 de diciembre de 2018 de mouser.es

El modelo ECE10US05 de la Tabla 6 corresponde a la fuente de menor tamaño, pero no se encontraba disponible entre los distribuidores. Por otro lado, la fuente conmutada RAC10-05SK/277 de la Figura 44 ofrece la mayor eficiencia de todas, de 82%, al menor precio y con dimensiones muy similares al resto. La RAC10-05SK/277 tiene un costo de €9.42 por subestación, o €37.68 por base de recarga.



Figura 44. Convertidor Regulado RAC10-05SK/277 de RECOM
(10 Watt, 2 A, 52.5x27.4x23.0 mm, €9.42). [69]

Además, este modelo ofrece protección de corto circuito con reinicio automático; protección de sobrecarga o sobretensiones ambas de 150 a 190%, y todas ellas con modo *hiccup*, que quiere decir que la fuente solo se mantendrá encendida cuando la situación de corto circuito, sobrecarga o sobretensión se haya resuelto. Incluye un fusible de entrada de T2A, es decir, con tiempo de retraso categoría T, de *slow blow* o actuación lenta, de 2 A; además de un capacitor de aislamiento de un máximo de 100 pF, por lo que de acuerdo con su fabricante [69] no requiere de componentes externos.

Debido al presupuesto de fabricación disponible de tan solo €50 a €70, se consideró que la opción de transferencia de potencia inalámbrica de ocho bobinas de al menos €57.04, sin el circuito de rectificación ni protecciones, no es viable en comparación con los €37.68 de cuatro fuentes conmutadas, que sí les incluye. Se optó por utilizar la fuente de conmutación tipo RAC10-05SK/277 para diseñar un sistema como el de la Figura 45.

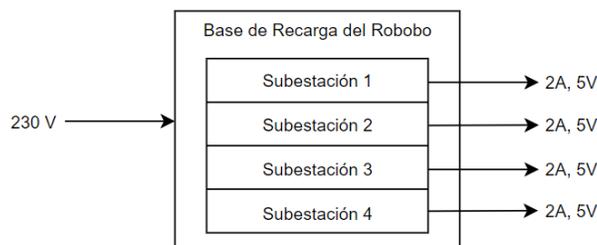


Figura 45. Condiciones eléctricas generales de la base de recarga y las cuatro subestaciones

Elaborado mediante Diagramly

Pese a que el componente principal de potencia, el RAC10-05SK/277, cuenta con las protecciones mencionadas, se decidió agregar un único fusible externo a la entrada de las cuatro fuentes conmutadas debido a que representa una manera económica y eficaz para la protección contra daños ante cortos circuitos y evita posibles daños de los componentes a lo largo de la validación del funcionamiento del circuito eléctrico. Se eligió un fusible de actuación lenta, los cuales interrumpen el circuito solamente cuando reciben una corriente elevada durante un periodo sostenido de tiempo, como en el caso de un corto circuito, entre 0.01 y 0.1 s [70], dependiendo del fabricante.

Para elegir el valor de fusible se retomaron las condiciones eléctricas que se tienen hasta el momento en la Figura 45, a partir de las capacidades máximas del AC/DC seleccionado, y que definen las ecuaciones (14), (15) y (16):

- A la entrada de la base de recarga en su valor eficaz o valor cuadrático medio RMS (por sus siglas en inglés: Rated Mean Square):

$$V_{IN} = 230 V \quad (14)$$

- Para cada subestación:

$$I_{sub} = 2 A; V_{sub} = 5 V; P_{OUTsub} = 10 W \quad (15)$$

- La eficiencia del AC/DC RAC10-05SK/277:

$$\eta_{AC/DC} = 82\% \quad (16)$$

Por lo tanto, para las cuatro bases de recarga se obtiene una potencia de entrada a la base de recarga definida por la ecuación (17), y la corriente RMS de operación a la entrada de la ecuación (18).

$$P_{IN} = \frac{4 \cdot P_{OUTsub}}{\eta_{AC/DC}} = 48.78 W \quad (17)$$

$$I_{IN} = \frac{P_{in}}{V_{Pin}} = \frac{48.78 W}{230 V} = 212.09 mA \quad (18)$$

Las pruebas de validación se llevaron a cabo para una sola subestación de recarga, en cuyo caso se tiene la potencia de la ecuación (19) y la corriente RMS de la ecuación (20):

$$P_{IN} = \frac{P_{OUTsub}}{\eta_{AC/DC}} = 12.2 W \quad (19)$$

$$I_{IN} = \frac{P_{in}}{V_{Pin}} = \frac{12.2 W}{230 V} = 53.04 mA \quad (20)$$

En el GII se tuvo acceso al uso de un fusible 0034.7109 de actuación lenta, cuyas características principales se resumen en Tabla 7. Los fusibles del estándar UL 248-14 pueden operar de manera continua al 75% de su corriente nominal [71]; por lo que el fusible 0034.7109 con 187.5 A RMS no cumplía con los requerimientos de funcionalidad para las cuatro subestaciones, pero sí para una. Se utilizó el fusible 0034.7109 en las pruebas de validación por motivos de disponibilidad, sin embargo, en caso de implementar las cuatro subestaciones se debe utilizar el fusible 0034.7110.

Tabla 7. Características de fusibles de actuación lenta de Schruter (Estándar UL 248-14). [72]

Identificador de Fabricante	Corriente Nominal RMS (A)	75% de la Corriente Nominal RMS (A)	Tensión Nominal RMS (VAC)	Capacidad de rompimiento
0034.7109	0.25	0.18750	250	50 A @ 250
0034.7110	0.315	0.23625		VAC

La fuente AC/DC RAC10-05SK/277 presenta un rizado máximo de 50 mV por efecto de la conmutación [69]. Se decidió agregar un capacitor cerámico a la salida del AC/DC para estabilizar la salida y filtrar el ruido de alta frecuencia. Los condensadores cerámicos poseen una resistencia serie equivalente o ESR (por sus siglas en inglés: Equivalent Series Resistance) baja en comparación con los condensadores electrolíticos de aluminio, condensadores de tantalio y condensadores de película, que les permite manejar mejor la corriente de rizado [73]. El fabricante del RAC10-05SK/277 recomienda en [74] utilizar un capacitor de 0.1μF por cada 50 V a la salida; por lo tanto, se utilizó un capacitor de 10 nF a la salida de los 5 V.

Para concluir con el diseño del circuito de potencia, se definió una entrada de alimentación con un conector macho tipo IEC 60320 C14 como el de la Figura 46. Este conector implica el uso de un cable con un conector hembra IEC 60320 C13 en uno de sus extremos, que poseen tres

un sistema como el de la Figura 48. El nuevo contacto se utilizó principalmente para identificar cuando un Robobo está conectado a la subestación de carga. De esta forma, se encienden los LED en verde o azul cuando el Robobo está conectado, y en rojo cuando no, como se explica a continuación.

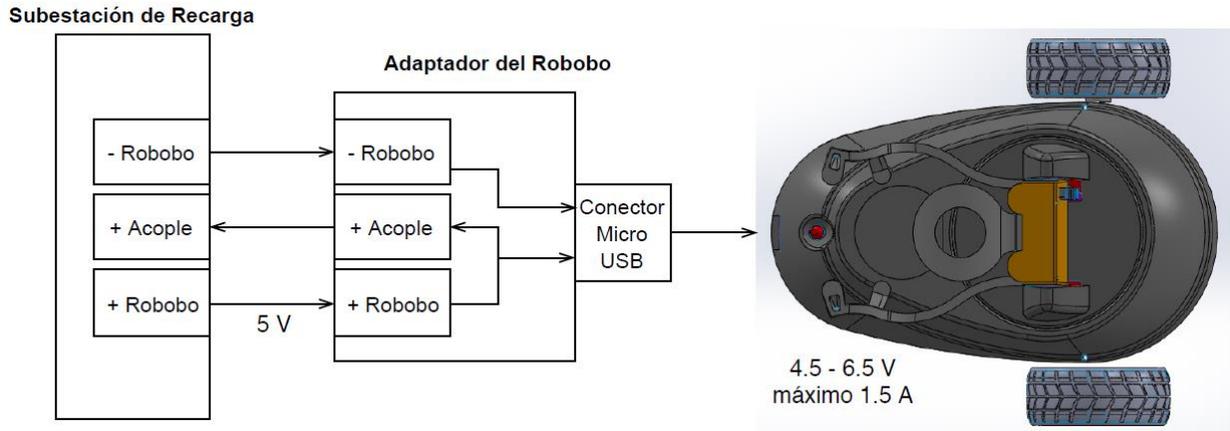


Figura 48. Sistema de carga con adaptador para el Robobo con tres contactos
Elaborado mediante Diagramly y SolidWorks

Estados de carga con el Robobo conectado

Para identificar los primeros dos estados de la Tabla 4, cargando o tiempo de carga concluido, se implementó el amplificador operacional APX321 como comparador no inversor con histéresis, junto con la resistencia shunt o de derivación R_{S1} , con la lógica mostrada en la Figura 49. La resistencia shunt permite determinar el valor de corriente que fluye a través del Robobo, y este dato se lleva al comparador en forma de tensión. Si el valor medido está por encima del umbral de tensión configurado en el pin V^- del comparador, la batería del Robobo se está cargando y se encienden los LED en verde; en caso contrario, el tiempo de carga ha concluido y se encienden los LED en azul.

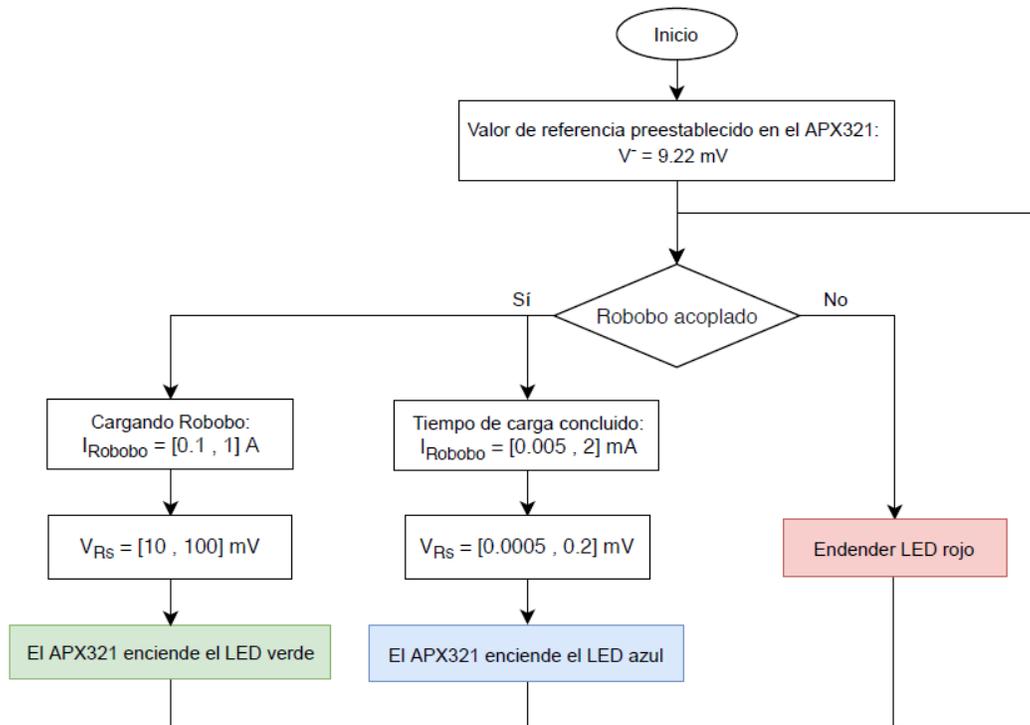


Figura 49. Lógica para encender los LED en color verde o azul

(R_s : resistencia Shunt, APX321: amplificador operacional)

Elaborado mediante Diagramly

En el circuito final de la Figura 47, cuando el Robobo está acoplado se conecta a través de los contactos + Robobo y – Robobo en serie con R_s , a un nodo de 5 V; como se simplifica en la Figura 50. El cargador LTC1733 del Robobo requiere al menos 4.5 V para cargar la batería correctamente [17], por lo que se dispone de 0.5 V para definir la resistencia shunt que va en serie. En la ecuación (21) se utilizaron solamente 0.3 V para el calcular una R_s máxima, con el objetivo de considerar posibles pérdidas por los contactos al aire u otros compontes. Por lo tanto, el valor máximo obtenido para la resistencia shunt es de 0.3 Ω .

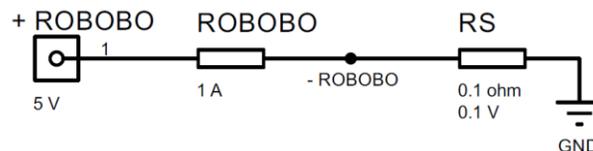


Figura 50. Consumo máximo de R_s cuando el Robobo está conectado

Elaborado mediante Proteus

$$R_{Smax} = \frac{V_{Rs}}{I_{Robobo}} = \frac{0.3 V}{1 A} = 0.3 \Omega \quad (21)$$

Se eligió una R_S de 0.1Ω del máximo obtenido en la ecuación (21), para un consumo máximo teórico de $0.1 V$ en R_S . En este caso, si el LTC1733 se configura con su corriente máxima de carga, I_{CHG} , de $1.5 A$ como en la Figura 51, el funcionamiento del cargador del Robobo no se vería afectado, debido a que R_S consumiría un máximo de $0.15 V$, como se muestra en la ecuación (22).

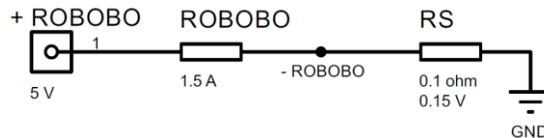


Figura 51. Consumo máximo de R_S cuando $I_{CHG} = 1.5 A$
Elaborado mediante Proteus

$$V_{Rs(max)} = I_{Robobo(max)} * R_S = 1.5 A \cdot 0.1 \Omega = 0.15 V \quad (22)$$

A partir de la R_S seleccionada se implementaron los dos primeros estados de la subestación de carga definidos antes en la Tabla 4, a través del comparador analógico APX321 como se muestran en la Tabla 8. La tensión en el pin negativo del comparador, que determina el umbral de conmutación, se configuró en el rango de tensión disponible entre los dos estados de carga, es decir, entre $]0.2; 10[$ mV de acuerdo con los valores que puede tomar V_{R_S} cuando el Robobo está acoplado a la subestación.

Tabla 8. Valores principales considerados para implementar la lógica de funcionamiento de cada subestación de recarga
($R_S = 0.1 \Omega$)

Estado de la Subestación de Recarga	$I_{R_S} = I_{Robobo}$ (A)	V_{R_S} (mV)	Salida del Comparador (V)	Color de LED encendido
Cargando	1	100	5	Verde
	0.1	10		
Tiempo de carga concluido	0.002	0.2	0	Azul
	0.000005	0.0005		

El APX321 es la versión singular del amplificador dual APX358, es decir, que contiene dos amplificadores en el mismo empaquetado. Se eligió el amplificador operacional APX321 debido a que el Grupo Integrado de Ingeniería utilizó el APX358 en el Robobo y por lo tanto se contaban con unidades a disposición para las pruebas de validación del circuito eléctrico. De acuerdo con [76], posee características que permitieron su aplicación, como:

- Uso típico de $V^+ = 5\text{ V}$ y $V^- = 0\text{ V}$, que en este caso permite encender el LED verde y azul, respectivamente.
- Operación a baja tensión (2.5 a 5.5 V).
- Baja corriente de alimentación, típica de $110\text{ }\mu\text{A}$.
- Distorsión cruzada eliminada, que es la que ocurre cuando una señal cambia de positivo a negativo, o viceversa, y puede causar problemas de oscilaciones parásitas.
- Tiene un rango de tensión de Entrada de Modo Común (cuando las tensiones en V^- y V^+ son iguales) de 0 a -0.2 V .
- Es posible reducir la captación de ruido y aumentar la integridad de la señal al colocar el integrado cerca de la fuente de señal.
- El factor de rechazo de modo común (CMRR, por sus siglas en inglés: Common Mode Rejection Ratio) de 50 a 65 dB con $V^+ = 5\text{ V}$ y $V^- = 0\text{ V}$ a 25°C , donde:

Se añadió el circuito de histéresis al APX321 para obtener un disparador de Schmitt como el de la Figura 52, para evitar oscilaciones indeseadas cuando la señal se encuentra en las proximidades de V_{ref} . Esto fue importante al ser V_{ref} un valor pequeño, menor a 10 mV , y no tratarse de un amplificador de instrumentación, que están diseñados para tener un alto rechazo al modo común (CMRR), por ejemplo de 75 a 100 dB en el caso de [77]; o un operacional diseñado para la amplificación de tensión proporcional a la corriente.

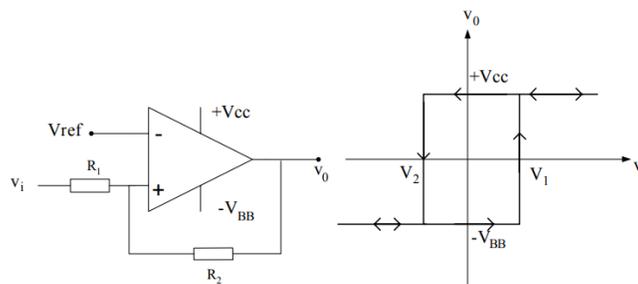


Figura 52. Comparador no inversor con histéresis. [78]

La ecuación (23) se utilizó para definir el valor de tensión crítico del amplificador con histéresis para la conmutación desde la saturación negativa ($v_o = -V_{BB}$) hacia la positiva ($v_o = V_{CC}$), y la ecuación (24) para el caso contrario. La Tabla 9 muestra los valores teóricos que se obtuvieron para V_{ref} , V_1 y V_2 del disparador de Schmitt, con la configuración de resistencias utilizadas en el circuito final de la Figura 47. La primera fila de la tabla considera R_S como despreciable, en la segunda se incluye como parte de R_1 .

$$v_i > V_1 = V_{ref} \frac{R_1 + R_2}{R_2} - V_{BB} \frac{R_1}{R_2} \quad (23)$$

$$v_i \leq V_2 = V_{ref} \frac{R_1 + R_2}{R_2} - V_{CC} \frac{R_2}{R_2} \quad (24)$$

Tabla 9. Valores teóricos de las tensiones del comparador no inversor con histéresis

($R_S = 0.1 \Omega$)

R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)	R4 (Ω)	V_{ref} (mV)	V_1 (mV)	V_2 (mV)	Histéresis $V_1 - V_2$ (mV)
4.99	4990	4.99	2700	9.224	55.250	4.233	51.017
5.09					56.172	4.133	52.039

En los valores obtenidos en Tabla 9 se puede observar que las tensiones V_{ref} y V_2 están dentro del rango de conmutación del APX321 de]0.2; 10[mV. Sin embargo, no se necesitó configurar V_2 dentro del rango de conmutación debido a que durante el proceso de carga la base utiliza solamente el flanco negativo de la histéresis, cuando pasa del estado de carga a dar por concluido el tiempo de carga.

Se tomó en cuenta el caso de que se reinicie el ciclo de carga con el Robobo conectado a la base. El LTC1733 iniciaría en modo de corriente constante, con la I_{CHG} actualmente configurada de 1 A. Esta corriente genera una tensión V_{R_S} de 100 mV, que está por encima de los 55 mV de conmutación que representa V_1 , por lo que se generó una salida positiva en el comparador y se logró indicar correctamente el estado de carga en curso con los LED en color verde.

Estado de subestación de recarga Disponible

El tercer y último estado de la Tabla 4, en el que se encienden los LED rojos cuando la subestación está disponible y no tiene ningún Robobo conectado, se implementó mediante el

contacto + Acople y el diodo Zener, D1, del circuito final de la Figura 47. El diodo D1 que se utilizó es el PMEG2020EH del que se disponía en el laboratorio de investigación y que posee una tensión directa de 0.2 a 0.45 V dependiendo de la corriente directa que pase a través de él. D1 se conectó en paralelo a los LED rojos a través del contacto + Acople , es decir, solamente cuando el Robobo está acoplado a la base de recarga. En ese instante se fuerza una tensión en los LED que no es suficiente para que se iluminen.

La solución planteada, para la base de recarga completa del Apéndice A.2, incluye la implementación de un total de 17 placas de circuitos impresos o PCBs. Dentro de la estructura se tiene un circuito principal que contiene la parte de potencia, de rectificación y reducción de tensión, y la lógica de funcionamiento de los tres estados de carga para cada subestación. Además, del circuito principal se desprenden cuatro PCBs adicionales por subestación, como se ejemplifica en la Figura 53; dos para los LED RGB, y otros dos externos a la base de recarga, que son los que constituyen el adaptador que se coloca en el Robobo.

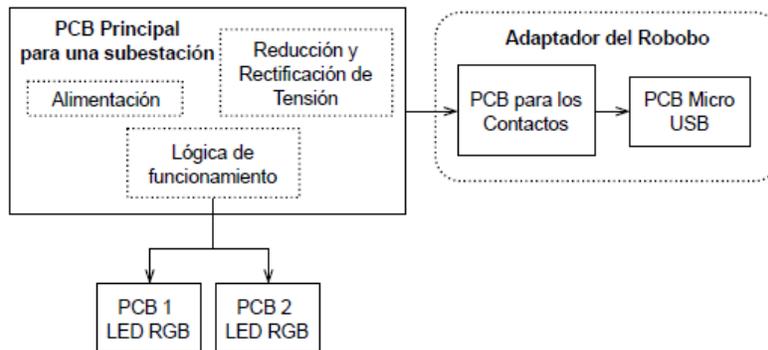


Figura 53. Diagrama de bloques de los circuitos impresos que componen la solución eléctrica para una subestación de recarga

Elaborado mediante Diagramly

5.2. Solución del Sistema de Reconocimiento

Para la elección del sistema de reconocimiento de la base de recarga, se tuvo la limitación de que el Robobo no se podía modificar debido al impacto económico y de diseño que implicaba incluirle nuevas capacidades, sensores o actuadores. Por lo tanto, se desecharon soluciones de detección por intensidad de señal, como las que utilizan infrarrojo o bluetooth, por ejemplo. Para dichos casos, el Robobo no contaba con las tecnologías de detección de las señales que se podían

haber emitido desde la base, o ya estaban siendo utilizadas, como en el caso del bluetooth que sirve de conexión entre la plataforma robótica móvil y el teléfono inteligente.

Sin embargo, la plataforma robótica móvil contaba con otros tipos de sistemas que permiten localizar la base de recarga, como lo son las dos cámaras que posee el teléfono. Se eligió dotar a la base de recarga de la capacidad de implementar un sistema de reconocimiento visual para llevar a cabo el proceso de recarga autónomo, a través de los fiduciales visuales descritos en la sección 3.2.

De entre los sistemas existentes se recomendó el reconocimiento y ubicación por medio de marcadores AprilTag, debido a la tasa de detección que presentan estos sistemas; que es del 100% de las etiquetas pequeñas o giradas hasta casi 80° con respecto a la cámara, con una exactitud de localización de casi 0° de error, incluso cuando la etiqueta se encuentra girada a 70°, como se mostró en la Figura 36. Además, su costo computacional es menor y ofrece la reducción de la tasa de falsos positivos, comparado a otros sistemas como ARTag o ARToolkitPlus, de acuerdo con los datos de la Figura 34 [62].

Dentro de las especificaciones del Robobo del Anexo B.3, se tiene que el teléfono inteligente a utilizar (no incluido dentro del paquete comercial) debe tener dos cámaras de alta resolución, el sistema operativo Android 5.1 o superior, conectividad Bluetooth para conectarse a la plataforma robótica móvil y conectividad WiFi para conectarse a un ordenador personal, así como la aplicación móvil “Robobo” instalada. Este conjunto de características permite programar al teléfono desde un ordenador utilizando Scratch, JavaScript o ROS para incorporar un sistema de visión con detección de etiquetas, similar al implementado en el Robobo mediante JavaScript en [79].

Finalmente, se propuso al GII implementar el algoritmo mostrado en la Figura 54 para el reconocimiento de la base de recarga, en el cual se utilizan las cámaras que posee el teléfono inteligente del Robobo para identificar el o los AprilTag presentes en sus alrededores. Al ejecutar el sistema de detección y codificación de AprilTag se obtiene la ubicación de las etiquetas con respecto al Robobo. Posteriormente se puede aproximar el robot a la estación de recarga a partir de los datos obtenidos.

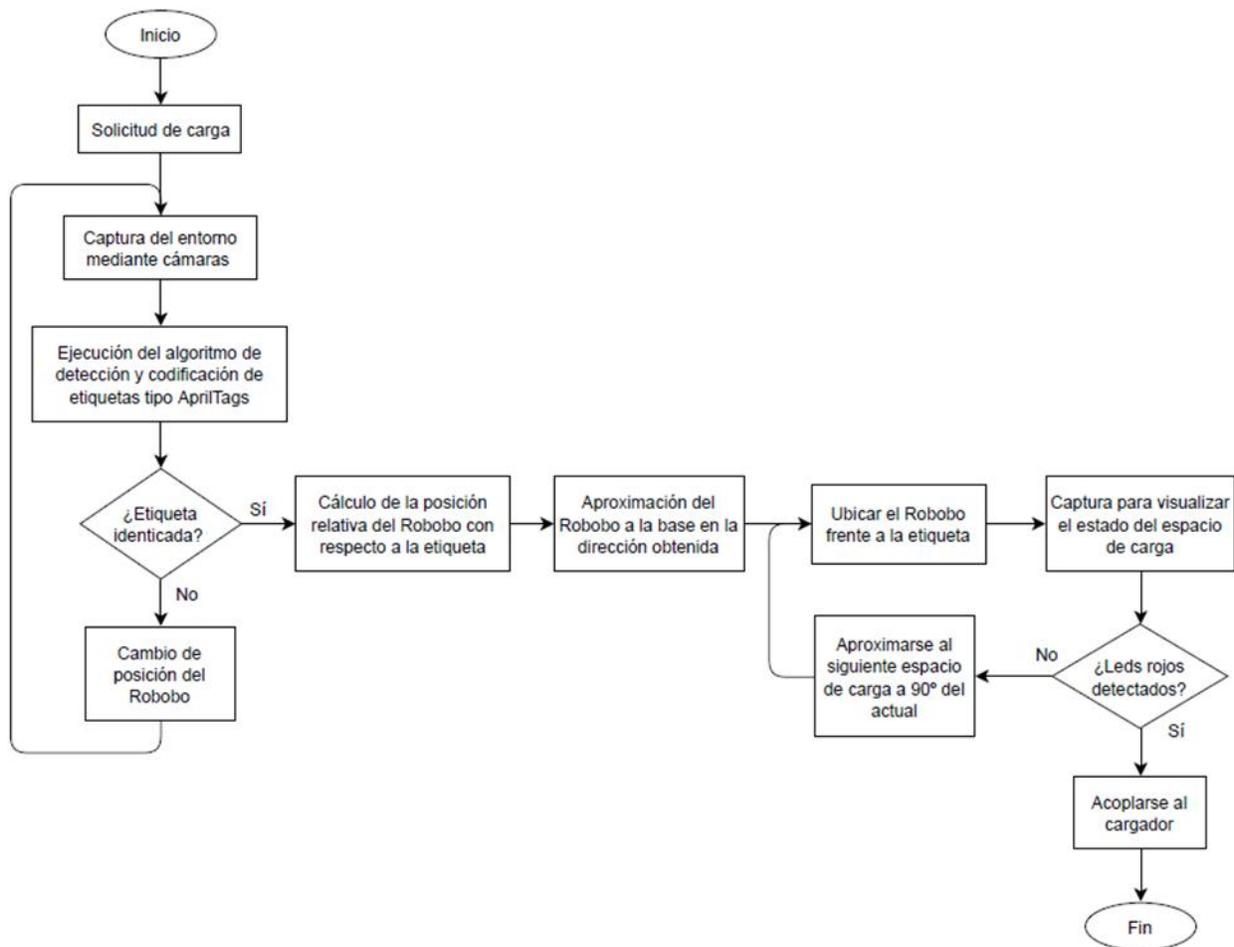


Figura 54. Proceso de aproximación a la base de recarga mediante reconocimiento de AprilTags

Elaborado mediante Diagramly

Una vez que el Robobo se aproximó a la base de recarga, se realiza una nueva captura del entorno para identificar por medio de la programación de detección de colores, si la subestación se encuentra con los LED encendidos en color rojo; es decir, que la subestación está desocupada y disponible para recargar el Robobo actual. De lo contrario, se conocen las dimensiones de la base de recarga, por lo que el Robobo puede fácilmente dirigirse a la siguiente subestación.

Cabe destacar que la aplicación y validación del algoritmo de detección y codificación de las etiquetas, así como el de la aproximación del Robobo a la base, se encuentran fuera de los alcances de este proyecto y corresponden a una de las líneas de investigación que se daban en el momento en el GII. Sin embargo, la elección y definición del proceso fue importante no solo para

orientar las investigaciones actuales de implementación de los algoritmos, sino también para poderle incluir en el diseño de la estructura propuesta a continuación en la sección 5.3.

5.3. Solución del Diseño de la Estructura

Para el diseño de la estructura de la base de recarga se tomaron en cuenta los requerimientos de la sección 4.2. Especialmente los relacionados a que el prototipo debe permitir acoplar al menos cuatro Robobos, sin modificar el diseño de la plataforma robótica móvil; y que debe incorporar el sistema de identificación con un rango de cobertura de 360°, para el cual se eligió el uso de etiquetas AprilTag, en la sección 5.2. Además, se limitaron las dimensiones máximas a 450x450x350 mm, y se debió de garantizar la capacidad de ensamblaje y desensamblaje para el acceso al circuito eléctrico.

El proceso de diseño y elección de candidatos se llevó a cabo de la mano con el equipo de trabajo del Robobo, al que se le presentaron las diferentes propuestas que llevaron al diseño final. Inicialmente, se utilizaron como referencia las bases de recarga para robots, con contactos al aire, de la Tabla 1, y se valoraron diseños generales como los de los bocetos que se muestran a continuación.

Se planteó un diseño similar a la base de recarga de Cozmo o Roomba, con “estacionamientos” individuales para cada Robobo, como las de la Figura 55. Sin embargo, cuatro Robobos colocados uno al lado de otro, ocupan al menos un espacio de 704 mm, que excede las dimensiones máximas permitidas. Los módulos se reacomodaron alrededor de un cilindro, como en la Figura 56, y se utilizaron rampas para disminuir el área que ocupa la estación en el suelo. Este diseño ofreció la ventaja de aprovechar el cilindro para dar altura a la estructura y colocar los AprilTag alrededor de él. Se planteó colocar el circuito de las cuatro subestaciones dentro del cilindro y así aprovechar el espacio en medio de las rampas.

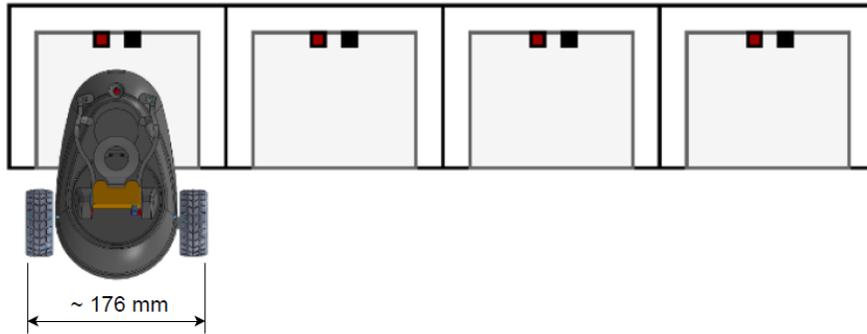


Figura 55. Boceto de cargadores o estacionamientos en línea
Elaborado mediante Diagramly

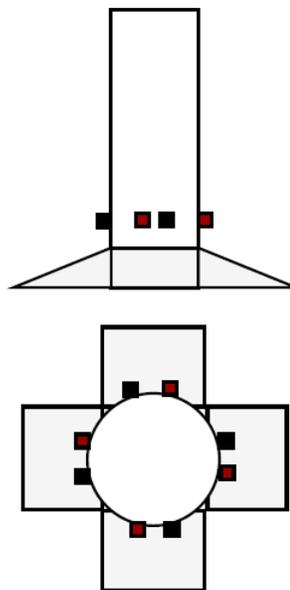
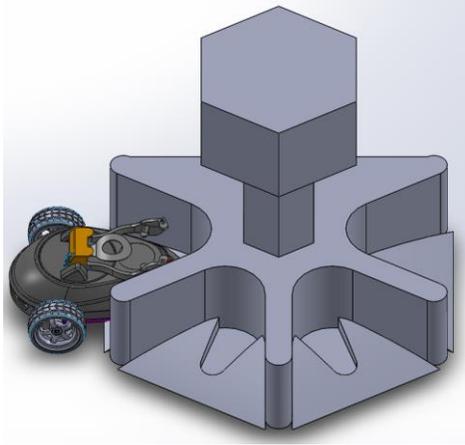
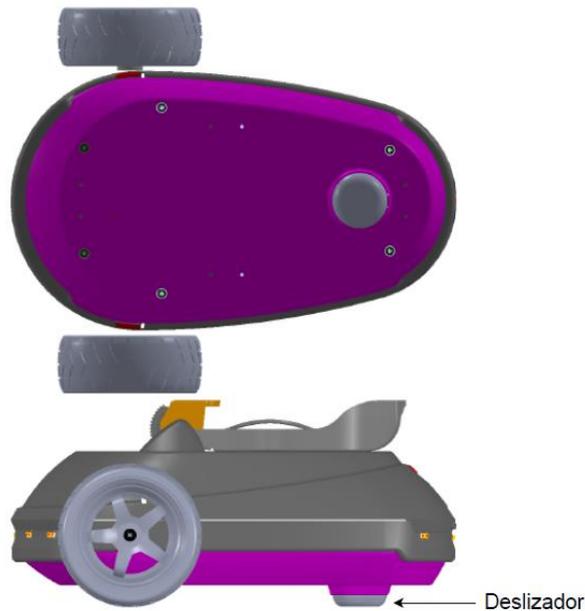


Figura 56. Boceto de subestaciones con rampas dispuestas alrededor de un cilindro
Elaborado mediante Diagramly

Se procedió a realizar el diseño de la estructura en 3D con el software de SolidWorks 2014, del que el GII poseía la licencia. Se valoró la combinación de los dos diseños anteriores de la Figura 47 y la Figura 56 en una estación de recarga como la de la Figura 57; que puede utilizarse apoyado a una pared y que reduce el largo de la estructura con respecto al diseño de estacionamientos en línea de la Figura 55. Se añadió a las rampas un escalón para el deslizador que posee el Robobo en su tapa inferior, que se puede observar con más detalle en la Figura 58, para dar mayor ajuste al posicionamiento del Robobo en la base de recarga.



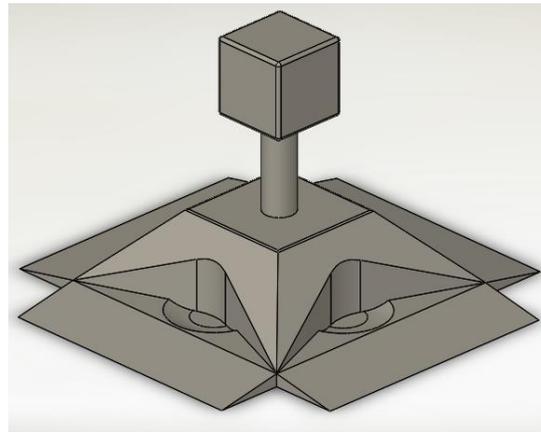
**Figura 57. Propuesta de diseño a partir de un hexágono con etiquetas de reconocimiento
Elaborado mediante SolidWorks**



**Figura 58. Detalle del deslizador del Robobo
Elaborado mediante SolidWorks**

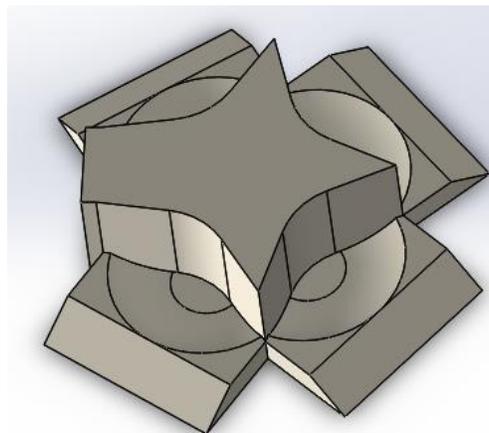
Sin embargo, la propuesta de la Figura 57 se descartó por factores de funcionalidad. Un Robobo podría aproximarse a la estación de recarga por el costado que no posee rampas y requerir más tiempo en ubicar una subestación disponible. Principalmente, en caso de que la estructura no se coloque apoyado a una pared, sino en el centro de una habitación o un aula, por ejemplo. Además de que carece de simetría en comparación con el diseño cilíndrico de la Figura 56.

Se continuó con el desarrollo de la estructura cilíndrica y se obtuvo la estación de recarga de la Figura 59 con cuatro caras simétricas. Este diseño lo conforma una base con cuatro rampas, un cilindro, y un cubo para colocar los AprilTag. Sin embargo, no consideraba la conexión del cable de alimentación, que necesita de una cara plana en la base para colocar el conector macho de la Figura 46, mencionado en la sección 5.1 sobre la solución del sistema eléctrico.

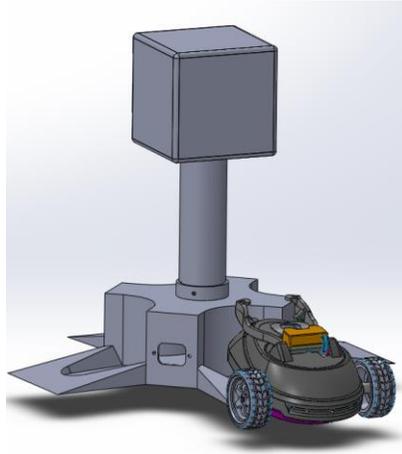


**Figura 59. Propuesta de diseño cilíndrico y cubo con etiquetas de reconocimiento
Elaborado mediante SolidWorks**

Se propuso cambiar la base de la Figura 59 por la de la Figura 60, para ubicar el conector del cable de alimentación del circuito en la cara plana que tiene al lado izquierdo en la imagen. Además, se redujo el tamaño con respecto a la versión anterior. Sin embargo, se decidió desarrollar una opción con una base más simétrica con varias caras planas en lugar de solo una, como la de la Figura 61, y se desarrolló la solución final a partir de ella.

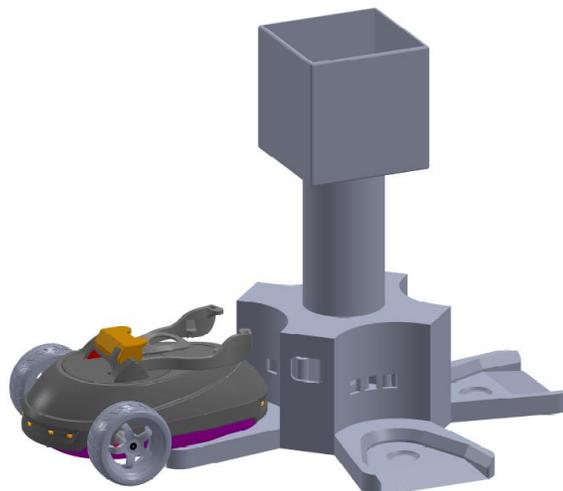


**Figura 60. Propuesta de diseño para incorporar conector IEC60 320-C14
Elaborado mediante SolidWorks**



**Figura 61. Propuesta de diseño a partir de base cuadrada
Elaborado mediante SolidWorks**

Finalmente, se diseñó la estructura de la Figura 62 de 344.96 mm de largo y ancho, con 317.6 mm de alto, que se puede apreciar con más detalle en los planos mecánicos del Apéndice A.2. El prototipo se compone de 6 partes o piezas: una base principal, su tapa en forma de X o cruz, cuatro rampas desmontables, un cilindro, y un prisma para colocar los AprilTag. La base principal es la que alberga el PCB principal de la Figura 53 y los 8 PCBs correspondientes a los LED RGB.



**Figura 62. Propuesta de diseño cilíndrico y cubo con etiquetas de reconocimiento
Elaborado mediante SolidWorks**

Esta solución se diseñó para poder colocar y retirar la tapa de la base sin problemas, con el borde superior en las paredes como se muestra en la Figura 63. Además, consideró el espacio para el conector del cable de alimentación del circuito, y tiene dos alojamientos en el suelo por cada subestación, a donde se acoplan una especie de orejas con las que se diseñaron las rampas, que se muestran con más detalle en la Figura 64.

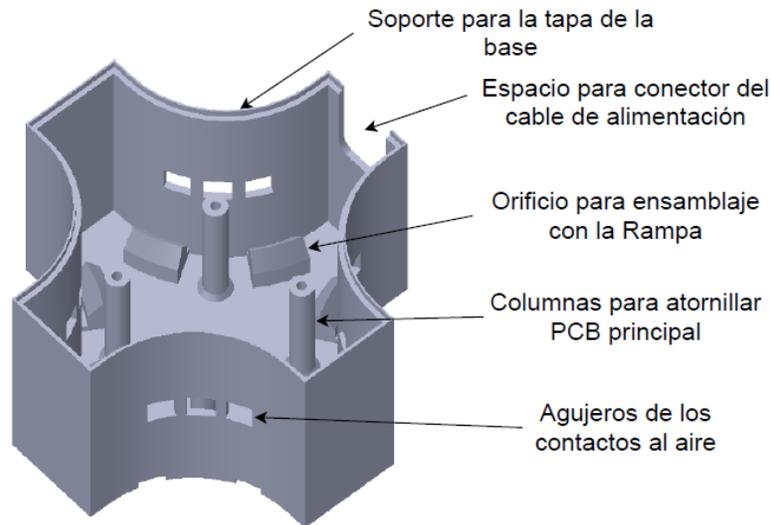


Figura 63. Detalles de la base final del prototipo
Elaborado mediante SolidWorks

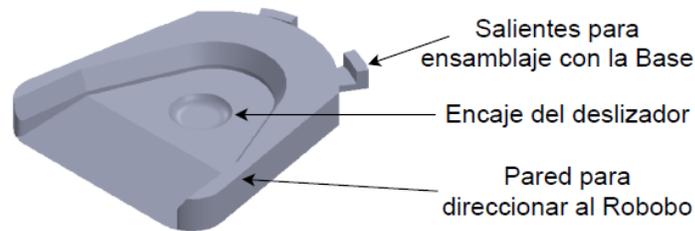


Figura 64. Detalles de la rampa final del prototipo
Elaborado mediante SolidWorks

Se implementaron cuatro columnas en la base para sostener el PCB principal. La altura de las columnas se definió para permitir a los contactos de carga salir de la base a través de los tres agujeros que tiene cada pared circular. Los contactos con muelle y el conector del cable eléctrico

de alimentación van soldados al PCB principal, por lo que se tuvo que ajustar tanto el diseño de la estructura como del PCB final del Apéndice A.2 para obtener un prototipo funcional.

La forma final de la rampa de la Figura 64 se basó en la forma de la tapa inferior del Robobo y su deslizador. Las paredes de la rampa direccionan al Robobo hacia un acople correcto, a pesar de que el Robobo no esté colocado de forma óptima antes de retroceder para el acople con la base de recarga. Se les añadió un tipo de orejas con respecto a los diseños anteriores para obtener rampas desmontables, lo que se hizo posible probar distintos prototipos de rampas sin necesidad de volver a manufacturar toda la base o preocuparse porque las dimensiones fueran permitidas por la impresora 3D que se utilizó para manufacturar el prototipo. Además, permitió disminuir el volumen que ocupa la base cuando no se está utilizando.

La tapa es simétrica a excepción del lado donde va el conector de alimentación, como se puede observar en la Figura 65. En el lado del conector se implementó una pared que se ajusta con la base y que hizo posible colocar y retirar el PCB, debido a que conector de alimentación está soldado permanentemente al PCB principal. La tapa tiene un soporte en el centro en forma de cruz, que sostiene el cilindro y el prisma de AprilTag. Se utilizó un ajuste holgado ISO entre la tapa y las paredes de la base para facilitar el acceso al PCB.

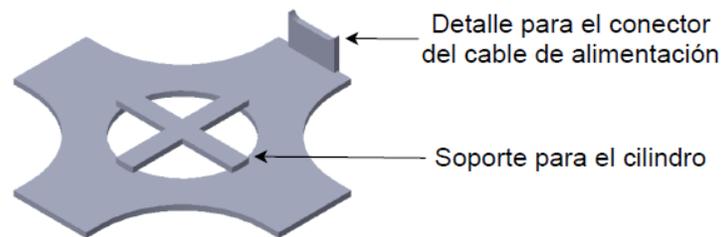


Figura 65. Detalles de la tapa final del prototipo
Elaborado mediante SolidWorks

Por otro lado, se utilizó la técnica de manufacturación aditiva para el prototipo, por medio del Modelado por Deposición Fundida o FDM descrito en el Marco Teórico en la sección 2.7. En el GII se dispuso de una impresora 3D como la de la Figura 21 del Marco Teórico, y filamento PLA natural como el de la Figura 66. La impresora posee una resolución de capas (en el eje Z o vertical) de 0.1 a 0.4 mm al intercambiar las boquillas de un fusór; en el laboratorio se utilizó

configurada para 0.3 mm. El volumen máximo de impresión es de 380x230x220 mm; suficiente para el tamaño de cada una de las piezas.



Figura 66. Filamento SMARTFIL PLA natural de (1.75 ± 0.03) mm para impresoras 3D. [80]

5.4. Presupuesto de materiales

La Tabla 10 resume la lista de componentes electrónicos que requirió el circuito final del Apéndice A.2 para las cuatro subestaciones, al adquirir los componentes en cantidades individuales, con un costo total de €68.327. Es importante mencionar que los componentes finales se eligieron con marcado CE.

Tabla 10. Presupuesto de materiales para el circuito de la estación de carga del Robobo

Nº Referencia Fabricante	Descripción	Coste Unitario (€)	Nº de Unidades	Coste Total (€)
RAC10-05SK/277	Fuente Conmutada AC/DC [69]	9.460	4	37.84
PMEG2020EH	Diodo Schottky [81]	0.438	4	1.752
SMTL6-RGB	LED RGB	0.010	8	0.08
PX0575/15/PC	Conector Macho IEC C14 [75]	2.140	1	2.140
0034.7109	Fusible Slow Blow [72]	0.475	1	0.475
APX321WG-7	Amplificador Operacional [76]	0.780	4	3.120
ZX80-B-5S	Conector Macho Micro USB [67]	0.654	4	2.616
885012207092	Capacitor 0805 10 nF [82]	0.080	4	0.320
WSL1206R1000FEA	Resistencia Shunt 0.1 Ω [83]	0.611	4	2.444
RR1220P-4991-D-M	Resistencia 4.99 k Ω [84]	0.186	4	0.744
RR1220P-272-D	Resistencia 2.7 k Ω [84]	0.087	4	0.348
ERJ-6ENF1100V	Resistencia 110 Ω [85]	0.089	12	1.068
CPF0805B4R99E1	Resistencia 4.99 Ω [86]	0.186	8	1.488
5201	Contacto con Muelle [87]	0.257	12	3.084
5223	Contacto Cilíndrico [88]	0.162	12	1.944
M20-9960646	Conector SIL Macho 6 [89]	0.248	8	1.984
M20-7820646	Conector SIL Hembra 6 [90]	0.851	8	6.808
Total (€):				68.327

Precio consultado el 15 de diciembre de 2018 de mouser.es

La Tabla 11 resume el detalle de los precios en caso de una producción en masa, con el precio unitario si se adquieren los componentes en cantidades de 1000. El precio se redujo en un 35.55% a €44.04. En cuanto a la estructura, el filamento PLA utilizado de [80] tiene un precio de €17.95 que permite la fabricación de más de una base. En el caso de que se utilice un rollo de filamento por base de recarga, se obtiene un total de €62.006 en materiales de fabricación.

Tabla 11. Presupuesto de materiales para el circuito eléctrico en cantidades de 1000 unidades por componente

Nº Referencia Fabricante	Descripción	Coste Unitario (€)	Nº de Unidades	Coste Total (€)
RAC10-05SK/277	Fuente Conmutada AC/DC	7.260	4	29.04
PMEG2020EH	Diodo Schottky	0.092	4	0.368
SMTL6-RGB	LED RGB	0.010	8	0.080
PX0575/15/PC	Conector Macho IEC C14	1.310	1	1.310
0034.7109	Fusible Slow Blow	0.274	1	0.274
APX321WG-7	Amplificador Operacional	0.134	4	0.536
ZX80-B-5S	Conector Macho Micro USB	0.654	4	2.616
885012207092	Capacitor 0805 100 pF	0.041	4	0.164
WSL1206R1000FEA	Resistencia Shunt 0.1 Ω	0.314	4	1.256
RR1220P-4991-D-M	Resistencia 4.99 k Ω	0.014	4	0.056
RR1220P-272-D	Resistencia 2.7 k Ω	0.014	4	0.056
ERJ-6ENF1100V	Resistencia 110 Ω	0.013	12	0.156
CPF0805B4R99E1	Resistencia 4.99 Ω	0.146	8	1.168
5201	Contacto con Muelle	0.122	12	1.464
5223	Contacto Cilíndrico	0.074	12	0.888
M20-9960646	Conector SIL Macho 6	0.115	8	0.92
M20-7820646	Conector SIL Hembra 6	0.461	8	3.688
			Total (€):	44.04

Precio consultado el 15 de diciembre de 2018 de mouser.es

Capítulo 6

6. Validación del prototipo de la base de recarga para el Robobo

En esta sección se muestran los resultados que se obtuvieron durante la validación del prototipo a lo largo del proceso de la implementación de la solución. Debido a la independencia de las subestaciones entre sí, la mayor parte de la verificación y validación se llevó a cabo para una subestación de recarga y no para la base de recarga completa. Se utilizaron los conceptos de estadística y las ecuaciones de la sección 2.8 para determinar el promedio y la desviación estándar de las mediciones, la propagación de incertidumbres y el porcentaje de error.

6.1. Pruebas de la lógica de funcionamiento del circuito en Protoboard

Previo al diseño y manufactura del circuito impreso se realizó la prueba de la lógica de funcionamiento en Protoboard. Se construyó el circuito de la Figura 67, con el material disponible en el laboratorio antes de realizar el pedido de los componentes del circuito final. Se utilizó una fuente de tensión HM8040 de la marca HAMEG a la entrada positiva del comparador para simular el comportamiento del Robobo; y se validó el funcionamiento del comparador no inversor sin histéresis o realimentación, construido a partir del amplificador operacional APX358. Un interruptor simuló el comportamiento del tercer contacto que tienen tanto la subestación como el adaptador del Robobo.

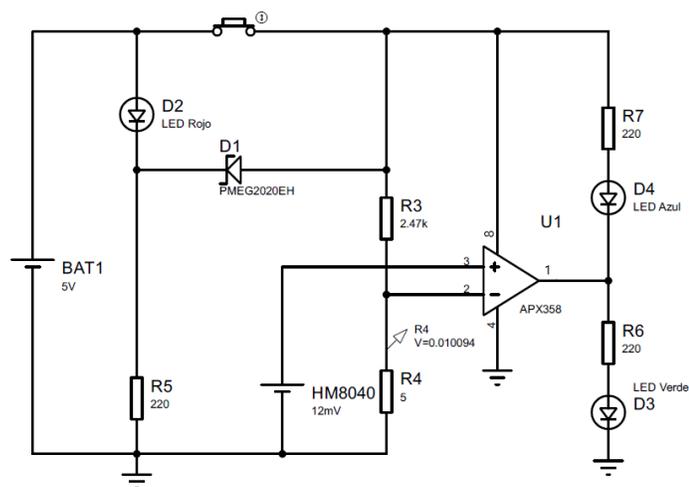


Figura 67. Circuito para verificar la lógica de funcionamiento del comparador no inversor sin histéresis

Elaborado con Proteus

Los resultados teóricos relacionados con las tensiones en el circuito de la Figura 67 se muestran en Tabla 12. Es importante notar que existen diferencias con respecto a los valores del circuito final de la Tabla 8, que se deben a las variaciones en los valores de las resistencias. Los datos de la Tabla 12 se calcularon con una resistencia shunt, encargada de medir la corriente del Robobo, de 0.16Ω en lugar de 0.1Ω ; por lo que el rango de conmutación disponible entre los dos estados de carga, a partir de la tensión que circula a través de R_S , es de $]0.32 ; 16[\text{ mV}$. Mediante el divisor de tensión de R_3 y R_4 se configuró un umbral de conmutación, V_{ref} , de 10.10 mV , que está dentro de ese rango.

Tabla 12. Valores teóricos utilizados para las pruebas en protoboard del comparador no inversor sin realimentación
($R_S = 0.16 \Omega$)

Color de LED	Salida del Comparador (V)	I_{R_S} (A)	V_{R_S} (mV)	R_{Robobo} (Ω)	V_{ref} (mV)
Verde	5	1	160	4.84	10.10
		0.1	16	49.84	
Azul	0	0.002	0.32	2499.84	
		0.000005	0.0008	999 999.84	

Se procedió a comprobar la iluminación del color de LED correspondiente para cada uno de los tres estados de carga y se midieron algunas de las tensiones más importantes. La fuente HM8040 que simula al Robobo tiene un máximo de 0.4 A , que no abarca todo el rango de corrientes de I_{R_S} de la Tabla 12, pero es suficiente para pasar de un estado de carga a otro. La R_{Robobo} representa a la resistencia equivalente que permite simular el consumo de corriente del Robobo, para su uso con la resistencia shunt R_S .

Para validar los dos estados de la Tabla 12, se obtuvieron los datos de la Figura 68 y la Figura 69 con el interruptor cerrado, que simula al Robobo conectado a la subestación. Los datos se utilizaron para verificar el cambio de estado del comparador cuando V^+ , que representa el efecto de la corriente del Robobo en R_S , está en los alrededores del umbral configurado en V^- de 10.10 mV . En la Figura 68 se puede apreciar que al variar V^+ de aproximadamente 0 mV a 50 mV , V_{OUT} presentó un cambio de estado de flanco positivo que alcanza los 2 V alrededor de $(16.0000 \pm$

0.0001) mV en V^+ . Por otro lado, en los datos de la Figura 69, en el flanco negativo de V_{out} se pasó de 2.1 V a 1.9 V con V^+ en (11.2000 ± 0.0001) mV.

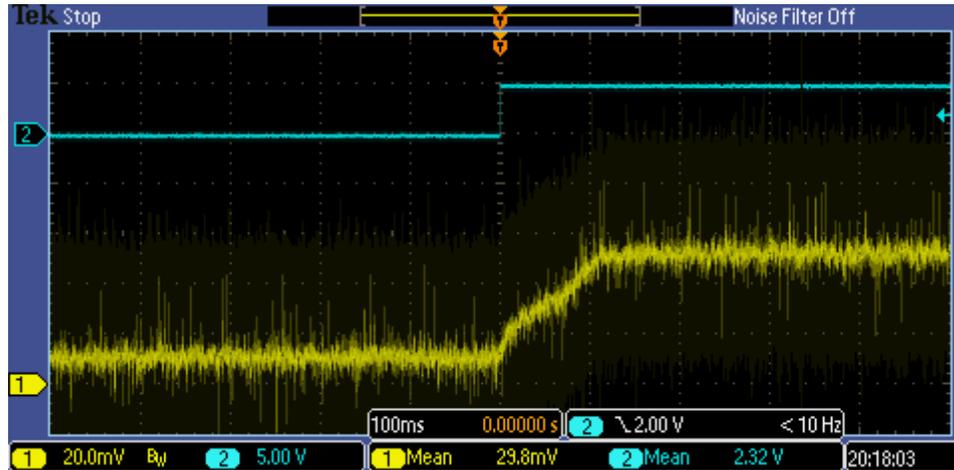


Figura 68. Flanco positivo a la salida del comparador no inversor
(1: APX358 V^+ , 2: APX358 V_{out})

Obtenido a partir de un osciloscopio modelo MSO2024B marca Tektronix

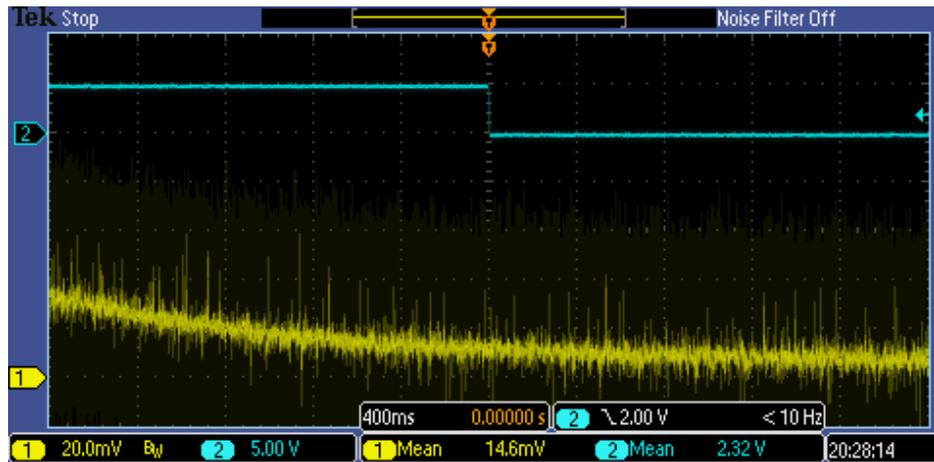


Figura 69. Flanco negativo a la salida del comparador no inversor
(1: APX358 V^+ , 2: APX358 V_{out})

Obtenido a partir de un osciloscopio modelo MSO2024B marca Tektronix

La diferencia en los valores mencionados de 16 mV y 11.2 mV con respecto al umbral de 10.10 mV se debió, entre otras cosas, a que el cambio de estado a la salida del amplificador operacional no es discreto, es decir, no pasa de 0 a 5 V en un momento exacto; sino que tiene el comportamiento de una rampa. En la Figura 68 y la Figura 69 el cambio de estado del comparador

se observó como un escalón debido a la resolución del eje X y a la rapidez del cambio. Los resultados obtenidos también se vieron influenciados por la histéresis propia del APX358 y por los valores tan pequeños de la señal en V^+ , que incluso hace que V^+ se aprecie con ruido en las imágenes.

Se procedió con la validación del comportamiento del LED rojo, D_2 . Como se observa en la Tabla 13, el LED solamente se encendió cuando el interruptor estaba abierto. Con el interruptor cerrado, que simula al Robobo acoplado a la subestación, el Diodo Shottky D_1 , se conecta en paralelo con el LED rojo. Se forzó entonces una tensión experimental de (0.272 ± 0.004) V en el LED, que no fue suficiente para iluminarlo.

Tabla 13. Mediciones para comprobación de funcionamiento de LED rojo
(Fuente HM8040 HAMEG para simular consumo de Robobo, Multímetro HIBOK-63C)

	Interruptor Abierto			Interruptor Cerrado		
	$(V_{R5} \pm 0.01)$ V	$(V_{D1} \pm 0.01)$ V	$(V_{D2} \pm 0.01)$ V	$(V_{R5} \pm 0.01)$ V	$(V_{D1} \pm 0.01)$ V	$(V_{D2} \pm 0.01)$ V
	2.98	-2.97	1.99	4.68	0.21	0.28
	2.98	-2.96	1.99	4.71	0.21	0.27
	2.98	-2.96	1.99	4.70	0.21	0.27
	2.98	-2.97	1.99	4.70	0.21	0.27
	2.98	-2.96	1.99	4.69	0.21	0.27
	2.98	-2.96	1.99	4.70	0.21	0.27
\bar{x}	2.98	-2.963	1.99	4.700	0.21	0.272
S_x	0	0.005	0	0.011	0	0.004

6.2. Pruebas de la lógica de funcionamiento del circuito en PCB

Se procedió a implementar la solución del circuito final de la Figura 47 para una sola subestación de recarga. Las pruebas en PCB incorporaron, con respecto a las descritas antes en protoboard, la resistencia shunt R_S que permite medir el consumo de corriente del Robobo a través de los cambios de tensión en V_{R_S} , además del comparador no inversor con su circuito de histéresis o realimentación.

Se utilizó el software Proteus para diseñar los PCB de la Figura 70 y generar los archivos Gerber, a partir de los esquemáticos del Apéndice A.2, para una sola subestación de recarga. Debido a la limitación de las herramientas del laboratorio, los PCB se diseñaron de una sola cara,

por lo que en el PCB principal de la Figura 70.a se tuvieron que añadir resistencias de 0Ω para poder implementar el circuito final. Las resistencias de 0Ω no se tomaron en cuenta dentro del presupuesto final de la sección 5.4 debido a que no son indispensables si se realiza el diseño de un PCB de dos caras.

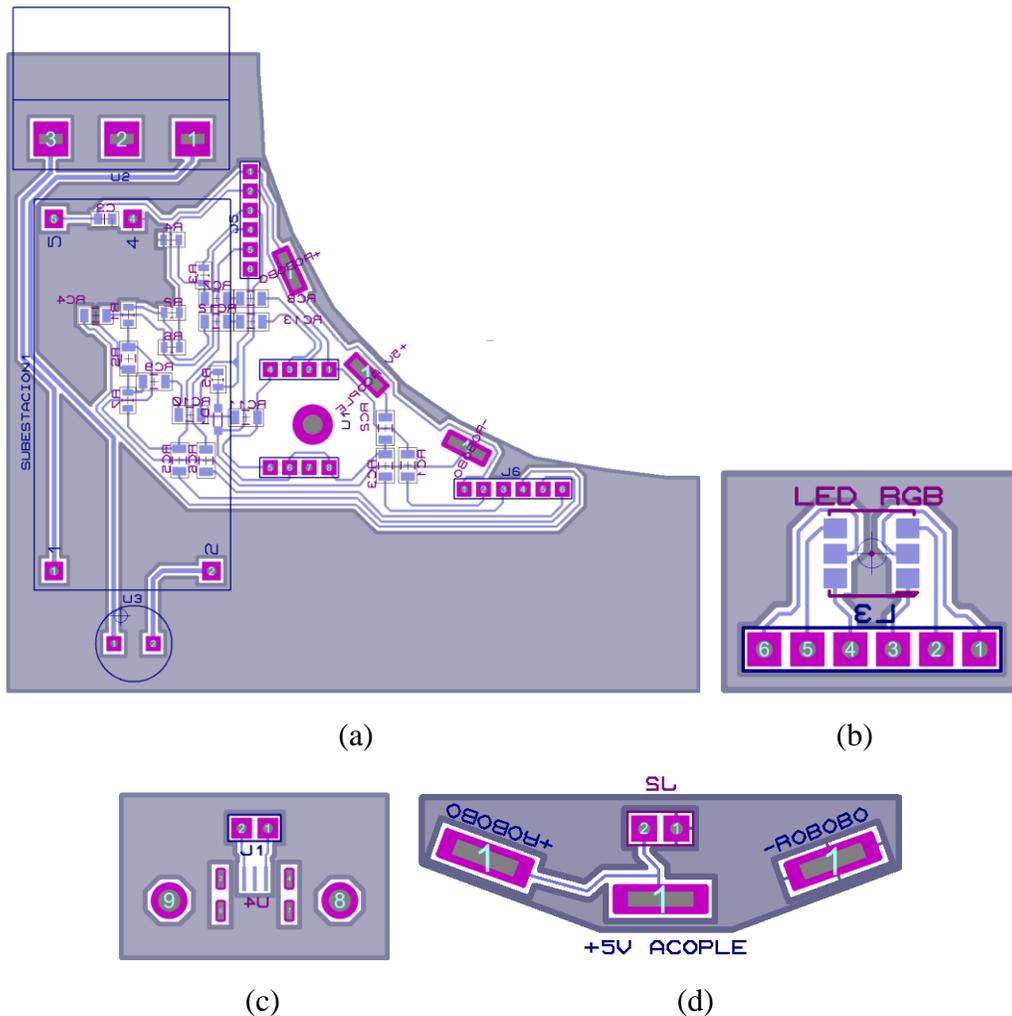


Figura 70. Diseño del PCB para una subestación de carga

(a: PCB Principal, b: PCB para LED RGB, c: PCB para micro USB, d: PCB para contactos del adaptador)

Elaborado mediante Proteus

Los PCB de Figura 70, y los esquemáticos del Apéndice A.2 a partir de los que se elaboraron, corresponden a la implementación del circuito final antes detallado de la Figura 47. Para poder implementarlo no solo se agregaron las resistencias de 0Ω , sino que también se creó el PCB de la Figura 70.b para ubicar los LED RGB de manera visible en cada subestación sin el uso de cables; la conexión al PCB principal se implementó con conectores SIL de seis pines. Se

soldaron conectores macho a 90° en el PCB de los LED y conectores hembra en el PCB principal, como se puede observar en la implementación de la Figura 71.



Figura 71. PCB principal y de los LED RGB para una subestación de carga

En el diseño y elección de componentes se procuró utilizar encapsulados de tamaño 0805 (o 2012 en el sistema métrico). Este tamaño se eligió debido a que ofrece dimensiones reducidas que a la vez permitieron manipular los componentes para colocarlos y soldarlos al PCB en un horno ProtoFlow S de LPKF Laser & Electronics del que se dispuso en el GII. Además, ya se disponía de algunos componentes en el laboratorio con el encapsulado 0805 debido a estas condiciones. En el diseño de los PCB se implementaron las recomendaciones de [91], se utilizó un grosor para las líneas de potencia de 25 thou (0.635 mm), para el resto de las líneas de 15 thou (0.381 mm) y un espaciamento entre ellas mayor o igual a 0.3 mm.

Posteriormente, el software de Circuit CAM permitió programar los procesos de manufactura del mecanizado CNC, y se utilizó junto con el software Board Master para generar las trayectorias de las herramientas del trazador o maquinador de circuitos impresos ProtoMat C30 s de LPKF Laser & Electronics. Finalmente, se colocaron los componentes de tecnología de montaje superficial o SMD (por sus siglas en inglés: Surface-Mount Technology) con pasta de soldadura sobre los PCB y se llevaron al horno ProtoFlow S antes mencionado para obtener los PCB de la Figura 71.

Por motivos de seguridad, antes de conectar el Robobo directamente por medio de su adaptador, se utilizaron resistencias externas conectadas al PCB para simular el consumo de corriente del Robobo en ambos estados de carga: “cargando” y “tiempo de carga concluido”. En la Figura 72.a se simuló el estado de la subestación “cargando” con una resistencia de 47 Ω , y en

la Figura 72.b se implementó una resistencia de 2.37 kΩ para el estado de “tiempo de carga concluido”, que concordaron con el color de LED verde y azul, respectivamente.

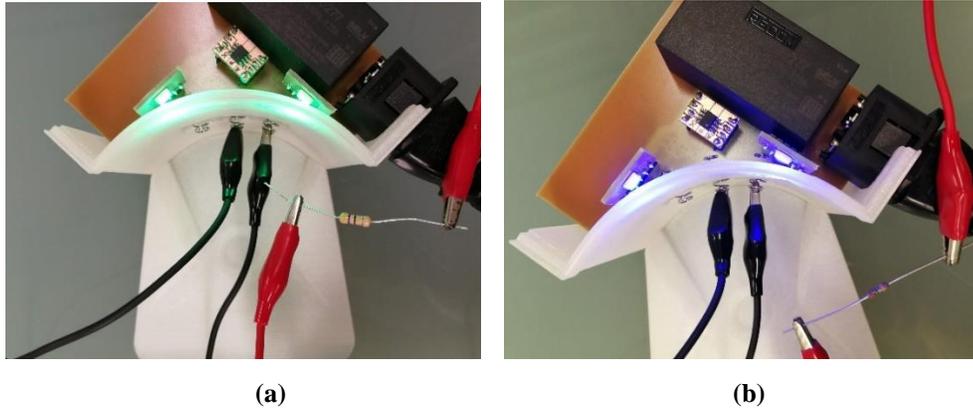


Figura 72. Subestación con resistencia para simular estado de carga en curso (a) y estado de tiempo de carga concluido (b)

Para el estado de la subestación “cargando”, que implica un rango de I_{R_s} de 100 a 1000 mA de acuerdo con la Tabla 8 de la sección 5.1 sobre la solución del sistema eléctrico, se conectó al PCB una carga de 47 Ω para un valor I_{R_s} teórico de 106.16 mA. Se obtuvieron los datos de la Tabla 14 en la que la I_{R_s} de (107 ± 1) mA se obtuvo como medición indirecta a partir de la V_{R_s} medida, y presentó un error de tan solo 0.79%. Además, V^+ está por encima de V^- , por lo que la salida del comparador es positiva y se logró encender los LED verdes, como se observó también en la Figura 72.

Tabla 14. Mediciones para simular estado de carga con consumo de 100 a 1000 mA (Resistencia de $(47 \pm 5\%) \Omega$ para simular Robobo, Multímetro HIBOK-63C)

	Entrada AC/DC (± 1 V)	Salida AC/DC (± 0.1 V)	($V_{R_s} \pm 0.1$) mV	($I_{R_s} \pm 1$) mA	($V^- \pm 0.1$) mV	($V^+ \pm 0.1$) V	($V_{OUT} \pm 0.01$) V
	228	5.3	10.7	107	8.1	15.4	4.50
	228	5.3	10.8	108	8.1	15.5	4.51
	227	5.3	10.7	107	8.1	15.4	4.49
	228	5.2	10.8	108	8.1	15.4	4.49
	228	5.6	10.7	107	8.1	15.5	4.49
	228	5.3	10.7	107	8.1	15.5	4.48
\bar{x}	227.833	5.333	10.733	107.333	8.100	15.450	4.493
S_x	0.408	0.137	0.0516	10.746	0	0.055	0.008

En el caso del estado de “tiempo de carga concluido” con I_{R_s} de 0.5 a 2 mA, se obtuvieron los datos de Tabla 15, en la que se esperaba una corriente I_{R_s} de 2.11 mA al incorporar la carga de 2.37 k Ω . El valor medio experimental está en (2 ± 1) mA, lo que representó un error de 5.21%. El incremento en el error se debió principalmente a que la tensión en la resistencia R_s es muy pequeña, y se necesitaría de un instrumento de medición con mayor precisión.

Tabla 15. Mediciones para simular estado de tiempo de carga concluido con consumo de 0.005 a 2 mA (Resistencia de $(2.37 \pm 1\%)$ k Ω para simular Robobo, Multímetro HIBOK-63C)

	Entrada AC/DC (\pm 1 V)	Salida AC/DC (\pm 0.01 V)	($V_{R_s} \pm 0.1$) mV	($I_{R_s} \pm 1$) mA	($V^- \pm 0.1$) mV	($V^+ \pm 0.1$) V	($V_{OUT} \pm$ 0.01) V
	228	5.03	0.4	4	8.2	0.2	0.278
	228	5.03	0.1	1	8.2	0.2	0.278
	228	5.03	0.1	1	8.2	0.2	0.278
	228	5.03	0.1	1	8.2	0.2	0.278
	228	5.03	0.2	2	8.2	0.2	0.278
	228	5.03	0.1	1	8.2	0.2	0.278
\bar{x}	228	5.03	0.167	1.667	8.2	0.2	0.278
S_x	0	0.00	0.121	1.464	0	0	0

Sin embargo, con los datos de la Tabla 15 se puede apreciar que con la resistencia de 2.37 k Ω se simuló correctamente el estado de “tiempo de carga concluido”, en el que $V^+ < V^-$ y la salida en el APX358 está en bajo; además, se encendieron los LED en color azul, como se mostró en la Figura 72.b. Por lo tanto, al tratarse de tensiones tan pequeñas el funcionamiento de este estado no se vio afectado por el incremento del error. Con los datos de ambas tablas se pudo observar también la reducción de tensión del AC/DC RAC10-05K277 y la referencia experimental de 8.1 y 8.2 mV para cada caso, con respecto a los 9.224 mV teóricos, para un error del 12.14% y 11.10%, respectivamente, debido, a los valores tan pequeños de tensión.

6.3. Pruebas del sistema de acople y la estructura

Una vez que se validó el funcionamiento del PCB, se procedió a realizar la conexión con el Robobo. Para ello se utilizaron los PCBs restantes de la Figura 70.c para el micro USB, y de la Figura 70.d para los contactos al aire. Se probaron dos tipos de contactos en el adaptador del Robobo; en la Figura 73 se tiene el adaptador con contactos cilíndricos, y en la Figura 74 con contactos de muelle tipo hoja.



Figura 73. Acople del Robobo con contactos cilíndricos



Figura 74. Acople del Robobo con contactos de muelle tipo hoja

El intercambio de contactos fue posible debido a que nuevamente se utilizó el diseño de acople entre los dos PCB mediante conectores macho SIL a 90° en el PCB del micro USB y conectores SIL hembra en el PCB de los contactos. Se realizaron pruebas manuales del acople del Robobo a la base de recarga con los dos tipos de contactos y se observó que los de muelle tipo hoja tienden a atascarse en los contactos de resorte de la subestación, por lo cual se prefirieron los cilíndricos de la Figura 73.

Además, al añadir el adaptador al Robobo e incorporarlo a la base energizada, se observó el cambio en el color de los LED como se muestra en la Figura 75, que pasa del estado “disponible” a “cargando”. Se realizaron acoples manuales como los de la Figura 76 y se tomaron los datos Tabla 16 con el Robobo colocado en línea recta con respecto a la subestación, y con un ángulo de desviación de 5° a una distancia de 20 mm entre el Robobo y la rampa. Se obtuvo un porcentaje de éxito del acople de 83.33% en ambos casos.

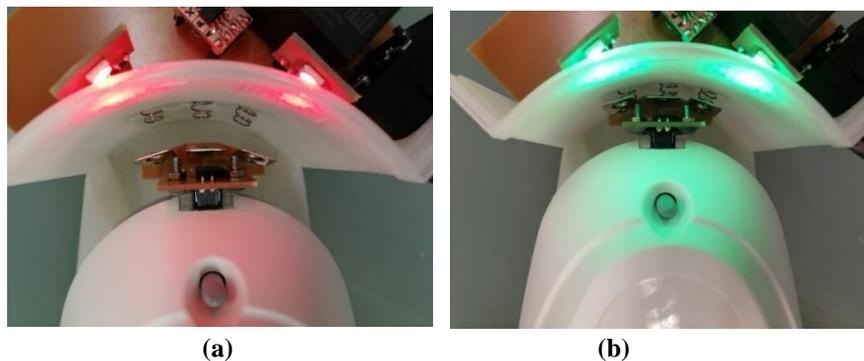


Figura 75. Subestación en estado disponible (a) y cargando (b)



Figura 76. Acople manual del Robobo a la subestación de carga

Tabla 16. Pruebas de acoples manuales entre el Robobo y la subestación de recarga

Ángulo de desviación del Robobo	Acople Efectivo						Porcentaje de Acoples Efectivos
	1	2	3	4	5	6	
0°	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	83.33%
5°	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	83.33%

Se realizó la misma prueba para programar el acople de la plataforma robótica móvil a la base de recarga. Se utilizó la aplicación de Android de Robobo para conectar el teléfono inteligente por WiFi a la computadora de la Figura 77. Se programó el movimiento hacia atrás mediante Scratch y se tomaron los datos de la Tabla 17. El Robobo se acopló correctamente en todas las ocasiones para el caso del Robobo en línea recta con la subestación; sin embargo, se obtuvo un porcentaje de éxito del 83.33% con la desviación de 5°.



Figura 77. Acople a la base de recarga con el movimiento del Robobo programado en Scratch

Tabla 17. Pruebas de acoples entre el Robobo y la subestación de recarga programados con Scratch

Ángulo de desviación del Robobo	Acople Exitoso						Porcentaje de Acoples Efectivos
	1	2	3	4	5	6	
0°	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	100%
5°	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	83.33%

Se observó que los conectores al aire elegidos afectaron el porcentaje de éxito del acople entre el Robobo y la base de recarga. Como se muestra en la Figura 78. Contactos para baterías utilizados como contactos al aire en el adaptador del Robobo (a) y en la base de recarga (b). Figura 78, los conectores no son para montaje en PCB además de que están diseñados para otros usos. Al acoplarse entre sí, se ejercieron esfuerzos en la soldadura que con el tiempo afectaron la conductividad entre el contacto y el PCB, y así el porcentaje de acoples exitosos. Otro factor que influyó en el porcentaje de éxito fue el diseño de las rampas, las paredes no eran tan altas como para limitar mejor el posicionamiento del Robobo cuando tiene algún grado de desviación.

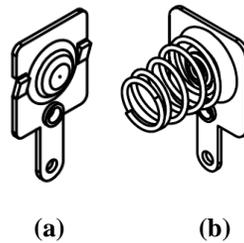


Figura 78. Contactos para baterías utilizados como contactos al aire en el adaptador del Robobo (a) y en la base de recarga (b). [88] [87]

Por otro lado, se mantuvo el Robobo conectado a la subestación energizada durante toda la noche en dos oportunidades, para comprobar el cambio al estado de “tiempo de carga concluido” debido a que el cargador LiPo del Roboo está configurado para aproximadamente 8 horas. Como se muestra en la Tabla 18, los LED cambiaron a color azul como en la Figura 79 en ambas ocasiones.

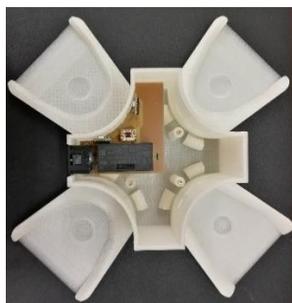
Tabla 18. Verificación del funcionamiento del estado de “tiempo de carga concluido”

Tiempo transcurrido (h)	LEDs en color azul		Porcentaje de Éxito (%)
	1	2	
> 8	Sí	Sí	100



Figura 79. Subestación en estado de tiempo de carga concluido

Finalmente, en la Figura 80.a se puede apreciar la base principal y las cuatro rampas que se manufacturaron mediante la técnica de FDM. Se atornilló a la base el PCB antes mencionado de la Figura 71, para una subestación de recarga. En Figura 80.b se añadió a la base su tapa, también manufacturada por FDM. El cilindro y el cubo para los AprilTag se construyeron a partir de piezas de LEGO disponibles en el laboratorio que se utilizaron para efectos demostrativos; esto permitió ahorrar de tiempo de manufactura y material, y se verificó que la estructura soportaba el peso de las piezas. En la Figura 80.c se presenta la estructura con un Robobo acoplado, por lo que los LED muestran el estado de carga en curso (color verde).



(a)



(b)



(c)

Figura 80. Estación de recarga para cuatro Robobos

(a: Base con circuito para una subestación; b: Base con subestación en estado Disponible; c: Base con subestación en estado de carga)

La estructura del prototipo ensamblado es de 317.6 mm de altura y una longitud máxima de 344.96 mm de rampa a rampa medidos en SolidWorks, que están dentro del rango de 450x450x350 mm. Se midió en físico la distancia rampa a rampa, como se muestra en la Tabla 19, y se obtuvo un máximo de (346.9±0.5) mm. No se realizó la medición de altura debido al uso de las piezas de LEGO que no corresponden con el material establecido para el prototipo de FDM. Se ensamblo el prototipo y se acopló y desacopló la tapa de la base en seis ocasiones sin problema alguno, para comprobar el acceso al circuito para su mantenimiento.

Tabla 19. Mediciones de la longitud de rampa a rampa de la estructura

	Longitud 1 (± 0.5 mm)	Longitud 2 (± 0.5 mm)
	345.5	347.0
	346.0	346.5
	346.0	347.0
	345.5	347.0
	345.0	347.0
	346.0	347.0
\bar{x}	345.7	346.9
S_x	0.4	0.2

La Tabla 20 resume los resultados de la validación del prototipo:

Tabla 20. Resultados de la verificación y validación del prototipo de la base de recarga

Requerimiento	Resultados
Generales	
El precio de fabricación se mantuvo en el rango de los €50-70.	En la Tabla 11 se observó que el precio de los componentes electrónicos necesarios es de aproximadamente €44.04 si se compran en lotes de 1000 unidades por componente, para una producción en masa. El filamento utilizado para la estructura es de €17.95, que permite fabricar más de una estación. En el peor de los casos, con un rollo de filamento para fabricar una sola base de recarga, el costo de fabricación es de un total de €61.99 que está dentro del presupuesto.
El prototipo cumplió con la normativa de Conformidad Europea (CE) que le corresponde.	Todos los componentes finales de la Tabla 10 contaron con el marcado CE ya sea en su hoja de datos o bien en su estructura.

Requerimiento	Resultados
El diseño de la base de recarga no implicó modificaciones de las características de la plataforma robótica móvil Robobo.	Se diseñó y validó la carga a través de un adaptador micro USB como el de la Figura 73 con los PCB de la Figura 70.c y la Figura 70.d que le permitió al Robobo acoplarse a la base de recarga. Además, en la sección 5.2 se propuso la solución al sistema de reconocimiento por medio de las cámaras que posee el teléfono inteligente; todo sin necesidad de alterar el diseño de la plataforma robótica móvil
Los robots pudieron aproximarse y acoplarse al dispositivo, ubicados en una superficie con pocas irregularidades.	El Robobo se aproximó y acopló con porcentaje de éxito de 83.33% con una desviación de 5° en las pruebas descritas en la sección 6.3.
Cuando una plataforma robótica se encontraba acoplada a la base de recarga, la base indicó, de manera visual al usuario, si el Robobo estaba cargando o si había concluido su ciclo de carga.	Los LED RGB se encendieron en color verde durante el proceso de carga como se indicó en la Figura 75.b, y en azul una vez que el proceso concluyó, como en la Figura 79.
El sistema de detección se diseñó para un rango de cobertura de 360°	El diseño cilíndrico de la Figura 62 permitió que se pudiera observar el prisma de AprilTag a través del teléfono inteligente colocado en el Robobo, al ubicarlo en seis posiciones distintas alrededor de la base de recarga a una distancia de dos metros.
Mecánicos	
Las dimensiones máximas no sobrepasaron los 350 mm de alto, 450 mm de largo y 450 mm de ancho.	Las dimensiones finales del prototipo en SolidWorks son de: 317.6 mm de alto y 344.96 mm de largo y ancho. La mayor medida de la estructura manufacturada a través de la técnica FDM fue de 346.9 mm de rampa a rampa, como se indicó en la Tabla 14.
La estructura se diseñó de tal forma que el usuario pudo armar y desarmar el prototipo para el acceso y mantenimiento del circuito eléctrico.	El prototipo cuenta con: una base, cuatro rampas, una tapa para la base, un cilindro y un prisma para los AprilTag; definidos por planos del Apéndice A.3. Además, en las pruebas realizadas en la sección 6.3. fue posible acceder al circuito sin problemas al retirar la tapa de la base y los tornillos.
Eléctricos	
La base de recarga se conectó al sistema eléctrico con una tensión de 110 a 240 V.	El convertidor conmutado AC/DC funciona en un rango que va de 85 a 305 VAC, con una salida de 5 V, lo cual se comprobó en los datos de la Tabla 14 y la Tabla 15.
Se suministró una corriente homogénea a cada Robobo con un valor entre 1 a 1.5 A durante el proceso de carga, con 5 V.	El eligió un AC/DC para cada subestación que puede suministrar hasta 2 A cada uno.

Requerimiento	Resultados
<p>El diseño e implementación del circuito electrónico tomó en cuenta la posibilidad de una futura comercialización de cargadores individuales, por lo que pudo subdividirse en cuatro partes o subestaciones independientes.</p>	<p>El RAC10-05SK/277 cuenta con una corriente de salida de hasta 2 A para una tensión de salida de 5 V, con una eficiencia del 82%. Se validó el circuito diseñado para una subestación de recarga en la sección 6.2 y 6.3y funcionó adecuadamente.</p>
<p>La solución planteada contó con protecciones del sistema eléctrico en caso de cortocircuito.</p>	<p>Se eligió un convertidor AC/DC con con protección de cortocircuito (SCP) con reinicio automático o modo hiccup, y protección tanto de sobrecarga (OLP) como de sobre tensión (OVP) de 150 a 195% con modo hiccup. Se implementó un fusible adicional, de acción lenta, que soporta de manera segura (es decir, sin explosión o ruptura) una corriente de hasta 250 mA a una tensión nominal de 250 V.</p>
<p>El circuito eléctrico incluyó LED rojos para indicar cuando una subestación de carga se encontraba encendida pero desocupada.</p>	<p>El comportamiento de los LED rojos se validó en protoboard en los datos de la Tabla 13 y posteriormente en PCB a lo largo de la sección 6.2 y 6.3.</p>

Capítulo 7

7. Conclusiones

7.1. Conclusiones

- Se identificaron los requerimientos generales, eléctricos y mecánicos necesarios para la recarga autónoma e independiente de una plataforma robótica móvil y se analizaron posibles soluciones para satisfacer esas características.
- Se diseñó un prototipo electromecánico para el acople y recarga simultánea de hasta cuatro plataformas robóticas Robobo, descrito por los planos eléctricos del Apéndice A.2 acorde con la normativa de Conformidad Europea CE para productos de media tensión, y los planos mecánicos del Apéndice A.3 que contemplan la implementación futura de un sistema de reconocimiento con etiquetas de tipo AprilTag.
- Se desarrolló e implementó un plan de validación del prototipo, con un porcentaje de acoples mecánicos exitosos de un 83.33% para desviaciones entre el Robobo y la base de recarga en un rango de $\pm 5^\circ$, y del funcionamiento del ciclo de carga del 100%.

7.2. Recomendaciones

La solución propuesta en este documento es el primer prototipo que se desarrolló para una estación de recarga del Robobo, por lo que presentó algunas condiciones que deben ser modificadas con el fin de obtener una solución óptima, especialmente si se desea comercializar un producto a partir de ella. Se observó que cinco LED frontales del Robobo encienden en color azul durante la carga; por motivos estéticos se recomienda intercambiar los colores de los estados verde y azul de la estación de recarga para que concuerden con los del robot.

El estado de “tiempo de carga concluido” con los LED en color azul se estableció con respecto al tiempo de recarga configurado en el cargador LTC1733 interno del Robobo, que se encuentra configurado para un aproximado de ocho horas. Se recomienda cambiar el diseño de la base para reducir ese tiempo. Se sabe que una vez que el LTC1733 alcanzó el estado C/10 la batería está cerca de su capacidad de almacenamiento final. Se pueden reajustar los valores de las resistencias utilizadas en el comparador no inversor con histéresis, de acuerdo con las ecuaciones (23) y (24) para aumentar el valor de conmutación a un valor por encima del que implica el estado C/10.

Además, es posible reducir el tamaño del PCB si se utiliza un circuito impreso de dos caras y un proceso más automatizado para soldar los componentes SMT. Se recomienda reubicar los componentes en ambas caras, eliminar el uso de las resistencias de $0\ \Omega$ que fueron necesarias para pasar una pista sobre otra y utilizar encapsulados más pequeños. Al reubicar los componentes se deben de mantener los que manejan las tensiones más pequeñas cercanos entre sí para evitar ruidos e interferencias. Al reducir el tamaño del PCB es posible reducir el de la estructura de la base de recarga.

Por otro lado, se propuso la transferencia de energía mediante contactos al aire. Se utilizaron contactos de baterías para realizar las pruebas de validación, mas se deben de sustituir por algún tipo de contacto que no genere tanto esfuerzo sobre el PCB y la soldadura.

En cuanto al proceso de manufactura de la estructura, se utilizó la técnica de modelado por deposición fundida o FDM, descrita en la sección 2.7, por tratarse de un producto que no se va a comercializar. Esta misma técnica se utilizó a lo largo del prototipado del Robobo. Sin embargo, eventualmente las piezas del Robobo se manufacturaron por medio de inyección de plástico para

su introducción al mercado. Como en el caso del Robobo, no se recomienda utilizar la técnica de FDM para manufacturar a gran escala la base de recarga debido a las desventajas que representa en cuanto a calidad superficial y tiempo de manufactura.

Finalmente, si se propone el diseño y manufactura de una nueva versión del Robobo, se recomienda configurar el cargador interno LTC1733 para su corriente máxima en el modo de corriente constante de 1.5 A. La base de recarga tomó en cuenta esta condición por lo que al configurar el Robobo para su máximo de corriente se reduce el tiempo de recarga.

Bibliografía

- [1] MINT, «¿Qué es Robobo?,» [En línea]. Available: <https://theroboboproject.com/que-es-robobo/>. [Último acceso: 03 julio 2018].
- [2] MINT, «Manual de Usuario,» España.
- [3] MINT, «Tienda,» [En línea]. Available: <https://theroboboproject.com/que-es-robobo/>. [Último acceso: 03 julio 2018].
- [4] J. Vélez, A. Belén, Á. Sánchez y J. Sánchez, *Visión por Computador*, Madrid: Dykinson, 2003.
- [5] J. Gao, *Digital Analysis of Remotely Sensed Imagery*, McGraw-Hill, 2009.
- [6] H. Rouette, *Encyclopedia of Textile Finishing*, Woodhead Publishing, 2001.
- [7] G. Schubert, *Treatise on Geophysics*, 2 ed., vol. 11, Elsevier, 2015.
- [8] H. Aghajan y A. Cavallo, *Multi-Camera Networks - Principles and Applications*, Massachusetts: Elsevier, 2009.
- [9] Unión Europea, «Marcado CE,» 16 julio 2018. [En línea]. Available: https://europa.eu/youreurope/business/product/ce-mark/index_es.htm. [Último acceso: 17 setiembre 2018].
- [10] Parlamento Europeo, «Directiva 2009/48/CE del Parlamento Europeo del Parlamento Europeo y del Consejo sobre la seguridad de los juguete,» 2009.
- [11] Parlamento Europeo , «Directiva 2014/35/UE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de comercialización de material eléctrico destinado a utilizarse con determinados límites de tensión,» 2014.

- [12] J. Erjavec, Hybrid, Electric and Fuel-Cell Vehicles, 2 ed., Cengage Learning, 2013.
- [13] M. Geier, How to Diagnose and Fix Everything Electronic, 2 ed., McGraw-Hill Education, 2016.
- [14] C. M. Cluter Cleveland, Dictionary of Energy, Expandida ed., Elsevier, 2009.
- [15] D. Warne, Newnes Electrical Power Engineer's Handbook, 2 ed., Elsevier, 2005.
- [16] A. Pesaran, Lithium Ion Batteries in Electric Drive Vehicles, SAE International, 2016.
- [17] Linear Technology Corporation, «LTC1733 Monolithic Linear Lithium-Ion Battery Charger with Thermal Regulation.,» USA.
- [18] D. Bhattacharya y R. Sharma, Solid State Electronic Devices, 2 ed., India. : Oxford University Press, 2013.
- [19] P. Scherz y S. Monk, Practical Electronics for Inventors, 2 ed., McGraw Hill, 2016.
- [20] G. MacAngus-Gerrard, Offshore Electrical Engineering Manual, 2 ed., Elsevier, 2018.
- [21] A. Bindra, «Digi-Key,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2016/may/minimizing-noise-generated-by-switched-mode-power-supplies>. [Último acceso: octubre 2018].
- [22] N. Chiyo, N. Sendai y K. Chiyo, «Coil unit for wirelessly transmitting or receiving power to charge smartphone and electric vehicle, has magnetic unit constituted by magnetic bodies being spaced from each other, where bodies overlap winding portion of coil and opening». China Patente US2018261383-A1, 13 setiembre 2018.
- [23] Wärtsilä, «Wireless Charging,» setiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/power-systems/shore-connections/wireless-charging>. [Último acceso: 2018 octubre].
- [24] J. Wang, M. Hu, C. Cai, Z. Lin, L. Li y Z. Fang, «Optimization design of wireless charging system for autonomous robots based on magnetic resonance coupling,» Hubei, China, 2018.

- [25] K. Alvarez, R. Lagos y M. Aizpun, «Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM),» *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 24, n° Especial, pp. 7-24, 2016.
- [26] La Factoria 3D, «MENDEL MAX XL V5 (KIT PREMIUM),» [En línea]. Available: <https://www.lafactoria3d.es/tienda/mendel-max-xl-pro>. [Último acceso: febrero 2019].
- [27] O. Es-Said, J. Foyos, R. Noorani, M. Mendelson, R. Marloth y B. Pregger, «Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples,» *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 15, n° 1, pp. 107-122, 2007.
- [28] C. Bellehumeur, L. Li, Q. Sun y P. Gu, «Modeling of Bond Formation between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process,» *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 6, n° 2, pp. 170-178, 2004.
- [29] L. Li, Q. Sun, C. Bellehumeur y P. Gu, «Investigation of bond formation in FDM process,» *Solid Freeform Fabrication Symp.*, n° 403, pp. 400-40, 2001.
- [30] L. Li, Q. Sun, C. Bellehumeur y P. Gu, «Composite Modeling and Analysis of FDM Prototypes for Design and Fabrication of Functionally Graded Parts,» *Solid Freeform Fabrication Symp*, pp. 187-194, 2001.
- [31] L. Rodriguez, J. Thomas y J. Renaud, «Mechanical Behavior of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Fused Deposition Materials,» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 7, n° 3, pp. 148-158, 1995.
- [32] D. Gutiérrez, N. Murillo y D. Venegas, «Manual de Laboratorio: Laboratorio de Física General I,» 2013.
- [33] Real Academia Española, «Robot».
- [34] H. Moravec, «Robot,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/technology/robot-technology>. [Último acceso: febrero 2019].
- [35] A. Andrew, *Behavior-Based Robotics*, Massachusetts: Cambridge, 1998.

- [36] GII, «DREAM: Deferred Restructuring of Experience in Autonomous Machines.,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.gii.udc.es/proyectos/detalle/342>. [Último acceso: febrero 2019].
- [37] GII, «Robótica y Cognición,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.gii.udc.es/investigacion/detalle/5>. [Último acceso: enero 2019].
- [38] A. Barrientos, Fundamentos de robótica, 2 ed., McGraw-Hill, 2007.
- [39] R. Aracil, C. Balaguer y M. Armanda, «Robots de servicio,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 5, nº 2, pp. 6-13, 2008.
- [40] E. Ruiz, Los robots en la educación, Ediciones Díaz de Santos, 2007.
- [41] L. Fernández y A. Muñoz, «Investigación sobre los Requisitos del Movimiento Colectivo Coordinado en un Sistema Multi-agente,» *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 2007.
- [42] Sony, «ERS-7M2 Entertainment Robot AIBO User's Guide,» 2004. [En línea]. Available: <http://www.aiai.ed.ac.uk/project/aibo/documents/ERS-7M2/AIBO-Basic-Manual.pdf>. [Último acceso: setiembre 2018].
- [43] Sony, «Aibo ERS-1000,» 2018. [En línea]. Available: <https://direct.sony.com/aibo-ERS1000W/>. [Último acceso: setiembre 2018].
- [44] GCtronic, «Wheelphone flyer,» [En línea]. Available: <http://projects.gctronic.com/wheelphone/Wheelphone-flyer-A4.pdf>. [Último acceso: setiembre 2018].
- [45] Anki, «Shop now. Bring home Cozmo,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.anki.com/en-us/cozmo/shop-now>. [Último acceso: setiembre 2018].
- [46] GCtronic, «Elisa-3,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.gctronic.com/doc/index.php/Elisa-3>. [Último acceso: enero 2019].

- [47] WowWee, «CHiP robot dog + accessories,» 2016. [En línea]. Available: <http://store.wowwee.com/chip-robot-dog-accessories.html>. [Último acceso: setiembre 2018].
- [48] iRobot, «iRobot Roomba 980,» 2018. [En línea]. Available: https://tienda.irobot.es/roomba-aspirador-robot-aspirador-roomba-980/R980040.html?cgid=es&lang=es_ES. [Último acceso: setiembre 2018].
- [49] GCtronic, «Getting started,» febrero 2018. [En línea]. Available: http://www.gctronic.com/doc/index.php?title=Getting_started#Charging. [Último acceso: setiembre 2018].
- [50] GCtronic, «Wheelphone-images,» febrero 2018. [En línea]. Available: <http://www.gctronic.com/doc/index.php?title=Wheelphone-images>. [Último acceso: setiembre 2018].
- [51] Anki, «Cozmo Tech,» febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.anki.com/en-us/cozmo/cozmo-tech>. [Último acceso: setiembre 2018].
- [52] ebay, «Anki Cozmo Replacement Charger Base Only 300-00030 - G30,» [En línea]. Available: <https://www.ebay.com/p/Anki-Cozmo-Replacement-Charger-Base-Only-300-00030-G30/20019231561?iid=352593695112>. [Último acceso: setiembre 2018].
- [53] WowWee, «CHiP Manual de Usuario,» 2015. [En línea]. Available: <http://cdn.wowwee.com.s3.amazonaws.com/files/1477337365a8abae3fc5452b0da1a2aae114dded3d.pdf>. [Último acceso: setiembre 2018].
- [54] Sony, «Entertainment Robot ERS-1000 Help Guide,» 2018. [En línea]. Available: <https://helpguide.sony.net/aibo/ers1000/v1/en/print.pdf>. [Último acceso: setiembre 2018].
- [55] iRobot, «Integrated Home Base,» 2016. [En línea]. Available: <https://store.irobot.com/default/parts-and-accessories/roomba-accessories/900-series/integrated-home-base/4452369.html>. [Último acceso: setiembre 2018].

- [56] ebay, «Wowwee Chip Cargador De Perro Robot,» 2018. [En línea]. Available: https://www.ebay.com/itm/Wowwee-CHiP-Robot-Dog-Charger-Charger-Power-Supply-only-/302614789738?_ul=BO. [Último acceso: setiembre 2018].
- [57] E. Olson, «AprilTag: A robust flexible visual fiducial system,» University of Michigan, 2011. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5979561>. [Último acceso: 10 setiembre 2018].
- [58] F. Golnaraghi y B. Kuo, *Automatic Control Systems*, 10 ed., McGraw-Hill Education, 2017.
- [59] K. Yang y B. El-Haik, *Design for Six Sigma: A Roadmap for Product Development*, 2 ed., McGraw-Hill, 2009.
- [60] J. Parker, *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*, John Wiley & Sons, Incorporated, 2010.
- [61] N. Faroughi, *Digital Logic Design and Computer Organization: With Computer Architecture for Security*, McGraw-Hill Education, 2015.
- [62] J. Wang y E. Olson, «AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection,» Michigan, Estados Unidos, 2016.
- [63] H. Kato y M. Billinghurst, «Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system,» de *Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR'99)*, San Francisco, USA, 1999.
- [64] M. Fiala, «ARTag, a fiducial marker system using digital techniques,» de *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, San Diego, USA, 2005.
- [65] B. Russell, A. Torralba, K. Murphy y W. T. Freeman, «LabelMe: A Database and Web-Based Tool for Image Annotation,» *International Journal of Computer Vision*, vol. 7, n° 1-3, 2008.

- [66] Denso Wave Incorporated, «Códigos QR | QR Codes,» [En línea]. Available: <http://www.codigos-qr.com/>. [Último acceso: diciembre 2018].
- [67] Hirose Electric CO, «Micro-USB connectors meeting USB 2.0 Standard,» 2016.
- [68] Amazon, «Qi Wireless Adapter– Wireless Charging Receiver- Qi Receiver Adapter Samsung,» [En línea]. Available: https://www.amazon.com/Receiver-Type-Samsung-Galaxy-Receiver/dp/B0785ST823/ref=sr_1_3?ie=UTF8&qid=1538057412&sr=8-3&keywords=wireless+charger+receiver&dpID=51d5IR1lrsL&preST=_SY300_QL70_&dpSrc=srch. [Último acceso: setiembre 2018].
- [69] RECOM, «AC/DC Converter RAC10-K/277,» 2018.
- [70] Littelfuse, «Fuse Characteristics, Terms and Consideration Factors,» 2014.
- [71] Schurter, «Find the Right Fuse. Criteria for Correct Fuse Selection».
- [72] Schurter Electronic Components, «MSTU 250,» 2017.
- [73] S. Ndiritu, «EPCI European Passive Components Institute,» 2017. [En línea]. Available: <https://passive-components.eu/4-types-of-capacitor-for-filtering-applications-in-switch-mode-power-supply-systems/>. [Último acceso: noviembre 2018].
- [74] RECOM, «RAC10-xxS/277 AC/DC-Converter,» 2017.
- [75] Bulgin, «IEC Connectors».
- [76] Diodes Incorporated, «APX321/APX358/APX324,» 2009.
- [77] J. Drake, «Tema III: El amplificador de instrumentación,» Cantabria, 2005.
- [78] S. Olavarría, «Amplificador Operacional,» Valparaíso, Chile. , 2003.
- [79] M. Parada, «Desarrollo de librerías de control para aplicaciones de coordinación en robótica colectiva,» 2018.

- [80] Smart materials 3D, «SMARTFIL PLA Natural,» [En línea]. Available: <https://www.smartmaterials3d.com/es/smartfil-pla/67-smartfil-pla-natural.html>. [Último acceso: febrero 2019].
- [81] Philips, «PMEG2020EH; PMEG2020EJ,» 2005. [En línea]. [Último acceso: octubre 2018].
- [82] Würth Elektronik, «WCAP-CSGP Ceramic Capacitors 885012207092,» Waldenburg, 2014.
- [83] Vishay, «WSL...9 Jumper,» 2017.
- [84] Mouser Electronics, «Metal thin film chip resistors (precision)».
- [85] Panasonic, «Precision Thick Film Chip Resistor,» 2018.
- [86] TE Connectivity, «Thin Film Precision Resistors,» 2016.
- [87] Keystone Electronics, «AA Female Battery Contact 5201,» 2015.
- [88] Keystone Electronics, «AA Male Battery Contact 5223,» 2007.
- [89] Harwin, «2.54 mm Pitch Sil Horizontal PC Tail Pin Header Assembly M20-996XXXX,» 2017.
- [90] Harwin, «2.54 mm Pitch Sil Vertical PC Tail Socket Assembly M20-782XXXX,» 2017.
- [91] A. Wright, «Top 10 Printed Circuit Board Design Checks,» Massachusetts.
- [92] Comisión Europea, «Harmonised Standards,» 2018. [En línea]. Available: <http://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/>. [Último acceso: 17 setiembre 2018].
- [93] Comisión Europea, «Nando (New Approach Notified and Designated Organisations) Information System,» 2018. [En línea]. Available: <http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/>. [Último acceso: 17 setiembre 2018].
- [94] MINT, «Especificaciones,» España.

- [95] J. Zhou, J. Wan y Y. Ma, «Magnetically Coupled Resonance Wireless Charging Technology Principles and Transfer Mechanisms,» Nanchang, China, 2017.
- [96] A. Holm, «HM8040 - Power supply,» [En línea]. Available: <http://www.sm5cbw.se/hameg/hm80/hm8040.htm>. [Último acceso: 2019 febrero].
- [97] M. Nixon y A. Aguado, Feature Extraction & Image Processing for Computer Vision, Elsevier, 2013.
- [98] GCtronic, «Shop,» [En línea]. Available: <http://www.gctronic.com/shop.php#Elisa-3%20robot>. [Último acceso: setiembre 2018].
- [99] LEGO, «LEGO MINDSTORMS EV3,» 2018. [En línea]. Available: <https://shop.lego.com/en-US/product/LEGO-MINDSTORMS-EV3-31313>. [Último acceso: setiembre 2018].
- [100] Mobsya Association, «Thymio,» 2018, [En línea]. Available: <https://www.mobsya.org/en/produit/thymio/>. [Último acceso: setiembre 2018].

Apéndices

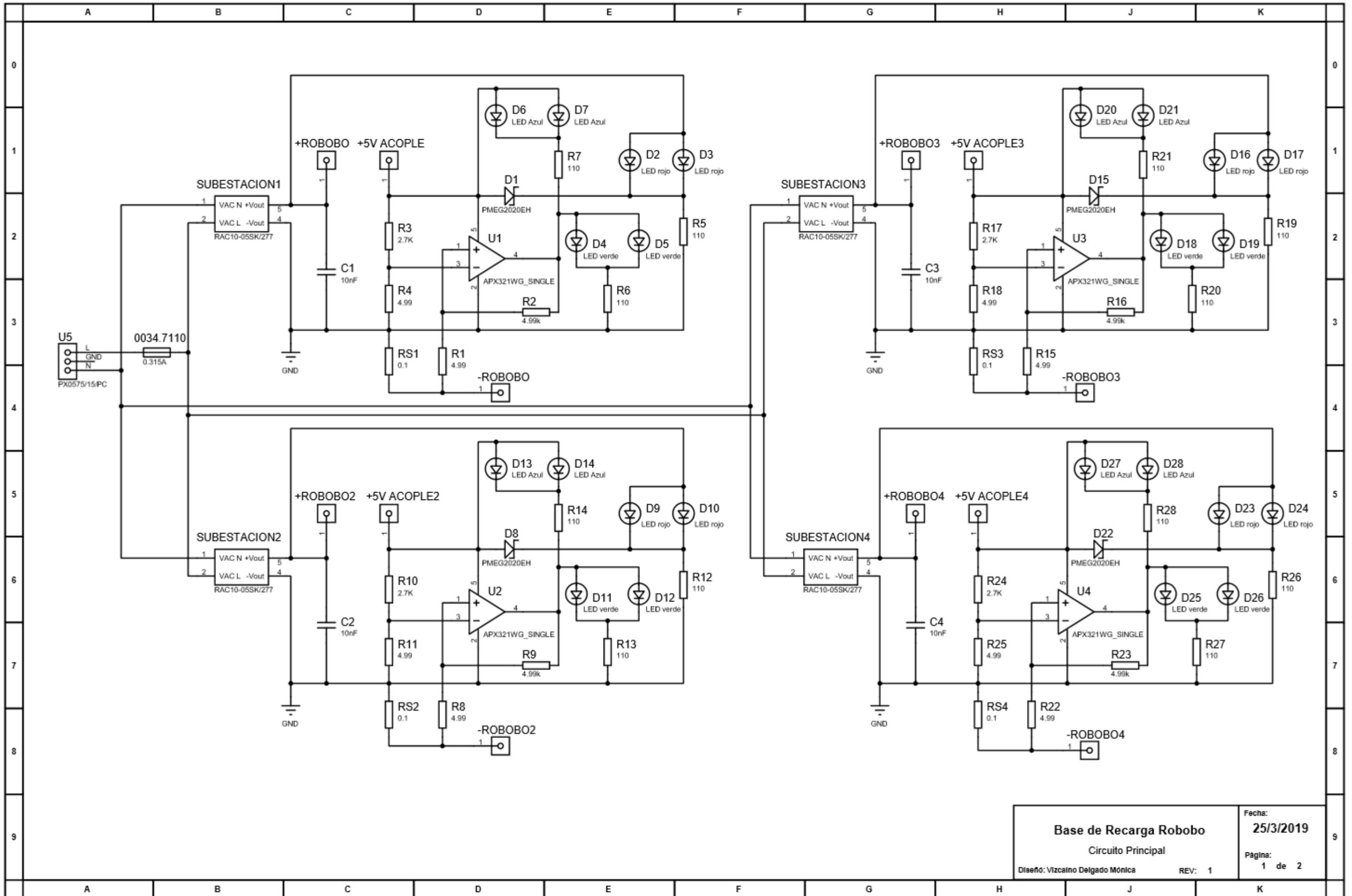
Apéndice A.1

Hoja de Información

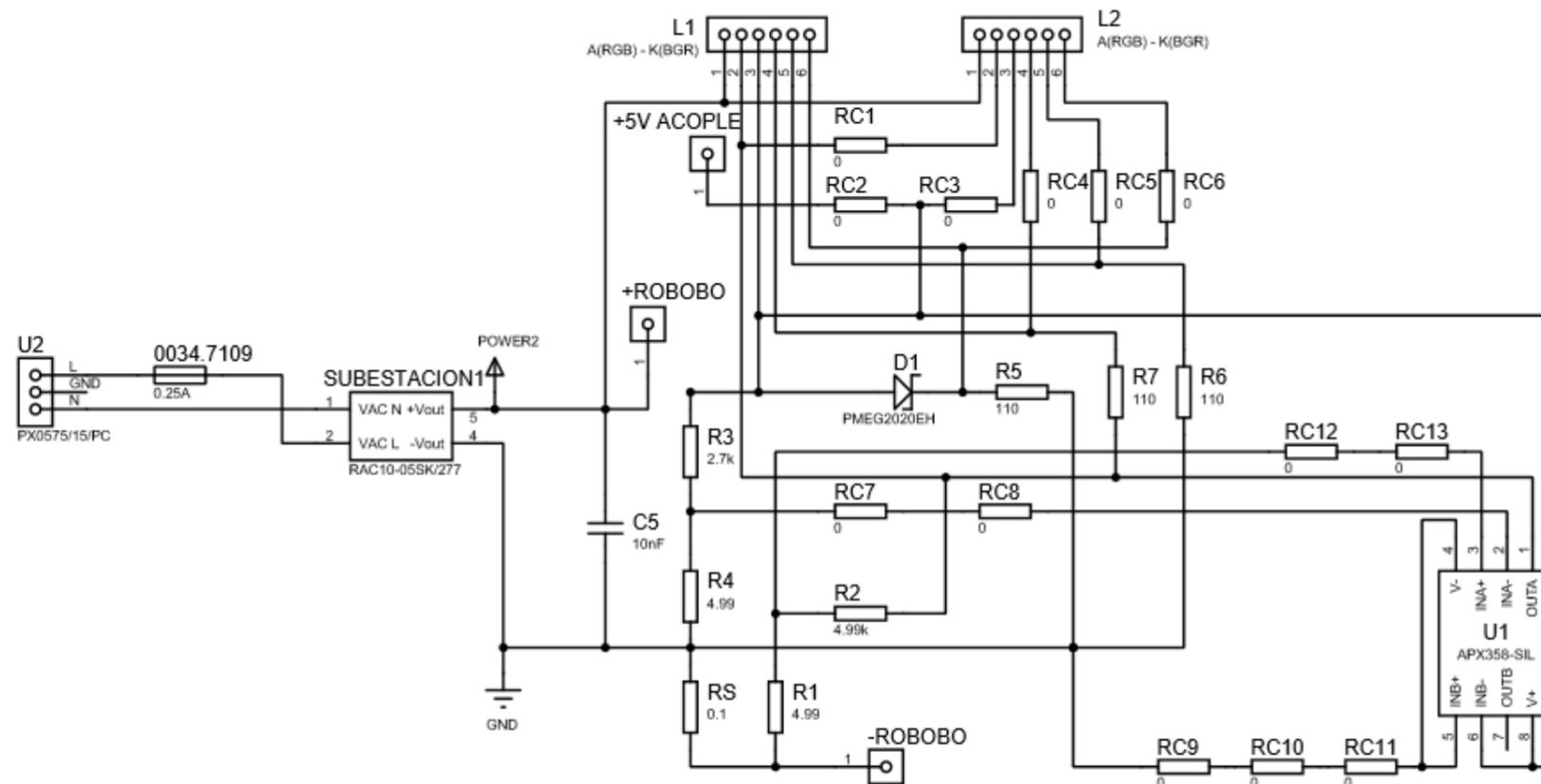
- **Información del estudiante:**
 - Nombre: Mónica Vizcaíno Delgado
 - Cédula: 1-1587-0480
 - Carné ITCR: 2013012249
 - Dirección de residencia: Desamparados, San José
 - Teléfonos: 7056-6502/ 2259-9114
 - Correo electrónico: monivii94@gmail.com
- **Información del Proyecto:**
 - Nombre del proyecto: “Diseño de una base de recarga para la plataforma robótica móvil”
 - Profesor asesor: Ing. Juan Diego Zamora
 - Nombre de la institución: Universidade da Coruña
 - Departamento: Grupo Integrado de Ingeniería (GII).
 - Actividad principal: El GII es un grupo interdisciplinario de investigación aplicada en ingeniería orientado a la transferencia de conocimiento y a la generación de nuevos productos en el entorno industrial. Entre sus líneas de investigación destacan la Dinámica de Fluidos, Robótica, Tecnologías Avanzadas de Sensorización y Medida, Inteligencia Computacional, Ingeniería de Organización Industrial y Transporte, entre otras
 - Dirección: Ferrol, España.
 - Teléfono: +34 981 337400 (ext 3634)
- **Información del asesor en la institución:**
 - Asesor industrial: Francisco Bellas Bouza
 - Puesto que ocupa: Profesor Titular del Departamento de Computación
 - Departamento: Grupo Integrado de Ingeniería
 - Profesión: Ingeniero en Informática
 - Grado académico: Doctor

- Teléfono: +34 881 013886
- Correo electrónico: francisco.bellas@udc.es

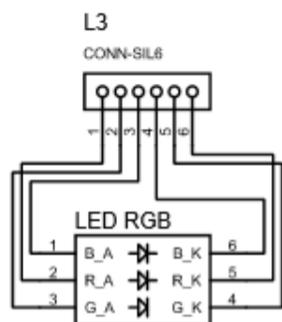
Apéndice A.2
Planos Eléctricos



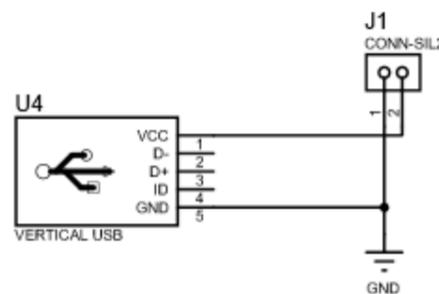
Base de Recarga Robobo
 Circuito Principal
 Fecha: 25/3/2019
 Diseñó: Vizcaino Delgado Mónica
 REV: 1
 Página: 1 de 2



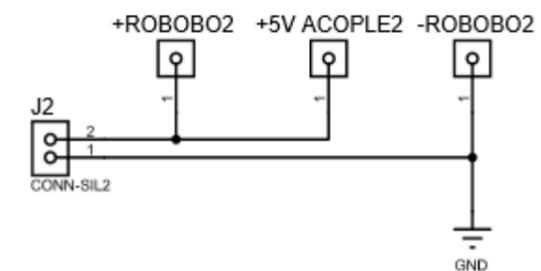
Circuito Principal Subestación



Circuito LED RGB
x2

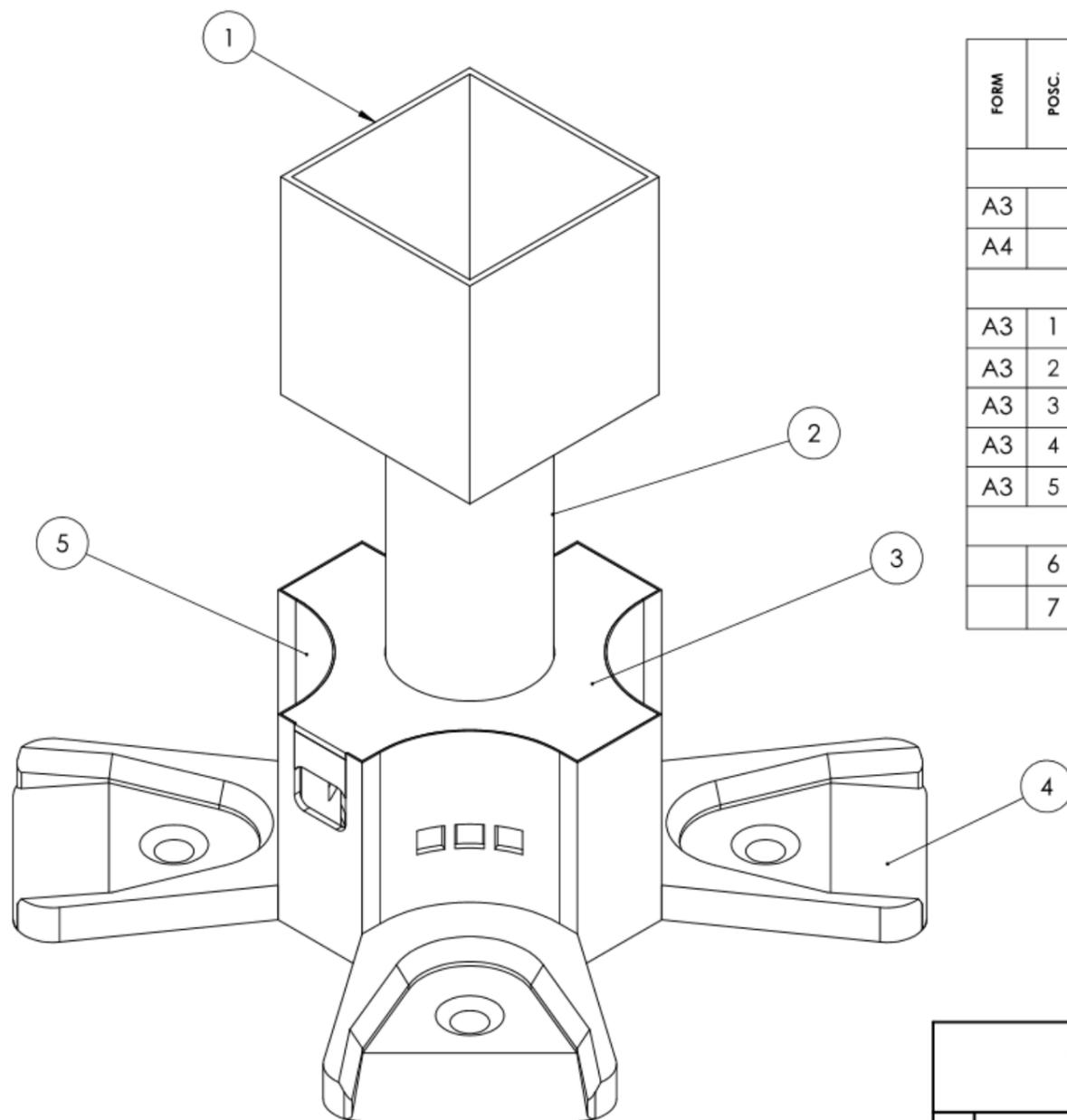


Circuito Micro USB



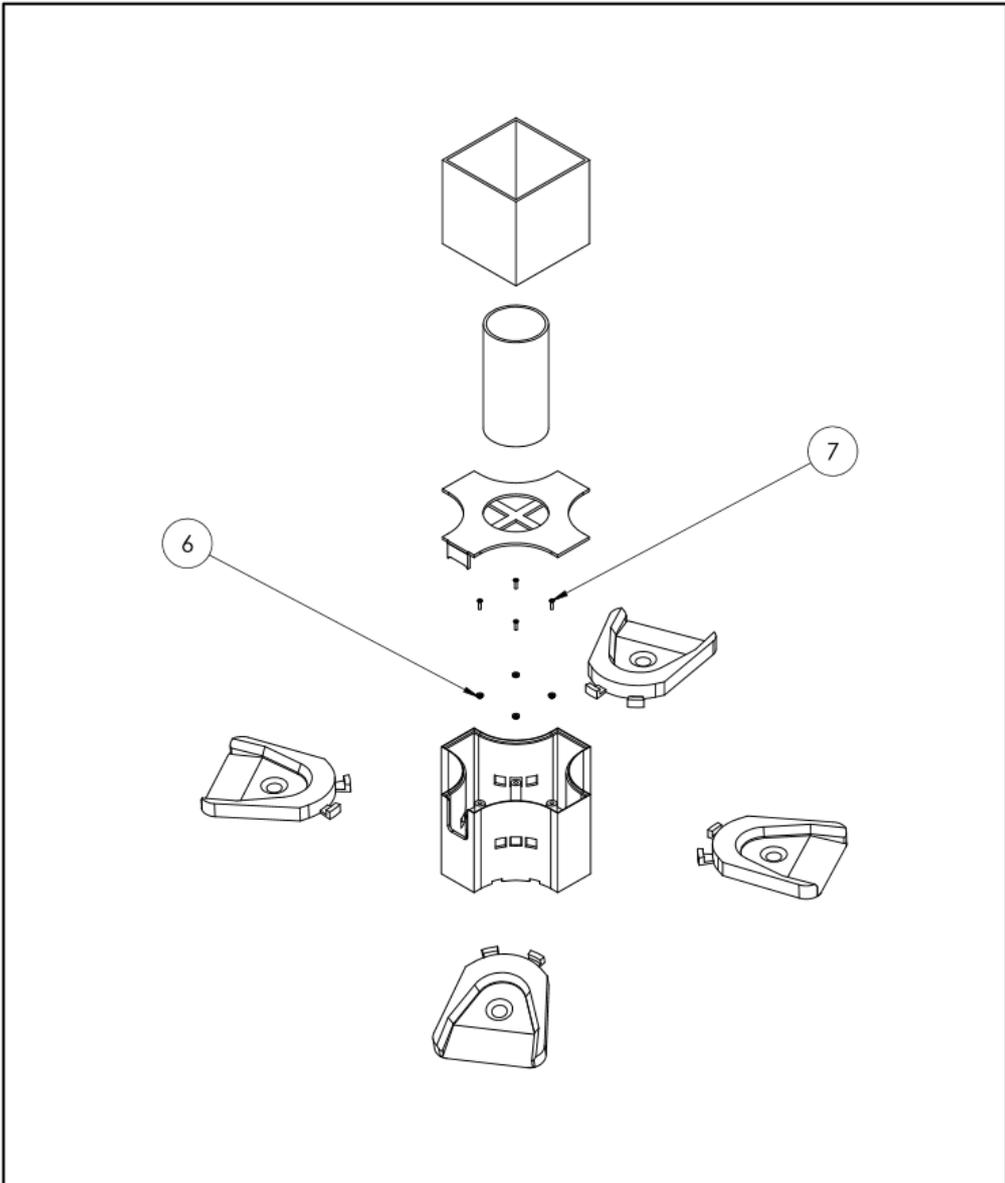
Circuito para Contactos de Adaptador

Apéndice A.3
Planos Mecánicos



FORM	POSC.	DESIGNACIÓN	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANT.
<u>Documentación</u>					
A3		BRR 2019.00.ENS	Dibujo de Montaje		
A4		BRR 2019.00.EXP	Vista de Explosión		
<u>Unidades de Montaje</u>					
A3	1	BRR 2019.01	Prisma AprilTags	Ácido Poliláctico	1
A3	2	BRR 2019.02	Cilindro	Ácido Poliláctico	1
A3	3	BRR 2019.03	Tapa Base	Ácido Poliláctico	1
A3	4	BRR 2019.04	Rampa	Ácido Poliláctico	4
A3	5	BRR 2019.05	Base	Ácido Poliláctico	1
<u>Elementos Estandarizados</u>					
	6	BRR 2019.06	Inserto M2.5X0.45		4
	7	BRR 2019.07	Tornillo M2.5x0.45x10		4

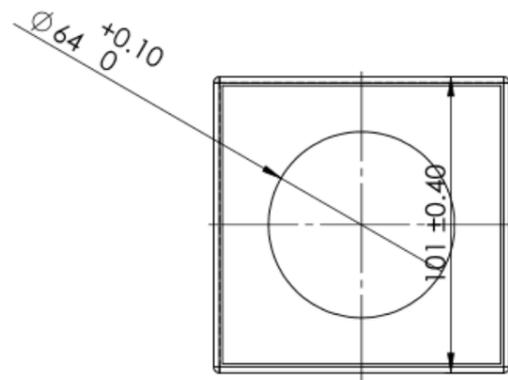
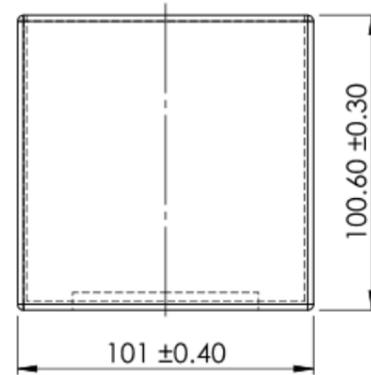
TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA	
				BASE DE RECARGA PARA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL ROBOBO	
DESIGN.	VECAÍNO, M.	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: IMPRESIÓN 3D.	REMOVER MATERIAL DE SOPORTE.
DIBUJ.	VECAÍNO, M.		13/02/19		
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: 1. LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM 2. LOS ESPESORES SON DE 3 MM				DENOMINACIÓN: ESPECIFICACIÓN TÉCNICA Y ENSAMBLAJE	
		MATERIAL: ÁCIDO POLILÁCTICO		DESIGNACIÓN: BRR 2019.00.ENS	SISTEMA:
		PESO: NO APLICA		ESCALA: 1:2	FORMATO: A3
				HOJA 1 DE 6	



TEC Tecnológico de Costa Rica					ÁREA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA	
					BASE DE RECARGA PARA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL ROBOBO	
DISEÑ. VICCAINO, M.	NOMBRE 	FIRMA 	FECHA 13/02/19	ACABADO GENERAL: IMPRESIÓN 3D.	REMOVER MATERIAL DE SOPORTE.	DENOMINACIÓN: VISTA EXPLOSIONADA
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: 1. LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM 2. LOS ESPESORES SON DE 3 MM			MATERIAL: ÁCIDO POLILÁCTICO	DESIGNACIÓN: BRR 2019.00.EXP	SISTEMA: 	FORMATO: A4
			PESO: NO APLICA	ESCALA: 1:5	HOJA 2 DE 6	

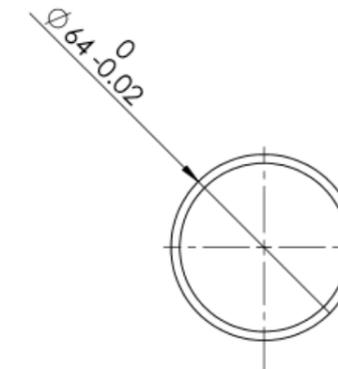
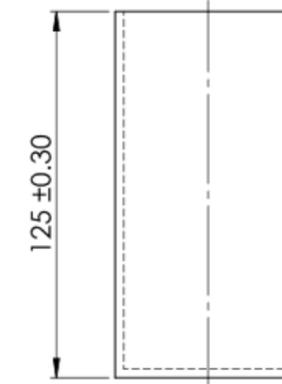
✓
FDM
Ra 10

Pieza 1: Prisma para AprilTag
Designación BRR 2019.01
Material: Ácido Poliláctico
Cantidad: 1
Radios de redondeo de 2 mm



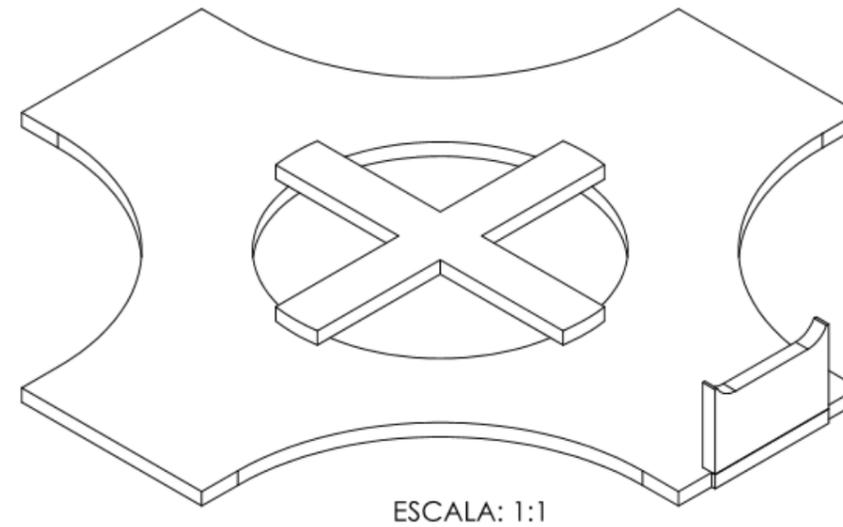
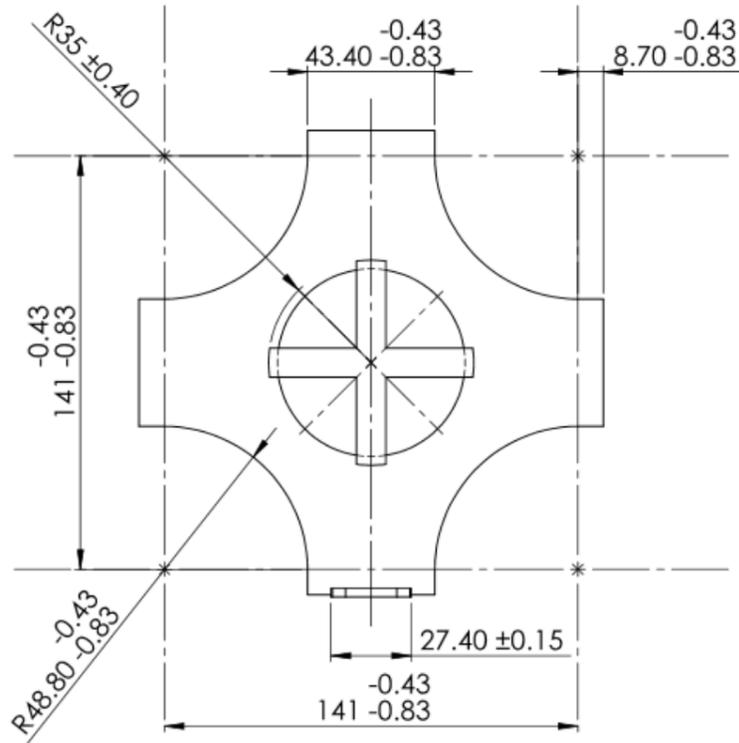
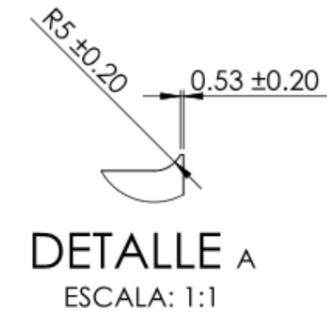
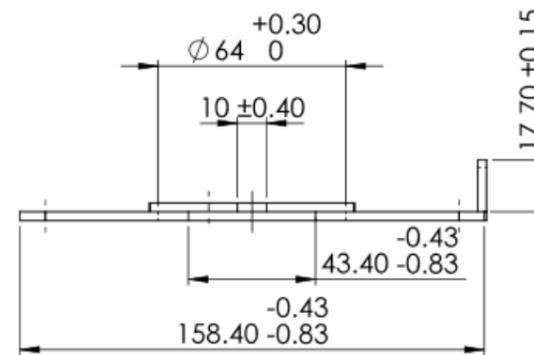
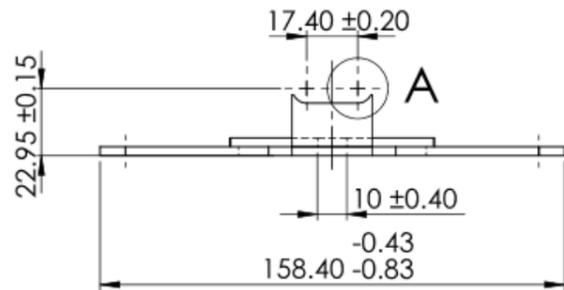
✓
FDM
Ra 10

Pieza 2: Cilindro
Designación: BRR 2019.02
Material Ácido Poliláctico
Cantidad: 1

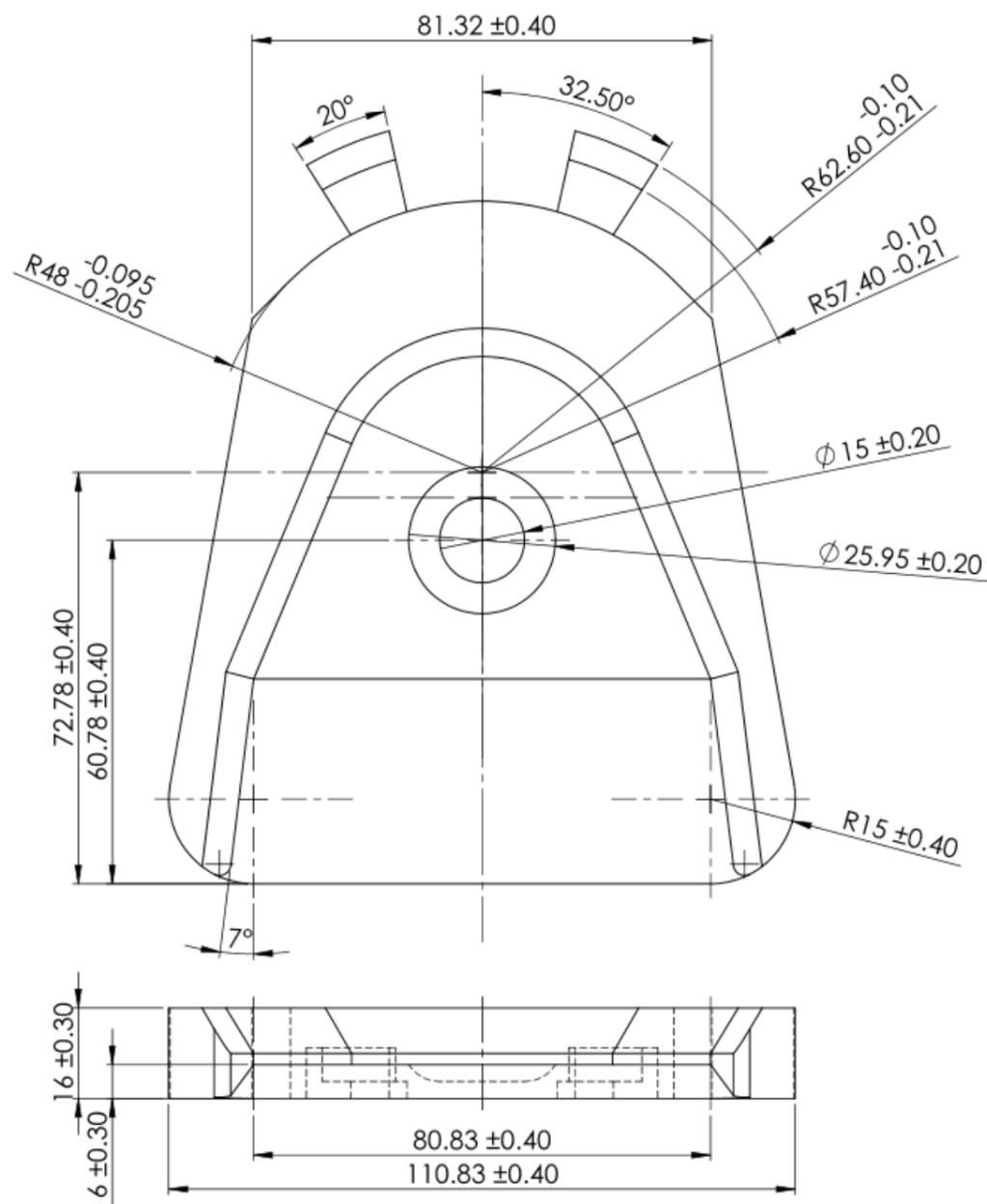


<p>TEC Tecnológico de Costa Rica</p>				ÁREA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA			
				BASE DE RECARGA PARA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL ROBOBO			
DISEÑ.	VIZCAÍNO, M.	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: IMPRESIÓN 3D.	REMOVER MATERIAL DE SOPORTE.	DENOMINACIÓN:	
DIBUJ.	VIZCAÍNO, M.		13/02/19			CILINDRO Y PRISMA	
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: 1. LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM 2. LOS ESPESORES SON DE 3 MM				MATERIAL:	DESIGNACIÓN:	SISTEMA:	FORMATO:
				ÁCIDO POLILÁCTICO	BRR 2019.01, BRR 2019.02		A3
				PESO: NO APLICA	ESCALA: 1:2	HOJA 3 DE 6	

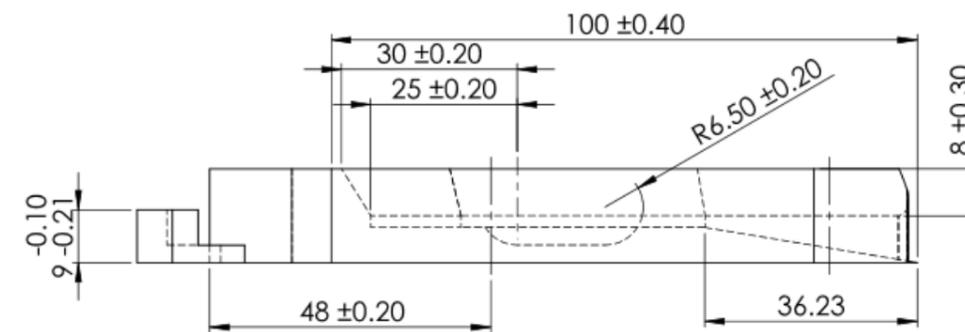
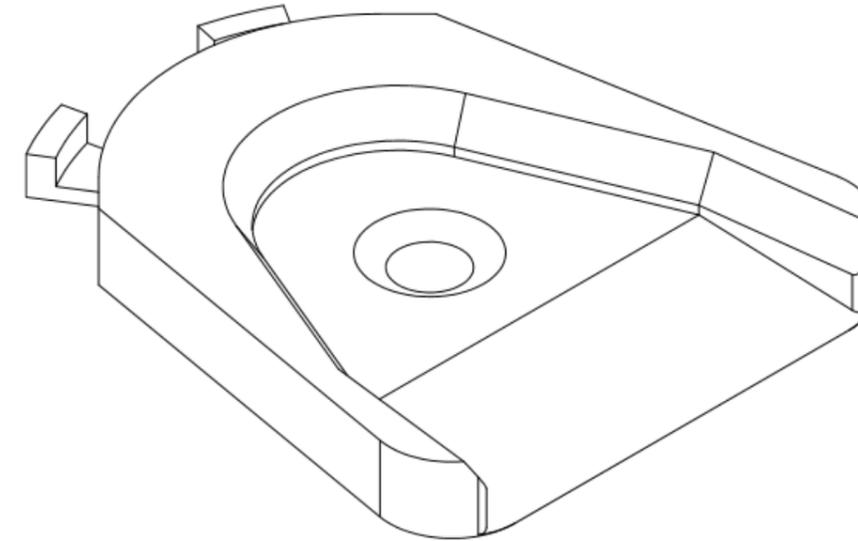
FDM
Ra 10



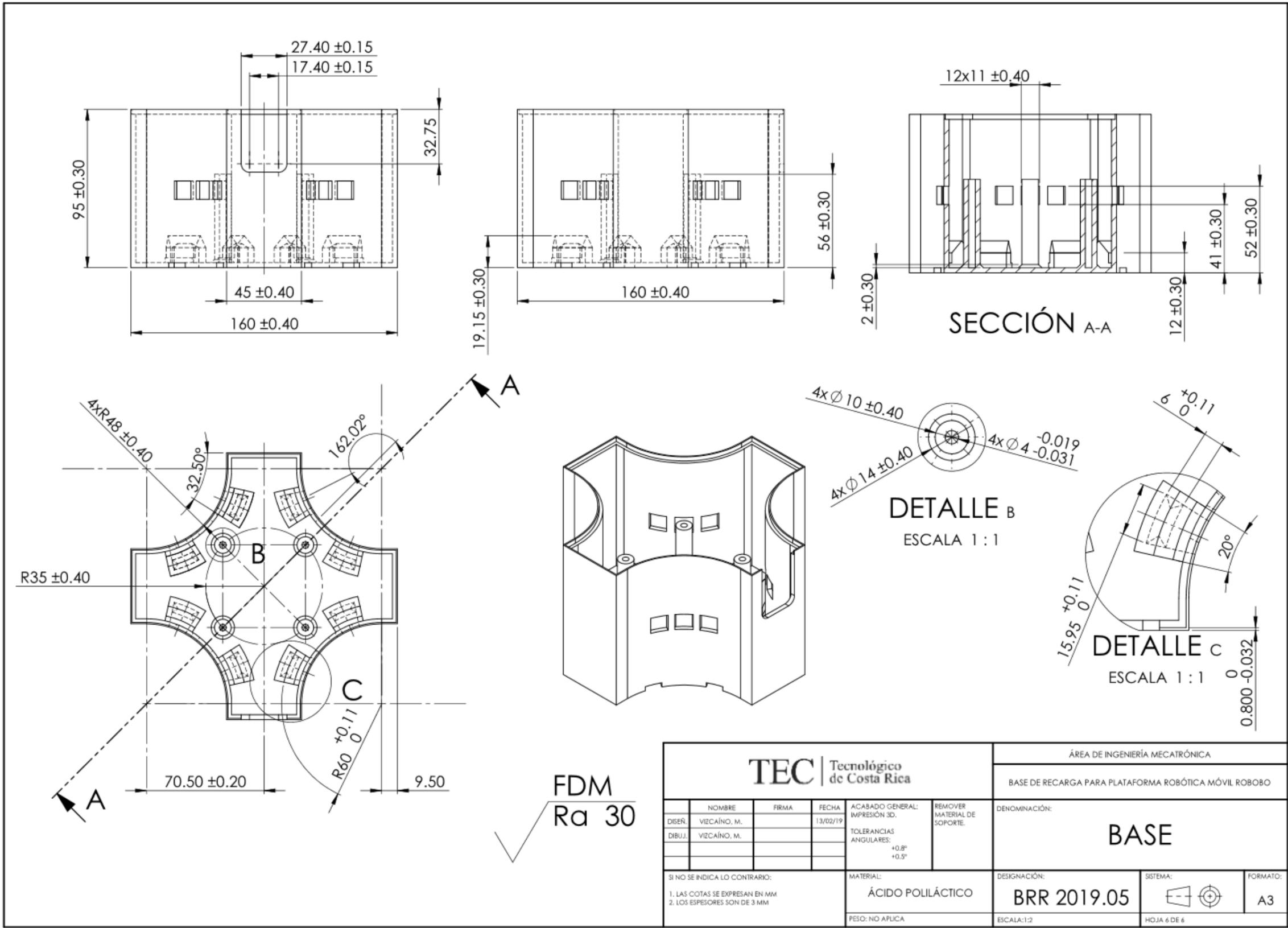
TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA	
				BASE DE RECARGA PARA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL ROBOBO	
NOMBRE VIZCAÍNO, M.	FIRMA	FECHA 13/02/19	ACABADO GENERAL: IMPRESIÓN 3D.	REMOVER MATERIAL DE SOPORTE.	DENOMINACIÓN: TAPA
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: 1. LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM 2. LOS ESPESORES SON DE 3 MM			MATERIAL: ÁCIDO POLILÁCTICO	DESIGNACIÓN: BRR 2019.03	SISTEMA:
			PESO: NO APLICA	ESCALA: 1:2	FORMATO: A3 HOJA 4 DE 6



FDM
Ra 10



TEC Tecnológico de Costa Rica					ÁREA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA	
					BASE DE RECARGA PARA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL ROBOBO	
NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: IMPRESIÓN 3D.	REMOVER MATERIAL DE SOPORTE.	DENOMINACIÓN:	
DISEÑ. VIZCAÍNO, M.		13/02/19	TOLERANCIAS ANGULARES: -50° -80°		RAMPA	
DIBUJ. VIZCAÍNO, M.					DESIGNACIÓN: BRR 2019.04	
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: 1. LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM 2. LOS ESPESORES SON DE 3 MM 3. RADIOS DE REDONDEO DE 2 MM			MATERIAL: ÁCIDO POLILÁCTICO	ESCALA: 1:1	SISTEMA:	FORMATO: A3
			PESO: NO APLICA		HOJA 5 DE 6	



Anexos

Anexo B.1

Marcado de Conformidad Europea

En general, los pasos para obtener el marcado CE son los siguientes [9]:

- Identificar los requisitos que aplican para el producto a escala de la UE; lo cual depende del grupo de productos (juguetes, equipos eléctricos, maquinaria, instrumentos de medición, dispositivos médicos, equipos de protección personal, entre otros), ya que cada uno de ellos cuenta con una Directiva distinta.
- Comprobar si el producto cumple los requisitos específicos de la Directiva. Se puede acudir también al cumplimiento de otras normas europeas armonizadas como opción para cumplir con los requisitos legales en lugar de la Directiva de la UE pertinente; sin embargo, su uso es voluntario. Una norma europea armonizada es un estándar europeo desarrollado por una Organización de Estándares Europeos reconocida, entre las que están: CEN (Comité Europeo de Normalización), CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica), o ETSI (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones) [92].
- Comprobar si un organismo notificado debe de ensayar el producto. Un organismo notificado es aquel que ha sido designado para llevar a cabo evaluaciones de conformidad con respecto a las directivas de la UE [93].
- Poner a prueba el producto, que en caso de que no se requiera que un organismo independiente o notificado verifique el producto, le compete al fabricante comprobar que cumpla los requisitos técnicos pertinentes.
- Reunir la documentación técnica que demuestre que el producto cumple los requisitos técnicos mencionados en la o las directivas.
- Colocar el marcado CE y redactar la declaración de conformidad. El marcado debe de ser visible, legible e indeleble. En caso de que se haya necesitado la intervención de un organismo notificado, el producto debe de hacer constar también el número de identificación del organismo.

Por otro lado, en [11] se pueden encontrar los objetivos a cumplir cuando se desea comercializar con marcado CE cualquier material eléctrico de media tensión. Sobre las condiciones generales de estos productos se tiene que:

- a) Las características fundamentales, cuyo reconocimiento y observancia ha de asegurar que el material eléctrico se utilice de manera segura y acorde con su destino, figurarán en el material eléctrico o, cuando esto no sea posible, en el documento que lo acompañe.
- b) El material eléctrico y sus componentes se fabricarán de modo que permitan un montaje y una conexión seguros y adecuados.
- c) El material eléctrico habrá de diseñarse y fabricarse de modo que quede garantizada la protección contra los peligros a que se refieren los puntos 2 y 3, a condición de que se utilice de manera acorde con su destino y sea objeto de un adecuado mantenimiento.

Para la protección contra los peligros derivados del propio material eléctrico se establecen medidas de índole técnica, de conformidad con las condiciones generales, a fin de que:

- a) Las personas y los animales domésticos queden adecuadamente protegidos contra el peligro de lesiones físicas u otros daños que pueda provocar el contacto directo o indirecto;
- b) No se produzcan temperaturas, arcos o radiaciones peligrosas;
- c) Se proteja convenientemente a las personas, los animales domésticos y los bienes contra los peligros de naturaleza no eléctrica causados por el material eléctrico que se desprendan de la experiencia;
- d) El sistema de aislamiento sea el adecuado para las condiciones de utilización previsibles.

En cuanto a la protección contra los peligros causados por efecto de influencias externas sobre el material eléctrico se establecen medidas de orden técnico conforme a las condiciones generales a fin de que el material eléctrico:

- a) responda a los requisitos mecánicos esperados de manera que no se ponga en peligro a las personas, los animales domésticos y los bienes;
- b) resista las influencias no mecánicas en las condiciones medioambientales esperadas de manera que no se ponga en peligro a las personas, los animales domésticos y los bienes;
- c) no ponga en peligro a las personas, los animales domésticos y los bienes en las condiciones de sobrecarga previsibles.

Anexo B.3

Especificaciones del Robobo [94]

ESPECIFICACIONES DE LA BASE:

TAMAÑO (PLEGADA): 92x172x200 mm

TAMAÑO (DESPLEGADA): 170x172x200 mm

PESO: ~700 g

BATERÍA: 5000 mAh LiPo Recargable

CERTIFICACIONES: CE, FCC Y RoHS

ACTUALIZACIÓN DEL FIRMEWARE DE BLUETOOTH

CONECTIVIDAD:

Conectividad Bluetooth

1 puerto micro USB para cargar la batería

SENSORES:

8 sensores infrarrojos

4 codificadores de motor (2 en las ruedas del motor, 1 en el motor PAN, 1 en el motor TILT)

Nivel de batería

ACTUADORES:

2 DC motor en las ruedas (150: 1)

1 motor de CC para movimiento TILT del soporte del teléfono inteligente (1000: 1)

1 motor de CC para movimiento PAN del soporte del teléfono inteligente (150: 1)

7 luces LED de color

ESPECIFICACIONES COMUNES DE SMARTPHONE DISPONIBLES EN ROBOBO: (SMARTPHONE NO INCLUIDO)

CONECTIVIDAD:

Wi-Fi

Bluetooth

3G/4G

SENSORES:

2 cámaras de alta resolución

Micrófono

Giroscopio 3D

Acelerómetro 3D

Magnetómetro 3D

Pantalla táctil

Sensor de luz

GPS

ACTUADORES:

Altavoz

Pantalla LCD de alta resolución

Luz de flash

