



CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS EMBEBIDOS

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

Robot móvil para desinfección

Autor:

Ing. Sergio Alberino

Director:

Mg. Ing. Claudio Abel Verrastro (CNEA - UTN/FRBA)

Jurados:

Mg. Bioing. Eduardo Filomena (UNER)

Esp. Ing. Juan Vicente Montilla Cabrera (FIUBA)

Mg. Ing. Sergio Burgos (UTN-FRP)

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires,
entre junio de 2020 y octubre de 2021.*

Resumen

En este trabajo se describe el desarrollo e implementación de un prototipo de robot móvil para tareas de desinfección por efecto de rayos ultravioletas. El dispositivo puede realizar un recorrido autónomo evitando obstáculos en un ambiente cerrado, o puede controlarse en forma inalámbrica desde una tablet o celular. El dispositivo será utilizado para desinfección en espacios públicos o en el hogar, y como plataforma para actividades de docencia e investigación en el Grupo de Inteligencia Artificial y Robótica de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires.

Para el desarrollo de este trabajo fueron fundamentales los conocimientos adquiridos de arquitectura de software, programación de microcontroladores, protocolos de comunicaciones e interfaz con Bluetooth, así como también las metodologías de especificación de requerimientos de software.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Robots de servicio	1
1.1.1. Robots móviles para inspección y limpieza	2
1.1.2. Robots de desinfección por luz ultravioleta	3
1.2. Desinfección usando luz ultravioleta	5
1.3. Motivación	7
1.4. Objetivos y alcances	8
2. Introducción específica	11
2.1. Diseño del prototipo	11
2.1.1. Módulos y dispositivos de hardware	12
Placa de microprocesamiento	12
Motores	13
Driver de motores	15
Módulo sensor de infrarrojos	17
Módulo detector pasivo de infrarrojos	18
2.1.2. Buzzer o Transductor electroacústico	18
LED ultravioleta	19
Módulo de comunicaciones Bluetooth	20
Baterías	21
2.2. Requerimientos	22
Supuestos iniciales del proyecto	22
3. Diseño e implementación	25
3.1. Diseño mecánico	25
3.1.1. Diseño del chasis y la carcasa del robot	25
3.2. Diseño de hardware	28
3.2.1. Placa de expansión de hardware	28
Diseño esquemático de la placa de expansión de hardware	29
Diseño PCB de la placa de expansión de hardware	31
Conexión para motores	32
Disposición de Entradas y Salidas	33
3.3. Diseño de software	33
3.3.1. Módulos de software	33
Máquina de estados finitos	33
Sensores	37
Motores	37
3.3.2. Aplicación	37
4. Ensayos y resultados	39
4.1. Pruebas funcionales del hardware	39

4.1.1. Validación de navegación autónoma	40
4.1.2. Validación de movimientos del robot	40
4.1.3. Validación módulo de comunicaciones Bluetooth	40
4.1.4. Validación detección de obstáculos	40
4.2. Pruebas no Funcionales	40
5. Conclusiones	41
5.1. Resultados obtenidos	41
5.2. Conocimientos aplicados	41
5.3. Próximos pasos	42
A. Placa de expansión de hardware	43
Bibliografía	45

Índice de figuras

1.1. Robots de servicio ¹	1
1.2. Clasificación de robots de servicio ²	2
1.3. Distintos tipos de robot de limpieza ³	2
1.4. Robot desinfectante por luz ultravioleta en una sala de hospital ⁴	3
1.5. UVR-Robot de la agencia nacional UV- Robotics ⁵	4
1.6. Imagen de la aspiradora Warptech ARobot 1000 UV ⁶	5
1.7. Ejemplo de esterilizador portátil por UVC ⁷	5
1.8. Clasificación de luz según longitud de onda ⁸	6
1.9. Efecto de la UV-C sobre el ADN de microorganismos ⁹	6
1.10. Representación del robot para tareas de desinfección por UV-C.	8
2.1. Representación del robot para tareas de desinfección por UV-C.	11
2.2. Placa de desarrollo EDUCIAA-NXP ¹⁰	12
2.3. Diagrama en bloques de la EDUCIAA-NXP ¹¹	13
2.4. Imagen del motor utilizado ¹²	14
2.5. Dimensiones del motor utilizado ¹³	15
2.6. Driver de motores ¹⁴	16
2.7. Diagrama esquemático del módulo ¹⁵	16
2.8. Módulo sensor de infrarrojos ¹⁶	17
2.9. Diagrama esquemático del módulo sensor de infrarrojos ¹⁷	17
2.10. Módulo PIR HC-SR501 ¹⁸	19
2.11. Imagen del buzzer seleccionado ¹⁹	19
2.12. imagen del LED UVC Germicida seleccionado ²⁰	20
2.13. Módulo Bluetooth HC-05 ²¹	21
2.14. Baterías 18650 en su portapila	22
3.1. Base y distribución de los motores.	25
3.2. Base y distribución de los motores.	26
3.3. Base circular.	26
3.4. Modelo 3D de la base y componentes.	27
3.5. Imagen 3D de la carcasa para el módulo PIR.	27
3.6. Imagen 3D de la pieza para el tercer punto de apoyo del robot.	27
3.7. Imagen 3D de la base completa con la tapa y el sensor PIR.	28
3.8. Diagrama en bloques del robot.	28
3.9. Esquemático de conexionado de sensores.	29
3.10. Esquemático de conexionado del relé.	30
3.11. Esquemático de conexionado del buzzer.	30
3.12. Conectores para los módulos Bluetooth e I2C.	31
3.13. Vista del modelo 3D de la placa de expansión de hardware.	31
3.14. Fotografía de la placa desarrollada.	32
3.15. Esquema de máquina de estados como el utilizado en el control del robot.	34

3.16. Diagrama de flujo básico de la rutina que configura la máquina de estados.	35
3.17. Ejemplo de configuración de la FSM con una tabla escrita en una planilla de cálculo.	35
3.18. Programación en bloques usando el MIT App inventor.	38
3.19. Imagen de la pantalla de la aplicación móvil implementada con MIT App inventor.	38
4.1. Prototipo armado y cableado, sin la tapa superior.	39

Índice de tablas

2.1. comparacion	14
2.2. características	15

Capítulo 1

Introducción general

En este capítulo se presentan las características de los robots de servicio, se reseña el uso de luz ultravioleta como germicida y se exponen los objetivos que motivaron el presente trabajo y su respectivo alcance.

1.1. Robots de servicio

A lo largo del siglo XX la robótica pasó de ser una temática de la rama de la ciencia ficción, a cumplir un importante rol dentro de los complejos industriales. En los últimos años los robots han pasado a tener cada vez más tareas de “servicio” para ambientes públicos y hogareños. La robótica de servicios abarca un amplio campo de aplicaciones, la mayoría de las cuales tienen diferentes grados de automatización, desde la teleoperación completa hasta el funcionamiento autónomo, y constituye un campo de aplicación más diverso que el de la robótica industrial. En la figura 1.1 se pueden observar tres tipos de robots de servicios: una aspiradora hogareña, un cortador de césped y un limpiavidrios.



FIGURA 1.1. Robots de servicio¹.

A mediados de la década de 1990, la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE) [1] y la Federación Internacional de Robótica (IFR) [2] adoptaron un sistema de clasificación de robots de servicio dividida por categorías y tipos de interacción, que se ha mantenido hasta la actualidad. En la figura 1.2 se puede observar los primeros ítems de clasificación para robots domésticos/personales de acuerdo a los tipos y áreas de aplicación.

¹Imágenes tomadas de <https://www.domotizar.com/>

I	Robots domésticos/personales	II	Robots de servicio profesional
1-7	Robots para tareas domésticas	16-21	Robótica de campo
1	Robots compañeros, asistentes, humanoides	16	Agricultura (campos, invernaderos, huertas, viñedos)
2	Limpieza de suelos, aspiradoras	17	Robots de ordeño
3	Corte de césped	18	Otros robots de ganadería
4	Limpieza de la piscina	19	Robots de minería
5	Limpieza de ventanas	20	Robots espaciales
6	Seguridad y vigilancia doméstica	21	Otros
7	Otros	22-26	Limpieza profesional
8-11	Robots de entretenimiento	22	Limpieza de suelos
8	Robots juguete/hobby	23	Limpieza de ventanas y paredes (incluyendo robots de limpieza que trepan paredes)
9	Robots multimedia	24	Limpieza de tanques y cañerías
10	Educación e investigación	25	Limpieza de casco (aeronaves, vehículos, etc.)
11	Otros	26	Otras tareas de limpieza
12-14	Asistencia a ancianos y discapacitados	27-29	Sistemas de inspección y mantenimiento
12	Sillas de ruedas robotizadas	27	Plantas, instalaciones
13	Dispositivos de ayuda y asistencia personales	28	Tanques, cañerías, cloacas
14	Otras funciones de asistencia	29	Otros sistemas de inspección y mantenimiento
15	Otros robots domésticos/personales		

FIGURA 1.2. Clasificación de robots de servicio².

1.1.1. Robots móviles para inspección y limpieza

Los robots móviles son dispositivos que poseen un sistema de locomoción capaz de navegar a través de un determinado ambiente de trabajo. Normalmente cuentan con cierto nivel de autonomía que les permite el desplazamiento sin colisiones por un recorrido específico. Sus aplicaciones son muchas y en general están relacionadas con tareas monótonas o riesgosas para la salud humana.

Las plataformas móviles pueden realizar tareas de inspección y limpieza de manera autónoma o controlada remotamente por un operador. Son utilizadas en zonas de difícil acceso debido a limitaciones de espacio o razones de seguridad. Este tipo de robot suele contar con sensores de distinto tipo para detectar los límites y obstáculos del entorno.

La proliferación de robots para limpieza se incrementó fuertemente a partir de la pandemia de Covid-19, con lo que se los puede encontrar hoy en día en espacios en los que antes no estaban presentes, tales como salas médicas, hoteles y en el transporte público [3].

Estos dispositivos “de interior” abarcan varios tipos. En la figura 1.3 se puede observar un modelo de robot trapeador húmedo, una aspiradora robótica y un limpiavidrios automático, a modo de ejemplo.

FIGURA 1.3. Distintos tipos de robot de limpieza³.

²Imagen tomada de https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/aa1_ifr_robots.pdf

³Imágenes tomadas de <https://www.domotizar.com/>

Si bien todas las aspiradoras robots cumplen con la misma función básica de aspirar polvo y suciedad, las prestaciones de cada modelo y marca varían considerablemente junto con el precio de mercado. Los precios pueden oscilar entre los 200 y los 1200 dólares [4]. Los robots de mayor gama incorporan cepillos, trapeadores húmedos y/o luz ultravioleta germicida. Las versiones más avanzadas presentan mayor cantidad de sensores de proximidad a la vez que incorporan cámaras y rayos láser para medir distancias hasta los obstáculos y planificar recorridos. La navegación de los robots más simples es de tipo aleatoria, simplemente sorteando los obstáculos con los que se encuentra y sin seguir una trayectoria ordenada.

1.1.2. Robots de desinfección por luz ultravioleta

Desde hace tiempo se utiliza luz ultravioleta para la desinfección de agua potable, y más recientemente ha sido incorporada como método germicida en conductos de ventilación. También se ha utilizado para la desinfección de instrumental e insumos en ambientes hospitalarios.

En los últimos dos años, con el aumento de los cuidados de la salud debido a la pandemia mundial por el COVID-19, comenzaron a comercializarse robots móviles de luz ultravioleta germicida, para desinfectar quirófanos y salas de hospitales[5]. Estos robots, poseen paneles con tubos ultravioleta para poder irradiar completamente una habitación o parte de la misma y son de alturas entre los 120 y los 180 cm para poder iluminar camas y mesas desde arriba y poder pasar por puertas y aberturas convencionales. En la figura 1.4 se muestra un robot de estas características.



FIGURA 1.4. Robot desinfectante por luz ultravioleta en una sala de hospital⁴.

La cobertura de los robots móviles de luz ultravioleta germicida suele ser mayor a los 180 grados, por lo que resulta importante no solo el recorrido realizado para abarcar todas las superficies, sino también evitar la presencia cercana de personas ya que la exposición de rayos ultravioleta puede ser perjudicial para la piel y la vista.

⁴Imagen tomada de <https://www.infoplcn.net/plus-plus/empresas/item/107726-mts-tech-robot-movil-ultravioleta-covid-19>

Además de los hospitales, estos robots están siendo usados en otros espacios, como vagones del subterráneo, espacios comunes en hoteles, oficinas y áreas de control en aeropuertos [6].

En 2020, la empresa argentina UV- Robotics lanzó el UVR-Robot [7] que cuenta con tubos de luz UV-C germicida dispuestos en un arreglo de 360 grados para que la luz llegue hasta cualquier rincón y con una plataforma omnidireccional. El proceso toma entre 5 y 15 minutos según la superficie, y se lo puede dirigir a control remoto. Esto le permite desinfectar autobuses, aviones y otros medios de transporte, salas de espera, centros de mayores, colegios, entidades bancarias, hoteles, ascensores o aseos. La iniciativa tuvo el apoyo del Ministerio de Desarrollo Nacional y cuenta con validaciones y homologaciones de la Universidad Tecnológica Nacional. En la figura 1.5 se observa al UVR-Robot desinfectando un vagón de tren subterráneo.



FIGURA 1.5. UVR-Robot de la agencia nacional UV- Robotics⁵.

A nivel hogareño, muchos robots de limpieza empiezan a incorporar la luz ultravioleta como medio de desinfección. En general, es una característica adicional que presentan las aspiradoras robóticas que además de barrido y trapeado húmedo agregan la esterilización de suelos con luz ultravioleta, resultando hoy en día una característica evaluada en las comparativas de los distintos productos [8]. En la figura 1.6 se observa la imagen de una aspiradora modelo Warptech ARobot 1000 UV con la funcionalidad de desinfección por UV-C por medio de LEDs ultravioletas en la parte inferior.

También se han comenzado a comercializar robots móviles de las dimensiones de una aspiradora robot, pero con el único fin de esterilizar gérmenes y virus usando la emisión de luz UV-C de baja intensidad (sin aspiradora o trapeador), para empresas y comercios en general. La propuesta que presentan es la dejar al robot funcionando por la noche en los espacios que se desean desinfectar. Un ejemplo de esta aplicación es el robot germicida móvil por UV-C y ozono Conga

⁵Imagen tomada de <https://www.interempresas.net/Tecnologia-aulas/Articulos/321010-UVR-bot-reto-acabar-cualquier-rastro-covid-19-20-minutos-luz-ultravioleta.html>

⁶Imagen tomada de https://www.coradir.com.ar/producto/productos_categoria/aspiradoras-roboticas



FIGURA 1.6. Imagen de la aspiradora Warptech ARobot 1000 UV⁶.

Apolo [9] de la empresa española Cecotec. Su precio se encuentra alrededor de los 1000 euros.

Existen también dispositivos portátiles de esterilización con LEDs ultravioleta en la longitud de onda entre los 200 y 280 nm para desinfectar celulares, teclados, llaves, juguetes para bebés y otros objetos pequeños. Se trata de luz de baja potencia (menor a los 15 mW) pero fuertemente enfocada sobre la superficie a esterilizar, desde una distancia muy corta (menor a los 3 cm), con lo que aprovechan al máximo la energía radiada. El tiempo de aplicación de la luz UV sobre la superficie oscila entre los 30 y 60 segundos, según la potencia del dispositivo. En la figura 1.7 se observa una imagen de un modelo de esterilizador portátil por UV-C. Muchos de estos dispositivos justifican su eficiencia con un estudio realizado en 2020 por el Guangdong Detection Center of Microbiology [10].



FIGURA 1.7. Ejemplo de esterilizador portátil por UVC⁷.

1.2. Desinfección usando luz ultravioleta

El espectro ultravioleta (UV) abarca la banda de radiación electromagnética entre los 400 y 100 nm, presentando una longitud de onda menor que la de la luz visible y mayor que la de los rayos X. Se divide en las siguientes categorías principales:

- los rayos UV-A (400 – 315 nm), que son los más cercanos al espectro visible.
- los rayos UV-B (315 – 280 nm), que son absorbidos en gran parte por diferentes elementos a medida que atraviesan el cielo.
- los rayos UV-C (280 – 200 nm), que son absorbidos totalmente por la capa de ozono.

⁷Imagen tomada de <https://procid.cl/producto/luz-led-germicida-portatil-uv-c-blanco/>

En la figura 1.8 se observa la clasificación de luz según longitud de onda en espectro de radiación electromagnética.

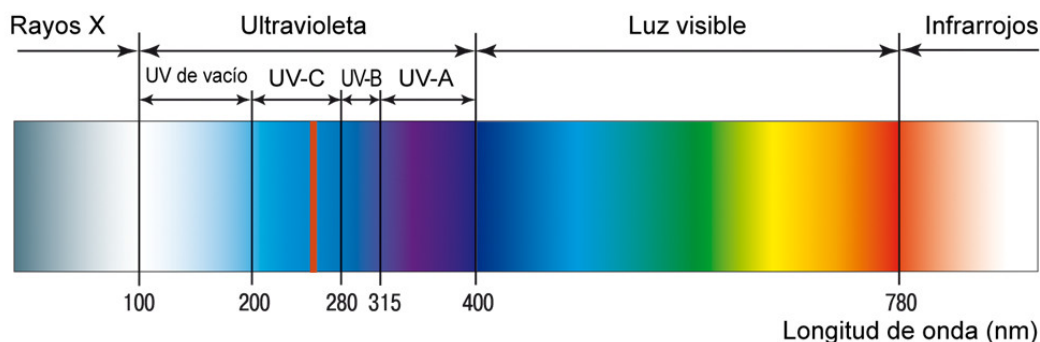


FIGURA 1.8. Clasificación de luz según longitud de onda⁸.

La utilización de luz ultravioleta UV-C como germicida ha demostrado efectividad para la esterilización las bacterias, gérmenes, virus, algas y esporas.

Los virus tienen un tamaño inferior a un micrómetro (μm , una millonésima parte de un metro) y las bacterias son típicamente de 0,5 a 5 μm . Técnicamente es incorrecto decir que los rayos UV-C matan a los virus, siendo que no se trata de organismos vivos. Sin embargo, el comité de foto-biología de la *Illuminating Engineering Society* (IES) informa que los fotones UV-C interactúan con el ARN y las moléculas de ADN en un virus o bacteria de modo que se evita su reproducción y por lo tanto su efecto infeccioso. Una célula que no puede reproducirse se considera muerta; ya que no puede multiplicarse dentro del anfitrión. A este proceso se lo denomina “desactivación” [11]. En la figura 1.9 se representa el efecto de la luz UV-C en el ADN de bacterias, gérmenes, virus, algas y esporas.

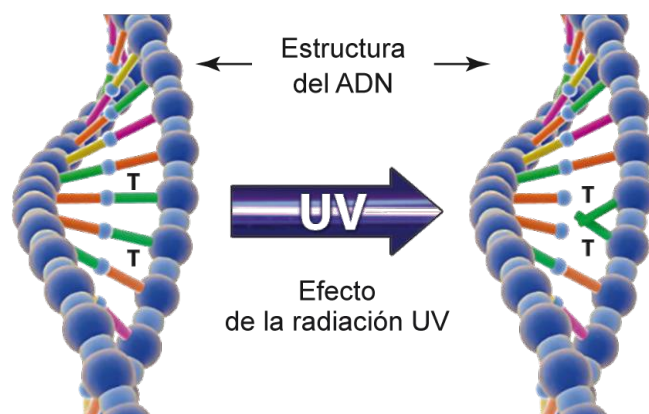


FIGURA 1.9. Efecto de la UV-C sobre el ADN de microorganismos⁹.

La *International Ultraviolet Association* (IUVA) afirma que los resultados de pruebas en laboratorio de desinfección utilizando UV-C entre los 200 y 280 nm demuestran especial utilidad para reducir la transmisión de los virus causantes del COVID-19: SARS-CoV-1 y MERS-CoV [12]. En la práctica, el efecto depende de

⁸Imagen tomada de <https://www.lit-uv.com/es/technology/>

⁹Imagen tomada de <https://www.lit-uv.com/es/technology/>

factores tales como el tiempo de exposición y obstrucción que puedan tener los rayos para alcanzar plenamente los pliegues u ondulaciones que pudiera tener la superficie a desinfectar.

En un informe sobre utilización de la radiación ultravioleta para desinfección [13], el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, concluye que el uso de radiación UV-C es muy adecuado para la desinfección de microorganismos y de virus, y propone su uso en combinación con métodos tradicionales para la desinfección en zonas de alta contaminación.

La cantidad de inactivación de patógenos en superficies es directamente proporcional a la dosis de radiación UV-C, definida como el producto de la intensidad (W/m^2) por la duración de la exposición. La dosis de luz UV necesaria varía en función del patógeno que se quiera desinfectar y de las condiciones ambientales[14].

Una de las ventajas de este método de desinfección radica en que una vez terminada el ambiente puede volver a ser utilizado inmediatamente, ya que no existe radiación persistente. La desinfección por UV-C resulta además menos contaminante para el medio ambiente, al no exponer al ser humano a los riesgos derivados del uso de productos químicos. La desinfección germicida por ultravioleta es especialmente recomendada cuando debe realizarse sobre materiales que podrían verse afectados o dañados ante la limpieza continua con productos a base de químicos líquidos, como ser dispositivos electrónicos o materiales susceptibles a la oxidación [15].

La desinfección por rayos UV-C es también útil en el caso de superficies de difícil acceso por su ubicación o cuando la zona presenta formas y estructuras que no permiten la higienización por contacto con paños o rociadores.

Por otra parte, la irradiación con luz UV-C presenta una serie de limitaciones. El patógeno que desea esterilizarse debe ser expuesto directamente a la radiación para que sea eliminado. Si bien la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda el uso de rayos UV-C para desinfección, también alerta sobre los riesgos de exposición en seres humanos y animales, cuya piel puede verse irritada, a la vez que puede producir daños a la vista [16]. En este sentido promueven la limpieza periódica de manos con jabón o con alcohol, y dejan la esterilización con UV-C para instrumental y objetos de uso diario.

1.3. Motivación

Existen cada vez más robots de servicio orientados a tareas específicas de ayuda para la industria y para el hogar. Debido al avance de la pandemia por COVID-19, en 2020 proliferaron los robots para desinfección utilizando emisión de luz ultravioleta de tipo germicida. Se trata de dispositivos de grandes dimensiones (con alturas entre uno y dos metros) ya que buscan cubrir superficies amplias como las de salas de hospitales, almacenes, espacios de transportes públicos, etc. Al mismo tiempo se ha visto que muchos robots de limpieza hogareña empiezan a incorporar la desinfección por UV-C como parte de sus prestaciones. En un informe sobre utilización de la radiación ultravioleta para desinfección [13] elaborado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, se

propone como algo necesario el diseño de robots móviles que recorran superficies horizontales de forma autónoma irradiando luz UV-C para la desinfección de ambientes cerrados.

En función de estas cuestiones, y con el fin de elaborar un trabajo acorde al nivel de los temas planteados en la especialización en sistemas embebidos, es que surge la idea de construir una plataforma móvil de dimensiones similares a las de una aspiradora robot comercial, que pudiera utilizarse para desinfección por rayos UV-C en espacios cerrados y sobre superficies planas, donde puedan existir obstáculos (patas de mesas, sillas, etc.) que dificulten la limpieza por otros medios (trapeadores, cepillos). El dispositivo puede ser usado para desinfección sin residuos químicos en espacios públicos (salas de atención médica, instituciones educativas) y en el hogar. También podría resultar conveniente para esterilizar superficies que no pueden ser limpiadas con productos líquidos, como es el caso de losetas de caucho o productos similares, como las utilizadas en jardines de infantes o gimnasios. En la figura 1.10 se observa una representación del robot para tareas de desinfección con UV-C.



FIGURA 1.10. Representación del robot para tareas de desinfección por UV-C.

Si bien existen plataformas robot con fines educativos y de experimentación, la mayoría son de fabricación extranjera y de costos elevados para ser afrontados por instituciones educativas. La construcción de prototipos robóticos a nivel nacional constituye en ese sentido un buen aporte para ampliar el parque de plataformas de experimentación y desarrollo de nuevas aplicaciones.

Se espera que el hardware resultante del presente trabajo pueda ser aprovechado en el Grupo de Inteligencia Artificial y Robótica (GIAR) de la UTN - Facultad Regional Buenos Aires, para la evaluación de algoritmos de Inteligencia Artificial. La placa EDU-CIAA cuenta con capacidad suficiente para el procesamiento de algoritmos reactivos para la planificación de recorridos con obstáculos (compatibles con trabajos realizados), en los que intervenga aprendizaje por refuerzo o comportamientos “aprendidos” con una red neuronal.

1.4. Objetivos y alcances

El propósito de este trabajo es el desarrollo de un prototipo de robot móvil para ser utilizado en tareas de desinfección por efecto de rayos ultravioletas germicidas. El dispositivo posee un modo autónomo en el que realiza un recorrido

aleatorio dentro de una habitación evitando obstáculos detectados por los sensores, y un modo de teleoperación en el que puede controlarse a distancia (de unos metros) desde una aplicación en un celular o tablet a través de Bluetooth.

En todos los casos, el uso de este robot móvil constituye un aporte a la desinfección de ambientes cerrados, que no implica que deba dejarse de lado los métodos tradicionales de prevención y limpieza.

Capítulo 2

Introducción específica

En este capítulo se presentan las distintas tecnologías y metodologías disponibles para la implementación del prototipo de robot móvil. Se describen los dispositivos más significativos que permitieron alcanzar los requerimientos planteados.

2.1. Diseño del prototipo

El prototipo se diseñó para que una superficie plana sea irradiada con un dispositivo emisor de rayos ultravioletas de tipo C en forma teleoperada o haciendo un recorrido autónomo aleatorio.

Se utilizaron sensores infrarrojos y de contacto para evitar los obstáculos que puedan aparecer en el camino del robot. La información sensada se maneja en forma de valores booleanos, para simplificar el procesamiento, tanto en uso de memoria como en velocidad.

La plataforma posee una placa de procesamiento central (EDU-CIAA) que recibe datos y una placa de control para el accionamiento de motores y/o dispositivos adicionales (como puede ser el encendido de LEDs UV-C germicidas). En la figura 2.1 se puede apreciar un diagrama con los principales bloques del dispositivo.

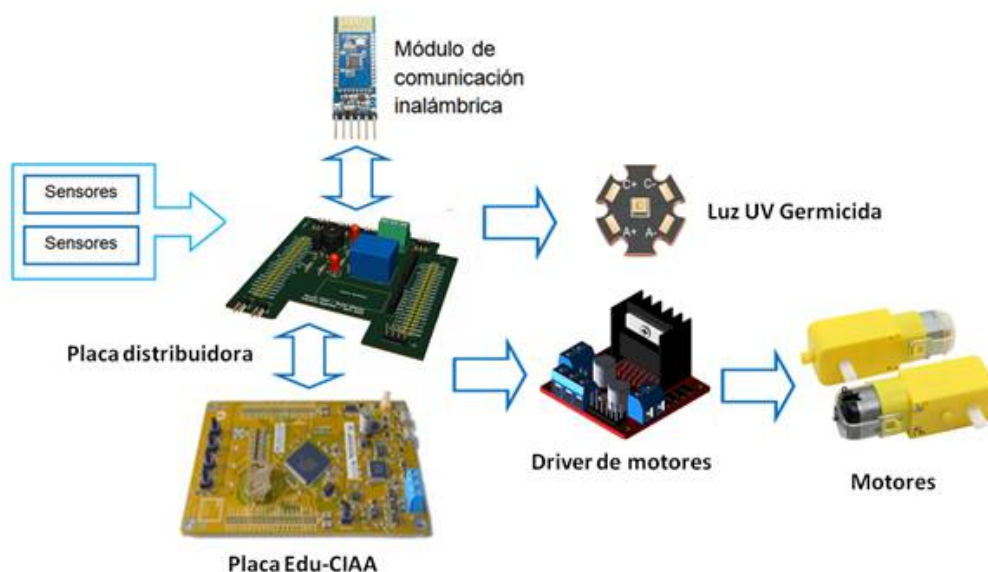


FIGURA 2.1. Representación del robot para tareas de desinfección por UV-C.

El comportamiento general, en el modo autónomo, puede ser reconfigurado a través de una tabla disponible en una librería del programa, y generada por una aplicación en PC. Esto permite cambiar el comportamiento reactivo del robot, sin modificar la rutina principal de procesamiento, basada en máquina de estados.

Se construyó una estructura mecánica para contener las distintas partes de hardware electrónico, y poder ensayar el comportamiento de sensores y motores en su conjunto.

Si bien el prototipo robot contempla el recorrido sobre el piso, irradiando luz ultravioleta hacia abajo, no hay ningún impedimento para que los sensores se monten de forma que el robot pueda recorrer una superficie plana elevada (una mesa de trabajo, por ejemplo) sin caerse, o que el emisor de luz se encuentre en la parte lateral o superior (dado que es controlado en forma independiente).

No se plantean pruebas funcionales que demuestren que se han esterilizado microorganismos y de virus al utilizar el dispositivo, siendo que eso implicaría ensayos y estudios que exceden el equipamiento disponible y las áreas de estudio de la especialización en sistemas embebidos.

El robot se alimenta con baterías recargables. No se monitorea ni se realiza la carga de las baterías. No se incluye cargador.

2.1.1. Módulos y dispositivos de hardware

En esta sección se describen los módulos y dispositivos de hardware utilizados en el prototipo del robot desarrollado.

Placa de microprocesamiento

Se decidió utilizar como hardware principal la placa de desarrollo EDUCIAA-NXP [17] para aprovechar la experiencia existente en la comunidad del posgrado.

En la figura 2.2 se observa una imagen de la EDU-CIAA-NXP, una versión de bajo costo de la CIAA-NXP, pensada para la enseñanza universitaria, terciaria y secundaria.



FIGURA 2.2. Placa de desarrollo EDUCIAA-NXP¹.

¹Imagen tomada de <http://www.proyecto-ciaa.com.ar>

En la figura 2.3 puede verse un diagrama en bloques general de la placa.

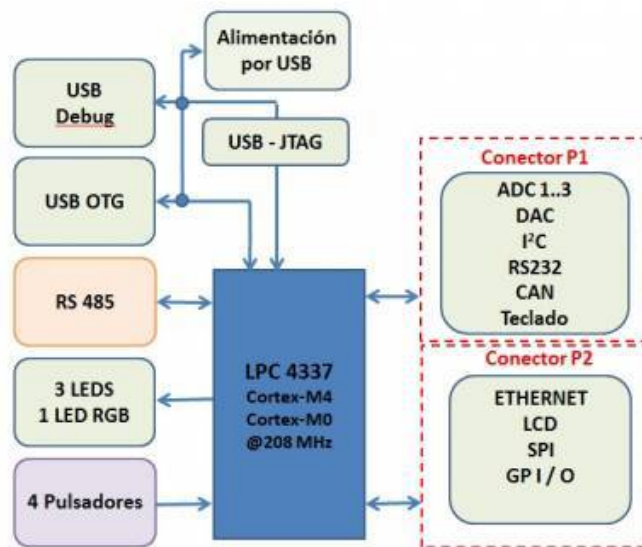


FIGURA 2.3. Diagrama en bloques de la EDUCIAA-NXP².

El microcontrolador utilizado por la EDU-CIAA es el LPC4337 (dual core ARM Cortex-M4F y Cortex-M0). Los recursos más significativos que se utilizaron de la placa fueron:

- GPIO (General Purpose Input/Output, Entrada/Salida de Propósito General)
- PWM (Pulse Width Modulation, modulación por ancho de pulso).
- UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, Transmisor-Receptor Asíncrono Universal).
- Temporizadores.

Motores

El robot es impulsado por dos motores de corriente continua con reducción mecánica.

Para la selección de los motores se tuvieron en cuenta las características del prototipo a desarrollar. Las opciones típicas para este tipo de robot son los motores de corriente continua, los motores paso a paso y los servomotores [25].

En la tabla 2.1 se listan ventajas y desventajas de estos tipos de motor.

Los motores de corriente continua pueden alcanzar altas velocidades y un alto torque. Son fáciles de controlar, pero requieren de reducciones mecánicas cuando la velocidad de operación es baja. Los motores paso a paso presentan precisión en sus movimientos sin requerir de realimentación, pero exigen mayor electrónica para su control. Son muy efectivos para realizar desplazamientos cortos y precisos. Los servomotores tienen un desplazamiento angular limitado y presentan gran precisión en movimientos cortos. Su principal desventaja radica en el costo relativamente alto.

²Imagen tomada de <http://www.proyecto-ciaa.com.ar>

TABLA 2.1. Comparación de características según tipo de motor.

	Motor de CC	Motor paso a paso	Servomotor
Ventajas	Alta velocidad y torque. Fácil de controlar.	Control de posición sin realimentación. Precisión en el control de posición y velocidad.	Alta precisión en control de posición y velocidad. Circuito realimentado.
Desventajas	Requiere reducción mecánica.	Requiere controlador. Baja potencia.	Limitación del recorrido. Costoso.

Se seleccionaron motores de corriente continua con caja reductora debido a que ofrecen las prestaciones suficientes para este tipo de robot, sin requerir de controladores (de hardware o software) adicionales [26]. En la figura 2.4 se puede ver una imagen del motor utilizado.

FIGURA 2.4. Imagen del motor utilizado³.

Los motores elegidos cuentan con una caja de reducción (48:1) acoplada al eje del motor eléctrico, para lograr la disminución de velocidad, y un eje lateral que permite reducir espacio al utilizarlos en una configuración diferencial. La tensión nominal de trabajo va de los 3 a 6 V. Este modelo de motorreductor es ampliamente difundido en el mercado de componentes para robótica didáctica, por lo que es de fácil adquisición y bajo costo.

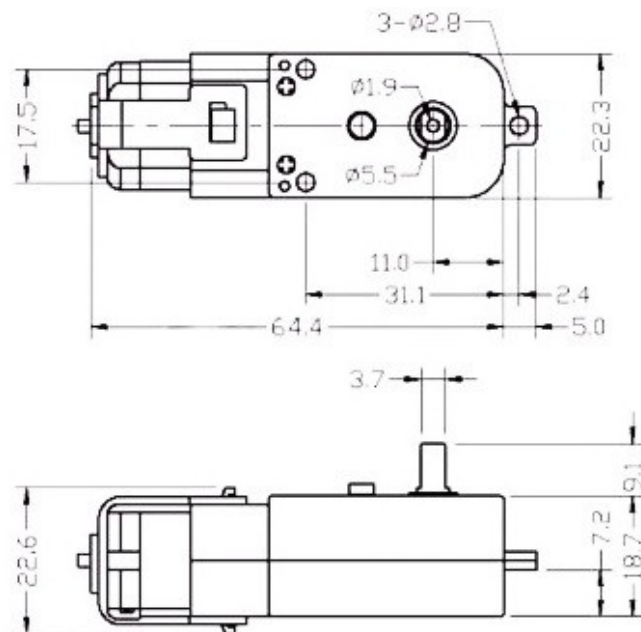
En la tabla 2.2 se referencian las principales características de los motores, según su tensión nominal de alimentación.

En la figura 2.5 se pueden observar las dimensiones del motor utilizado.

³Imagen tomada de <https://robots-argentina.com.ar/>

TABLA 2.2. Características de los motores.

	3V DC	5V DC	6V DC
Reducción		48:1	
Velocidad sin carga	125 RPM	200 RPM	230 RPM
Velocidad con carga	95 RPM	152 RPM	175 RPM
Torque	0,8 kg.cm	1 kg.cm	1,1 kg.cm
Corriente	110-130 mA	120-140 mA	130-150 mA
Dimensiones	70mm x 22mm x 18mm		
Peso	50g		
Ruido	<65dB		

FIGURA 2.5. Dimensiones del motor utilizado⁴.

Driver de motores

Para el accionamiento de motores se decidió utilizar un módulo basado en el circuito integrado L298N (doble puente H) [18] siendo que permite controlar dos motores de corriente continua de manera simultánea e independiente. El módulo ofrece conectores de entrada y salida para el puente integrado, un regulador LM78M05 interno que suministra 5V para la lógica de control, y los diodos de protección de contracorriente en las salidas [19].

En la figura 2.6 se puede observar una imagen de la placa y sus conectores. Sus características principales son:

- Tensión mínima: 5 V.
- Tensión máxima: 35 V.
- Corriente máxima: 2 A.
- Tensión de nivel lógico: 5 V.

⁴Imagen tomada de <https://robots-argentina.com.ar/>

- Potencia máxima 25 W.
- Medidas: 43 x 43 x 24 mm.

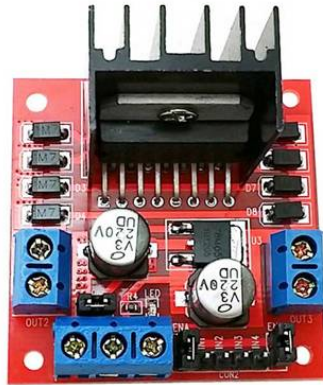


FIGURA 2.6. Driver de motores⁵.

La placa tiene la opción de habilitar o no el regulador LM7805 integrado para alimentar la parte lógica. En la figura 2.7 se observa el diagrama esquemático del módulo.

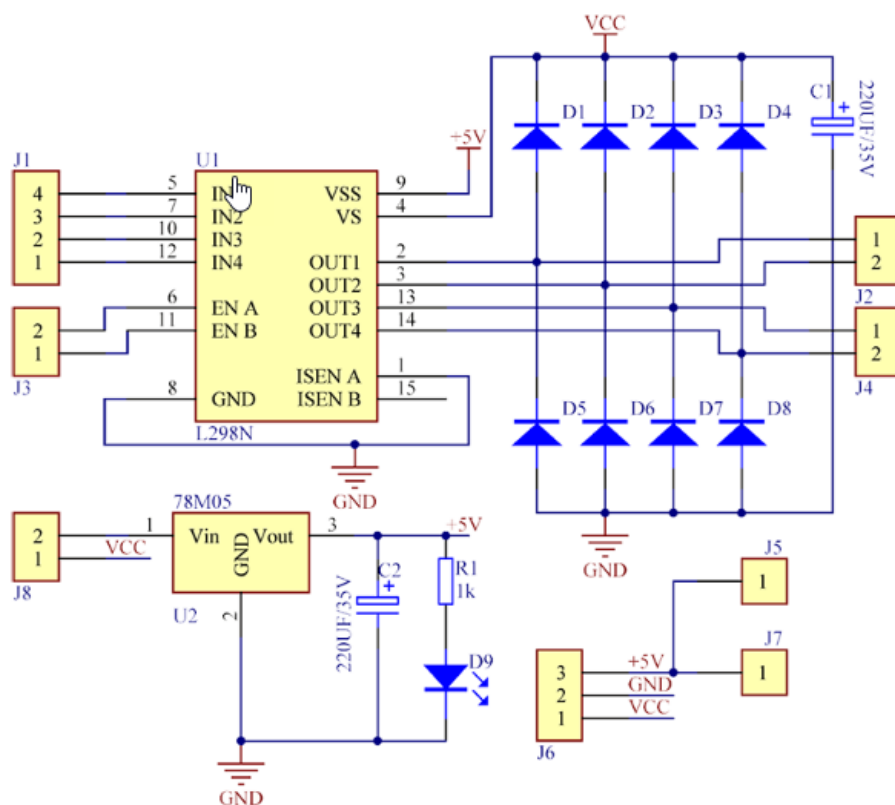


FIGURA 2.7. Diagrama esquemático del módulo⁶.

⁵Imagen tomada de <http://robots-argentina.com.ar>

⁶Imagen tomada de <http://robots-argentina.com.ar>

Módulo sensor de infrarrojos

Se utilizaron dos módulos sensores de proximidad por infrarrojos IR FC-51 [20] para la detección de obstáculos por parte del robot. Estos módulos están compuestos por un emisor de luz infrarroja (IR) y un receptor que detecta su reflejo en las superficies contra las que se enfrenta, de modo que presentan una señal en presencia de cualquier obstáculo en su parte frontal. Un potenciómetro permite ajustar el rango de detección.

El sensor presenta una respuesta estable incluso con luz ambiente o en completa oscuridad. En la figura 2.8 se observa una imagen del sensor de infrarrojos.

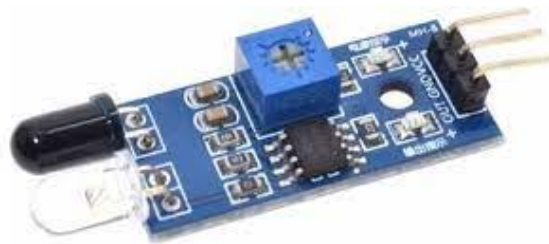


FIGURA 2.8. Módulo sensor de infrarrojos⁷.

En la figura 2.9 se muestra el circuito esquemático del sensor de infrarrojos

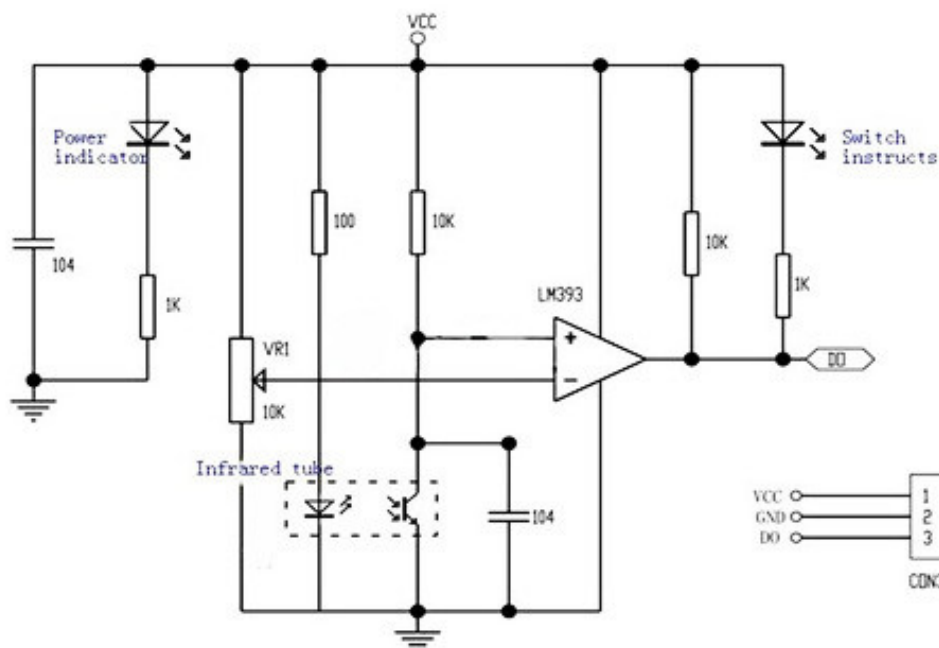


FIGURA 2.9. Diagrama esquemático del módulo sensor de infrarrojos⁸.

⁷Imagen tomada de <http://robots-argentina.com.ar>

⁸Imagen tomada de <http://robots-argentina.com.ar>

Las características del módulo son:

- Ángulo de cobertura: 35°.
- Tensión de funcionamiento: 3 V – 6 V.
- Rango de detección: 2 cm – 30 cm (ajustable con el potenciómetro).
- Tamaño: 4,5 cm x 1,4 cm x 0,7 cm.
- Discriminación: la salida toma nivel lógico bajo cuando se detecta un obstáculo (reflexión).

Módulo detector pasivo de infrarrojos

Se utilizó un Módulo detector pasivo de infrarrojos (PIR) para poder sensar movimientos alrededor del robot cuando está encendido el módulo UV-C y desactivarlo para evitar la irradiación sobre personas o animales que se acerquen al robot. Los detectores PIR captan la variación de las radiaciones infrarrojas del medio ambiente que los rodea y de esa manera reaccionan ante fuentes de energía tales como el calor del cuerpo humano o de animales. Es llamado pasivo debido a que no emite radiaciones, sino que las recibe. Su funcionamiento se basa en un sensor piroeléctrico que es un componente electrónico diseñado para detectar cambios en la radiación infrarroja recibida.

Se utilizó un módulo PIR HC-SR501 [21] que cuenta con dos potenciómetros para regular la sensibilidad y el tiempo de duración del pulso. Las principales características son:

- Tensión de operación: 4,5 V - 20 V.
- Corriente en reposo: <50 uA.
- Rango de detección: 3 a 7 metros (ajustable).
- Tiempo de retardo: 5 - 200 Seg (puede ser ajustado).
- Angulo de detección: <100° (cono).
- Tamaño: 3,2 cm x 2,4 cm x 1,8 cm.

En la figura 2.10 se puede ver una imagen del módulo PIR HC-SR501 utilizado.

2.1.2. Buzzer o Transductor electroacústico

Se utilizó un buzzer o transductor electroacústico para la señalización sonora sobre el estado de operación del robot. El transductor produce un tono audible, generado por un diafragma piezoeléctrico. El buzzer seleccionado es de tipo Activo, es decir que posee un oscilador incorporado al dispositivo. Sus características técnicas son:

- Tensión de operación: 3,3 V 5 V.
- Corriente de operación: <25 mA.
- Salida de sonido min a 10 cm: 85 dB.
- Frecuencia: 3,1 kHz.

⁹Imagen tomada de <https://naylampmechatronics.com/>

FIGURA 2.10. Módulo PIR HC-SR501⁹.

- Diámetro: 12 mm.
- Altura: 7,5 mm.
- Longitud: 7,5 mm.

En la figura 2.11 se observa imagen del transductor electroacústico utilizado.

FIGURA 2.11. Imagen del buzzer seleccionado¹⁰.

LED ultravioleta

El robot cuenta con un relé para la activación del módulo UV-C. De esta manera el dispositivo emisor de luz ultravioleta puede tener alimentación independiente y hasta intercambiarse por otro de distintas prestaciones. Para el desarrollo del prototipo se optó por un emisor LED de alta potencia, alimentado con la misma batería del robot, siendo que son más compactos y resistentes a los golpes que las lámparas ultravioleta halógenas y emiten menos radiación de calor, por lo que pueden montarse más fácilmente sin tener que contar con disipadores adicionales. Los LEDs UV-C presentan un ángulo de apertura que oscila alrededor de los 120 grados con lo que es más fácil dirigir toda la potencia de radiación UV a una superficie específica. Se utilizó un LED de alta potencia, germicida, tipo SMD3535, para el módulo de desinfección. Sus características técnicas son las siguientes:

- Tipo de LED: SMD3535.

¹⁰Imagen tomada de <https://sumador.com/products/buzzer-activo-5v-12x9-5mm>

- Color: Ultravioleta UVC .
- Potencia: 1 W.
- Corriente 120 mA.
- Tensión de Entrada: 5 a 8 VDC.
- Flujo Radiante: 7 - 12 mW.
- Longitud de Onda: 280 nm.
- Apertura del Haz: 140 grados.
- Vida útil: 30000 horas.
- Diámetro: 6,5 mm.
- Largo: 15,5 mm.
- Ancho: 8 mm.
- Alto: 5,2 mm.
- Peso: 120 g.

En la figura 2.12 se observa imagen del LED UVC Germicida.

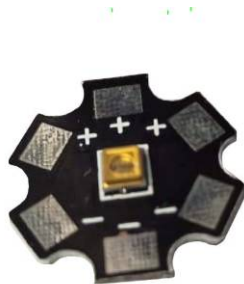


FIGURA 2.12. imagen del LED UVC Germicida seleccionado¹¹.

Módulo de comunicaciones Bluetooth

Se utilizó el módulo Bluetooth HC-05 para la comunicación con el robot [22]. El mismo ya había sido utilizado en prácticas de la asignatura "protocolos de comunicación en sistemas embebidos". El módulo permite realizar un enlace digital con un alcance de 10 m aproximadamente y no requiere antena externa ya que se encuentra integrada en el PCB. La velocidad máxima de transmisión asincrónica es de 2 Mbps y soporta modo master y modo slave. Todos los parámetros del módulo se pueden configurar mediante comandos AT.

En la figura 2.13 se observa el módulo HC-05.

¹¹Imagen tomada de <https://www.dled.com.ar>

¹²Imagen tomada de <https://www.todomicro.com.ar/arduino/222-modulo-bluetooth-hc05>

FIGURA 2.13. Módulo Bluetooth HC-05¹².

Las características del módulo son:

- Tensión de operación: 3,6 V - 6 V DC.
- Consumo corriente: 50 mA.
- Bluetooth: V2.0+EDR.
- Frecuencia: banda ISM 2,4 GHz.
- Modulación: GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying).
- Potencia de transmisión: 4 dBm, Class 2.
- Sensibilidad: -84 dBm a 0.1 % BER.
- Alcance 10 m.
- Tamaño: 3,7 cm x 1,6 cm.

Baterías

En función del consumo y la intención de no dedicar mayor espacio a las celdas de alimentación, se emplearon dos baterías de Ion-litio tipo 18650. La capacidad de estas baterías varía de un modelo a otro pero suelen estar comprendidas entre los 2100 y los 4000 mAh, y permiten ser recargadas con una media de entre 600 a 1000 veces sin que se estropeen ni pierdan efectividad [23]. Su tensión nominal es de 3,7 V (hasta 4,2 V en vacío).

Las baterías van conectadas en serie para lograr una tensión de 7,4 V, acorde a la alimentación de los motores, y con un margen superior necesario para el correcto funcionamiento del regulador de tensión de 5 V del módulo de accionamiento de motores. Las baterías se insertaron en un portapilas comercial. En la figura 2.14 se muestra las dos baterías 18650 ya instaladas en su portapila.



FIGURA 2.14. Baterías 18650 en su portapila .

2.2. Requerimientos

En esta sección se enumeran los requerimientos planteados en la planificación inicial del proyecto. Los requerimientos se han dividido en funcionales y no funcionales.

1. Requerimientos funcionales

- a) Capacidad de locomoción. El robot debe ser capaz de desplazarse por medio de ruedas motorizadas, a través de superficies planas.
- b) Capacidad de percepción. El robot debe ser capaz de detectar y obtener información del medio.
- c) Capacidad de comunicación inalámbrica. El robot debe ser capaz de establecer una comunicación por medio de un módulo Bluetooth, con una aplicación android en un celular o tablet.
- d) El robot deberá funcionar con alimentación a batería recargable.
- e) El proyecto debe ser extensible a una posible herramienta de enseñanza e investigación.

2. Requerimientos no funcionales

- a) El robot no debe emitir luz UV-C cuando detecte movimiento a su alrededor, para no producir daños a la salud de personas o animales con los que interactúe.
- b) El diseño del robot debe respetar regulaciones en cuanto a radiación en el espectro ultravioleta.
- c) Se utilizarán componentes electrónicos disponibles comercialmente en Argentina.

Supuestos iniciales del proyecto

Para el desarrollo de este trabajo se supuso inicialmente que:

- Se iba a contar con disponibilidad de los laboratorios e instrumental de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e innovación productiva. UTN. Buenos Aires, para cubrir la tarea de desarrollo.

- Se iba a disponer de tiempo durante la jornada laboral para la realización del mismo.
- Se iba a disponer de todos los componentes y herramientas necesarios.

Estos supuestos, incluidos en la planificación del trabajo, se cumplieron solo en parte, ya que la pandemia por COVID-2019 limitaron el acceso a los laboratorios e instrumental, a la vez que se incrementó el tiempo necesario para las actividades laborales desarrolladas en paralelo al proyecto.

Capítulo 3

Diseño e implementación

En este capítulo se enumeran y desarrollan los aspectos considerados a la hora diseñar el robot. Se tuvieron en cuenta los alcances establecidos y las posibilidades económicas de solventar el proyecto.

3.1. Diseño mecánico

En esta sección se presenta la conformación del prototipo desde un punto de vista Mecánico. Se describe el diseño del chasis y la carcasa del robot, la estructura sobre la que se monta la totalidad de los componentes, las características de los motores y demás partes constitutivas.

3.1.1. Diseño del chasis y la carcasa del robot

Se optó por una configuración de tracción de tipo diferencial [27] que permite al robot girar sobre su propio eje. Se usan dos ruedas controladas individualmente junto con una rueda loca como tercer punto de apoyo. Esta configuración permite al robot moverse en espacios interiores y evitar obstáculos sin quedar atascado. Se construyó una base en acrílico para montar los motores y colocar encima las placas electrónicas de control y accionamiento del robot. En la figura 3.1 se muestra la base y la distribución física de los motores.

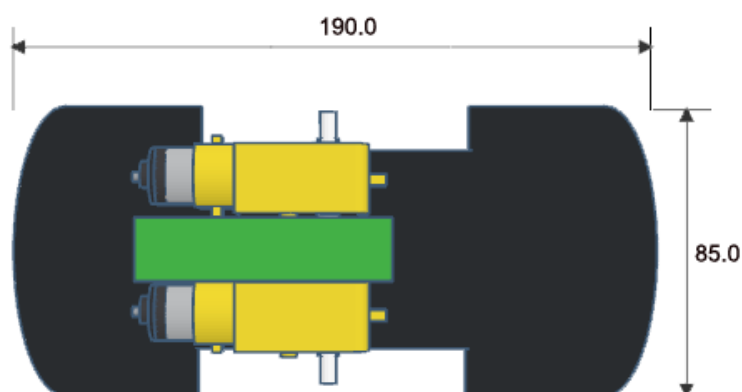


FIGURA 3.1. Base y distribución de los motores.

Las dimensiones de esta base se determinaron en función de las dimensiones de los motores y de la placa principal de procesamiento. En la figura 3.2 se muestra la base en relación con la placa EDU-CIAA, ruedas y baterías.

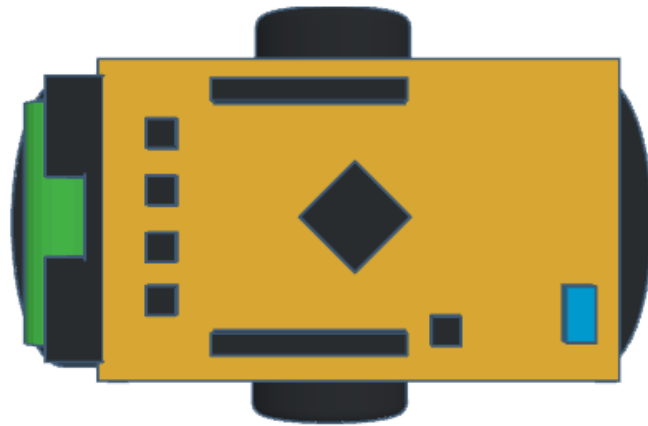


FIGURA 3.2. Base y distribución de los motores.

El chasis se completa con una base circular sobre la que se integrarán los sensores y el resto de la carcasa. Esta forma responde a la necesidad de evitar que el robot quede atorado entre obstáculos (como pueden ser patas de mesas o sillas). La base circular sumada a la tracción diferencial permite al robot salir de cualquier encrucijada por el mismo camino por el que accedió, ya que puede rotar sobre sí mismo y no presenta irregularidades que puedan trabarse. En la figura 3.3 se muestra la integración de la base inicial con el chasis circular.

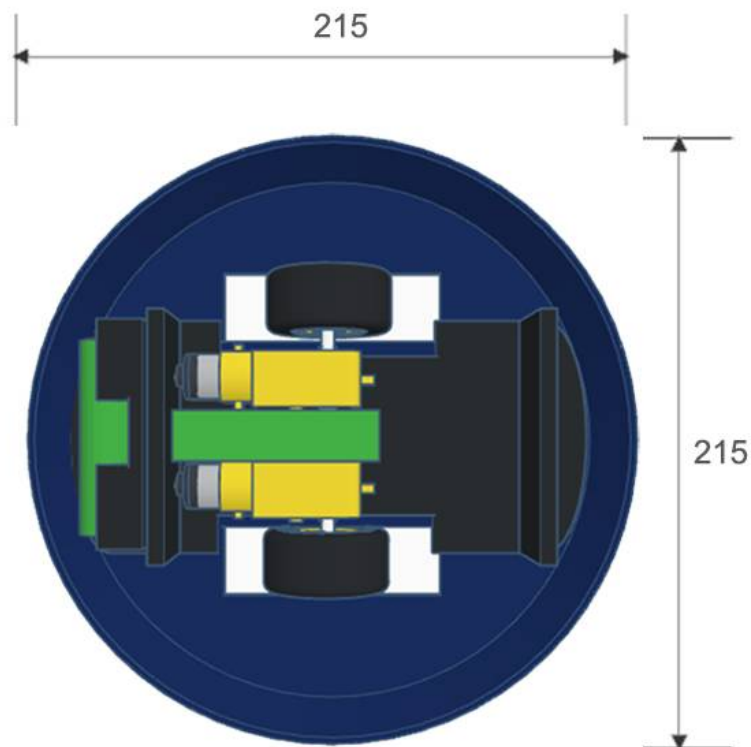


FIGURA 3.3. Base circular.

En la figura 3.4 se muestra una vista 3D de la base y los componentes principales (motores, ruedas, driver de motores, baterías y placas de control).

Se imprimió en 3D una carcasa para el módulo PIR, de modo que quede expuesta

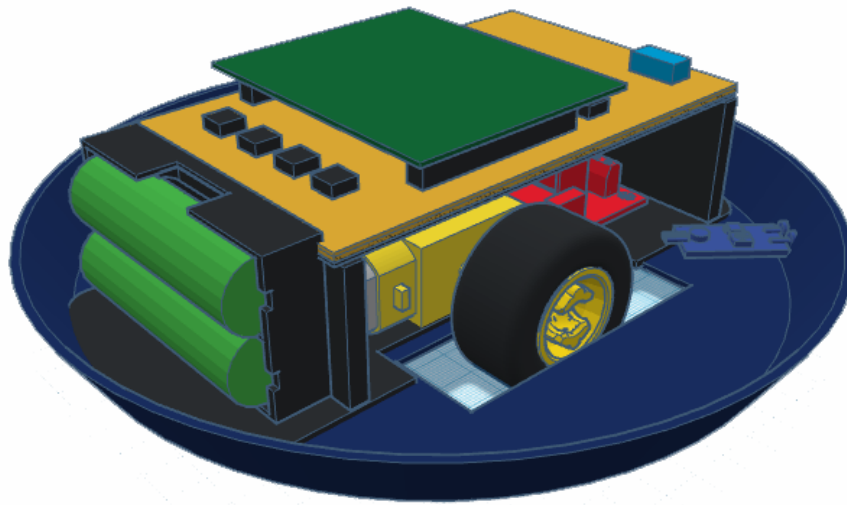


FIGURA 3.4. Modelo 3D de la base y componentes.

la parte que permite el sensado a la vez que se protege a la placa electrónica y se facilita su montaje en la parte superior del robot. En la figura 3.5 se muestra se observa la imagen 3D de la carcasa para el módulo PIR.



FIGURA 3.5. Imagen 3D de la carcasa para el módulo PIR.

Para facilitar el movimiento de la plataforma robot, en configuración diferencial, se incluyó un tercer punto de apoyo o "rueda loca" que mantiene al robot horizontal durante su movimiento. La pieza se compone de un soporte impreso en 3D, y una bola que se mueve libremente dentro del soporte. En la figura 3.6 se muestra se observa la imagen 3D del soporte.

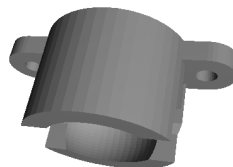


FIGURA 3.6. Imagen 3D de la pieza para el tercer punto de apoyo del robot.

En la figura 3.7 se muestra una vista 3D de la base completa con la tapa y el sensor PIR en la parte superior. La tapa se mantuvo en forma semitransparente para que pueda apreciarse la disposición de las partes internas y la configuración final.

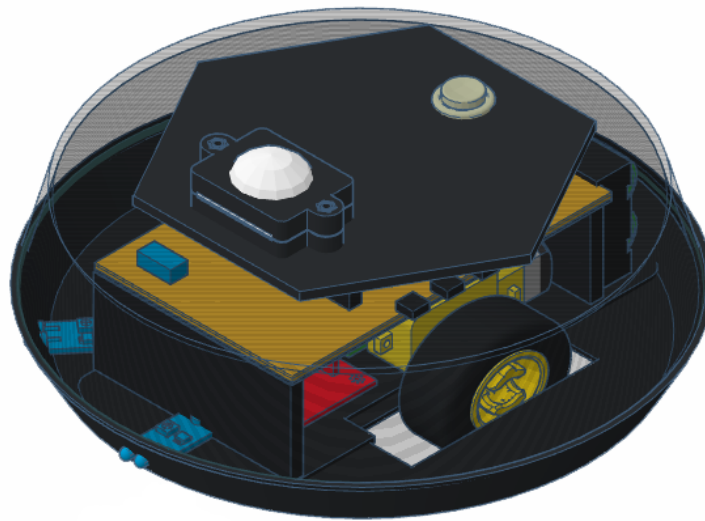


FIGURA 3.7. Imagen 3D de la base completa con la tapa y el sensor PIR.

3.2. Diseño de hardware

En esta sección se detallan los componentes y módulos electrónicos que forman parte del robot y se describe la función que desempeña cada uno de ellos. En la figura 3.8 se puede apreciar un diagrama en bloques de los módulos que conforman el robot.

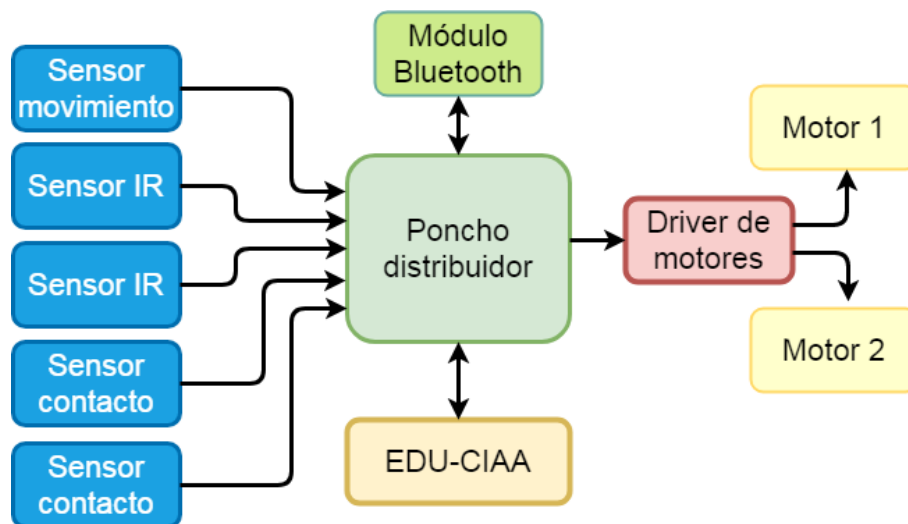


FIGURA 3.8. Diagrama en bloques del robot.

3.2.1. Placa de expansión de hardware

La denominación “Poncho” es utilizada dentro de la comunidad del proyecto CIAA para referirse a una placa de expansión o “shield” que se conecta sobre algún procesador de la familia CIAA. Para este trabajo se diseñó una placa de

expansión de hardware con el fin de facilitar las conexiones de la placa EDU-CIAA con los sensores, actuadores y el módulo de comunicación bluetooth.

Diseño esquemático de la placa de expansión de hardware

La placa de expansión de hardware presenta varios conectores para simplificar en conexionado de los distintos sensores, ya que varios de ellos requieren no solo ser cableados a un determinado pin de la placa EDU-CIAA, sino que además necesitan conexión a las líneas de alimentación. Los conectores corresponden a los siguientes sensores / señales de entrada:

- Sensores infrarrojos (2).
- Finales de carrera (2).
- Sensor de movimiento (1).
- Pulsador de cambio de modo (1).

La elección de los puertos utilizados para la atención de cada sensor contempló la distancia entre pines de modo de optimizar el ruteo de la placa. En la figura 3.9 se observa detalle de cada conector en la placa de expansión con los puertos de la EDU-CIAA.

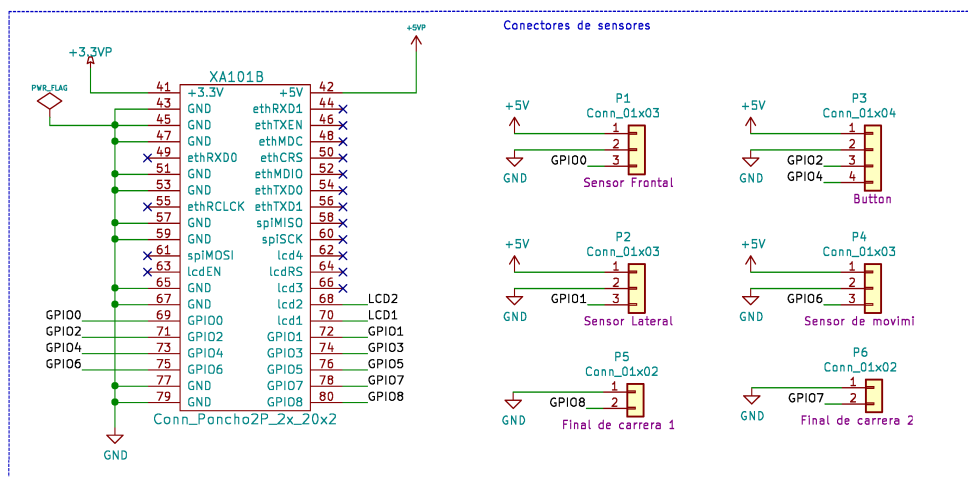


FIGURA 3.9. Esquemático de conexionado de sensores.

La placa de expansión permite también la conexión con el módulo de control de motores, como dispositivo de salida, y conecta con los siguientes actuadores integrados en la placa:

- Relé actuador.
- Buzzer
- LED indicador de alimentación.
- LED indicador de relé encendido.

El relé se utiliza para activar o desactivar dispositivos conectados a la bornera de la placa, de modo que los mismos puedan contar con una alimentación independiente. En el caso particular de la presente aplicación el relé permite conmutar el módulo de luz ultravioleta germicida. La utilización del relé permite no solo la

aislación eléctrica del circuito de control con el dispositivo a controlar, sino que habilita también la posibilidad de intercambiar el módulo UVC por otro de distintas características. Por ejemplo, se podría utilizar otro tipo de lámpara UVC con su propia alimentación. En la figura 3.10 se muestra el conexionado del relé y su bornera.

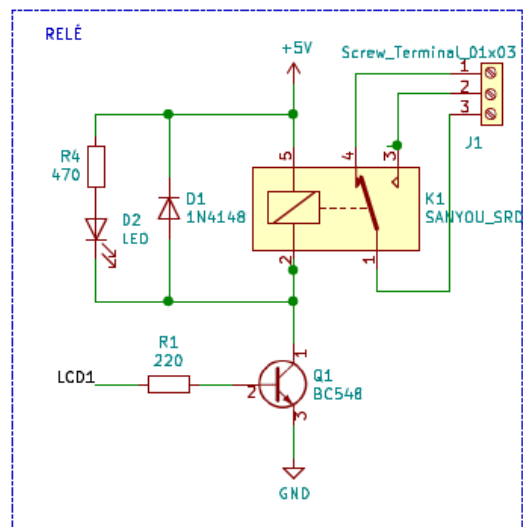


FIGURA 3.10. Esquemático de conexionado del relé.

El buzzer aporta señalización sonora sobre el estado de operación del robot. Se utilizó un Buzzer Activo que posee su propia frecuencia de oscilación. Al presionar el pulsador (en forma demorada) se producen dos pitidos que indican el paso del modo teleoperado al modo autónomo, y un pitido al realizar el paso inverso. En la figura 3.11 se observa el conexionado del buzzer por medio de un transistor.

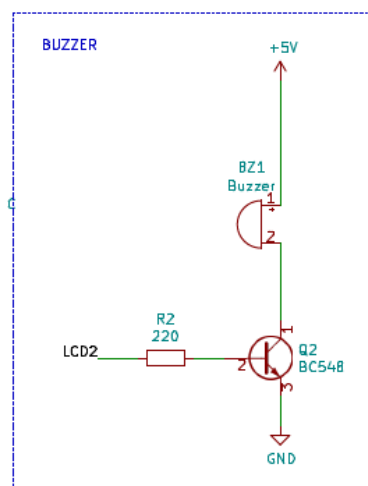


FIGURA 3.11. Esquemático de conexionado del buzzer.

La placa posee un zócalo para el conexionado del módulo de comunicación bluetooth (HC-05) y otro zócalo destinado a dispositivos I2C (como podría ser un módulo de giróscopo o acelerómetro). El módulo bluetooth permite la comunicación con el dispositivo externo (teléfono celular o Tablet) para el modo de operación remoto. El módulo se conecta directamente sobre la placa, para evitar cables y por lo tanto, la posibilidad de ruido en la conexión. También resulta conveniente

para reducir el espacio del montaje. En la figura 3.12 se observa un detalle del conexionado en la placa para el módulo Bluetooth HC-05 y cualquier dispositivo I2C.

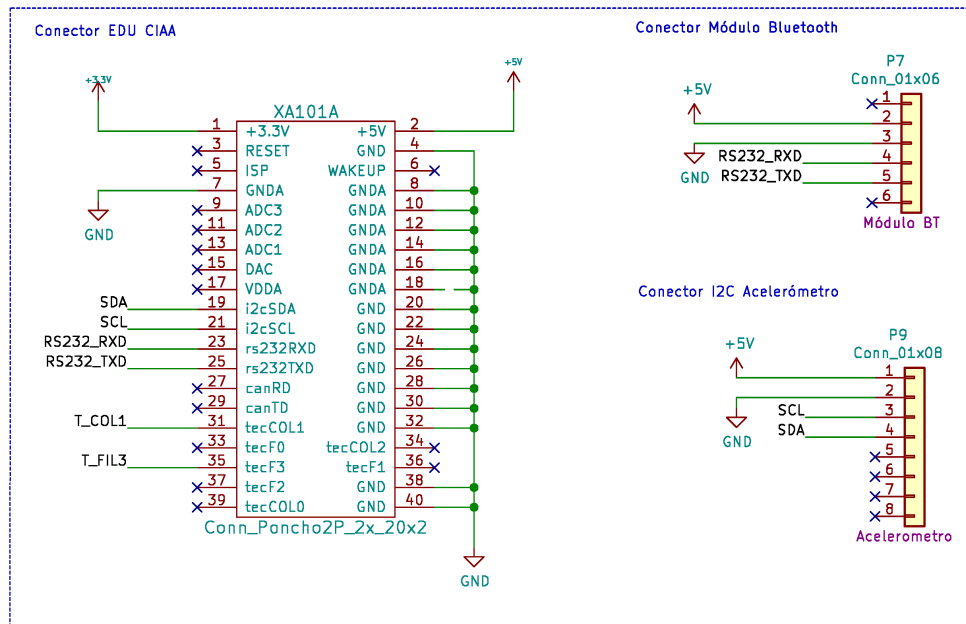


FIGURA 3.12. Conectores para los módulos Bluetooth e I2C.

Diseño PCB de la placa de expansión de hardware

La placa fue diseñada durante la cursada de la asignatura "diseño de circuitos impresos", según los lineamientos expuestos en la documentación para placas de expansión de hardware para la EDU-CIAA.

El diseño de PCB se realizó con el software KiCad [28] (Versión 5.1.9), el cual es un paquete de software para el diseño de circuitos electrónicos o EDA (Electronic Design Automation). En la figura 3.13 se observa el modelo 3D de la placa y sus componentes.

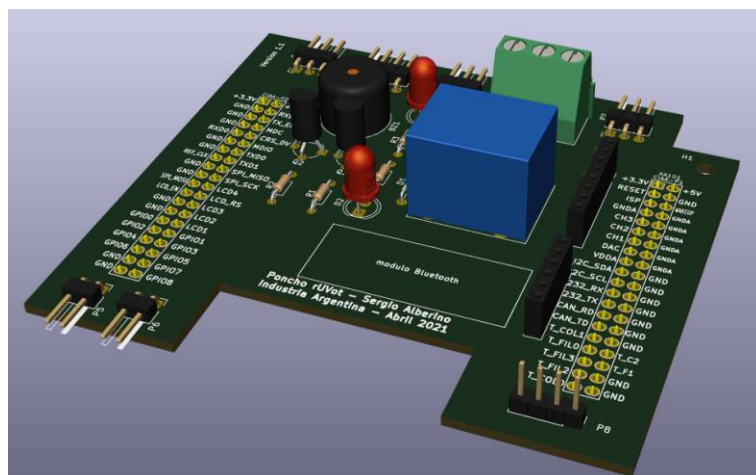


FIGURA 3.13. Vista del modelo 3D de la placa de expansión de hardware.

Una vez completado y validado el diseño, se generaron los archivos de fabricación para su procesamiento con técnicas caseras. En la figura 3.14 se puede observar una imagen de la placa procesada, con sus componentes soldados y el módulo Bluetooth insertado en el conector correspondiente.

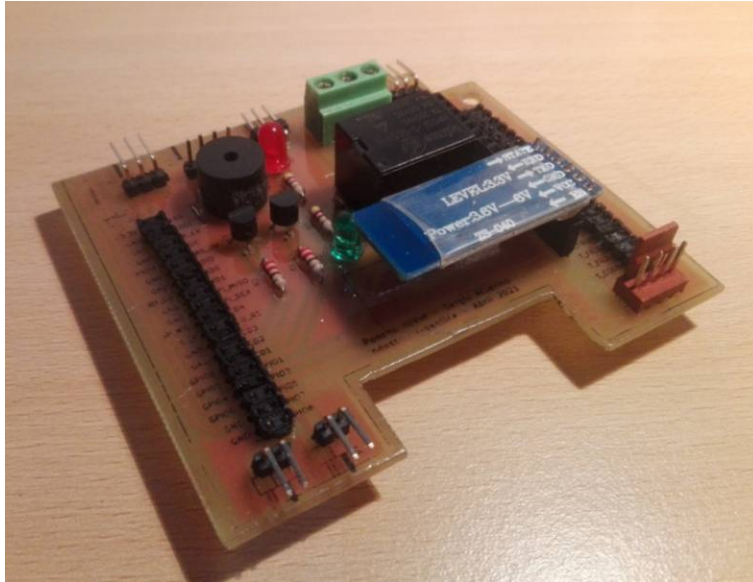


FIGURA 3.14. Fotografía de la placa desarrollada.

Conexionado para motores

Para el accionamiento de los motores se utilizó modulación por ancho de pulsos (PWM, por su sigla en inglés). La placa EDU-CIAA posee un solo modulo PWM con 11 salidas asociadas. Todas las salidas PWM comparten la misma frecuencia, aunque puede asignarse un valor de ciclo de actividad en forma independiente.

- PWM0: GPIO_2.
- PWM1: GPIO_8.
- PWM2: T_FIL1.
- PWM3: T_FIL2.
- PWM4: T_FIL3.
- PWM5: T_COL0.
- PWM6: T_COL1.
- PWM7: T_COL2.
- PWM8: LCD_1.
- PWM9: LCD_2.
- PWM10: LCD_3.

Se utilizaron las líneas de T_FIL3: PWM4 y T_COL1: PWM6 para el control de los motores.

Disposición de Entradas y Salidas

Se utilizaron los pines de entrada/salida de Propósito General (GPIO, General Purpose Input/Output) de la placa Edu-CIAA para el conexionado de sensores y actuadores. El módulo GPIO de la sAPI permite modelar un único pin de entrada/salida o un puerto completo. Los pines utilizados son:

- GPIO0: Sensor IR frontal.
- GPIO1: Sensor IR lateral.
- GPIO2: Pulsador externo.
- GPIO3: Dirección motor.
- GPIO4: Señalización Pulsador.
- GPIO5: Dirección motor.
- GPIO6: Sensor PIR.
- GPIO7: Sensor de contacto.
- GPIO8: Sensor de contacto.
- LCD_1: Relé.
- LCD_2: Buzzer.

3.3. Diseño de software

Para la arquitectura del firmware se tuvo en cuenta un patrón de diseño de arquitectura de control ambiental [29], ya que se trata de un patrón de control general que incluye procesos de sensor y actuador, y es el que más se acerca al modelo de comportamiento del robot. La programación se realizó utilizando lenguaje C sobre el firmware de la EDU-CIAA versión 3 como capa de abstracción de hardware. Se utilizaron módulos de software de la biblioteca sAPI para acceder de manera simple a los diferentes periféricos. Se modularizó el firmware en archivos, de modo de mantener en un mismo módulo de software las instrucciones relacionadas con cada periférico y que puedan utilizarse (y reutilizarse) en forma ordenada. Se usó una máquina de estados finitos como rutina principal para el comportamiento autónomo del robot, en función reactiva a la información obtenida por los sensores.

El diseño del firmware se organizó como una estructura de capas, lo cual permite la separación de las partes que componen el sistema.

3.3.1. Módulos de software

Máquina de estados finitos

Las Máquinas de Estado Finitas (FSM, por su sigla en inglés) son utilizadas ampliamente como rutinas para reconocimiento de secuencias de datos, para interpretación de tramas de comunicación serie, y para el ordenamiento de tareas ante distintas condiciones medidas. Son básicamente estructuras de programa cuyo comportamiento está determinado por el “estado” en el que se encuentran y por

variables (generalmente booleanas) de entrada, ofreciendo para cada caso una salida y un "estado próximo" (que puede tratarse del mismo estado en el que se encuentra). El uso de FSM es sencillo, implica un bajo consumo de procesamiento, y resulta flexible para el agregado de nuevas condiciones y estados. Sin embargo, cuando el número de entradas crece, su implementación y mantenimiento puede resultar complejo ya que su comportamiento se establece en el código fuente. En la figura 3.15 se muestra un esquema de máquina de estados como el utilizado en el control del robot.

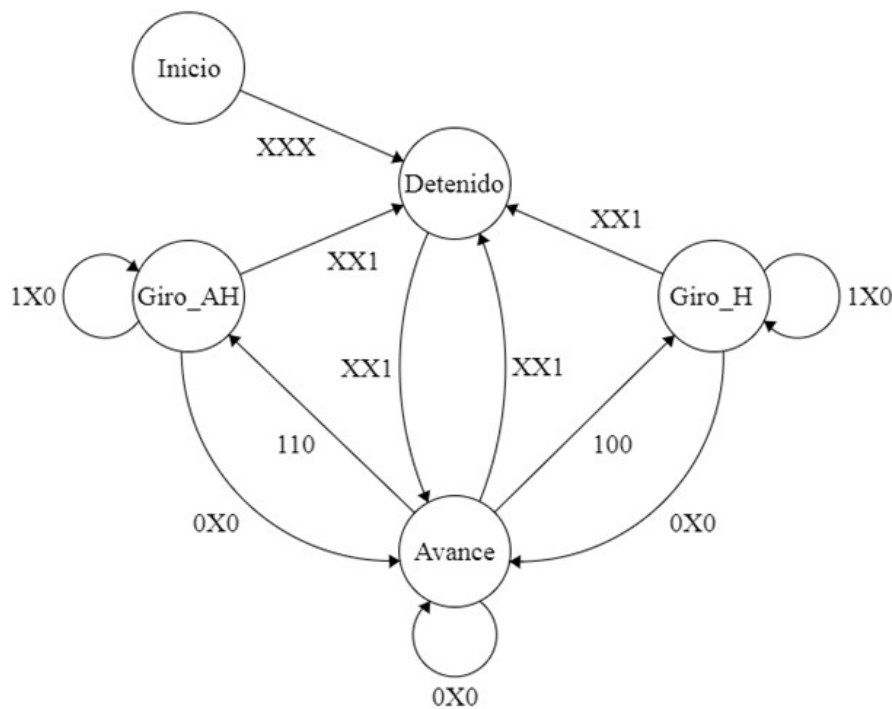


FIGURA 3.15. Esquema de máquina de estados como el utilizado en el control del robot.

Los estados están asociados a las acciones que realiza el robot:

- Estado Detenido.
- Estado Avanzando.
- Estado Girando en sentido horario
- Estado Girando en sentido antihorario

Se utilizó un método en el que la máquina de estados se actualiza a partir de los datos registrados en una estructura de datos de estados/entradas/salidas almacenada en un archivo header en la memoria del microcontrolador (librería MdE.h). Las variables de entrada son de tipo booleano y las acciones planteadas por la tabla corresponden a comportamientos puramente reactivos. La solución ha sido presentada en un trabajo de investigación anterior [30]. En la figura 3.16 se representa en forma de diagrama de flujo la secuencia de la máquina de estados cuyas acciones responden a las directivas tomadas desde la tabla de la librería MdE.h.

La ventaja del método utilizado radica en el uso de una aplicación en una PC que permite generar el contenido del archivo header a partir de una hoja de cálculo

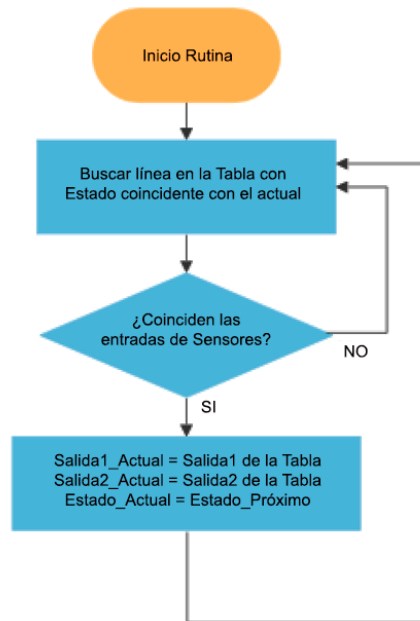


FIGURA 3.16. Diagrama de flujo básico de la rutina que configura la máquina de estados.

en la que se pueden consignar las distintas acciones a partir de las combinaciones de estado actual y condiciones de entrada.

En la planilla de configuración, es posible “enmascarar” condiciones que son indiferentes al comportamiento usando el valor “X” (interpretado semánticamente como “indeterminado”), que luego es expandido por la aplicación intérprete de modo que finalmente en la estructura de datos de la FSM se consideren todas las condiciones como valores booleanos.

La aplicación verifica que no se produzcan combinaciones redundantes o inválidas y se encarga de construir el archivo header con la estructura ordenada de datos para la actualización de la FSM, para ser transferido al microcontrolador del robot. En la figura 3.17 se observa un ejemplo de configuración de la FSM con una tabla escrita en una planilla de cálculo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Estado	SD1	SD2	SD3	Pul	SWD	SWI	IrL	IrF	COM	Par	Estadon+1	Comentarios
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	100	1	Sin obstaculo adelante, Avanza
3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	3	90	1	Obstáculo al frente,IrL libre, Gira+
4	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	90	1	Obstáculo al frente,y lateral, Gira -
5	1	0	0	0	0	1	X	X	X	2	120	1	Toca Final de carrera, gira-
6	1	0	0	0	0	X	X	X	X	3	120	1	Toca Final de carrera, gira +
7	1	0	0	0	1	X	X	X	X	1	0	0	Se presionó el pulsador, pasa al estado 0
8	0	0	0	0	1	X	X	X	X	1	100	1	Se presionó el pulsador, pasa al estado 1

FIGURA 3.17. Ejemplo de configuración de la FSM con una tabla escrita en una planilla de cálculo.

La FSM se implementa como rutina principal, tomando los datos de la tabla procesada y consignada en el archivo header, y partiendo siempre de un Estado Inicial. La rutina de la FSM utiliza pocos recursos de procesamiento, relevando las variables de entrada y el valor del estado actual, y localizando en la tabla la opción de salida y el Estado al que debe pasar .

Este método reduce considerablemente el tamaño del código de la rutina de actualización de FSM, a la vez que facilita realizar cambios en el comportamiento del robot al cambiar solo los datos en la librería MdE.h. En el código 3.1 se observa el listado de los valores ordenados y expandidos a partir de la tabla de la figura 3.17.

```

1 // ***** TABLA *****
2 unsigned char Planilla [60][6] =
3 {
4     {0,0,16,1,100,1},
5     {0,0,17,1,100,1},
6     {0,0,18,1,100,1},
7     {0,0,19,1,100,1},
8     {0,0,20,1,100,1},
9     {0,0,21,1,100,1},
10    {0,0,22,1,100,1},
11    {0,0,23,1,100,1},
12    {0,0,24,1,100,1},
13    {0,0,25,1,100,1},
14    {0,0,26,1,100,1},
15    {0,0,27,1,100,1},
16    {0,0,28,1,100,1},
17    {0,0,29,1,100,1},
18    {0,0,30,1,100,1},
19    {0,0,31,1,100,1},
20    {1,0,0,1,100,1},
21    {1,0,0,3,120,1},
22    {1,0,1,3,120,1},
23    {1,0,1,3,90,1},
24    {1,0,2,3,120,1},
25    {1,0,3,2,90,1},
26    {1,0,3,3,120,1},
27    {1,0,4,3,120,1},
28    {1,0,5,3,120,1},
29    {1,0,6,3,120,1},
30    {1,0,7,3,120,1},
31    {1,0,8,2,120,1},
32    {1,0,8,3,120,1},
33    {1,0,9,2,120,1},
34    {1,0,9,3,120,1},
35    {1,0,10,2,120,1},
36    {1,0,10,3,120,1},
37    {1,0,11,2,120,1},
38    {1,0,11,3,120,1},
39    {1,0,12,2,120,1},
40    {1,0,12,3,120,1},
41    {1,0,13,2,120,1},
42    {1,0,13,3,120,1},
43    {1,0,14,3,120,1},
44    {1,0,14,2,120,1},
45    {1,0,15,2,120,1},
46    {1,0,15,3,120,1},
47    {1,0,16,1,0,0},
48    {1,0,17,1,0,0},
49    {1,0,18,1,0,0},
50    {1,0,19,1,0,0},
51    {1,0,20,1,0,0},
52    {1,0,21,1,0,0},
53    {1,0,22,1,0,0},
54    {1,0,23,1,0,0},
55    {1,0,24,1,0,0},
56    {1,0,25,1,0,0},

```

```

57     {1,0,26,1,0,0},
58     {1,0,27,1,0,0},
59     {1,0,28,1,0,0},
60     {1,0,29,1,0,0},
61     {1,0,30,1,0,0},
62     {1,0,31,1,0,0},
63     {255,0,0,0,0,0}
64 };

```

CÓDIGO 3.1. Ejemplo de estructura de datos almacenada en MdE.h"

Sensores

El módulo de software dedicado a los sensores (sensors.c) se encarga de inicializar las variables relacionadas con los sensores, y realizar la lectura de cada uno de ellos. Para facilitar el tratamiento de la información de los sensores se representan sus estados con valores booleanos en una única variable que se utiliza como entrada en la máquina de estados.

Motores

El módulo de software dedicado al control de los motores recibe del módulo de máquina de estados la indicación de qué acción debe realizar cada motor en cada momento. Las acciones dadas por los motores, en concordancia con los estados (Avanzar, girar o detenerse) se codificaron por medio de un número identificador (ID). se utilizó también un parámetro modificador, que da mayor detalle la acción a realizar. Esta codificación de acciones se realizó con el fin de simplificar el uso de la tabla de configuración de la máquina de estado, de modo que las acciones a realizar queden unívocamente identificadas con valores numéricos. Por ejemplo a la acción avanzar le corresponde el ID número 1, con lo que se activarán los dos motores en forma simultánea y en la misma dirección, mientras que el valor que lo acompaña (entre 0 y 255) determina el valor de PWM que se aplicará a los motores.

3.3.2. Aplicación

Para el desarrollo de la aplicación móvil se utilizó MIT App Inventor [31]. Se trata de un entorno gráfico de programación que utiliza un lenguaje visual basado en bloques el cual permite en forma sencilla programar aplicaciones totalmente funcionales para dispositivos Android. La herramienta es de distribución gratuita y aunque las aplicaciones desarrolladas en este entorno no alcanzan una gran complejidad, es posible cubrir con ellas un gran número de necesidades básicas en un dispositivo móvil.

En el entorno se diferencian un módulo diseñador del contenido y apariencia de la aplicación a desarrollar (App Inventor Designer), y módulo editor de bloques (App Inventor Blocks Editor) con el que se programa en forma visual el comportamiento de los componentes de la aplicación, ensamblando los bloques como piezas de un esquema. En la figura 3.18 se observa cómo se conforma el programa usando el editor de bloques.

Como aspectos positivos del uso de MIT App Inventor es de resaltar que se trata de un software gratuito y de fácil configuración, al que se puede acceder desde

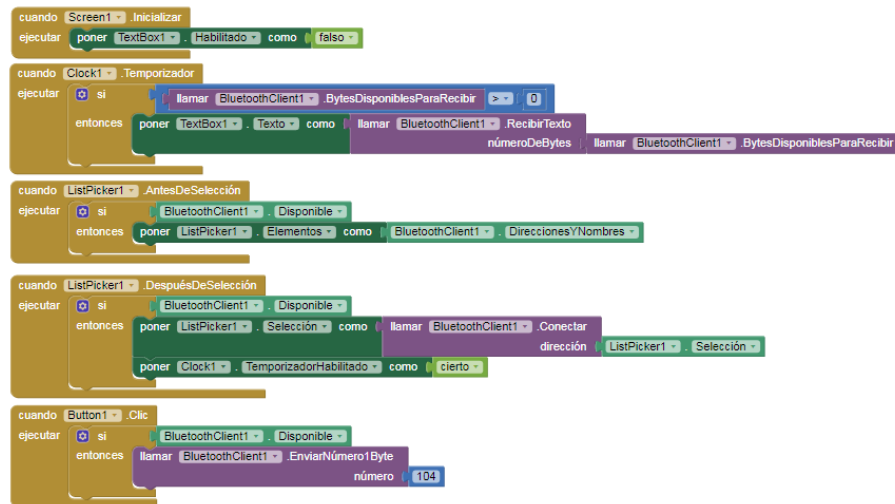


FIGURA 3.18. Programación en bloques usando el MIT App inventor.

cualquier computadora sin necesidad de instalarlo. Las limitaciones principales del uso de MIT App Inventor radican en que solo permite desarrollos para la plataforma Android, y que no se puede acceder a la interfaz de desarrollo (IDE) sin conexión a internet.

En la figura 3.19 se muestra cómo queda configurada la pantalla de la aplicación móvil implementada con MIT App Inventor.

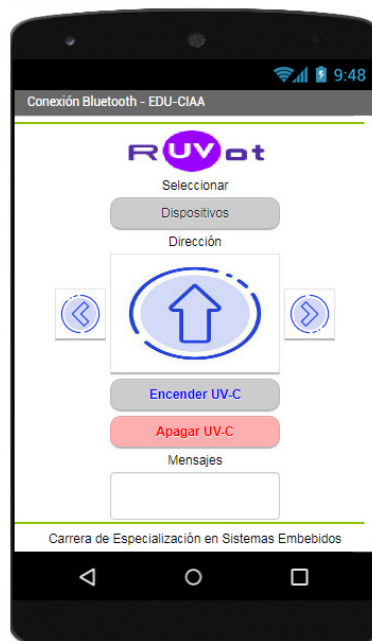


FIGURA 3.19. Imagen de la pantalla de la aplicación móvil implementada con MIT App inventor.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

En este capítulo se detallan los ensayos realizados para comprobar el correcto funcionamiento de hardware y firmware, y la interacción de los módulos que componen el robot.

4.1. Pruebas funcionales del hardware

Para las pruebas funcionales de hardware y software fue necesario completar la construcción mecánica del prototipo, de modo que se pudiera testear el comportamiento del robot frente a obstáculos de distinto tipo. En la figura 4.1 se presenta una imagen del prototipo armado y cableado, en estado funcional, sin la tapa superior.

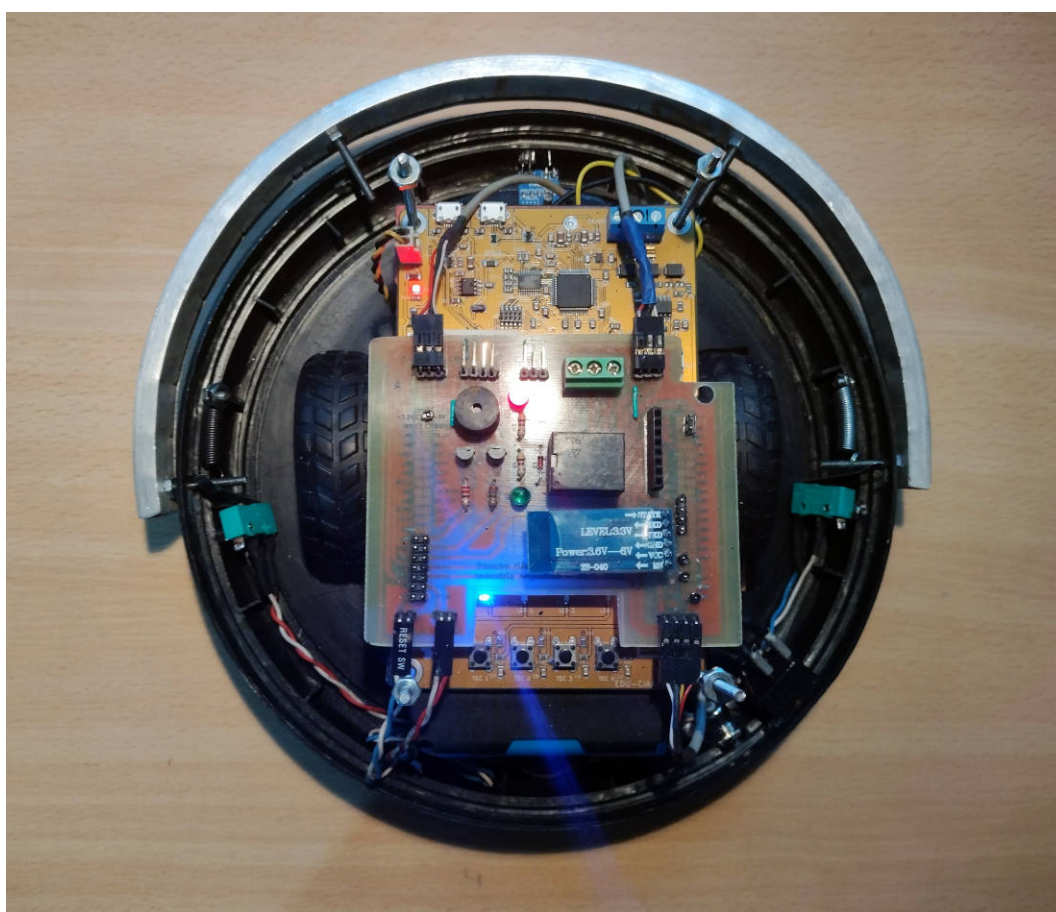


FIGURA 4.1. Prototipo armado y cableado, sin la tapa superior.

4.1.1. Validación de navegación autónoma**4.1.2. Validación de movimientos del robot**

Se verificó que el robot responde a los “estímulos” detectados por los sensores según lo determinado en la librería `mde.h`, como tabla de configuración de la máquina de estados principal. Se utilizaron los LEDs de la placa EDU-CIAA como testigo del estado tomado por la FSM en cada momento.

4.1.3. Validación módulo de comunicaciones Bluetooth**4.1.4. Validación detección de obstáculos****4.2. Pruebas no Funcionales**

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se presenta un breve resumen del trabajo realizado, los problemas encontrados y los resultados obtenidos. También se mencionan mejoras a realizar a futuro.

5.1. Resultados obtenidos

El trabajo finalizó con el desarrollo exitoso de un prototipo de robot móvil para tareas de desinfección por efecto de rayos ultravioletas germicidas, donde se cumplieron los requerimientos planteados en la planificación del trabajo. Se desarrolló con éxito un circuito impreso como placa de expansión de hardware, y un firmware funcional para la placa EDU-CIAA. Se verificó el funcionamiento de los modos autónomos y de teleoperación del robot. Se validó que el dispositivo puede ser utilizado para desinfección sin residuos químicos en espacios públicos y en el hogar.

La planificación, se cumplió dentro de los plazos esperados, aunque se manifestó el riesgo “Imposibilidad de cumplir con los plazos planteados para el desarrollo del proyecto”. Esto se debió a la reducción de tiempo disponible para dedicarle al proyecto, debido a actividades laborales y estar cursando las últimas materias de la carrera. Al haber extendido el plazo para la entrega y haber re-planificado actividades se logró mitigar este inconveniente.

5.2. Conocimientos aplicados

Durante la realización de este trabajo se aplicaron conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera de especialización. En particular, fueron importantes los aportes de las siguientes asignaturas:

- Gestión de proyectos para realizar la planificación y generar toda la documentación inicial.
- Ingeniería de software para definir los requerimientos básicos y pensar el proyecto desde las necesidades del usuario. También se aplicaron los conocimientos relativos a la implementación de un repositorio GIT para el resguardo y versionado de toda la documentación del proyecto.
- Programación de microcontroladores para la implementación del firmware en C del microcontrolador ARM Cortex-M4 de la placa EDU-CIAA. En la asignatura se presentó todo lo referente a la modularización por archivos implementada en este trabajo y el modelo de máquinas de estado finito.

- Protocolos de comunicaciones en sistemas embebidos para conocer las posibilidades de comunicación de la placa EDU-CIAA con otros dispositivos, en particular con el módulo Bluetooth. También en esta asignatura se presentó el entorno MIT App Inventor que se utilizó para el desarrollo de la aplicación de control.
- Diseño de Circuitos Impresos para el desarrollo de la placa de expansión de hardware (poncho) utilizada en este trabajo, y el aprendizaje de buenas costumbres de diseño de PCB.

5.3. Próximos pasos

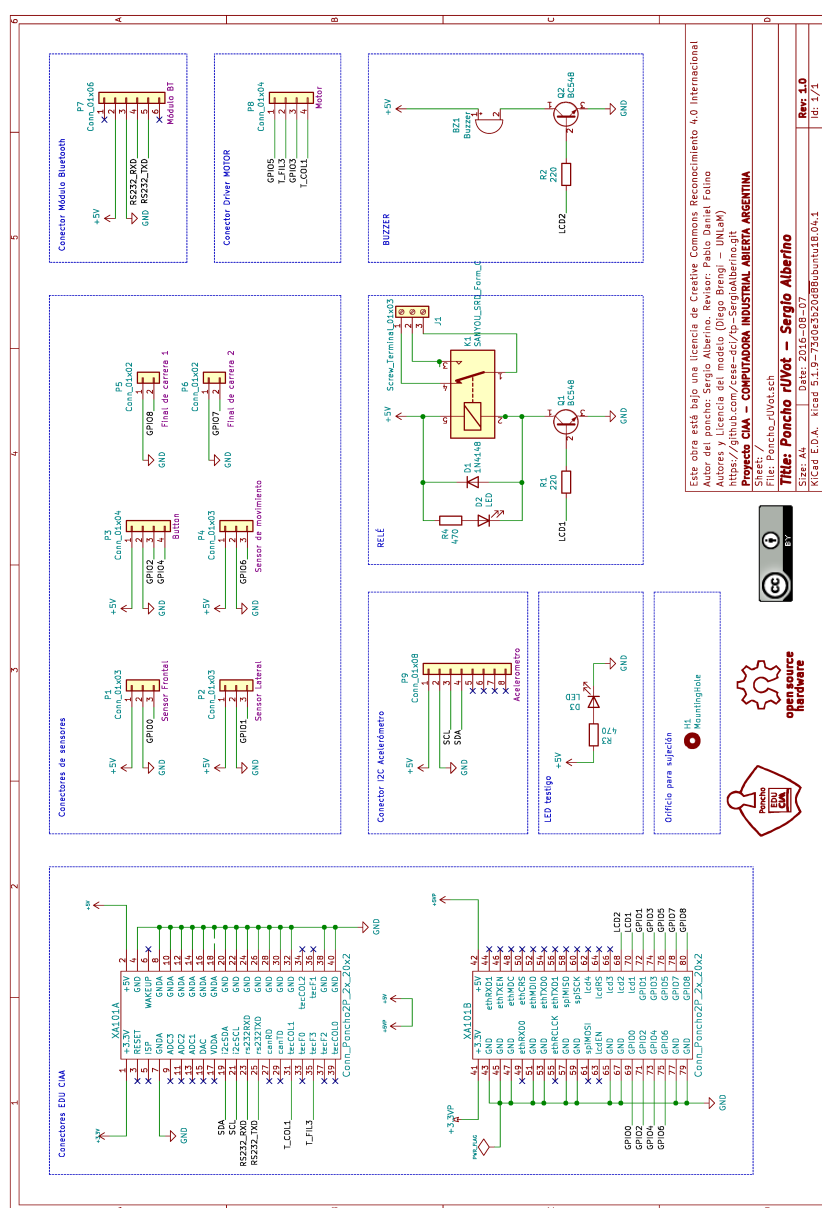
Como mejoras a futuro se contempla:

- Agregar una unidad de medición inercial o IMU (por su sigla en inglés) como ser un acelerómetro o un giróscopo, para tener informa acerca de la velocidad y orientación del robot en el modo autónomo. De esta manera se podría ampliar la variedad de recorridos posibles y que no dependan únicamente de las características del entorno.
- Al contar con un puerto I2C en la placa, sería posible incorporar un lector de tarjetas de memoria (tipo SD) para almacenar allí la librería con la que se configura la máquina de estados principal. Con este aditamento sería posible definir o ampliar el comportamiento autónomo del robot sin necesidad de modificar su programación.
- Ya que la placa de expansión de hardware utiliza un relé para conmutar el módulo UVC, podían desarrollarse otros módulos (intercambiables) con su propia alimentación, que utilicen diferentes lámparas germicidas o que ofrezcan otras prestaciones.

Apéndice A

Placa de expansión de hardware

Diagrama esquemático de la placa de expansión de hardware.



Bibliografía

- [1] United Nations Economic Commission for Europe. *Homepage*. <https://unece.org>. 2021. (Visitado 01-05-2021).
- [2] International Federation of Robotics (2021). *Homepage*. <https://unece.org>. 2021. (Visitado 01-05-2021).
- [3] International Federation of Robotics. *Cleaning robots reduce infections in hospitals and public spaces*. <https://ifr.org/news/cleaning-robots-reduce-infections>. 2020. (Visitado 01-05-2021).
- [4] Robots al Detalle. *Comparativa modelos robot aspirador iRobot Roomba*. <https://robotsaldetalle.es/comparativas/comparativa-modelos-robot-aspirador-irobot-roomba/>. 2021. (Visitado 12-06-2021).
- [5] El confidencial. *Los inventos con rayos UV se disparan con el covid, pero ¿sirven para matar al virus?* https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2020-07-10/rayos-uv-coronavirus-covid-samsung-esterilizar_2672375/. 2020. (Visitado 12-06-2021).
- [6] Mundo PMMI. *Más robots para desinfección llegan al mercado*. <https://www.mundopmmi.com/automatizacion/article/21174349/ms-robots-para-desinfeccion-llegan-al-mercado>. 2019. (Visitado 09-05-2021).
- [7] Agencia NOVA. *El invento argentino que elimina los virus con luz ultravioleta*. <https://www.mundopmmi.com/automatizacion/article/21174349/ms-robots-para-desinfeccion-llegan-al-mercado>. 2021. (Visitado 09-05-2021).
- [8] Bidcom. *Comparativo Aspiradoras Robot*. <https://www.bidcom.com.ar/comparar-aspiradoras>. 2021. (Visitado 09-05-2021).
- [9] Europress. *El robot Conga adopta la tecnología UVC y ozono para garantizar espacios libres de virus*. . 2020. (Visitado 12-06-2021).
- [10] Guangdong Detection Center of Microbiology. *LED Handheld lamp report*. <https://www.healthkeeper.gr/wp-content/uploads/2020/08/pistopoihtiko-apodosis.pdf>. 2020. (Visitado 12-06-2021).
- [11] IES Committee Report: Germicidal Ultraviolet (GUV). *IES Standards Committee April, 15 2020 as a Transaction of the Illuminating Engineering Society*. 2020. ISBN: 978-0-87995-389-8. URL: <https://media.ies.org/docs/standards/IES-CR-2-20-V1-6d.pdf>.
- [12] International Ultraviolet Association Inc. *UV Disinfection for COVID-19*. <https://ifr.org/news/cleaning-robots-reduce-infections>. 2020. (Visitado 01-05-2021).
- [13] Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España). *Informe sobre utilización de la radiación ultravioleta (UVC) para desinfección*. <http://hdl.handle.net/10261/216311>. 2020. (Visitado 09-05-2021).
- [14] International Commission on Illumination. *CIE position statement on the use of ultraviolet (UV) radiation to manage the risk of COVID-19 transmission*.

- <http://cie.co.at/publications/cie-position-statement-use-ultraviolet-uv-radiation-manage-risk-covid-19-transmission>. 2021. (Visitado 17-08-2021).
- [15] Monsolar.net. *Desinfección del Coronavirus en ambientes interiores. Luz Ultravioleta*. <http://www.monsolar.net/desinfeccion-del-coronavirus-en-ambientes-interiores-luz-ultravioleta-con-efecto-germicida-uv/>. 2021. (Visitado 09-05-2021).
- [16] World Health Organization. *COVID-19 Mythbusters*. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public/myth-busters>. 2021. (Visitado 01-05-2021).
- [17] Proyecto CIAA. *Computadora Industrial Abierta Argentina*. <http://www.proyecto-ciaa.com.ar/>. 2014. (Visitado 01-05-2021).
- [18] STMicroelectronics. *L298 Dual full-bridge driver datasheet*. <https://www.st.com/en/motor-drivers/l298.html>. 2021. (Visitado 01-05-2021).
- [19] Robots Didácticos. *Uso de la placa L298N para motores de CC*. <http://robots-argentina.com.ar/didactica/uso-de-la-placa-l298n-para-motores-de-cc/>. 2021. (Visitado 01-05-2021).
- [20] Web-Robótica.com. *Como usar el módulo sensor de Infrarrojos IR FC-51 para evitar obstáculos con Robot Arduino/Genuino*. <https://www.web-robotica.com/arduino/conceptos-basicos-arduino/como-usar-el-modulo-sensor-de-infrarrojos-ir-fc-51-para-evitar-obstaculos-con-robot-arduinogenuino>. 2015. (Visitado 01-05-2021).
- [21] Punto Flotante. *HC-SR501 PIR Sensor infrarrojo de movimiento*. <https://puntoflotante.net/MANUAL-DEL-USUARIO-SENSOR-DE-MOVIMIENTO-PIR-HC-SR501.pdf>. 2017. (Visitado 11-05-2021).
- [22] Mundo PMMI. *HC-05 Datasheet Bluetooth Transceiver Module*. <https://maker.pro/custom/tutorial/hc-05-bluetooth-transceiver-module-datasheet-highlights>. 2021. (Visitado 09-05-2021).
- [23] Pilas Recargables. *Baterías recargables 18650*. <https://www.pilasrecargables.info/baterias-18650/>. 2021. (Visitado 01-05-2021).
- [24] Eric Pernia. *Biblioteca sAPI*. <https://github.com/epernia/sAPI>. 2021. (Visitado 09-05-2021).
- [25] Revista ElectroIndustria. *Conceptos básicos sobre servo accionamientos*. <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=744&tip=7>. 2021. (Visitado 09-05-2021).
- [26] Robots Didácticos. *Advertencia sobre los motores con reducción en el Mercado*. <https://robots-argentina.com.ar/didactica/advertencia-sobre-los-motores-con-reduccion-en-el-mercado/>. 2021. (Visitado 11-05-2021).
- [27] Humberto Alejandro Secchi. *Una introducción a los robots móviles*. AAECA. Buenos Aires (Argentina), 2008.
- [28] KiCad. *About KiCad*. <https://www.kicad.org/about/kicad/>. 2021. (Visitado 09-05-2021).
- [29] Laboratorio de sistemas embebidos. *Ingeniería de Software*. <https://campus.fi.uba.ar/>. 2021. (Visitado 11-05-2021).
- [30] Sergio Alberino y otros. *Programación de Robots utilizando Hoja de Cálculo*. https://www.frba.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2021/02/jar8_submission_16.pdf. 2014. (Visitado 17-08-2021).
- [31] Instituto Tecnológico de Massachusetts. *MIT App Inventor*. <http://appinventor.mit.edu>. 2012. (Visitado 17-08-2021).